



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CONCEPTUAL (TRL 3)
DE UN ROBOT DE ASISTENCIA PARA
REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A :

SEBASTIÁN ARÁMBULA COYOTE

DIRECTOR DE TESIS

DR. JUAN MANUEL JACINTO VILLEGAS



TOLUCA, MARZO 2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma del Estado de México, y en particular a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la formación y las herramientas necesarias para desarrollar este proyecto.

A mi director de tesis, el Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas, por su paciencia, guía académica y motivación constante durante todo el desarrollo de este trabajo. Su experiencia y compromiso han sido fundamentales para el logro de este proyecto.

Agradezco profundamente a mi familia, por su amor incondicional, su apoyo moral y emocional, y por ser el pilar que me sostuvo en los momentos más desafiantes.

A mis amigos, quienes me acompañaron en este camino con palabras de aliento, colaboración y comprensión.

Y a la vida, por los aprendizajes no planeados, los giros inesperados y las personas que, aunque ya no estén, dejaron una marca en mi historia.

A todos ustedes, gracias.

Sebastián Arámbula Coyote

Resumen

Los accidentes cerebrovasculares y las lesiones del miembro superior generan problemas motores que afectan la calidad de vida de las personas, entre esos problemas, se encuentran movimientos cotidianos como la flexoextensión del codo y la pronosupinación del antebrazo. La rehabilitación de este tipo de lesiones se basa principalmente en terapias físicas convencionales que dependen en gran medida de la disponibilidad de fisioterapeutas, lo que se vuelve un problema en contextos con alta demanda y recursos limitados como lo son el tiempo y el dinero. Ante esta situación, los robots de rehabilitación se presentan como una alternativa para apoyar y complementar la terapia tradicional.

En esta tesis se desarrolla el diseño, la manufactura y el ensamble conceptual (TRL 3) de un robot móvil de escritorio para la rehabilitación del miembro superior, cuyo objetivo es asistir los movimientos de flexión, extensión, pronación y supinación. El trabajo se centra en el diseño mecánico del sistema, considerando aspectos de ergonomía, antropometría y seguridad, así como el uso de procesos de manufactura accesibles, principalmente mediante impresión 3D con materiales poliméricos. El prototipo integra mecanismos pasivos y una estructura diseñada para soportar cargas estáticas típicas de rehabilitación de miembro superior.

Para evaluar el comportamiento estructural del diseño, se realizaron aproximaciones matemáticas y simulaciones mediante el método del elemento finito (FEM) en los componentes principales del robot, con el fin de verificar que los esfuerzos y deformaciones se mantuvieran dentro de límites seguros. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de modo y efecto de falla (AMEF) para identificar posibles riesgos asociados al diseño. Los resultados obtenidos muestran que el prototipo manufacturado es viable y permiten establecer una base para trabajos futuros enfocados en su validación experimental y su posible aplicación en entornos clínicos o domiciliarios.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo general.	1
1.2. Planteamiento del problema.	2
1.3. Justificación.	3
1.4. Meta de ingeniería.	4
1.5. Hipótesis	4
2. Marco teórico.	5
2.1. Nivel de madurez tecnológica	5
2.2. Robots.	5
2.2.1. Clasificación de robots por su estructura.	6
2.2.2. Clasificación de robots por su campo de aplicación.	8
2.3. Rehabilitación.	10
2.4. Mecánica articular de miembro superior.	11
2.4.1. Mecánica articular del hombro.	11
2.4.2. Mecánica articular del codo.	12
2.4.3. Mecánica articular de la muñeca.	14
2.4.4. Antropometría de miembro superior.	15
2.5. Lesiones de miembro superior	22
3. Estado del arte.	24
3.1. Robots con arreglo omnidireccional para rehabilitación	25
3.2. Características principales de robots para rehabilitación de miembro superior.	31
4. Marco metodológico	32
4.1. Requisitos de diseño	32
4.1.1. Dimensiones	32
4.1.2. Rango de movimiento	32
4.1.3. Materiales	33
4.1.4. Seguridad	34
4.1.5. Torque	34
4.1.6. Ergonomía	35
4.1.7. Mantenimiento	36
4.2. Estudio de las alternativas	36
4.2.1. Alternativa 1	37

4.2.2.	Alternativa 2	37
4.2.3.	Alternativa 3	37
4.3.	Diseño final de la alternativa seleccionada	40
4.3.1.	Base de MDF	40
4.3.2.	Carcasa	42
4.3.3.	Soportes	45
4.3.4.	Base rotativa superior pasiva	48
4.3.5.	Guía	52
4.3.6.	Desplazador	53
4.3.7.	Pronosupinador	56
4.3.8.	Soporte para pronosupinador	57
4.3.9.	Seguro	58
4.3.10.	Picaporte	60
4.4.	Resultados de simulaciones mediante método del elemento finito	62
4.4.1.	Base de MDF	62
4.4.2.	Carcasa	63
4.4.3.	Soportes	65
4.4.4.	Base rotativa superior pasiva	66
4.4.5.	Guía	69
4.4.6.	Desplazador	70
4.4.7.	Pronosupinador	71
4.4.8.	Soporte para pronosupinador	73
4.4.9.	Seguro	74
4.4.10.	Picaporte	74
4.5.	Componentes del robot	75
4.5.1.	Base de MDF	76
4.5.2.	Soporte para la base de MDF	76
4.5.3.	Soportes	77
4.5.4.	Carcasa	77
4.5.5.	Guías para unir la carcasa	78
4.5.6.	Base rotativa superior pasiva	78
4.5.7.	Guía	79
4.5.8.	Desplazador	79
4.5.9.	Pronosupinador	79
4.5.10.	Soporte del pronosupinador	80
4.5.11.	Seguro	80
4.5.12.	Joystick	81
4.5.13.	Picaporte	82
4.5.14.	Rodamientos	82
4.5.15.	Extensor	83
4.5.16.	Soporte del encoder	84
4.5.17.	Cubre encoder	85
4.5.18.	Ruedas omnidireccionales	85
4.5.19.	Cople	86
4.5.20.	Adaptador para el cople	86

4.5.21. Eje cuadrado de transmisión	86
4.5.22. Botón de paro de emergencia	88
4.5.23. Soporte para las baterías	88
4.5.24. Botón de encendido y puerto de carga	88
4.5.25. PCB Núcleo	89
4.5.26. STM32 Núcleo	89
4.5.27. Tornillería	89
5. Manufactura y ensamble del sistema	91
5.1. Impresión de componentes	91
5.2. Proceso de ensamblaje del robot	92
5.3. Modelo físico experimental en impresión 3D	102
Análisis de modo y efecto de falla (AMEF)	106
Conclusiones y trabajo a futuro	128
Bibliografía	129
Apéndice A - Dibujos técnicos de las piezas	137
Apéndice B - Solicitud de registro de diseño industrial	168

Índice de figuras

2.1. Tipos de robots manipuladores (editado de [1]).	6
2.2. Robots terrestres [2].	7
2.3. Distribución de ruedas en robots móviles terrestres [2].	8
2.4. Tipos de robots industriales [3].	9
2.5. Robots para rehabilitación [4, 5].	9
2.6. Articulación esternoclavicular (editado de [6]).	11
2.7. Hombro (editado de [6]).	12
2.8. Articulaciones del codo (editado de [7]).	13
2.9. Músculos principales que mueven al codo (editado de [7]).	14
2.10. Huesos de la muñeca (editado de [8]).	14
2.11. Articulaciones de la muñeca [9].	15
2.12. Longitudes de pie a considerar en un estudio de antropometría (editado de [10]).	16
2.13. Longitudes en posición sentada a considerar en un estudio de antropometría (editado de [10]).	17
3.1. 2 de los primeros robots para rehabilitación.(a) Robot REHAROB [11], (b) Robot MIT-Manus [12].	24
3.2. Robots para rehabilitación. (a) Robot ARM Guide [13], (b) Robot ARMin [14].	26
3.3. Robots con arreglo omnidireccional. (a) Robot MOTORE [15], (b) Robot Reha-Maus [16], (c) Robot MOTORE++ [17].	27
3.4. Robot HOTAR [18].	29
3.5. Robot ArmAssist [19].	29
4.1. Alternativas	40
4.2. Base de MDF	41
4.3. Vista isométrica de la carcasa	43
4.4. Soportes	46
4.5. Parte 1 de la base rotativa superior pasiva	49
4.6. Unión de las partes 2 y 3 de la base rotativa superior pasiva	50
4.7. Guía	52
4.8. Desplazador	54
4.9. Partes del pronosupinador	56
4.10. Soporte para pronosupinador	57
4.11. Seguro	58
4.12. Ensamble de picaporte	60
4.13. Análisis FEM de la base de MDF en dirección S_Z	63

4.14. Análisis FEM Carcasa	64
4.15. Esfuerzos de los soportes 1 y 2.	65
4.16. Esfuerzos del Soporte 3.	67
4.17. Esfuerzos de la base rotativa superior pasiva parte 1.	68
4.18. Esfuerzos de la base rotativa superior pasiva parte 2 y 3.	69
4.19. Esfuerzos de la Guía.	70
4.20. Distribución de esfuerzos SX en el desplazador obtenida mediante FEM. . . .	71
4.21. Análisis FEM Pronosupinador	72
4.22. Análisis FEM Soporte del Pronosupinador	73
4.23. Esfuerzos del Seguro.	74
4.24. Esfuerzos en el picaporte	75
4.25. Base de MDF.	76
4.26. Soporte para la base de MDF.	77
4.27. Soportes	77
4.28. Carcasa.	78
4.29. Guías para unir la carcasa	78
4.30. Base rotativa superior pasiva.	79
4.31. Guía.	79
4.32. Desplazador.	80
4.33. Pronosupinador.	80
4.34. Soporte del pronosupinador.	81
4.35. Seguro.	81
4.36. Joystick.	82
4.37. Picaporte.	82
4.38. Rodamientos.	83
4.39. Extensor.	84
4.40. Soporte del encoder.	84
4.41. Cubre encoder.	85
4.42. Rueda omnidireccional.	85
4.43. Cople.	86
4.44. Adaptador para el cople.	87
4.45. Eje cuadrado de transmisión.	87
4.46. Botón de paro de emergencia de la marca Segetek.	88
5.1. Impresora K1C.	92
5.2. Instalación de soportes inferiores.	93
5.3. Rodamientos.	94
5.4. Ensamble del pronosupinador y joystick.	95
5.5. Ensamble del desplazador y picaporte.	95
5.6. Ensamble del pronosupinador y la base rotativa superior pasiva parte 2. . . .	96
5.7. Ensamble de la guía.	96
5.8. Ensamble de la base rotativa superior pasiva.	96
5.9. Ensamble del encoder.	97
5.10. Ensamble de botones y puerto de carga.	97
5.11. Ensamble de la carcasa.	98

5.12. Ensamble de la base rotativa superior pasiva con la carcasa.	98
5.13. Motores y ruedas en la base.	99
5.14. Ensamble de baterías y PCB.	100
5.15. Ensamble final.	101
5.16. Vista frontal del modelo físico.	102
5.17. Vista lateral del modelo físico.	103
5.18. Vista trasera del modelo físico.	103
5.19. Vista superior del modelo físico.	104
5.20. Vista inferior del modelo físico.	105

Índice de tablas

2.1.	Longitudes en posición de pie en mujeres.	18
2.2.	Longitudes en posición sentada en mujeres.	19
2.3.	Longitudes en posición de pie en hombres.	20
2.4.	Longitudes en posición sentado en hombres.	21
2.5.	Porcentajes que ocupa cada parte del cuerpo (editado de [20]).	23
3.1.	Características principales de robots para rehabilitación de miembro superior.	31
4.1.	Listado de tornillería utilizada.	90
5.1.	AMEF Base de MDF	108
5.2.	AMEF Carcasa	110
5.3.	AMEF Soportes	112
5.4.	AMEF Base rotativa superior pasiva	114
5.5.	AMEF Guía	116
5.6.	AMEF Desplazador	118
5.7.	AMEF Pronosupinador	120
5.8.	AMEF Soporte de pronosupinador	122
5.9.	AMEF Seguro	124
5.10.	AMEF Picaporte	126

Acrónimos

ACV Accidentes cerebrovasculares

AMEF Análisis de Modo y Efecto de Falla

ASME Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers)

CAD Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)

CIF Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud

FDM Deposición de filamento fundido (Fused Deposition Modeling)

FEM Método de Elemento Finito (Finite Element Method)

GDL Grados de Libertad

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía

MDF Tablero de fibra de densidad media (Medium-Density Fiberboard)

OMS Organización Mundial de la Salud

PCB Placa de circuito impreso (Printed Circuit Board)

PETG Tereftalato de polietileno glicol(Polyethylene Terephthalate Glycol)

PLA Ácido Poliláctico(Polylactic Acid)

TRL Nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level)

Lista de símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad
A	Área transversal	mm^2 o m^2
c	Distancia del eje neutro a la fibra extrema	mm
d	Diámetro o distancia lineal	mm
E	Módulo de elasticidad	GPa
F	Fuerza	N
g	Aceleración gravitacional	m/s^2
I	Momento de inercia	mm^4
L	Longitud	mm o m
M	Momento flector	$\text{N}\cdot\text{m}$
R	Radio	mm
T	Torque	$\text{N}\cdot\text{m}$
α	Ángulo	°
ρ	Densidad	kg/m^3
σ	Esfuerzo normal	MPa
τ	Esfuerzo cortante	MPa
ε	Deformación	– (%)

Capítulo 1

Introducción

Las enfermedades neuromusculares, los accidentes cerebrovasculares (ACV) y las lesiones en las extremidades superiores pueden generar limitaciones motoras que afectan la calidad de vida de los humanos. Entre los movimientos que pueden llegar a ser afectados están la pronosupinación y la flexoextensión. La pronosupinación corresponde al giro natural del antebrazo que permite orientar la palma de la mano hacia arriba o hacia abajo, un gesto cotidiano presente al tomar un objeto, abrir una puerta o girar una llave. Por su parte, la flexoextensión es el movimiento del codo que permite doblar y estirar el brazo, necesario para acciones tan simples como acercarse un vaso, alcanzar una superficie o apoyar la mano sobre una mesa.

Actualmente, la rehabilitación se basa principalmente en terapias físicas convencionales, las cuales pueden ser costosas, prolongadas y dependientes de la disponibilidad de fisioterapeutas. Para disminuir la carga a fisioterapeutas y evitar terapia convencional, los robots de rehabilitación han surgido como una alternativa efectiva, proporcionando terapias controladas, precisas y dinámicas. Sin embargo, los dispositivos existentes tienen costos elevados, diseños muy complejos o solamente permiten movimientos específicos con pocos grados de libertad.

Para solucionar esta problemática, en esta tesis se propone el diseño mecánico de un robot de rehabilitación capaz de asistir en los movimientos de pronosupinación y flexoextensión del miembro superior, el cual pueda ser replicado fácilmente para aplicarse en un entorno cotidiano, ya sea en clínica o en domicilio.

1.1. Objetivo general.

Realizar el diseño mecánico, la manufactura y el ensamble de un robot móvil de escritorio, empleando criterios de diseño y técnicas de prototipado rápido mediante impresión 3D, que permita asistir los movimientos de flexión, extensión, pronación y supinación para la rehabilitación del miembro superior.

1.2. Planteamiento del problema.

De acuerdo con el Censo de Población del INEGI 2020 [21], el 5.7 % (7,168,178 personas) de la población total del país presenta alguna discapacidad y/o condición neurológica. De este porcentaje, el 41 % corresponde a una discapacidad motriz, principalmente asociada con dificultades para caminar, subir o bajar escaleras. Para atender esta problemática, en México se tienen registrados aproximadamente 40,000 fisioterapeutas [22], lo que implica que cada uno debe atender a cerca de 180 pacientes. El problema radica en que considerando una jornada de 8 horas, 5 días a la semana y 1 hora de terapia para cada paciente, se necesitaría atender a 5 pacientes simultáneamente para lograr el objetivo de atender a los 180 por semana, lo cual es un trabajo imposible. Según [22], se necesitan 600 000 fisioterapeutas para ocuparse de las necesidades de rehabilitación en el país. Además, la falta de fisioterapeutas hace que los centros de rehabilitación no estén accesibles para todas las personas, suponiendo que cada profesional cuenta con un consultorio y el territorio mexicano es de 1 964 375 km² [23], en México habría un fisioterapeuta cada 50 km², esto crea una dificultad para que los pacientes se movilicen a los centros de rehabilitación pues no todos son capaces de hacerlo ya sea por motivos económicos, de tiempo o por cuestiones de salud.

Aunado a lo anterior, la saturación de trabajo a los fisioterapeutas crea un problema de monotonía en las rehabilitaciones con terapias poco dinámicas que causan aburrimiento en los pacientes y propician el abandono de la terapia.

Para ello, se buscará la ayuda de la tecnología para tratar de solucionar este problema en miembro superior. De acuerdo a lo establecido previamente, los robots para rehabilitación han ayudado a disminuir la carga de trabajo de los fisioterapeutas en estos últimos años, pero estos robots existentes tienen la desventaja de que cuentan con costos elevados y no se pueden replicar por cuestiones de patente, por lo que no son accesibles para la mayoría. Del mismo modo, la mayoría de ellos no mencionan el espacio de trabajo necesario para poder realizar la rehabilitación, tampoco mencionan si en alguno de los robots se utilizaron medidas antropométricas para su diseño y se debe verificar además que la fuerza que proporcionan los motores sea suficiente para mover el miembro superior y que el robot sea capaz de soportar esa carga. Por lo cual, se buscará la forma de diseñar el robot con materiales y procesos de manufactura accesibles a la mayor parte de la población sin necesidad de sacrificar la calidad y la seguridad, esto para contrastar con los materiales y procesos que tienen los robots ya existentes, pues suelen tener costos elevados debido a los materiales que se utilizan en ellos.

Se ha hablado de rehabilitación de miembro superior, pero no se ha enfatizado en el tipo de lesión o daño que es capaz de rehabilitar el robot, es por ello que se buscará abarcar la mayor cantidad de lesiones posibles, con el fin de hacer más versátil el uso del robot y el costo-beneficio sea adecuado.

Ahora bien, como se pudo leer en la literatura previa, los robots móviles necesitan además de dispositivos adicionales para funcionar correctamente, aunque no compete a este proyecto la búsqueda y elección de estos, es pertinente mencionarlo para futuros proyectos. Los dispositivos adicionales pueden ser monitores y paneles deslizantes, esto es un obstáculo en la cuestión de transporte y habría que buscar la forma de permitir mayor portabilidad para esta situación. En el caso de los monitores, siempre serán necesarios para poder mostrar las actividades virtuales que se tienen que realizar, aunque podrían reemplazarse por lentes de realidad virtual pero existiría un problema para la cuestión de accesibilidad que se busca.

Para el caso de los paneles deslizantes, se tiene el problema de que este tipo de dispositivos requieren tecnología más costosa o menos accesible, pues estos necesitan de una manufactura especial, además, existen un tipo diferente de paneles a los que se les imprime un patrón para la detección del movimiento, pero el problema radica en que al ser impresión, estos pierden la calidad rápidamente y deben sustituirse continuamente.

Para finalizar, en este proyecto no se pretende alcanzar el desarrollo completo del sistema; sin embargo, se encargará de sentar las bases para que en un futuro pueda ser probado en entornos médicos y cumpla finalmente con su cometido.

1.3. Justificación.

Conforme a lo mencionado en el planteamiento del problema, se diseñará un robot móvil de escritorio para rehabilitación de miembro superior, este robot permitirá la rehabilitación en casa con el fin de suavizar el trabajo realizado por el fisioterapeuta, pues ahora se sabe que el número registrado en México de estos profesionales es muy bajo para la cantidad de personas con alguna discapacidad que necesitan este servicio.

Con el propósito de favorecer el acceso a procesos de rehabilitación, el robot desarrollado en este proyecto se plantea como hardware de código abierto, lo que permitirá que su diseño pueda ser consultado y replicado libremente en distintos entornos clínicos y educativos. Asimismo, se busca mantener costos asequibles y una manufactura sencilla mediante el uso de impresión 3D, con el fin de facilitar su adopción en centros de rehabilitación con recursos limitados.

Por otro lado, en la tabla 3.1 se observa que las fuerzas permitidas por los robots van desde los 5 N en niños hasta los 123 N en adultos y de acuerdo a lo mencionado previamente en este proyecto, un brazo promedio mexicano requiere de al menos 39 N de fuerza para poder moverlo, esta fuerza será la mínima buscada en el diseño del robot.

Con respecto al espacio de trabajo, se puede observar en las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 que las medidas promedio de longitud de brazo rondan los 748 mm para hombre y 686 mm para mujer, por lo que el espacio de trabajo debería tener mínimo ese tamaño de largo y ancho. No compete a este proyecto la creación o adaptación de un espacio de trabajo, pero para un correcto funcionamiento, es pertinente saber que se necesita mínimo un espacio de 748 mm a lo largo y ancho.

Aunque este proyecto no abarca la selección de dispositivos adicionales, se hará un breve análisis con el propósito de mencionar la configuración más adecuada para el futuro de este proyecto. Para la cuestión visual, se propone el uso de un monitor que permita una buena visualización del contenido, o en su defecto, un comunicador entre el robot móvil y cualquier pantalla o monitor que se tenga disponible en el hogar o en el centro de rehabilitación. Por otra parte, para el dispositivo de detección de posición se propone el uso de una cámara ubicada sobre el espacio de trabajo, este sistema tiene de ventaja que no es un sistema costoso, es duradero y permite una buena posición y orientación en la detección de la posición del robot, si fuera necesario modificar el área de trabajo, este sistema permite realizar fácilmente ese cambio, por el contrario, los paneles deslizantes tienen dimensiones ya establecidas y no abarcan espacios tan amplios, además de que son propensos a dañarse fácilmente, algunos no son capaces de ser doblados debido a su sistema electrónico interior y eso genera menor

portabilidad, los que no incluyen electrónicos porque son impresos con patrones especiales tienen la desventaja de que al ser una impresión, esta pierde calidad después de algún tiempo de uso, lo que requiere nuevos paneles, que significa mayor gasto económico y generación de residuos.

De acuerdo con lo establecido en el planteamiento del problema y con el alcance definido para este proyecto, el desarrollo se limita al diseño mecánico, la manufactura y el ensamble primario del robot. Esto sitúa el trabajo en una etapa temprana de validación conceptual, en la cual aún no se realizan pruebas experimentales en entornos clínicos, ya que estas quedan fuera del alcance de este documento. No obstante, el robot se fundamenta en principios y configuraciones reportadas en dispositivos funcionales del estado del arte, por lo que se espera que, en trabajos futuros, el prototipo pueda someterse a evaluaciones experimentales que confirmen su desempeño en aplicaciones reales de rehabilitación del miembro superior.

1.4. Meta de ingeniería.

Realizar el diseño mecánico y desarrollo de un robot móvil de escritorio que permita rehabilitar el miembro superior de pacientes.

1.5. Hipótesis

Si se diseña y manufactura un robot móvil de escritorio utilizando materiales poliméricos obtenidos mediante manufactura aditiva, con mecanismos pasivos que permitan la pronosupinación y la flexoextensión del miembro superior, entonces el prototipo será capaz de soportar cargas estáticas típicas de rehabilitación del miembro superior (≈ 40 N) manteniendo esfuerzos y deformaciones dentro de límites seguros, posibilitando un movimiento adecuado para la rehabilitación física de miembro superior.

Capítulo 2

Marco teórico.

2.1. Nivel de madurez tecnológica

También llamada por sus siglas en ingles TRL (Technology Readiness Level), es una escala de medición que sirve para identificar el alcance de las actividades asociadas a la investigación, desarrollo tecnológico y la innovación de un proyecto, consiste en 9 niveles que son los siguientes [44]:

1. TRL 1: principios básicos observados y reportados.
2. TRL 2: concepto tecnológico y/o aplicación tecnológica formulada.
3. TRL 3: prueba experimental de concepto.
4. TRL 4: validación tecnológica a nivel laboratorio.
5. TRL 5: tecnología validada en condiciones que simulan un entorno real.
6. TRL 6: tecnología demostrada en un ambiente relevante.
7. TRL 7: demostración de prototipo a nivel sistema en un ambiente operativo real.
8. TRL 8: sistema completo y evaluado.
9. TRL 9: pruebas con éxito en entorno real y despliegue.

2.2. Robots.

Los robots se han implementado en todo tipo de áreas del conocimiento, con el fin de facilitar diferentes tareas, en su mayoría repetitivas o de riesgo, lo que ha permitido también su uso dentro del área de la salud. Los robots se pueden clasificar por su tipo de estructura, y de aplicación.

2.2.1. Clasificación de robots por su estructura.

A continuación, se mencionan los dos tipos de clasificación de robots por su estructura:

1. **Manipuladores:** son aquellos robots creados para realizar tareas como mover o sostener objetos (ver Figura 2.1). Se fabrican con barras rígidas que mediante articulaciones permiten su movimiento, son esencialmente brazos articulados. Este tipo de robots se utilizan principalmente en la industria y pueden tener alguna de las siguientes configuraciones [24]:

- Cartesiana.
- Cilíndrica.
- Polar o esférica.
- Angular.
- Scara.

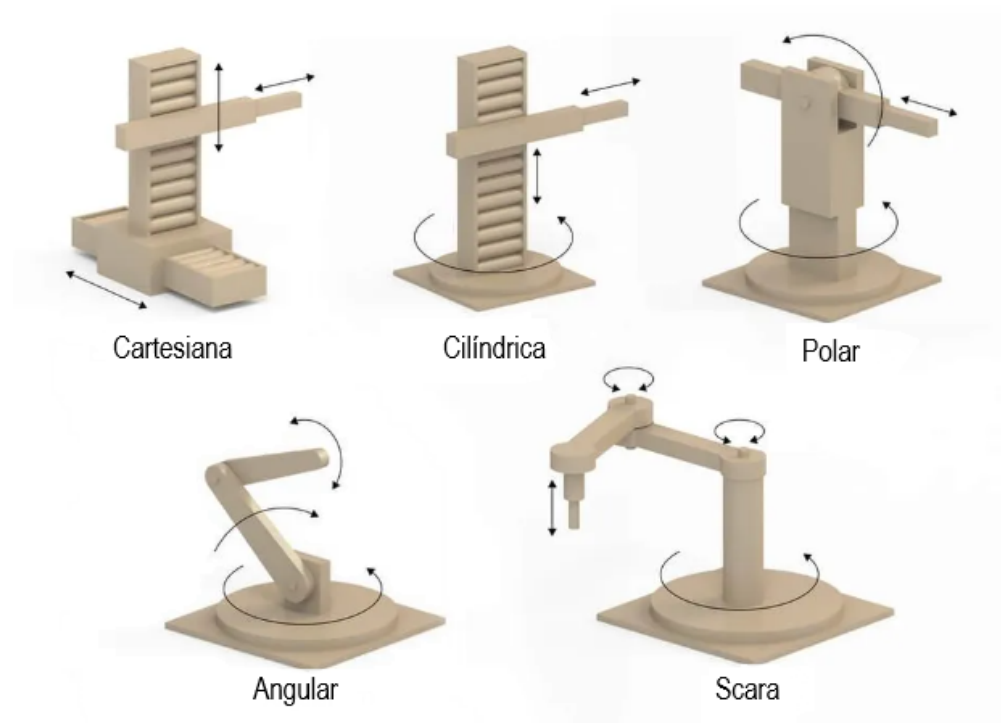


Figura 2.1: Tipos de robots manipuladores (editado de [1]).

2. **Móviles:** son los robots que pueden desplazarse sin estar sujetos a un punto, con el objetivo de incrementar la autonomía y limitar la intervención humana. Se dividen en las siguientes categorías [2]:

a) Terrestre (ver Figura 2.2).

- Robots de ruedas.
- Robots de patas.
- Robots de orugas.

- b) Acuático.
- c) Aéreo.

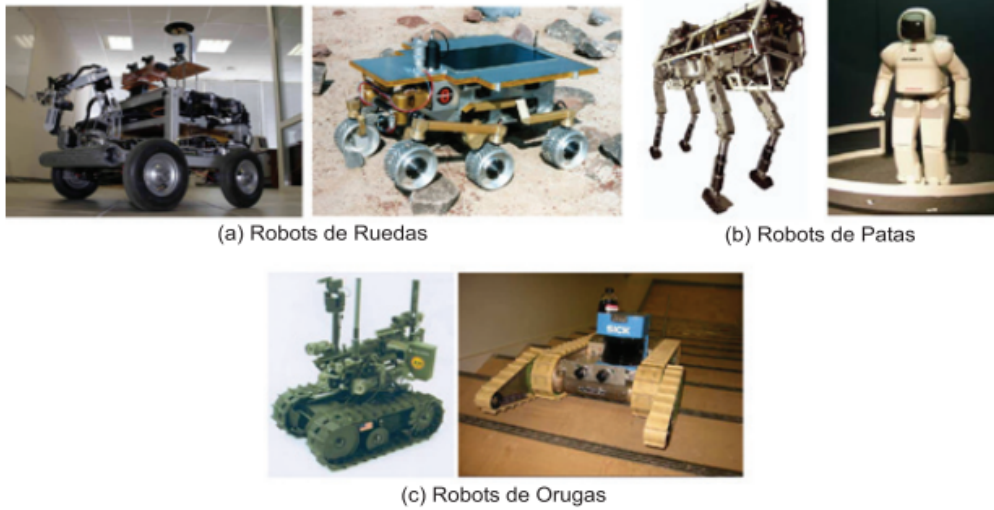


Figura 2.2: Robots terrestres [2].

Los robots móviles terrestres pueden clasificarse por el tipo de distribución de ruedas (ver Figura 2.3), tales como:

- Ackerman.
- Triciclo clásico.
- Tracción diferencial.
- Skid steer.
- Tracción síncrona.
- Tracción omnidireccional.

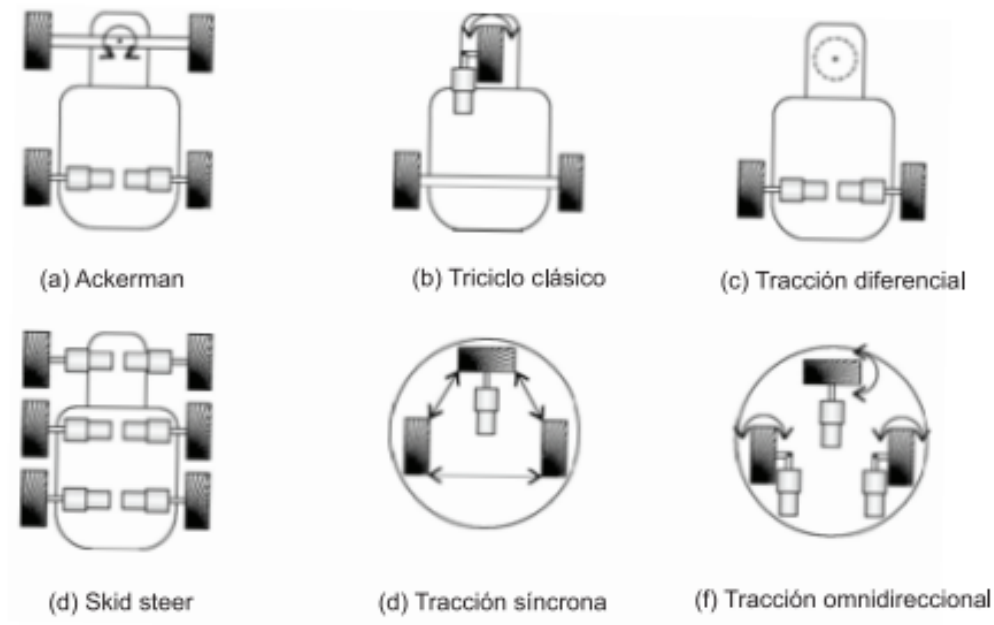


Figura 2.3: Distribución de ruedas en robots móviles terrestres [2].

2.2.2. Clasificación de robots por su campo de aplicación.

Por consiguiente, se mencionan las dos clasificaciones de robots por su tipo de aplicación:

1. **Industriales:** los robots industriales (ver Figura 2.4) son aquellos manipuladores que permiten la automatización de procesos dentro de la industria. Es programable, de tres o más ejes y de control automático [25]. Se tiene la siguiente clasificación de este tipo de robots:
 - Seis ejes.
 - Cartesianos.
 - Scara.
 - Delta.
 - Doble brazo.
 - AGV + Brazo.
2. **De servicio:** se llaman robots de servicio a aquellos que prestan algún servicio que beneficia directamente a la humanidad, dejando fuera las aplicaciones orientadas al sector industrial [26]. Se clasifican en las siguientes categorías según la Federación Internacional de Robótica [27]:
 - Agricultura.
 - Limpieza profesional.
 - Inspección y mantenimiento.
 - Construcción y demolición.
 - Transporte y logística.
 - Médicos.

- Seguridad.
- Hospitalarios.
- Otros.

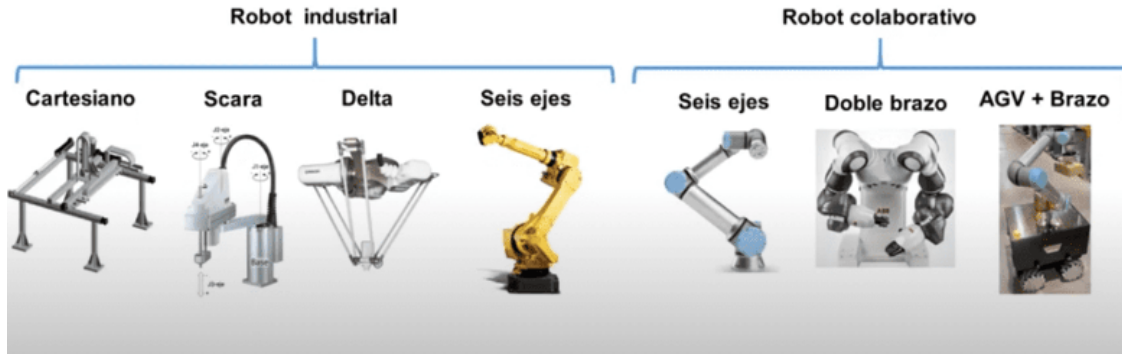


Figura 2.4: Tipos de robots industriales [3].

Para este trabajo de investigación, el tipo de robot a profundizar será el médico, específicamente para rehabilitación, los cuales son auxiliares en cuestiones de terapia física, principalmente para realizar tareas repetitivas, además de contar con precisión y exactitud a la hora de ejecutar movimientos. Se clasifica en dos categorías (ver Figura 2.5), esto según su tipo de rehabilitación:

- Miembro superior.
- Miembro inferior.



Figura 2.5: Robots para rehabilitación [4, 5].

Para delimitar más el proyecto y el robot con el que se va a trabajar, se elegirá al robot médico de tipo móvil y para rehabilitación de miembro superior. Las ventajas que se tienen en este tipo de robots son las siguientes [28, 29]:

- Capacidad de entregar altas repeticiones de entrenamiento y de igual intensidad.
- Manejo exacto de las dosis terapéuticas.
- Fácil implementación.
- Al combinarse con la terapia convencional, se logran mejores resultados.
- Permite realizar ejercicios personalizados.
- Mejora la coordinación de músculos agonistas y antagonistas y reduce el tiempo de ejecución.

2.3. Rehabilitación.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), "la rehabilitación se define como un conjunto de intervenciones encaminadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud en la interacción con su entorno" [30].

El objetivo principal de la rehabilitación es la de otorgar independencia y permitir al paciente continuar con una vida lo más normal posible, para esto existen diferentes formas de abordar el problema de acuerdo al tipo de discapacidad con la que se cuenta, estas son algunas de ellas [31]:

- Aparatos de asistencia: herramientas y dispositivos que ayudan a personas con discapacidades a moverse y funcionar.
- Terapia de rehabilitación cognitiva para ayudar a aprender nuevamente o mejorar habilidades como pensar, memorizar, planificar y tomar decisiones.
- Terapia ocupacional para ayudarlo con sus actividades diarias.
- Terapia física para ayudarlo con su fuerza, movilidad y condición física.

Debido a la poca propagación de la cultura de la rehabilitación, la OMS reunió en 2017 a especialistas de esta área con el fin de realizar una guía acerca de empezar con una cultura de rehabilitación en todo el mundo, esta guía tiene por nombre "Rehabilitación en los sistemas de salud: guía de acción" [32], la cual se espera que en el año 2030 esté aplicada en todo el mundo, ahí menciona 10 actividades fundamentales para cumplir a más tardar en ese año y son las siguientes:

1. Crear un liderazgo fuerte y apoyo político respecto de la rehabilitación en el ámbito subnacional, nacional e internacional.
2. Fortalecer la planificación y la implementación de la rehabilitación en el ámbito nacional y subnacional, incluso dentro de la preparación y respuesta ante emergencias.
3. Mejorar la integración de la rehabilitación en el sector de la salud y fortalecer las relaciones intersectoriales para satisfacer de forma efectiva y eficiente las necesidades de la población.
4. Incorporar la rehabilitación en la cobertura universal de salud.
5. Construir modelos de prestación de servicios de rehabilitación integrales para lograr progresivamente el acceso equitativo a servicios de calidad, entre ellos, ayudas técnicas, para toda la población, incluido en zonas rurales y remotas.
6. Desarrollar una fuerza de trabajo multidisciplinaria de rehabilitación sólida y adecuada para el contexto del país, y promover conceptos relativos a la rehabilitación en la educación del personal de la salud.

7. Ampliar los recursos financieros para la rehabilitación a través de los mecanismos adecuados.
8. Recopilar información pertinente a la rehabilitación para mejorar los sistemas de información de salud, incluidos los datos de rehabilitación a nivel del sistema y la información sobre el funcionamiento que utiliza la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud (CIF).
9. Desarrollar capacidad de investigación y ampliar la disponibilidad de datos empíricos de calidad sobre la rehabilitación.
10. Establecer y fortalecer redes y asociaciones de rehabilitación, especialmente en países con ingresos bajos, medianos y altos.

2.4. Mecánica articular de miembro superior.

2.4.1. Mecánica articular del hombro.

El hombro es una de las articulaciones del cuerpo más complejas debido al movimiento que permite realizar, se compone de tres huesos principales como se muestra en la Figura 2.7: la clavícula, la escápula y el húmero. La escápula y la clavícula forman la cintura escapular, en donde se articula el húmero que forma la articulación glenohumeral. Esta articulación recibe su nombre de la unión entre la cabeza del húmero y la cavidad glenoidea de la escápula. Es una enartrosis, lo que quiere decir que permite el movimiento en todas las direcciones. Participa en dos tercios del movimiento del hombro y cuenta con 3 grados de libertad (GDL) [7, 33].

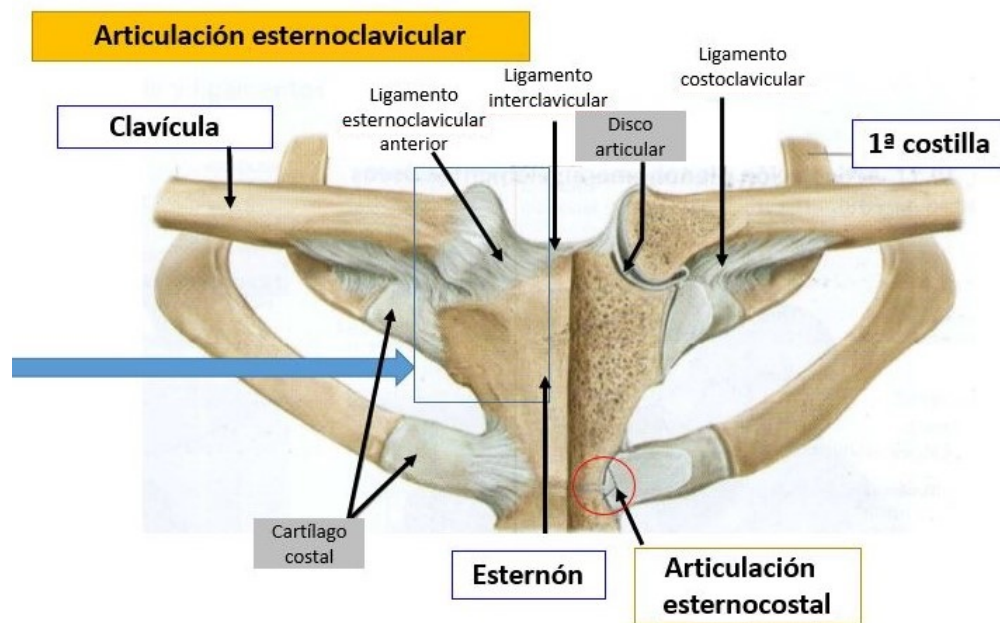


Figura 2.6: Articulación esternoclavicular (editado de [6]).

Además de la articulación glenohumeral, se tienen otras dos articulaciones principales dentro del hombro: la acromioclavicular y la esternoclavicular.

- La articulación acromioclavicular está formada por el borde anterointerno del acromión y la cara inferior del extremo externo de la clavícula, participa en dos tercios del movimiento de la escápula, tiene 3 GDL y realiza movimientos de abducción, aducción, retroversión y anteversión [7, 33].
- La articulación esternoclavicular (ver Figura 2.6) está conformada por el extremo interno de la clavícula, el borde superointerno del esternón y la primera costilla, ésta articulación con forma de silla de montar tiene 2 GDL y permite los movimientos de flexión y abducción del hombro [7, 33].

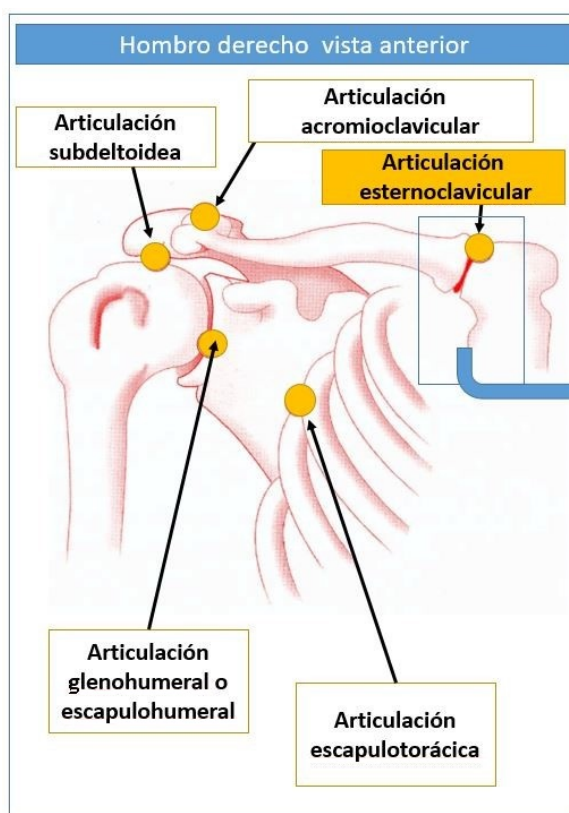


Figura 2.7: Hombro (editado de [6]).

Cabe mencionar que los rangos de movimiento del hombro, son flexión de 180° , extensión de $45-60^{\circ}$, abducción de 150° , aducción de $30-50^{\circ}$, rotación externa de 90° y rotación interna de $70-90^{\circ}$ [34].

2.4.2. Mecánica articular del codo.

El codo se constituye desde el extremo inferior del húmero hasta el extremo superior del radio y del cúbito, siendo una articulación de tipo bisagra (conocida como ginglymoidea por

su termino médico), la cual se compone de tres articulaciones (ver Figura 2.8): humeroradial, humerocubital y radiocubital.

- La articulación humeroradial solamente tiene 1 GDL y esta conformada por el húmero y el radio, permite flexión, extensión, rotación y pronosupinación.
- La articulación humerocubital la conforman el húmero y el cúbito, cuenta con 1 GDL y solamente permite flexión y extensión.
- La articulación radiocubital se divide en distal y proximal, permite la pronosupinación del antebrazo y tiene 1 GDL.

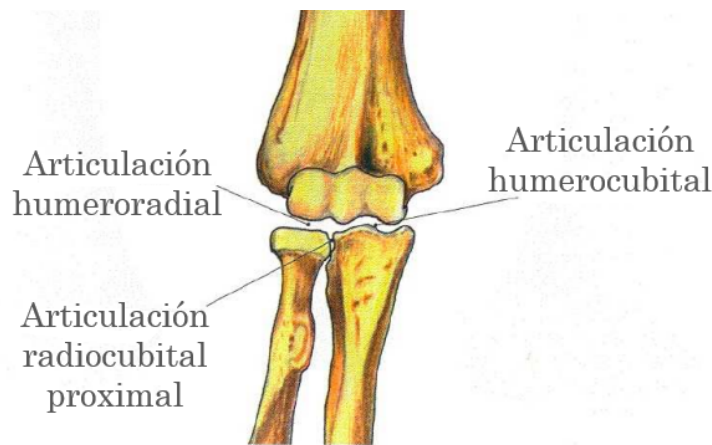


Figura 2.8: Articulaciones del codo (editado de [7]).

Los huesos de la articulación del codo se mueven por la acción de tres músculos (ver Figura 2.9):

- **Bíceps:** es un músculo conformado por una cabeza larga y una corta. La cabeza larga aleja el brazo del tronco y lo gira hacia dentro, la cabeza corta tira del brazo hacia el tronco y cuando ambas cabezas se contraen, se produce la flexión del codo. Permite doblar el antebrazo en flexión y supinación [35].
- **Tríceps:** es un músculo conformado por tres cabezas: larga, lateral y medial. Se ubica en la parte posterior del brazo, casi en toda la extensión del húmero, su función principal es la extensión del antebrazo [36].
- **Braquial:** es un músculo encargado principalmente de realizar la flexión del antebrazo en cualquiera de sus posiciones, además de que estabiliza el movimiento mediante la relajación constante de sí mismo. No participa en los movimientos de supinación y pronación [37].

Los rangos de movimiento del codo son 0° de extensión, 140° de flexión y 180° de pronosupinación [38].

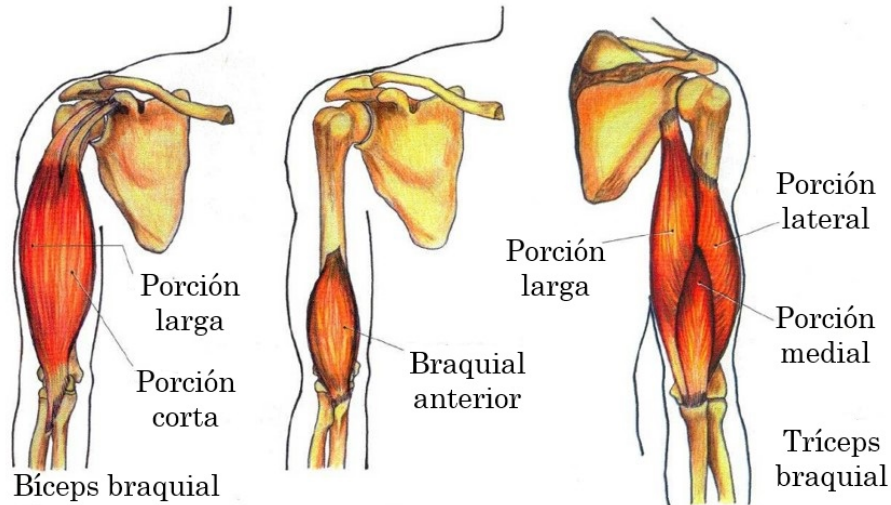


Figura 2.9: Músculos principales que mueven al codo (editado de [7]).

2.4.3. Mecánica articular de la muñeca.

La muñeca o carpo, se encuentra entre el antebrazo y la mano. Se compone por ocho huesos carpianos, que se muestran en la figura 2.10 y se distribuyen en dos filas:

1. Trapecio.
2. Trapezoide.
3. Hueso grande.
4. Hueso ganchoso.
5. Escafoides.
6. Semilunar.
7. Piramidal.
8. Pisiforme.

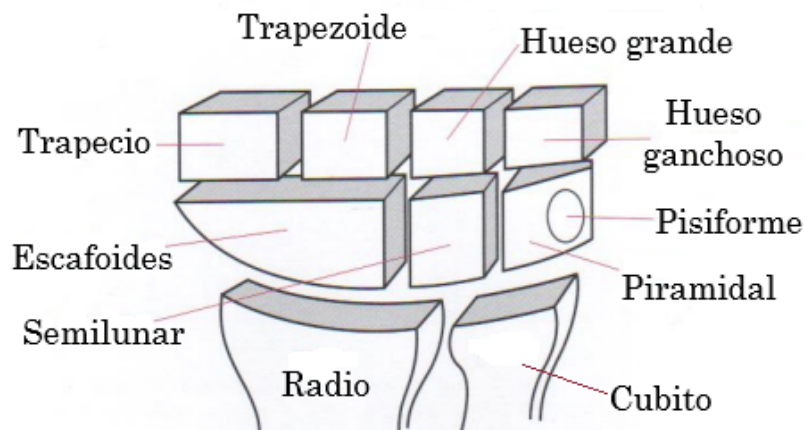


Figura 2.10: Huesos de la muñeca (editado de [8]).

Existen dos articulaciones que constituyen a la muñeca (ver Figura 2.11), la carporradial que une la muñeca con el antebrazo y la mediocarpiana que se encarga de articular las dos filas de huesos del carpo. La muñeca cuenta con 2 GDL, que son la abducción-aducción en el plano frontal y la flexoextensión en el plano sagital, sus rangos de movimiento son de 45° para aducción, 15° de abducción, así como de 85° tanto para flexión como para extensión [39].

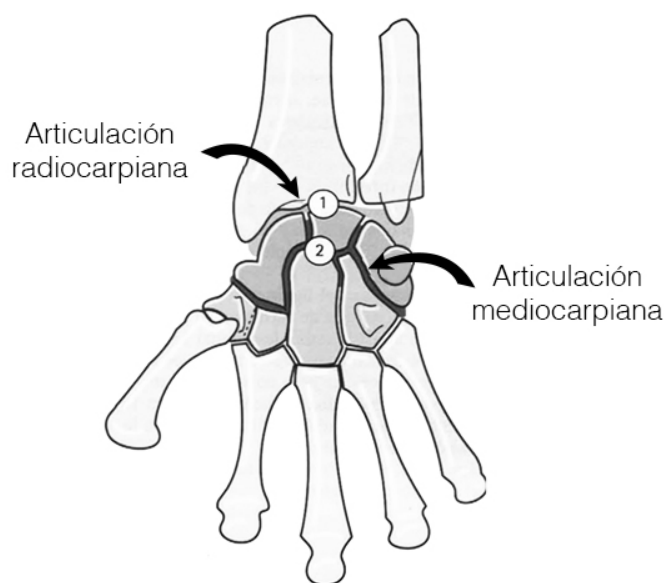
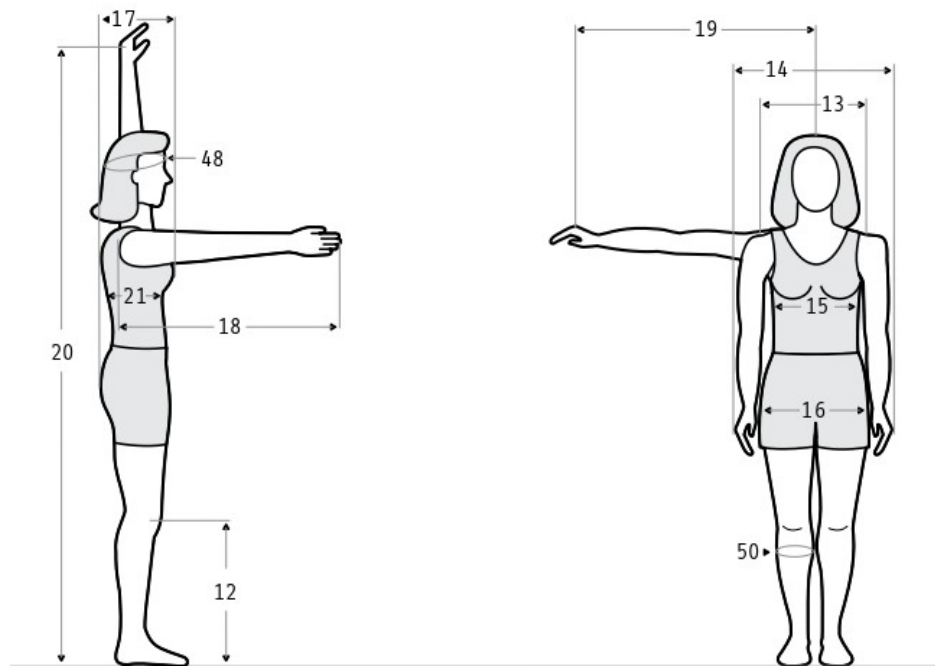


Figura 2.11: Articulaciones de la muñeca [9].

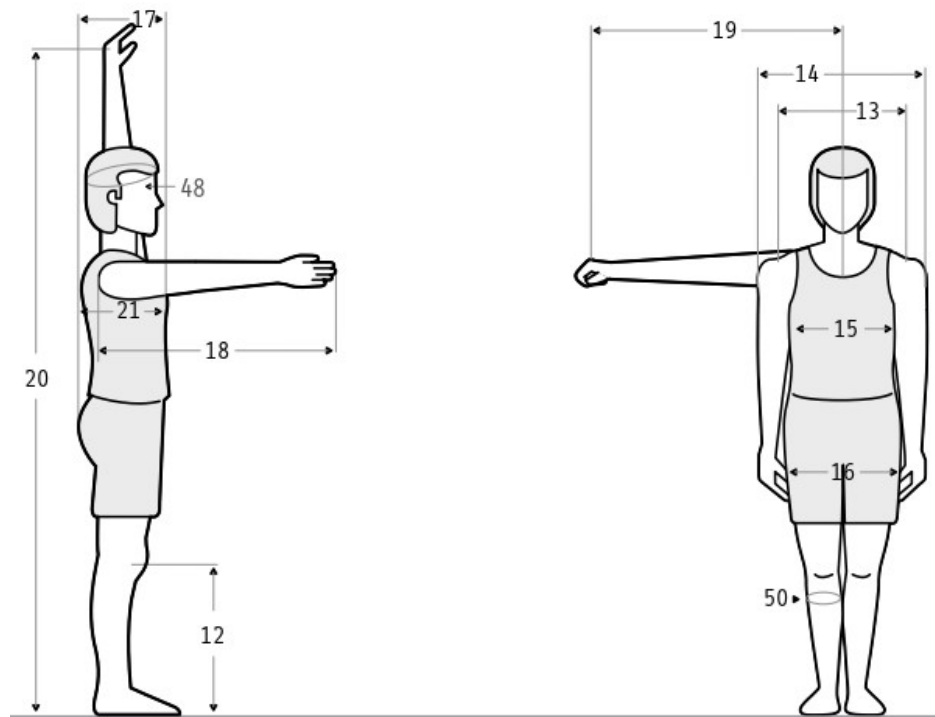
2.4.4. Antropometría de miembro superior.

La antropometría se refiere a la rama de la ergonomía que estudia las medidas del cuerpo humano. Para realizar un buen diseño del robot, se debe tener en cuenta la cuestión antropométrica, en este caso, de miembro superior. Se considerará el estudio realizado en [10]. En dicho estudio se comprenden dimensiones antropométricas de personas en Guadalajara, Ciudad de México, León y la zona fronteriza México-EUA, además de personas de diferentes países como Cuba, Colombia, Venezuela y Chile. Para este proyecto se tomará en cuenta únicamente el estudio realizado a personas de Guadalajara debido a que es el más completo, pues contempla hombres y mujeres de 18 a 65 años lo cual abarca la edad promedio de la población del mundo, mientras que el resto del estudio en las otras ciudades, solamente contempla un sexo o un rango de edad muy corto.

El estudio se realizó a 600 trabajadores industriales de la zona metropolitana de Guadalajara donde 204 son mujeres y 396 son hombres.

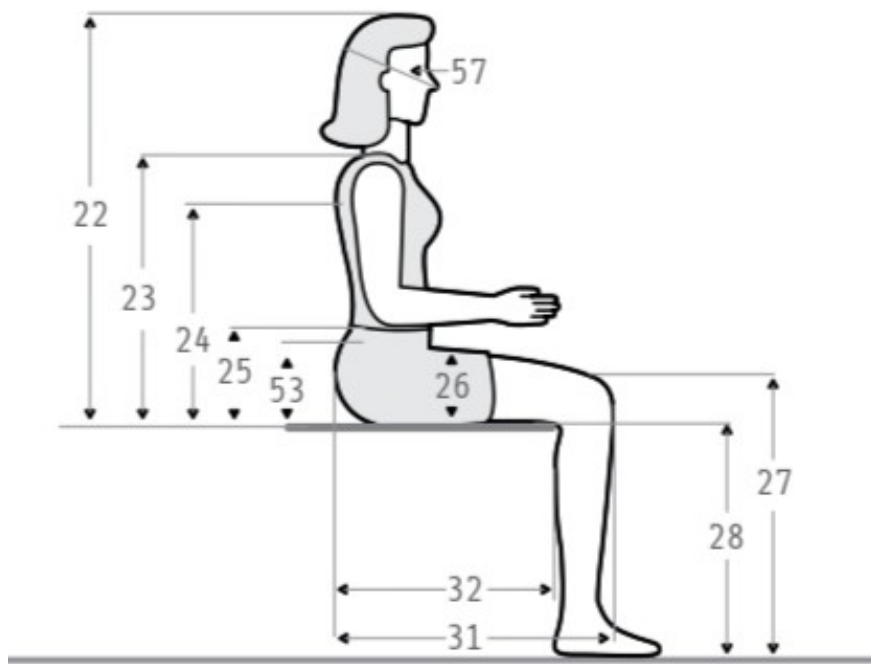


(a)

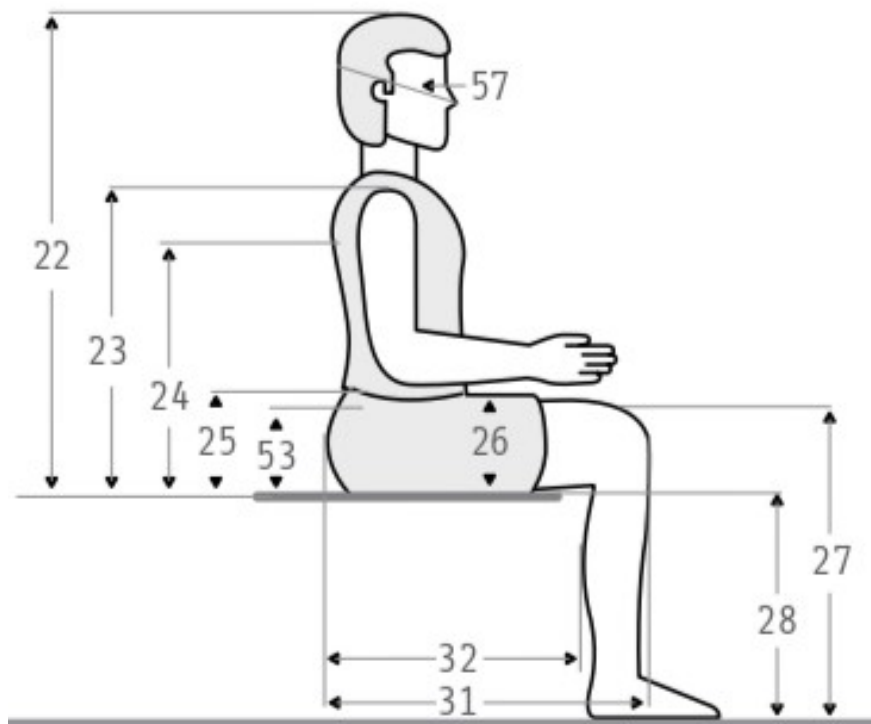


(b)

Figura 2.12: Longitudes de pie a considerar en un estudio de antropometría (editado de [10]).



(a)



(b)

Figura 2.13: Longitudes en posición sentada a considerar en un estudio de antropometría (editado de [10]).

Tabla 2.1: Longitudes en posición de pie en mujeres.

		18 - 65 años (n=204)				
Dimensiones				Percentiles		
		$\bar{x}$	D.E.	5	50	95
12	Altura rodilla	449	23.84	411	446	491
13	Diámetro máx. bideltoides	443	40.42	389	435	521
14	Anchura máx. cuerpo	484	44.98	434	479	578
15	Diámetro transversal tórax	314	31.31	268	310	374
16	Diámetro bitrocantérico	364	30.93	321	359	420
17	Profundidad máx. cuerpo	277	35.67	233	269	344
18	Alcance brazo frontal	686	32.41	631	684	741
19	Alcance brazo lateral	700	30.18	645	700	750
20	Alcance máx. vertical	1896	76.78	1761	1899	2026
21	Profundidad tórax	267	31.64	224	263	328
48	Perímetro cabeza	553	15.99	525	552	580
50	Perímetro pantorrilla	363	34.94	315	355	426

Tabla 2.2: Longitudes en posición sentada en mujeres.

		18 - 65 años (n=204)				
Dimensiones				Percentiles		
		$\bar{x}$	D.E.	5	50	95
22	Altura normal sentado	832	27.42	790	831	879
23	Altura hombro sentado	551	22.95	511	552	591
24	Altura omoplato	426	26.91	377	426	469
25	Altura codo sentado	250	25.78	207	249	293
26	Altura máx. muslo	152	18.06	126	150	185
27	Altura rodilla	472	21.85	435	474	508
28	Altura poplítea	374	20.79	338	376	406
29	Anchura codos	487	54.23	411	478	582
30	Anchura cadera sentado	399	39.4	347	392	472
31	Longitud nalga-rodilla	575	27.97	534	572	625
32	Longitud nalga-poplíteo	471	32.92	434	470	513
53	Altura cresta ilíaca	204	23.68	158	204	236
57	Diámetro a-p cara	211	10.59	192	212	228

Tabla 2.3: Longitudes en posición de pie en hombres.

		18 - 65 años (n=396)				
Dimensiones				Percentiles		
		$\bar{x}$	D.E.	5	50	95
12	Altura rodilla	478	28.76	434	476	526
13	Diámetro máx. bideltoides	478	41.17	422	472	544
14	Anchura máx. cuerpo	523	41.34	455	520	596
15	Diámetro transversal tórax	342	34.12	293	338	398
16	Diámetro bitrocantérico	342	22.69	310	341	387
17	Profundidad máx. cuerpo	275	37.45	219	272	323
18	Alcance brazo frontal	748	37.32	590	648	810
19	Alcance brazo lateral	709	81.50	581	738	818
20	Alcance máx. vertical	2042	113.57	1900	2043	2200
21	Profundidad tórax	238	28.32	196	235	287
48	Perímetro cabeza	569	18.13	540	568	596
50	Perímetro pantorrilla	365	33.78	315	362	420

Tabla 2.4: Longitudes en posición sentado en hombres.

		18 - 65 años (n=396)				
Dimensiones				Percentiles		
		$\bar{x}$	D.E.	5	50	95
22	Altura normal sentado	876	31.17	825	877	927
23	Altura hombro sentado	581	27.63	535	582	638
24	Altura omoplato	442	27.66	396	443	486
25	Altura codo sentado	246	28.36	201	245	290
53	Altura cresta ilíaca	195	19.19	158	198	223
26	Altura máx. muslo	152	18.09	127	150	178
27	Altura rodilla	513	25.79	473	512	556
28	Altura poplítea	412	25.65	374	412	453
29	Anchura codos	531	54.90	443	529	620
30	Anchura cadera sentado	374	31.26	328	372	423
31	Longitud nalga-rodilla	583	33.41	537	582	640
32	Longitud nalga-poplíteo	476	28.92	432	475	526
57	Diámetro a-p cara	222	8.27	207	222	235

De las tablas mostradas anteriormente, se pueden obtener las siguientes medidas relevantes para este proyecto.

- Alcance de brazo frontal (ver Tablas 2.1 y 2.3).
 - Mujer: 686 mm
 - Hombre: 748 mm
- Alcance de brazo lateral (ver Tablas 2.1 y 2.3).
 - Mujer: 700 mm
 - Hombre: 709 mm
- Longitud hombro-codo (obtenido de las Tablas 2.2 y 2.4).
 - Mujer: 301 mm
 - Hombre: 335 mm
- Grosor máximo del brazo (obtenido de las Tablas 2.1 y 2.3).
 - Mujer: 85 mm
 - Hombre: 90.5 mm

Además de conocer las dimensiones del miembro superior, es necesario estimar el peso del brazo para calcular la fuerza requerida para moverlo. Para ello, se utilizarán los datos antropométricos reportados en [40], donde se analizaron 6 049 personas mexicanas con un promedio de 37 años de edad, de las cuales el 50.8 % eran mujeres y el resto hombres. En dicho estudio se obtuvo que el peso promedio de los hombres es de 78 kg y el de las mujeres de 69 kg.

Aunque existen variaciones individuales, este estudio representa adecuadamente a la población mexicana adulta y permite obtener un valor de referencia confiable para el cálculo del peso del brazo. En este trabajo se empleará el peso promedio de los hombres, ya que al ser ligeramente mayor proporciona un escenario conservador que permite abarcar un rango más amplio de usuarios y garantiza un diseño mecánico seguro. A partir de este valor promedio se estimará la fuerza ejercida por el brazo debida a su propio peso utilizando la información que se muestra a continuación.

En la tabla 2.5 se puede observar que el porcentaje de peso de miembro superior suma 5.12 % del total del peso del cuerpo, si sacamos ese porcentaje de lo mencionado previamente donde el peso promedio de un hombre mexicano es de 78 kg, se tiene que el peso del brazo promedio de un mexicano es de 4 kg. Para conocer la fuerza ejercida por el peso del brazo, únicamente se multiplica por la aceleración gravitacional (9.81 m/s^2) y se tiene que la fuerza ejercida es de 39 N.

2.5. Lesiones de miembro superior

El miembro superior consiste de numerosos huesos y músculos, los cuales pudieron ser observados en la información anterior. Todos esos huesos y músculos son propensos a sufrir daños ya sea derivados de un accidente o derivado de una complicación de salud.

Tabla 2.5: Porcentajes que ocupa cada parte del cuerpo (editado de [20]).

One segment	Men N = 35		Women N = 100	
	Mean	SD	Mean	SD
Hand	0.65%	0.06%	0.5%	0.026%
Forearm	1.87	0.2	1.57	0.1
Upper arm	3.25	0.49	2.9	0.32
Foot	1.43	0.13	1.33	0.02
Shank	4.75	0.53	5.35	0.47
Thigh	10.5	1.21	11.75	1.86
Whole trunk	55.1	2.75	53.2	4.64
Head and neck	8.26		8.2	
Thorax	20.1		17.02	
Abdomen	13.06		12.24	
Pelvis	13.66		15.96	

Uno de los principales causantes de problemas en la movilidad de miembro superior es el llamado ictus o accidente cerebrovascular, esta condición médica ocurre cuando hay una interrupción del flujo de sangre en el cerebro o la rotura de una vena o arteria cerebral [41], entre las consecuencias de esta condición están la muerte si no es tratada rápidamente, en caso de sobrevivirlo, se puede producir discapacidad física y deterioro cognitivo.

Además de los problemas derivados de un ictus, otro tipo de lesiones que se pueden presentar en el miembro superior son:

1. **Torcedura:** Lesión de un músculo o tendón resultado de torcimientos o tirones como levantar objetos pesados de manera incorrecta y por tener malas posturas [42].
2. **Luxación:** Dislocación completa de las superficie articular de los huesos, comunmente presentada en el hombro [43].
3. **Fracturas:** Ruptura de huesos [43].

Capítulo 3

Estado del arte.

La historia de los robots para rehabilitación surgió en la década de 1980, pero en esos años, la robótica estaba comenzando y al igual que toda la tecnología en sus inicios, solía tener muchos problemas, los movimientos que realizaba eran lentos, además de ser una tecnología bastante estorbosa y costosa. Pero con el paso de los años, la robótica tuvo un gran crecimiento y fue hasta el comienzo del nuevo milenio cuando realmente se incorporaron robots para rehabilitación, los principales fueron REHAROB [11] (ver Figura 3.1a) y MIT-Manus [12] (ver Figura 3.1b).

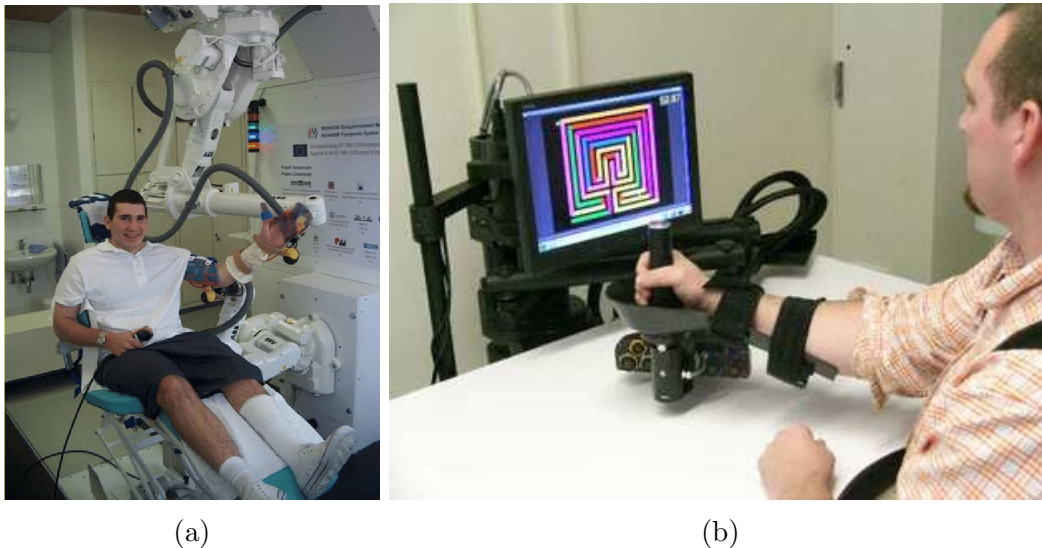


Figura 3.1: 2 de los primeros robots para rehabilitación.(a) Robot REHAROB [11], (b) Robot MIT-Manus [12].

El robot fijo REHAROB (ver Figura 3.1a) permite la rehabilitación de extremidades superiores, cuenta con 6 GDL enfocados principalmente a hombro y codo en pacientes que hayan sufrido algún problema neurológico y que disminuyó sus capacidades motrices. Lo que hace este robot es identificar la mejor forma para rehabilitar al paciente y con base en esos datos, se creará un proceso de rehabilitación acorde al problema para aplicarlo directamente. Esto ayudó significativamente en la automatización de terapias, además de

permitir una precisión y exactitud en la ejecución de los movimientos. Realiza principalmente movimientos lentos a velocidad constante [45, 46]. Al ser fijo, tiene un peso elevado comparado con el resto, de aproximadamente 811 kg, sus motores eléctricos de 200-600 V controlados electrónicamente proporcionan 123 N de fuerza, además, se necesita un espacio de trabajo de 1444 mm diametrales para el movimiento izquierda-derecha y 1790 mm de altura. Se puede implementar junto con ambientes virtuales y teleoperación [47, 48, 49].

El robot MIT-Manus (ver Figura 3.1b) es un robot móvil para rehabilitación con 5 GDL, 2 de ellos son de flexoextensión y pronosupinación, el resto es para movimientos de la muñeca: flexoextensión, pronosupinación y abducción/aducción [45]. Se desarrolló para personas que sufrieron un derrame cerebral, además se combina con videojuegos, para hacer más dinámica y amigable la rehabilitación. El MIT-Manus puede llegar a proporcionar 45 N de fuerza con sus actuadores eléctricos, además de que no requiere tanto espacio para su instalación, únicamente de 381 x 457 mm. Se puede implementar en ambientes virtuales y teleoperación, así como de tecnología háptica¹ [50, 51, 52].

Además de estos robots para rehabilitación de miembro superior, también surgieron algunos otros que no fueron tan conocidos pero que es prudente mencionar pues sentaron las bases de las nuevas generaciones de robots para rehabilitación.

El robot llamado Assisted Rehabilitation and Measurement (ARM) Guide (Figura 3.2a) puede parecer con un funcionamiento muy sencillo, pero fue pionero en su área, pues aunque solamente cuenta con 1 GDL, su función principal es la de medir el alcance que tiene el paciente mediante el movimiento de flexoextensión [45, 13]. Este movimiento de flexoextensión se puede hacer vertical y horizontalmente; cuenta con un servomotor de corriente continua capaz de proporcionar 40 N de fuerza, se puede implementar en ambientes virtuales y teleoperación aunque sea necesario un monitor externo para poder visualizar los videojuegos [53, 54].

También se creó el robot ARMin (Figura 3.2b) que en su momento fue el que mas GDL tenía, siendo 7, los cuales eran: Rotación de hombro en 3 dimensiones, flexoextensión del codo, pronosupinación del antebrazo, flexoextensión de la muñeca y apertura/cierre de la mano. Además también se auxilia de videojuegos para hacer la rehabilitación [45, 14]. De este dispositivo se sabe muy poco y la literatura encontrada no ofrece detalle técnico, lo que se sabe es que cuenta con 6 motores de corriente continua para controlar las diferentes secciones del robot, además de permitir la implementación de ambientes virtuales y teleoperación, pero necesita un monitor externo para visualizar los ambientes virtuales [55].

3.1. Robots con arreglo omnidireccional para rehabilitación

Los robots móviles omnidireccionales son aquellos capaces de desplazarse en cualquier dirección sin necesidad de modificar previamente su orientación. Este tipo de movimiento se logra mediante configuraciones holonómicas, entendidas como sistemas en los que el ro-

¹La tecnología háptica es capaz de activar el sentido del tacto del usuario sin necesidad de agarrar el objeto en cuestión, esto se logra con actuadores en el dispositivo que, mediante vibraciones y fuerzas, recrean una sensación muy similar a la realidad.



(a)



(b)

Figura 3.2: Robots para rehabilitación. (a) Robot ARM Guide [13], (b) Robot ARMin [14].

bot puede combinar traslaciones y rotaciones de forma simultánea, dado que sus grados de libertad de movimiento coinciden con los grados de libertad que pueden controlarse. En la práctica, esto permite que el robot se desplace hacia adelante, atrás, izquierda, derecha, en diagonal y que gire sobre su propio eje con gran precisión.

Para conseguir este comportamiento, se emplean arreglos de ruedas especiales (como ruedas omni o Mecanum) distribuidas típicamente cada 120° , lo que permite generar componentes de fuerza en múltiples direcciones y facilita un desplazamiento verdaderamente omnidireccional.

El estudio de estas plataformas comenzó a tomar relevancia en la década de 1990, destacando el artículo “A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots” [56], en el que se presentó una nueva familia de robots móviles con estas características. A partir de dicho trabajo, diversos autores concluyeron que los robots omnidireccionales ofrecían mayor agilidad y podían ejecutar tareas con mayor eficiencia [57, 58].

Estas cualidades motivaron el interés por incorporar esta tecnología dentro del ámbito médico, específicamente en la rehabilitación, ya que el movimiento omnidireccional permite trayectorias más precisas, suaves y controladas. La aplicación de esta tecnología en robots para rehabilitación de miembro superior comenzó con los sistemas MOTORE y Reha-Maus, los cuales marcaron un precedente en el uso de plataformas móviles avanzadas para asistir terapias de recuperación motriz.

MOTORE (Figura 3.3a) consiste en un dispositivo háptico que permite rehabilitación de miembro superior de una forma innovadora. Lo que hace MOTORE es que usa el arreglo omnidireccional con ruedas a 120° , lo que permitirá al paciente realizar movimientos a cualquier lugar sobre el plano en el que esté. Lo interesante de este robot es que se le pueden implementar ambientes creados en computadora para simular alguna actividad con el fin de volver la rehabilitación más entretenida. Tiene un peso de aproximadamente 10 kg y una fuerza de 25 N que es proporcionada por 3 motores de corriente continua, además, está diseñado para trabajar en un plano de 1200 x 800 mm, permite la implementación de ambientes virtuales, teleoperación y háptica, con la desventaja de que es necesario contar

con un panel deslizante con un patrón especial para cerrar el lazo de control y de un monitor para visualizar el contenido multimedia [15, 59].

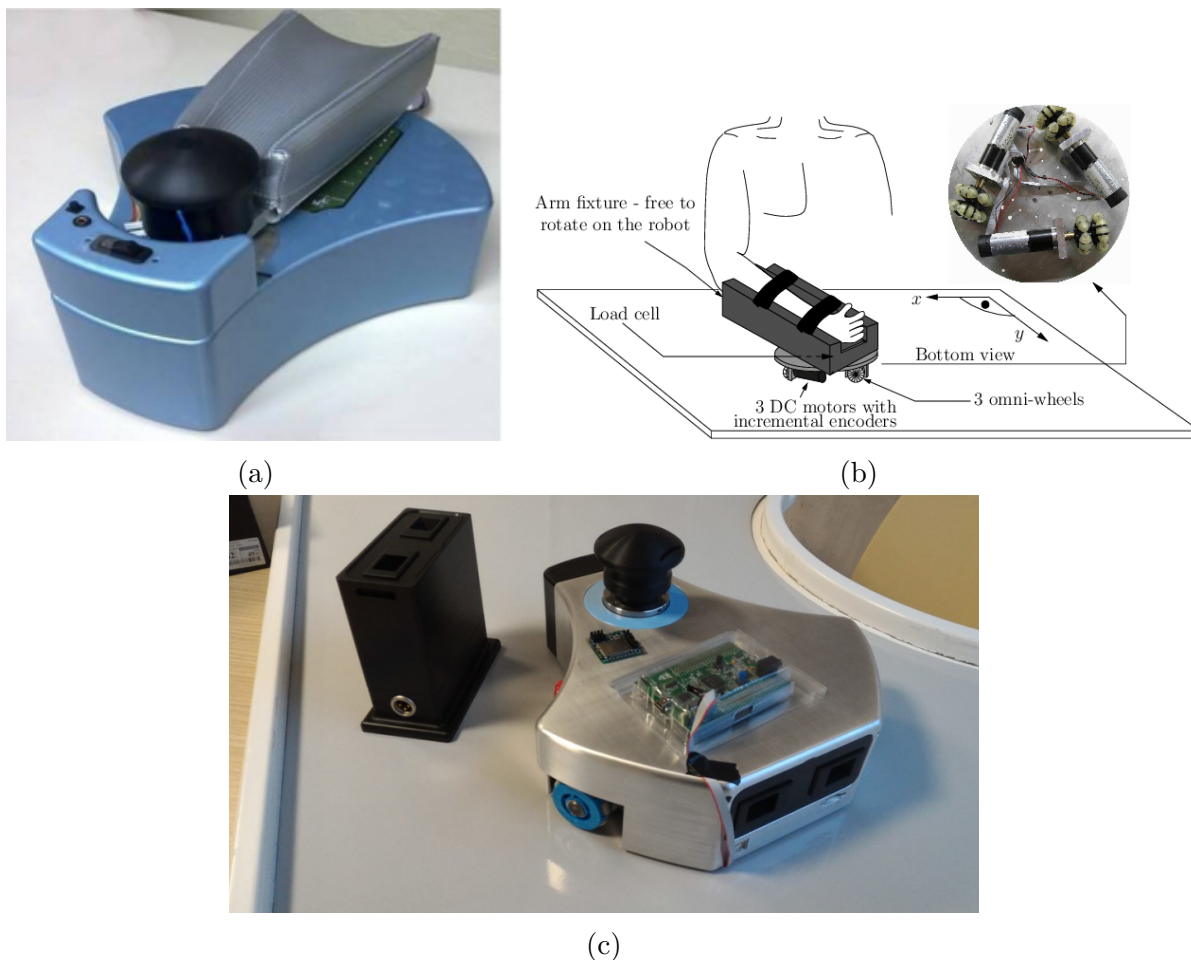


Figura 3.3: Robots con arreglo omnidireccional. (a) Robot MOTORE [15], (b) Robot Reha-Maus [16], (c) Robot MOTORE++ [17].

Reha-Maus (Figura 3.3b) consistió más en una propuesta de diseño, pues este no se fabricó, únicamente quedó en la teoría, pero consiste en un robot omnidireccional con un peso de 2.8 kg, proporciona una fuerza de hasta 55 N mediante 3 motores de corriente continua, su arreglo de ruedas es de 120° , cuenta con un reposa brazo rectangular y con un agarre neutro de la zona háptica [16], a diferencia del agarre prono que se tiene en MOTORE. El arreglo de ruedas por el que optaron en Reha-Maus fue en delta, pues consideran que se tiene menos fricción debido a que actúan perpendicular al eje del motor, a diferencia de MOTORE, que es en estrella. Este prototipo necesita un espacio plano de 300 mm de diámetro para trabajar y un panel deslizante para cerrar el lazo de control.

A raíz de estas invenciones, se desarrollaron múltiples versiones, tales como AssistOn-Mobile [60], MOTORE++ [17], HOTAR [18] y ArmAssist [61].

AssistOn-Mobile es un robot que permite la rehabilitación con movimiento sobre una superficie plana, cuenta con un arreglo de 4 ruedas, se considera diferente a los demás en

el sentido de que incluye un control de velocidad que permite al paciente realizar los ejercicios a su propio ritmo determinado previamente por el terapeuta, además, cuenta con un sensor RGB-D que monitorea los movimientos del paciente y proporciona retroalimentación para adecuar el programa de rehabilitación en tiempo real. Por último, integra una interfaz Cerebro-Computadora con el fin de mapear la actividad cerebral del paciente y proporcionar ayuda en la rehabilitación [60]. Este robot proporciona 15 N mediante 4 motores de corriente continua, requiere de un espacio de 340 x 160 x 85 mm para trabajar correctamente, además de que se le pueden implementar ambientes virtuales, teleoperación y háptica pero es necesario un panel deslizante y un monitor para visualizar el contenido.

MOTORE++ (Figura 3.3c) es una versión mejorada de MOTORE al cual se le encontraron algunas limitaciones que podían ser aprovechadas para mejorarse, entre ellas se encuentran la siguientes:

- Carcasa: el centro de masa no estaba correctamente ubicado por lo que afectaba la fuerza proporcionada, además de que era complicado acceder a la electrónica y hacer reparaciones como cambiar las ruedas.
- Detección: existían limitaciones relacionadas con el dispositivo usado para la ubicación en el plano del robot, además de algunos problemas con el uso de la energía de la batería que proporcionaba un voltaje poco confiable en el funcionamiento del robot.
- Electrónica: había problemas para cambiar algunos parámetros del robot pues aunque la electrónica funcionaba, era limitado lo que se podía hacer con ella.
- Comunicación: A pesar de haber usado un filtro especial para las comunicaciones por Bluetooth, resultó ser poco fiable pues la conexión era muy baja y con problemas para cuando se usaba continuamente.

Ante estas observaciones que se le hicieron a MOTORE, se logró llegar a un nuevo diseño del robot, aprovechando esas áreas de oportunidad como fue mejorando la carcasa, haciendo el espacio más efectivo para las rehabilitaciones aunque con un peso más elevado a su predecesor. ahora de 10.5 kg. Se hizo más accesible para cuestiones de reparación y cambio de partes, también se logro construirle una nueva arquitectura para mejorar la detección de su ubicación. Se le adaptó un microcontrolador STM32F756 que permite manipular más fácilmente los parámetros del robot. Y por último se cambió el sistema Bluetooth por un subsistema Wi-Fi, con el fin de obtener una conexión más estable y con la posibilidad de conectar al Internet de las cosas (IoT). Ocupa el mismo espacio de trabajo de MOTORE, permite las mismas implementaciones como ambientes virtuales, teleoperación y háptica, pero también lo limita la necesidad de contar con un panel deslizante con un patrón especial y un monitor [17].

El robot HOTAR (Figura 3.4) es el que más portable se podría considerar, pues además del dispositivo ya incluye una computadora y una pantalla touch la cual permite visualizar videojuegos que ayudarán en la terapia de rehabilitación. El robot HOTAR cuenta con un arreglo de 3 ruedas a 120° y con agarre neutro, tiene un peso de aproximadamente 2 kgf, un diámetro de 230 mm y una altura de 200 mm. Además cuenta con sensores de fuerza con el fin de poder evaluar la capacidad de movimiento que tiene el paciente y poder auxiliarlo en al rehabilitación ya sea haciendo el dispositivo fácil de mover o que sea necesario aplicar un poco más de fuerza para moverlo [18]. El dispositivo proporciona una fuerza de 5 N

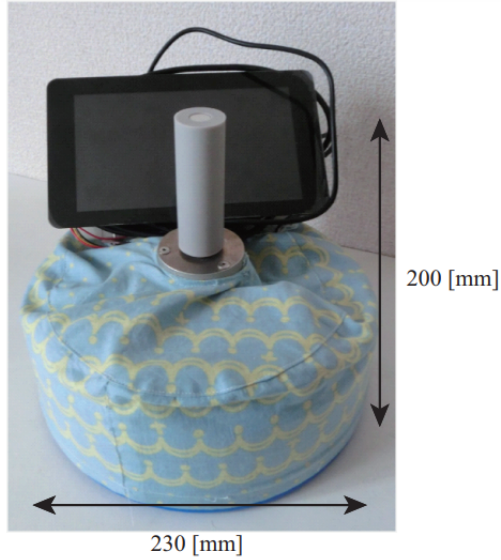


Figura 3.4: Robot HOTAR [18].

mediante 3 motores de corriente continua, permite la implementación de ambientes virtuales y teleoperación, requiere de un panel deslizante para funcionar correctamente.

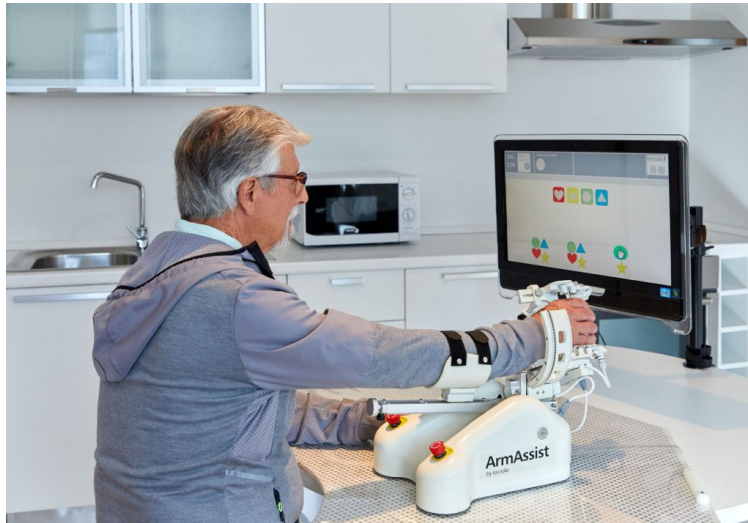


Figura 3.5: Robot ArmAssist [19].

Se tiene además el robot ArmAssist (Figura 3.5), el cual se usa para rehabilitación de hombro y codo después de haber sufrido un derrame cerebral, al igual que los anteriores, se apoya de videojuegos para auxiliar al dispositivo en la rehabilitación. Permite realizar movimientos de abducción/aducción de hombro y flexoextensión de codo, con un agarre neutro [61]. Este robot ha sido actualizado en diversas ocasiones, estas actualizaciones han permitido que los grados de libertad del robots aumenten de 3 a 7, esto debido a una implementación que permite realizar el movimiento de pronosupinación, así como de movimiento de dedos y palma de la mano. Aunque se reservan detalles técnicos, se ha encontrado que se necesitan 3

motores de corriente continua para funcionar, además de un panel deslizante y un monitor para visualizar el contenido multimedia, permite la implementación de ambientes virtuales, teleoperación y tecnología háptica [62, 63, 64].

Para resumir la información anterior del estado del arte, en la tabla 3.1 se compararán las características de cada robot para rehabilitación de miembro superior mencionado previamente.

3.2. Características principales de robots para rehabilitación de miembro superior.

Tabla 3.1: Características principales de robots para rehabilitación de miembro superior.

Robot	Tipo de robot	Peso (kg)	Fuerza (N)	GDL	Tipo de actuadores	Espacio de trabajo	Tipo de implementación	Dispositivos adicionales necesarios para su funcionamiento
REHAROB [11, 45, 46, 47, 48, 49]	Fijo	811 aprox	123	6	Motores eléctricos 200-600 V	Ø1444 x 1790 mm	Ambientes virtuales, teleoperación.	-
MIT-Manus [12, 45, 50, 51, 52]	Fijo	No mencionado	45	5	Eléctricos	381 x 457 mm	Ambientes virtuales, teleoperación, háptica	-
ARM Guide [13, 45, 53, 54]	Fijo	No mencionado	40	1	Servomotor DC	No mencionado	Ambientes virtuales, teleoperación.	-Monitor para visualizar los videojuegos
ARMin [14, 45, 55]	Fijo	No mencionado	No mencionado	7	6 motores DC	No mencionado	Ambientes virtuales, teleoperación.	-Monitor para visualizar los videojuegos
MOTORE [15, 59]	Móvil	10	35	3	3 motores DC	1080 x 720 mm	Ambientes virtuales, teleoperación, háptica	-Panel deslizante con un patrón especial. -Monitor para visualizar los videojuegos.
Reha-Maus [16, 65]	Móvil	2.8	55	3	3 motores DC 12 V	No mencionado	Prototipo	-Panel deslizante
AssistOn-Mobile [60]	Móvil	No mencionado	15	3	4 motores DC	No mencionado	Ambientes virtuales, teleoperación, háptica	-Panel deslizante. -Monitor para visualizar los videojuegos.
MOTORE++ [17]	Móvil	10.5	No mencionado	3	3 motores DC	1200 x 800 mm	Ambientes virtuales, teleoperación, háptica	-Panel deslizante con un patrón especial. -Monitor para visualizar los videojuegos.
HOTAR [18, 66]	Móvil	2	5	3	3 motores DC	No mencionado	Ambientes virtuales, teleoperación.	-Panel deslizante
ArmAssist [61, 62, 63, 64]	Móvil	3	98	7	3 motores DC	512mm x 288mm	Ambientes virtuales, teleoperación, háptica	-Panel deslizante con un patrón especial. -Monitor para visualizar los videojuegos.

Capítulo 4

Marco metodológico

4.1. Requisitos de diseño

Para garantizar el correcto funcionamiento del robot, es fundamental considerar una serie de requisitos técnicos que aseguren su eficiencia, funcionalidad y comodidad para el usuario. Estos requisitos están orientados a cubrir aspectos relacionados con las dimensiones, el rango de movimiento, los materiales empleados, la seguridad operativa y los componentes que se utilizarán.

4.1.1. Dimensiones

De acuerdo con lo presentado en el apartado de Antropometría del miembro superior, la distancia promedio de alcance frontal del brazo es de 748 mm. Sin embargo, para la rehabilitación específica de los movimientos de pronosupinación del antebrazo y flexoextensión del codo, solo se empleará la longitud correspondiente a la distancia codo-mano. Esta distancia se determina al restar la longitud del segmento hombro-codo, obteniendo un valor aproximado de 411 mm.

No obstante, debido a la posición de trabajo, no se busca que el usuario recargue la parte cercana al codo, sino que, por comodidad y ergonomía, la zona de apoyo se localizará en la región media del antebrazo (entre el codo y la muñeca). Por esta razón, el diseño considerará una longitud de apoyo superior a 206 mm, incorporando un sistema de ajuste en intervalos de 10 mm. Este valor se seleccionó debido a que la longitud del antebrazo presenta variaciones naturales entre individuos, y un paso de 10 mm permite compensar adecuadamente dichas diferencias sin introducir ajustes demasiado finos ni excesivamente amplios. Además, este intervalo es compatible con las tolerancias propias de la manufactura aditiva y asegura un ajuste ergonómico confortable para la mayoría de los usuarios.

4.1.2. Rango de movimiento

Con base en el análisis de la mecánica articular del miembro superior, se definen los rangos de movimiento que el robot debe cubrir para permitir una rehabilitación completa y efectiva:

1. **Flexoextensión del brazo:** se establece un rango total de 180° , el cual abarca la movilidad natural del codo en combinación con el movimiento del hombro. Aunque el rango del codo es inferior a este valor, al considerar la intervención del hombro, se logra un rango global que simula con precisión los movimientos cotidianos.
2. **Pronosupinación del antebrazo:** el robot permitirá un rango total de 180° , distribuidos en 90° hacia la pronación (rotación interna) y 90° hacia la supinación (rotación externa). La posición neutra de la mano será la referencia central, facilitando la manipulación del joystick durante la terapia y permitiendo alcanzar las posiciones extremas de pronación y supinación.

4.1.3. Materiales

El diseño del robot prioriza el uso de materiales accesibles, económicos y de fácil manufactura, sin comprometer la resistencia estructural. Con el fin de reducir costos y optimizar la fabricación, se optará por la manufactura aditiva (impresión 3D), evitando procesos convencionales más costosos.

Entre los materiales disponibles para impresión 3D, se selecciona PLA (ácido poliláctico) debido a su versatilidad, propiedades mecánicas adecuadas y bajo costo. Dado que el robot solo soportará la carga del antebrazo del usuario, estimada en aproximadamente 4 kg según la antropometría del miembro superior, no se requiere un material de alta resistencia, ya que no estará sometido a esfuerzos intensos, altas velocidades ni temperaturas extremas.

De acuerdo con las propiedades del PLA reportadas por [67], se consideran las siguientes características:

1. Densidad: 1300 kg/m^3
2. Resistencia última a la tracción: 57.3 MPa
3. Deformación máxima: 69.4 %
4. Módulo de elasticidad: 2.35 GPa
5. Tensión de fluencia: 45.2 MPa

Como complemento al PLA, se considera también el uso de PETG (tereftalato de polietileno glicol) en piezas que requieran mayor resistencia al impacto, buena resistencia química o mejor comportamiento frente a condiciones ambientales ligeramente más exigentes. El PETG combina buena rigidez con una mayor flexibilidad en comparación con el PLA, lo que lo hace adecuado para componentes que puedan estar sometidos a cargas repetidas o esfuerzos moderados.

Según datos técnicos de [67], el PETG presenta las siguientes propiedades mecánicas promedio:

1. Densidad: 1270 kg/m^3
2. Resistencia última a la tracción: 50 MPa
3. Deformación máxima: 120 %
4. Módulo de elasticidad: 2.0 GPa
5. Tensión de fluencia: 40 MPa

El PETG presenta una mayor resistencia al impacto y a la fatiga que el PLA, además de un mejor comportamiento frente a esfuerzos repetitivos y condiciones ambientales más exigentes, lo que lo hace adecuado para piezas funcionales que requieran durabilidad adicional.

Aunque la estructura principal del robot estará fabricada en PLA y PETG según las necesidades funcionales, la base donde se colocarán la placa electrónica y las baterías estará construida en MDF (tablero de fibra de densidad media). La elección de MDF se debe a su rigidez, bajo costo y facilidad de mecanizado, lo que lo convierte en una opción adecuada para soportar los componentes electrónicos de forma estable.

El MDF presenta una densidad promedio de 700–800 kg/m³, lo que le proporciona la resistencia necesaria para soportar el peso de las baterías y la electrónica sin deformarse. Además, su superficie lisa facilita la fijación de los componentes. Para evitar riesgos térmicos o eléctricos, se implementarán revestimientos aislantes o separadores entre la base de MDF y los elementos electrónicos sensibles, garantizando la seguridad del sistema.

4.1.4. Seguridad

Para asegurar la protección del usuario durante la rehabilitación, el robot contará con dos botones de emergencia ubicados en lados opuestos del dispositivo. La elección de dos botones responde a criterios de accesibilidad y seguridad, pues al estar en posiciones opuestas, se garantiza que al menos uno de ellos esté siempre disponible para el usuario o el fisioterapeuta, incluso si el brazo o algún elemento del robot obstruye uno de los lados.

Además, disponer de dos botones proporciona redundancia en el sistema de seguridad, lo cual es una práctica común en el diseño de dispositivos de rehabilitación, ya que permite detener el funcionamiento del robot aun en caso de que uno de los botones falle o no pueda accionarse. Esto asegura una detención inmediata ante cualquier comportamiento anómalo, protegiendo la integridad física del usuario.

4.1.5. Torque

El torque es un parámetro fundamental en el diseño del robot, ya que determina la capacidad de generar fuerza rotacional necesaria para asistir el movimiento de flexoextensión del codo durante la rehabilitación. Una correcta estimación del torque garantiza que el robot pueda movilizar el brazo del usuario de forma eficiente, precisa y segura, evitando tanto la aplicación de fuerzas excesivas que puedan provocar incomodidad o lesiones, como la insuficiencia de fuerza que limitaría la eficacia terapéutica.

Para dimensionar correctamente los actuadores del robot, se debe considerar la carga máxima que el robot moverá, que corresponde al peso del antebrazo del usuario. De acuerdo con la antropometría del miembro superior, el peso promedio del antebrazo (codo-mano) en un adulto es aproximadamente 4 kgf.

El torque τ requerido para cada movimiento se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = F \times d \quad (4.1)$$

Donde:

- τ = Torque (Nm)

- F = Fuerza aplicada (N)
- d = Distancia perpendicular desde el eje de rotación hasta el centro de masa del antebrazo (m)

El movimiento de flexoextensión requiere la aplicación de torque para vencer la resistencia gravitacional del brazo. Para estimar este valor, se considera la distancia promedio desde el eje de rotación (codo) hasta el centro de masa del antebrazo, la cual, según la antropometría, se encuentra aproximadamente al **45 %** [68] de la longitud total del antebrazo. Dado que la longitud promedio codo-mano es de **411 mm**, la distancia efectiva d es:

$$d = 0,45 \times 0,411 \text{ m} = 0,185 \text{ m} \quad (4.2)$$

Por lo tanto, el torque requerido para soportar el peso del antebrazo es:

$$\tau = 39,24 \text{ N} \times 0,185 \text{ m} = 7,26 \text{ Nm} \quad (4.3)$$

4.1.6. Ergonomía

La ergonomía es un factor crucial en el diseño de cualquier dispositivo que interactúe directamente con el cuerpo humano, especialmente en aquellos destinados a la rehabilitación. En el caso de un robot de rehabilitación para la flexoextensión del codo y la pronosupinación del antebrazo, la comodidad, la seguridad y la facilidad de uso son esenciales para asegurar que el paciente reciba los beneficios del tratamiento sin causar incomodidad o daño adicional. Por lo tanto, se debe considerar tanto la posición del usuario como la accesibilidad de los controles y la facilidad de uso del dispositivo.

El diseño del robot debe permitir que el usuario mantenga una postura cómoda y natural durante el proceso de rehabilitación. El objetivo es evitar forzar el brazo del paciente en posiciones incómodas o dañinas. Dado que los movimientos que se realizarán con el robot son tanto de flexoextensión del codo como de pronosupinación del antebrazo, es esencial que el dispositivo permita una alineación adecuada del brazo y la muñeca.

Dado que el robot interactuará de manera directa con el brazo del usuario, es fundamental minimizar cualquier punto de presión que pueda causar incomodidad, dolor o lesiones durante su uso. Por esta razón, los soportes del robot deberán estar diseñados con materiales suaves y acolchonados en las áreas de contacto con el antebrazo y la muñeca.

- **Materiales acolchonados:** Las áreas de contacto con el brazo estarán revestidas con materiales como gomaespuma o silicona suave, lo que asegurará que la presión ejercida sobre la piel sea mínima. Además, estos materiales permitirán una correcta ventilación, evitando que el usuario sienta calor o sudoración excesiva durante el uso del dispositivo.
- **Diseño ergonómico de los soportes:** Los soportes deben tener una forma que se adapte de manera natural a la curvatura del antebrazo y la muñeca, evitando que el usuario sienta que está en una posición incómoda o forzada. Se estudiarán las dimensiones y formas anatómicas del miembro superior para asegurar que el robot ofrezca la máxima comodidad.

4.1.7. Mantenimiento

El diseño del robot de rehabilitación no solo debe garantizar un funcionamiento adecuado durante su uso inicial, sino también asegurar que mantenga su eficiencia y fiabilidad a lo largo del tiempo. Para ello, se deben tener en cuenta los requisitos de mantenimiento y la durabilidad de los componentes, con el fin de prolongar la vida útil del sistema.

El mantenimiento preventivo se enfoca en minimizar el riesgo de fallos y asegurar el correcto funcionamiento del robot durante su vida útil. Los requisitos de diseño relacionados con el mantenimiento preventivo incluyen la facilidad de acceso a los componentes clave y la modularidad del diseño para permitir un reemplazo eficiente de piezas. Las acciones recomendadas son:

- **Inspección periódica de los componentes mecánicos y electrónicos:** Se debe garantizar que los componentes sean fácilmente accesibles para realizar revisiones periódicas. En el caso de los motores y circuitos electrónicos, los diseños modulares permitirán una inspección rápida y eficaz.
- **Limpieza de componentes:** El robot debe estar diseñado de manera que permita una fácil limpieza sin riesgo de dañar los componentes sensibles, como la placa electrónica o los cables de conexión.
- **Reemplazo de baterías:** El diseño del compartimiento de baterías debe permitir un fácil acceso para su reemplazo periódico. Es esencial que el proceso de reemplazo sea sencillo y accesible para los usuarios.

En el caso de fallos o averías, es importante que el robot esté diseñado para facilitar la reparación. Los requisitos de diseño en esta área incluyen la disponibilidad de piezas de repuesto y la posibilidad de realizar reparaciones rápidas sin comprometer el funcionamiento general del sistema. Las acciones correctivas pueden incluir:

- **Reemplazo de componentes electrónicos defectuosos:** El diseño modular permitirá que, en caso de fallo de un motor o de un componente electrónico, se pueda reemplazar únicamente la parte afectada, sin necesidad de cambiar todo el sistema.
- **Reemplazo de componentes defectuosos:** Debido a que el robot será fabricado mediante manufactura aditiva, las piezas que sufran daños por situaciones ajenas al uso para el cual fue diseñado podrán ser reprocesadas y fabricadas nuevamente, garantizando así una fácil reposición de los componentes defectuosos.

La durabilidad de los componentes del robot está estrechamente vinculada a los materiales utilizados y al diseño. Los materiales seleccionados deben ser resistentes al desgaste y capaces de soportar el uso prolongado sin comprometer la estructura del dispositivo.

4.2. Estudio de las alternativas

Para la elaboración del prototipo del robot móvil, se evaluaron tres alternativas de diseño estructural. Aunque todas las opciones consideran el uso de los mismos componentes y materiales, presentan diferencias significativas en la geometría y en la forma en que se distribuyen los esfuerzos mecánicos.

- Alternativa 1: Diseño circular
- Alternativa 2: Diseño triangular
- Alternativa 3: Diseño en Y

4.2.1. Alternativa 1

La figura 4.1a muestra el primer diseño propuesto, el cual consiste en una estructura de forma circular. Esta alternativa se basa en la simplicidad geométrica, lo que facilita su replicación y manufactura. Además, la forma circular permite una distribución uniforme de los esfuerzos a lo largo de la circunferencia, contribuyendo a la estabilidad del sistema.

Sin embargo, la principal desventaja de este diseño radica en la cantidad de espacio desaprovechado al dimensionar la estructura para ajustarse a la longitud promedio del antebrazo mexicano. Si bien esta configuración busca proporcionar estabilidad y evitar la generación de un momento excesivo que incremente los esfuerzos cortantes en la superficie de apoyo del brazo, el área no utilizada representa una limitante en términos de eficiencia espacial y de materiales.

4.2.2. Alternativa 2

La figura 4.1b muestra la segunda alternativa propuesta, la cual consiste en un diseño con geometría triangular. Esta configuración permite un mejor aprovechamiento del espacio disponible, facilitando la disposición eficiente de los componentes. Además, su forma sencilla favorece la replicación y manufactura, optimizando el uso de materiales.

No obstante, la principal desventaja de este diseño radica en la posible pérdida de estabilidad durante la rotación del brazo. Debido a la geometría triangular, la distribución de la carga no es tan uniforme, lo que podría generar un desequilibrio al ejercer el movimiento, comprometiendo la precisión y la consistencia del robot durante la rehabilitación.

4.2.3. Alternativa 3

La tercera alternativa, representada en la Figura 4.1c, surge como una combinación de las dos propuestas anteriores. Su diseño en forma de Y busca optimizar el aprovechamiento del espacio disponible sin comprometer la estabilidad estructural, logrando así una distribución más equilibrada de los esfuerzos. Esta configuración pretende combinar la eficiencia geométrica del diseño triangular con la estabilidad inherente del diseño circular.

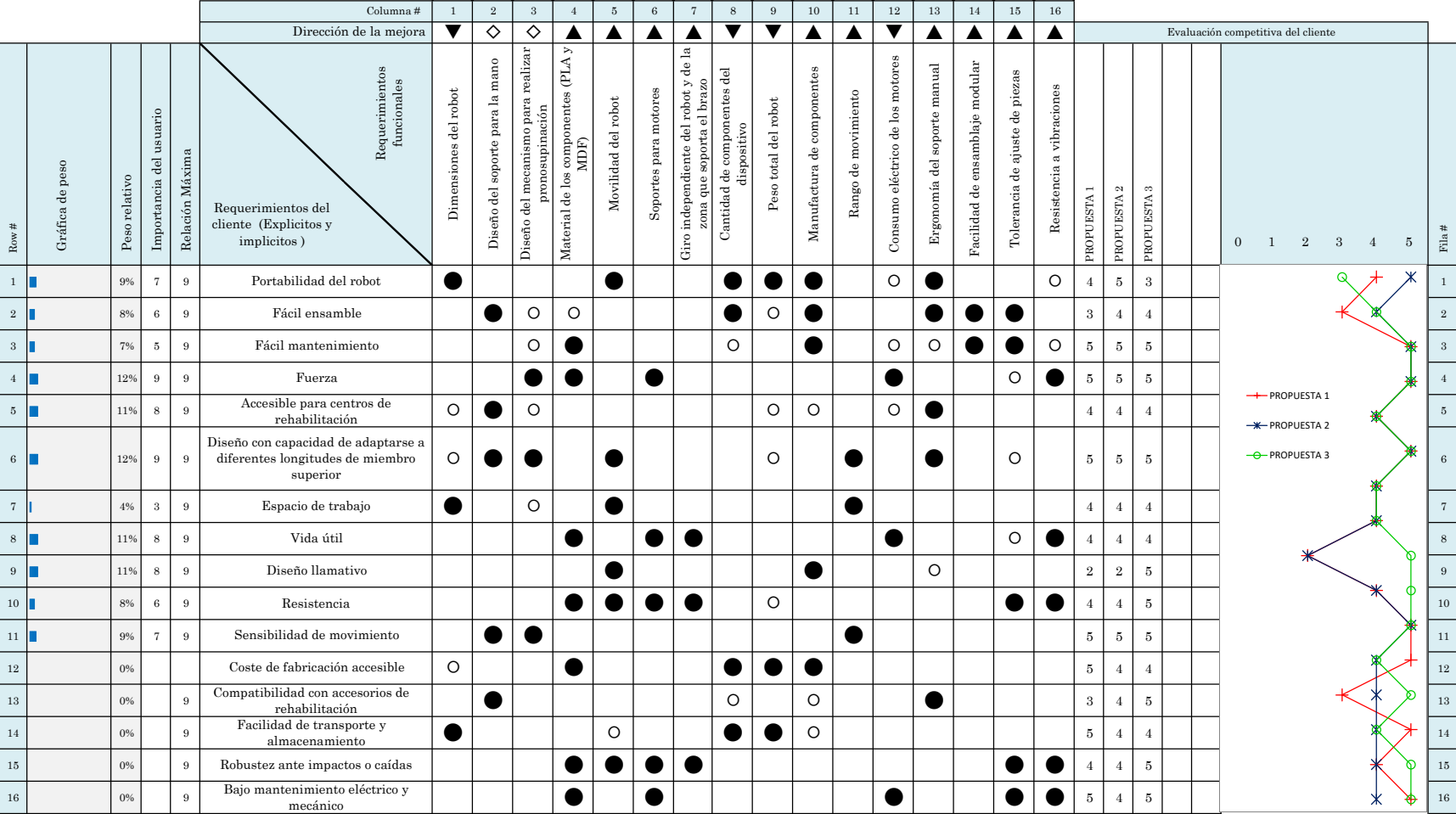
Sin embargo, a pesar de los esfuerzos por alcanzar un modelo más eficiente, esta alternativa no está exenta de desventajas. Una de las principales limitaciones es la presencia de un mayor número de esquinas en comparación con las otras opciones. Aunque estas esquinas han sido redondeadas para reducir la concentración de esfuerzos, la geometría sigue presentando zonas críticas donde las tensiones podrían incrementarse, afectando potencialmente la durabilidad del robot.

Por ello se realizará el análisis de la casa de la calidad¹ para poder elegir el mejor diseño de los que se propusieron.

¹La casa de la calidad es una matriz que permite comparar distintas alternativas de diseño con base en qué tanto cumplen los requisitos del proyecto.

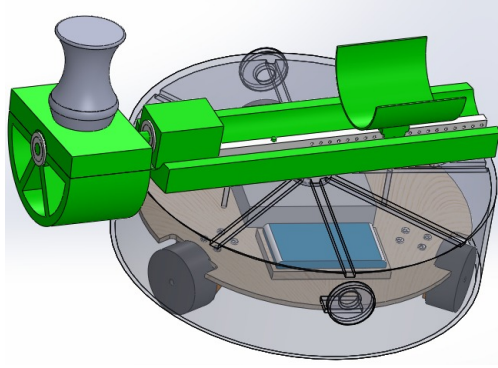
QFD: Despliegue de la función calidad
Proyecto: Diseño mecánico de un robot de asistencia para rehabilitación de miembro superior

Table with 3 sections: Correlaciones (Positive, Negative, No correlation), Relaciones (Strong, Medium, Weak), and Dirección de mejora (Maximize, Objective, Minimize).

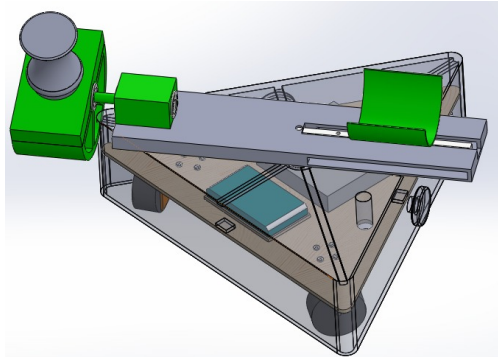


Evaluación técnica competitiva

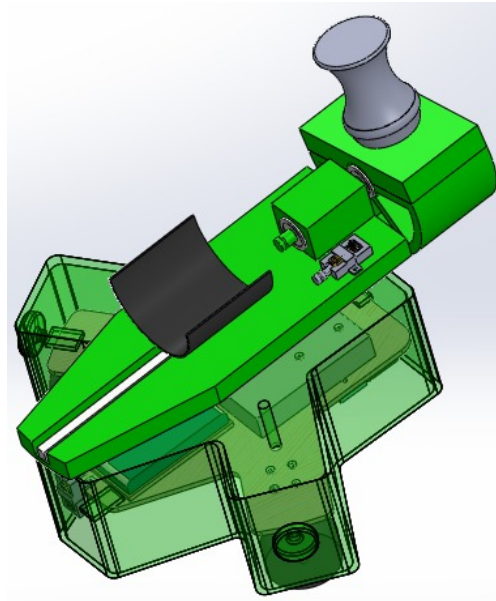
Objetivo	Tamaño del robot para permitir portabilidad	Tener un agarre cómodo y funcional para la mano	Permitir realizar el movimiento de pronosupinación con facilidad	Poseer buenas propiedades mecánicas del robot	Permitir movimientos fluidos	Sostener con firmeza los motores y soportar sus vibraciones y movimientos	Impedir movimientos bruscos al brazo cuando se cambie de dirección	Hacer que el ensamble sea sencillor rápido	Tener un robot liviano para mejorar portabilidad	Favorecer una manufactura sencilla a base de impresión 3D	Permitir el mayor rango de movimiento posible	Disminuir la potencia requerida manteniendo el desempeño.	Permitir manipulación cómoda por parte del terapeuta o usuario.	Lograr ensamblaje rápido sin herramientas especializadas.	Mejorar precisión dimensional para evitar holguras o interferencias.	Asegurar integridad estructural en sesiones repetitivas.
Max relación	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Importancia de la evaluación técnica	185.53	355.26	382.89	355.26	390.79	272.37	165.8	173.68	197.37	339.47	225	280.26	406.58	130.26	303.95	319.74
Peso relativo	4%	8%	9%	8%	9%	6%	4%	4%	4%	8%	5%	6%	9%	3%	7%	7%
Tabla de peso																
PROPUESTA 1	4	5	3	5	4	4	3	4	3	4	5	5	3	4	4	3
PROPUESTA 2	5	4	4	5	3	4	4	3	4	5	4	5	4	5	5	4
PROPUESTA 3	4	5	5	5	5	4	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5
Columna #	5 4 3 2 1 0 PROPUESTA 1 PROPUESTA 2 PROPUESTA 3															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16



(a) Alternativa 1: Diseño circular



(b) Alternativa 2: Diseño triangular



(c) Alternativa 3: Diseño en Y

Figura 4.1: Alternativas

4.3. Diseño final de la alternativa seleccionada

4.3.1. Base de MDF

El diseño del robot inicia con la distribución estratégica de las ruedas sobre la base. La base está fabricada con tablero de fibra de densidad media (MDF) de 6 mm. de grosor, seleccionado por su adecuada resistencia mecánica, bajo costo y facilidad de manufactura.

Lo principal en el diseño de la base es garantizar la correcta distribución de las ruedas según el arreglo omnidireccional. Este arreglo consiste en posicionar las tres ruedas con una separación angular de 120° entre sí. Esta configuración permite que el robot realice movimientos suaves y precisos durante la flexoextensión del brazo, asegurando una adecuada maniobrabilidad y estabilidad.

Además de la distribución de las ruedas, el diseño de la base considera la colocación estratégica de los componentes electrónicos, las baterías y el cableado. Para ello, se in-

corporaron perforaciones y ranuras que facilitan el montaje y la organización de todos los elementos. La base también cuenta con orificios específicos para los botones de emergencia, colocados en lados opuestos para garantizar la accesibilidad y la seguridad del usuario en caso de un evento inesperado.

El diseño final de la base, además de optimizar la distribución de esfuerzos, prioriza la estabilidad estructural durante la operación. La geometría en Y fue seleccionada debido a su capacidad para distribuir mejor el peso del robot y los esfuerzos generados, reduciendo la posibilidad de inclinaciones o vibraciones excesivas durante el movimiento del brazo.

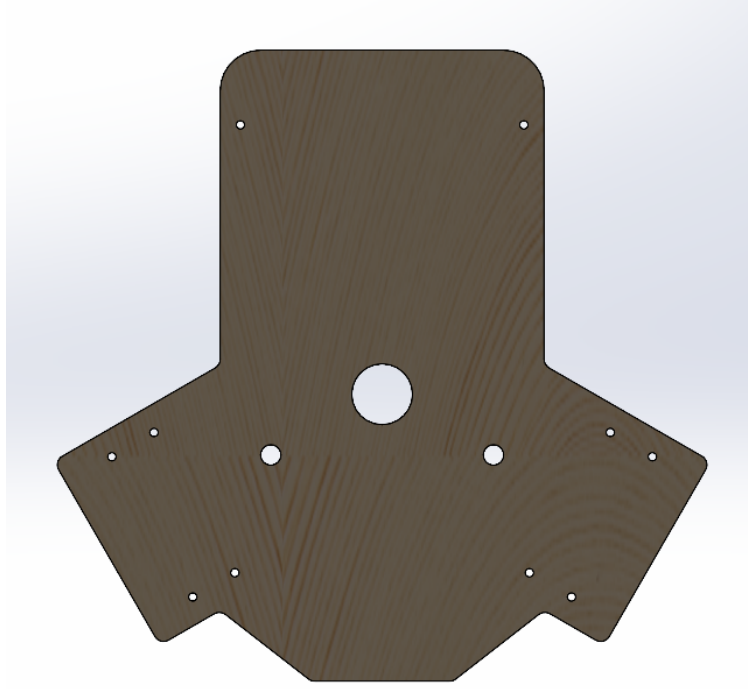


Figura 4.2: Base de MDF

Para garantizar que la base del robot móvil soporte adecuadamente las cargas, se calcula el esfuerzo normal generado bajo condiciones de operación. Debido a que la carga aplicada no se distribuye de manera uniforme sobre toda la superficie, se evalúa tanto el esfuerzo promedio global como el esfuerzo local que se produce en las zonas donde la carga se transmite hacia la base.

Esfuerzo promedio global

El esfuerzo promedio σ_{prom} se obtiene mediante la expresión:

$$\sigma_{\text{prom}} = \frac{F}{A_{\text{base}}} \quad (4.4)$$

Donde:

- $F = 58,86 \text{ N}$: suma del peso estimado del antebrazo del usuario y del conjunto de componentes electrónicos.
- $A_{\text{base}} = 0,0607 \text{ m}^2$: área total de la base de MDF.

Sustituyendo:

$$\sigma_{\text{prom}} = \frac{58,86}{0,0607} = 9,70 \times 10^2 \text{ Pa} \quad (4.5)$$

Este valor representa el esfuerzo distribuido de manera uniforme sobre toda la superficie de la base.

Esfuerzo local en la zona de transmisión de carga

En la práctica, la carga aplicada sobre el robot no se transfiere de manera uniforme a toda la base, sino a través de elementos de contacto localizados, como tornillos, columnas o separadores estructurales. Estos elementos poseen superficies de apoyo reducidas, de forma aproximadamente circular, mediante las cuales la carga se introduce en la placa de MDF.

Para estimar el esfuerzo en estas zonas de apoyo, se considera un área efectiva de contacto con forma circular, equivalente al apoyo generado por uno de estos elementos. Como dimensión característica se adopta un diámetro efectivo de $d_{\text{ef}} = 9 \text{ mm} = 9 \times 10^{-3} \text{ m}$, valor coherente con el tamaño de la cabeza de los tornillos empleados. El área de contacto resulta entonces:

$$A_{\text{ef}} = \frac{\pi d_{\text{ef}}^2}{4} \quad (4.6)$$

$$A_{\text{ef}} = \frac{\pi(9 \times 10^{-3})^2}{4} = 6,36 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (4.7)$$

En un caso conservador, se supone que toda la fuerza aplicada $F = 58,86 \text{ N}$ se transmite únicamente a través de esta zona efectiva, por lo que el esfuerzo normal local es:

$$\sigma_{\text{local}} = \frac{F}{A_{\text{ef}}} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{\text{local}} = \frac{58,86}{6,36 \times 10^{-5}} = 9,25 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (4.9)$$

$$\sigma_{\text{local}} \approx 0,925 \text{ MPa}$$

Este valor representa el esfuerzo máximo estimado en una zona localizada de apoyo, donde la carga se concentra debido a la interacción con los elementos de fijación.

4.3.2. Carcasa

La carcasa del robot de rehabilitación está diseñada para proporcionar una estructura resistente y funcional que proteja a los componentes internos sin comprometer la ergonomía y la seguridad del usuario, además de mejorar la estética del dispositivo y contribuir a la rigidez estructural con la reducción de posibles vibraciones. Está fabricada en PLA (ácido poliláctico), un material termoplástico biodegradable conocido por su ligereza, resistencia a la tracción y facilidad de fabricación mediante impresión 3D.

El diseño de la carcasa se centra en la protección de los mecanismos internos, minimizando el peso y maximizando la durabilidad. Los puntos críticos de la estructura, como el agujero

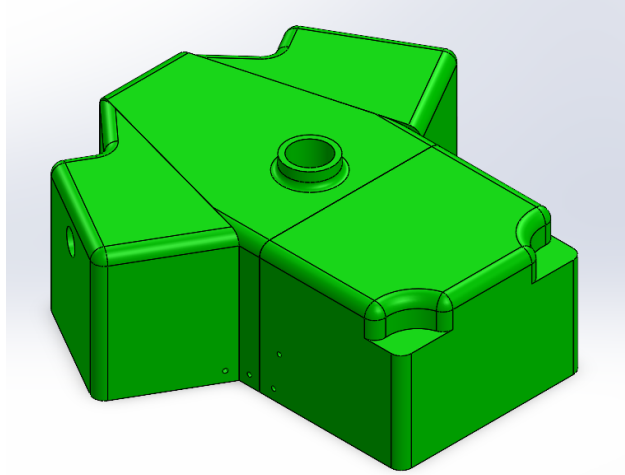


Figura 4.3: Vista isométrica de la carcasa

central más grande donde se concentra la fuerza del brazo durante la rehabilitación, se analizan detalladamente para asegurar que los tornillos de fijación mantengan la integridad de la carcasa bajo condiciones de carga. La resistencia de los tornillos, en particular, es crucial, ya que deben soportar las fuerzas generadas durante la interacción del robot con el usuario, garantizando que la estructura no experimente deformaciones o fallos en su funcionamiento.

Además, se ha optimizado la distribución de las cargas a lo largo de la carcasa para evitar puntos de concentración de esfuerzos que puedan comprometer su estabilidad. El diseño modular también facilita el ensamblaje y la posible reparación de las piezas, sin necesidad de herramientas especializadas.

En términos de resistencia mecánica, se evaluaron las propiedades del PLA en condiciones de uso típicas, considerando tanto la resistencia a la tracción como la flexibilidad del material. La carcasa está diseñada para operar de manera eficiente dentro de los límites de resistencia del PLA, asegurando que el robot mantenga su funcionalidad a lo largo del tiempo.

Como se puede observar en la Figura 4.3, la carcasa del robot está conformada por cuatro partes. En el centro de la pieza principal se encuentra un barreno, en el cual se soportará la estructura donde el usuario recarga el brazo. Esta zona es crítica, ya que en ella se concentrará la mayor parte del esfuerzo generado por el movimiento del brazo. Para garantizar la resistencia estructural, se busca que esta fuerza se disperse hacia el resto de la carcasa, evitando la concentración de esfuerzos en un solo punto.

Con el fin de reducir la concentración de tensiones, la parte exterior del barreno cuenta con un redondeo. Esta característica mejora la distribución de cargas al reducir las tensiones localizadas en las esquinas. Para que la disipación de esfuerzos sea efectiva, el radio del redondeo debe ser adecuado en relación al diámetro del barreno, preferiblemente de al menos un 10-20 % del diámetro. Además, los redondeos en las esquinas vivas de la carcasa no solo facilitan la impresión 3D, reduciendo la posibilidad de deformaciones durante la fabricación, sino que también previenen accidentes o cortes durante la manipulación.

Para facilitar el movimiento rotatorio y garantizar la alineación precisa del eje, se incorporaron rodamientos en la estructura. Estos elementos reducen la fricción y evitan el balanceo del eje insertado en el barreno, contribuyendo a un desplazamiento más suave y

estable. Aunque el robot no opera bajo condiciones cíclicas ni de alta velocidad (RPM), los rodamientos seleccionados deben ser capaces de soportar la carga generada por el peso y el esfuerzo del brazo sin deformarse ni perder precisión.

En el diseño del robot de rehabilitación, se optó por utilizar rodamientos de bolas con brida PGN de $3/4'' \times 1-3/8''$ para soportar el eje que atraviesa el barreno central de la carcasa. La elección de este tipo de rodamiento se basó en las siguientes consideraciones técnicas:

- **Dimensiones adecuadas:** El diámetro interno de $3/4''$ (19.05 mm) permite un ajuste preciso con el eje, evitando juegos laterales o desalineaciones. El diámetro externo de $1-3/8''$ (34.93 mm) proporciona una superficie de contacto suficiente para distribuir la carga de manera estable.
- **Brida integrada:** La brida facilita el montaje y mejora la estabilidad, ya que evita desplazamientos axiales no deseados, lo que es esencial para mantener la precisión del movimiento rotatorio durante la rehabilitación.
- **Resistencia a contaminantes:** Estos rodamientos cuentan con sellado, lo que los protege contra la entrada de polvo y humedad. Esta característica mejora la durabilidad del sistema, especialmente en un entorno de uso continuo.
- **Fricción reducida:** Los rodamientos de bolas disminuyen la fricción durante el movimiento del eje, facilitando un desplazamiento más suave y uniforme, lo que contribuye a la comodidad del usuario durante la terapia.

Para determinar si los rodamientos elegidos son suficientes para soportar la carga generada por el movimiento del brazo, se consideraron las siguientes fuerzas:

- **Peso del brazo humano:** El brazo de un adulto tiene un peso aproximado del 5-6 % del peso corporal total. Para un paciente de 70 kg (como referencia), esto equivale a aproximadamente 3.5-4.2 kgf ($\sim 35 - 42$ N).
- **Fuerza generada durante la rehabilitación:** Durante los movimientos de pronosupinación y flexoextensión, la fuerza aplicada puede ser mayor, considerando la resistencia del usuario y el posible uso de ligas o bandas elásticas. Se estima que la carga máxima podría alcanzar entre 50 N y 80 N, incluyendo las fuerzas dinámicas.

Los rodamientos PGN utilizados tienen una capacidad típica de carga estática y dinámica que supera ampliamente estas fuerzas, ya que están diseñados para soportar aplicaciones industriales ligeras. Por lo tanto:

- **Capacidad de carga estática:** 408 kg, suficiente para soportar la fuerza generada por el brazo sin deformarse ni perder precisión.
- **Capacidad de carga dinámica:** 703 kg, adecuada para soportar movimientos repetitivos de baja velocidad durante la rehabilitación sin un desgaste significativo.

La elección de los rodamientos PGN con brida resulta adecuada para esta aplicación debido a:

- Su capacidad de carga, que supera la fuerza generada por el peso y el esfuerzo del brazo humano.
- Su brida integrada, que proporciona un montaje más estable y seguro.
- Su sellado, que garantiza protección contra contaminantes, prolongando la vida útil del sistema.
- La reducción de fricción, que facilita el movimiento fluido del eje, esencial para la rehabilitación.

El esfuerzo (σ) se calcula como la fuerza F dividida entre el área A sobre la cual actúa la fuerza:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

- $F = 40 \text{ N}$ es la fuerza aplicada aproximada unicamente del brazo.
- $A = 632,44 \text{ mm}^2 = 632,44 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ es el área en la que se distribuirá inicialmente la carga.

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{40}{632,44 \times 10^{-6}} = \frac{40}{0,00063244} = 63,300 \text{ Pa} = 0,0633 \text{ MPa}$$

El esfuerzo es $\sigma = 0,0633 \text{ MPa}$. La resistencia a la tracción del PLA es de 57.3 MPa , lo que indica que el esfuerzo experimentado es mucho menor que la resistencia del material.

4.3.3. Soportes

En el diseño de los soportes (ver Figura 4.4) para los motores conectados a las ruedas, se adoptó una geometría triangular con un soporte angulado. Esta geometría sencilla está diseñada para transferir eficientemente la carga hacia las ruedas, además de fijar y estabilizar los motores.”

Para el diseño del soporte, es necesario conocer las especificaciones del motor a utilizar. En este caso, se empleará el motor 9.7:1 Metal Gearmotor de Pololu, modelo 25Dx63L mm LP 12V (número de modelo # 4882), disponible en su página web.

Este motor cuenta con un torque máximo de $1,3 \text{ kg}\cdot\text{cm}$, que equivale a:

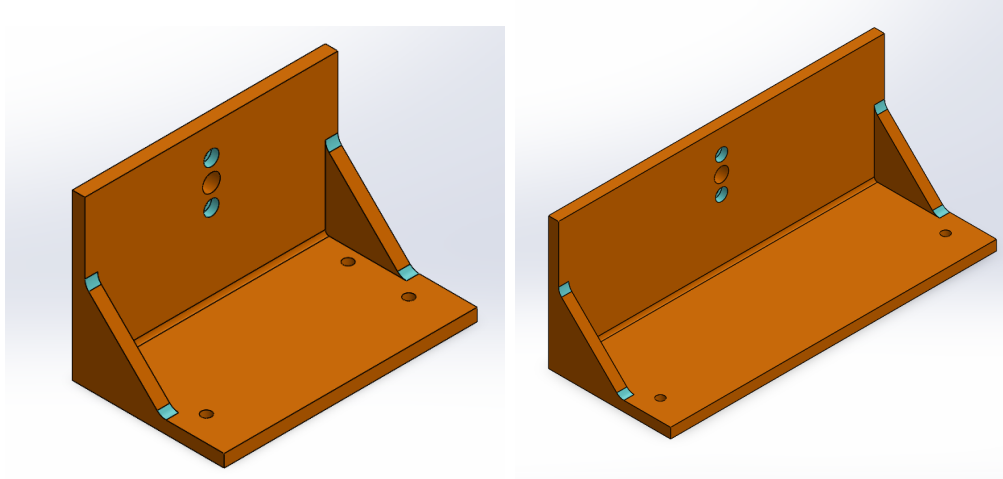
$$M = 1,3 \times 0,0981 = 0,12753 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (4.10)$$

El eje del motor tiene un diámetro de 4 mm , lo que implica un radio de:

$$r = \frac{4}{2} = 2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m} \quad (4.11)$$

La fuerza generada por el motor debido al torque se calcula utilizando la fórmula:

$$F = \frac{M}{r} \quad (4.12)$$



(a) Soporte 1 y 2

(b) Soporte 3

Figura 4.4: Soportes

Sustituyendo los valores:

$$F = \frac{0,12753}{0,002} = 63,77 \text{ N} \quad (4.13)$$

Esta es la fuerza que actúa sobre el soporte del motor.

El motor está fijado al soporte mediante tornillos. Para determinar el esfuerzo ejercido en los tornillos, se considera el área de contacto de los mismos.

El área de contacto de cada tornillo se obtuvo de Solidworks:

$$A = 1,885 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (4.14)$$

El esfuerzo aplicado a cada tornillo, suponiendo que la fuerza se distribuye uniformemente, se obtiene mediante la fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.15)$$

Sustituyendo los valores:

$$\sigma = \frac{63,77}{1,885 \times 10^{-5}} = 3,38 \times 10^6 \text{ Pa} = 3,38 \text{ MPa} \quad (4.16)$$

Por lo tanto, el motor genera un esfuerzo aproximado de 3,38 MPa en cada tornillo.

El PLA tiene una resistencia a la tracción típica en el rango de:

$$\sigma_{\text{tracción}} = 40 - 60 \text{ MPa} \quad (4.17)$$

Para este análisis, se toma un valor promedio conservador de:

$$\sigma_{\text{tracción}} = 50 \text{ MPa} \quad (4.18)$$

El esfuerzo calculado en los tornillos es:

$$\sigma = 3,38 \text{ MPa} \quad (4.19)$$

Dado que el esfuerzo generado es significativamente menor que la resistencia del PLA, el soporte sí resistirá la carga generada por el motor bajo condiciones normales de funcionamiento.

Aunque el esfuerzo aplicado no supera la resistencia del PLA, es importante tener en cuenta factores como la orientación de impresión y la calidad del relleno, ya que el PLA es anisotrópico. Para garantizar la resistencia adecuada, se recomienda:

- Utilizar un relleno de al menos 80 % o preferiblemente 100 %.
- Aumentar la cantidad de perímetros para reforzar las zonas sometidas a carga.
- Orientar la impresión de manera que las capas no queden perpendiculares a la dirección del esfuerzo.

Esfuerzos de flexión

Carga por soporte:

$$F_{\text{soporte}} = \frac{117,72 \text{ N}}{3} = 39,24 \text{ N}.$$

Soporte 1 y 2

La placa horizontal fue analizada considerando una carga distribuida de 39,24 N sobre una longitud de 60 mm, lo que equivale a:

Carga distribuida equivalente:

$$q = \frac{39,24 \text{ N}}{60 \text{ mm}} = 0,654 \text{ N mm}^{-1}$$

Momento flector máximo:

Al tratarse de una viga empotrada con carga uniformemente distribuida, el momento flector máximo se calcula como:

$$M = \frac{q \cdot L^2}{12} = \frac{0,654 \cdot 60^2}{12} = 196,2 \text{ N mm}$$

Propiedades geométricas de la sección transversal:

Para una sección rectangular de base $b = 100 \text{ mm}$ y altura $h = 5 \text{ mm}$:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{100 \cdot 5^3}{12} = 1041,67 \text{ mm}^4, \quad c = \frac{h}{2} = 2,5 \text{ mm}$$

Esfuerzo máximo por flexión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{196,2 \cdot 2,5}{1041,67} = 0,471 \text{ MPa}$$

Soporte 3

Carga distribuida equivalente:

$$q = \frac{F}{L} = \frac{39,24 \text{ N}}{60 \text{ mm}} = 0,654 \text{ N mm}^{-1}$$

Momento flector máximo:

$$M_{\text{máx}} = \frac{q \cdot L^2}{12} = \frac{0,654 \cdot 60^2}{12} = 196,2 \text{ N mm}$$

Propiedades geométricas de la sección transversal:

Para una sección rectangular con ancho $b = 160 \text{ mm}$ y espesor $h = 5 \text{ mm}$, se tiene:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{160 \cdot 5^3}{12} = 1666,67 \text{ mm}^4$$
$$c = \frac{h}{2} = 2,5 \text{ mm}$$

Esfuerzo máximo por flexión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{196,2 \cdot 2,5}{1666,67} = 0,294 \text{ MPa}$$

4.3.4. Base rotativa superior pasiva

La base rotativa superior pasiva se diseñó con el propósito de permitir la rotación del brazo, además de soportar los elementos superiores del robot, en los cuales reposarán el brazo y la mano. Esta base estará compuesta por tres elementos diferentes que se analizarán para determinar si son capaces de resistir los esfuerzos generados por las cargas a las que estarán sometidos.

Parte 1.

El análisis comenzará con la primera parte de la base rotativa superior pasiva (Figura 4.5), la cual estará sometida a la mayor carga, ya que es donde el brazo ejercerá la mayor presión y de donde emerge el eje que conecta con la carcasa.

Esta pieza fue diseñada con una estructura robusta para garantizar que no presente fallas al recibir la carga del brazo. Aunque previamente se comprobó, en el análisis de la carcasa, que el PLA con un grosor de 5 mm es capaz de resistir dicha carga, en esta parte se verificará nuevamente, ahora considerando un grosor de 7 mm para asegurar una mayor resistencia estructural.

Cálculo del esfuerzo por flexión en el canal central

Se modeló el canal central como una viga en voladizo, apoyada sobre el eje mediante un rodamiento, con una carga puntual de 40 N aplicada a una distancia de 182,5 mm desde el eje. El ancho del canal se consideró como $b = 22 \text{ mm}$, y el espesor efectivo en la zona crítica es $h = 7 \text{ mm}$.

Momento flector máximo:

$$M = F \cdot L = 40 \cdot 182,5 = 7300 \text{ N mm}$$

Momento de inercia:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{22 \cdot 7^3}{12} = 6284,17 \text{ mm}^4, \quad c = \frac{h}{2} = 3,5 \text{ mm}$$

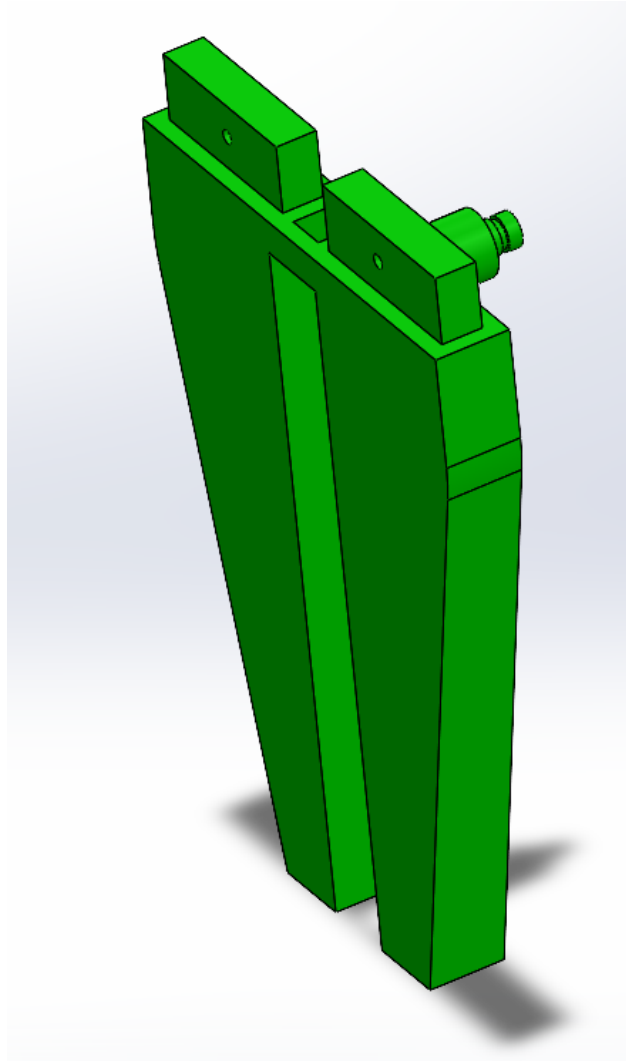


Figura 4.5: Parte 1 de la base rotativa superior pasiva

Esfuerzo máximo:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{7300 \cdot 3,5}{6284,17} = 4,07 \text{ MPa}$$

Este esfuerzo se presenta en la fibra extrema del cuello del canal, en la zona de transición hacia el eje, y puede considerarse como el punto crítico para evaluación estructural.

Partes 2 y 3.

Inicialmente, el diseño consistía en un único componente en lugar de dos. Sin embargo, debido a la necesidad de incluir un conducto interno para el paso de los cables provenientes del joystick, se optó por dividir la pieza en dos partes, facilitando así el montaje y el tendido del cableado.

Para la parte 2 de la base rotativa superior pasiva, se hará uso de un rodamiento en el cual se insertará un eje que permitirá el movimiento de pronosupinación, el rodamiento elegido para este movimiento es Xike modelo ID0.500 con las siguientes especificaciones:

- **Dimensiones:**

- Diámetro interno: 1/2 pulgada (12.7 mm).
- Diámetro externo: 1 3/8 de pulgada (34.925 mm).
- Grosor: 1/2 pulgada (12.7 mm).

- **Capacidad de carga estática:** 1100 lbs (4.89 kN).

- **Capacidad de carga dinámica:** 1700 lbs (7.56 kN).

Al igual que en el criterio de selección de los rodamientos para el eje de la carcasa móvil, se realizó una comparación con la carga a la que estará sometido el rodamiento. En este caso, la carga corresponde al peso promedio de un brazo humano, estimado en aproximadamente 4 kg, equivalente a alrededor de 40 N.

El rodamiento seleccionado supera ampliamente esta carga, ya que su capacidad de carga estática es de 4.89 kN, lo que garantiza un margen de seguridad considerable.

Además, el rodamiento estará sometido a cargas dinámicas durante el movimiento de pronosupinación. Sin embargo, estas cargas no superarán los 40 N, ya que el mecanismo no estará motorizado y la única fuerza aplicada corresponderá al peso del brazo. Aunque esta parte del robot está diseñada principalmente para soportar la mano, cuenta con la capacidad estructural para resistir el peso del brazo completo sin riesgo de falla.

La brida integrada del rodamiento facilita un montaje más preciso y seguro, ya que mejora la adherencia con la superficie plana de contacto y proporciona una mayor estabilidad estructural al conjunto.

Por otro lado, se realizará un análisis estructural de la unión entre ambas piezas (véase Figura 4.6), ya que no interactuarán de manera independiente con las fuerzas aplicadas. Desde el ensamblaje inicial, ambas partes permanecerán unidas de forma permanente, por lo que resulta más representativo considerarlas como un cuerpo único.

En particular, el estudio se enfocará en la zona redondeada de transición, ya que se espera que en dicha región se presenten las mayores concentraciones de esfuerzo debido a la geometría y la transmisión de carga.

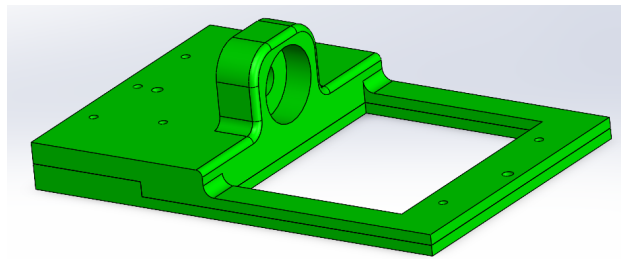


Figura 4.6: Unión de las partes 2 y 3 de la base rotativa superior pasiva

Datos del Problema

- **Material:** PLA (Ácido Poliláctico)

- Resistencia a tracción (σ_{uts}): 50 MPa
- Límite elástico (σ_y): 45 MPa

■ **Geometría:**

- Largo: $L = 207 \text{ mm}$
- Altura mayor: $h_1 = 22 \text{ mm}$
- Altura menor: $h_2 = 10 \text{ mm}$
- Radio del redondeo: $r = 5 \text{ mm}$
- Grosor: $t = 140 \text{ mm}$

■ **Carga aplicada:**

- Fuerza (F): 60 N

Cálculos Mecánicos

La carga total de 60 N se encuentra distribuida sobre una longitud de 25 mm , comenzando a 182 mm del soporte. Se idealizó como una carga puntual aplicada en el centro de ese tramo ($194,5 \text{ mm}$).

Momento Flector

$$M = F \cdot d = 60 \cdot 194,5 = 11\,670 \text{ N mm}$$

Momento de Inercia

$$I = \frac{t \cdot h_2^3}{12} = \frac{140 \cdot 10^3}{12} = 11\,666,7 \text{ mm}^4$$

Distancia desde el eje neutro

$$c = \frac{h_2}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ mm}$$

Tensión Nominal

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{11670 \times 5}{11666,7} = 5,00 \text{ MPa}$$

Factor de Concentración de Tensiones (K_t) [70] Para un escalón con radio $r = 5 \text{ mm}$ y relación $\frac{h_1}{h_2} = 2,2$:

$$A = 0,927296$$

$$b = -0,309098$$

$$K_t \cong A \cdot \left(\frac{r}{h_2}\right)^b = 0,927296 \cdot \left(\frac{5}{10}\right)^{-0,309098} \cong 1,1488$$

Tensión Máxima

$$\sigma_{\text{max}} = K_t \times \sigma_{\text{nom}} = 1,1488 \times 5 \approx 5,744 \text{ MPa}$$

Con los cálculos realizados, se concluye que esta pieza es capaz de soportar los esfuerzos que puedan surgir durante su uso, incluso aquellos para los que no está específicamente diseñada, como la evaluación del momento flector en las partes 2 y 3. Sin embargo, considerando que dicha situación podría llegar a presentarse, el diseño sigue siendo seguro.

4.3.5. Guía

Inicialmente, esta pieza consistía en un componente comercial previamente elaborado. Sin embargo, debido a que se planea que la mayor parte del robot sea fabricada mediante manufactura aditiva, se diseñó una pieza personalizada que funcione como canal para el paso de cables y que además permita ajustar las dimensiones a los diferentes tamaños del miembro superior.

Esta pieza estará sometida a una parte significativa de la carga del brazo. Aunque dicha carga se comparte con la base rotativa superior pasiva, para efectos de diseño se considerará una fuerza efectiva equivalente a aproximadamente la mitad de la carga total aplicada, representando el peso que es transmitido directamente a la guía.

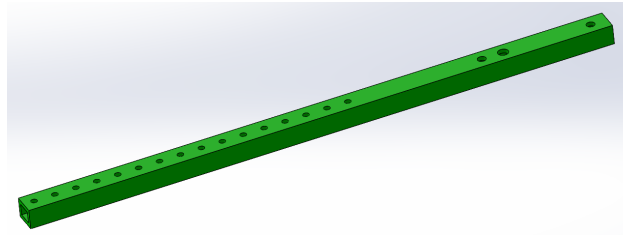


Figura 4.7: Guía

Datos Técnicos

- **Material:** PLA
 - Resistencia a tracción: 50 MPa a 70 MPa
- **Carga total del brazo:** 39,24 N
- **Carga efectiva considerada:**

$$F_{\text{diseño}} = \frac{39,24 \text{ N}}{2} = 19,62 \text{ N}$$

Área Resistente

La sección transversal puede aproximarse con un área externa bruta de $109,25 \text{ mm}^2$. Aunque la pieza contiene múltiples barrenos de 3 mm, su separación evita que dos perforaciones afecten simultáneamente la misma sección transversal. Por tanto, el área resistente efectiva coincide con el área bruta:

$$A_{\text{ef}} = 109,25 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo Nominal en la Guía

El esfuerzo normal promedio generado por la carga efectiva es:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F_{\text{diseño}}}{A_{\text{ef}}}$$
$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{19,62 \text{ N}}{109,25 \text{ mm}^2} = 0,1796 \text{ MPa} \approx 0,18 \text{ MPa}$$

Este valor representa el esfuerzo normal promedio en las paredes de la guía.

Separación de barrenos

Según la norma ASME B31.3 (diseño de tuberías, aplicable a elementos perforados), la separación mínima entre centros debe cumplir:

$$s_{\text{mín}} \geq 2d$$

Para barrenos de 3 mm, la distancia mínima requerida es:

$$s_{\text{mín}} = 2 \times 3 \text{ mm} = 6 \text{ mm}$$

La guía posee separaciones de 10 mm entre centros (o 7 mm entre bordes), por lo que:

$$6 \text{ mm} \leq 7 \text{ mm}$$

De esta forma se asegura que las zonas debilitadas no se superponen y que cada perforación actúa de manera independiente, preservando el área resistente empleada en el cálculo.

4.3.6. Desplazador

Esta pieza (ver Figura 4.8) se encarga de transmitir la carga al resto del robot y, además, soporta el brazo. Su nombre viene del hecho de que permite ajustarse a las diferentes medidas del brazo de cada persona, lo que la hace esencial para que el robot pueda adaptarse a distintos usuarios sin necesidad de modificaciones complejas.

Además de su función estructural, esta pieza debe ser cómoda para apoyar el antebrazo. Por eso, tiene una forma curva que sigue la anatomía natural del brazo, lo que mejora la ergonomía y evita molestias durante su uso prolongado. Para aumentar la comodidad, la superficie debe cubrirse con un material adecuado para el contacto, como espuma viscoelástica o silicona, que distribuyen la presión de forma uniforme. Estos materiales pueden forrarse con un textil acolchado para ofrecer un acabado suave, reducir la fricción y evitar posibles irritaciones en la piel.

Por último, esta pieza también tiene un papel clave en la distribución de esfuerzos, ya que, aunque la base rotativa superior pasiva soporta parte de la carga, esta estructura absorbe la mayor parte del peso del brazo. Por ello, su diseño debe garantizar la resistencia necesaria para soportar las fuerzas aplicadas sin deformarse ni comprometer la estabilidad del robot.

Cálculo del esfuerzo por flexión en la columna lateral

Se evaluará el esfuerzo máximo por flexión en la columna lateral de la base curva. La carga total aplicada sobre la superficie curva es de 40 N, distribuida simétricamente, por lo que cada lado recibe 20 N.

Geometría de la columna lateral

- Altura de la columna: $L = 26 \text{ mm}$
- Ancho de la sección: $b = 6 \text{ mm}$
- Espesor (altura de la sección): $h = 9,92 \text{ mm}$
- Radio del filete: $R = 10 \text{ mm}$

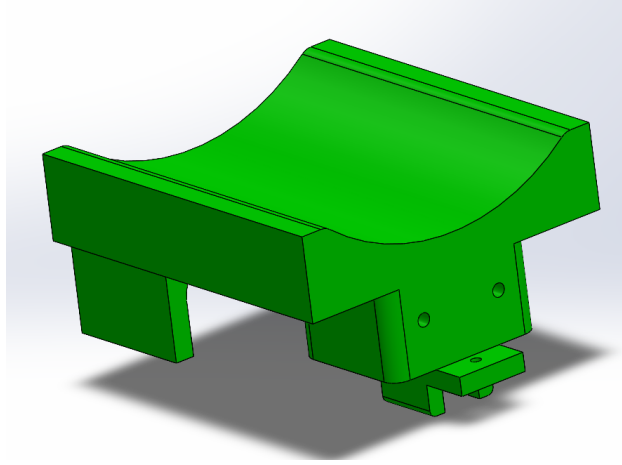


Figura 4.8: Desplazador

El refuerzo diagonal transmite parte de la carga hacia la base, reduciendo el momento en la columna vertical. Se asume una distribución del 50 % de la carga en la columna:

$$F = \frac{20 \text{ N}}{2} = 10 \text{ N}$$

$$M = F \cdot L = 10 \text{ N} \cdot 26 \text{ mm} = 260 \text{ N mm}$$

$$c = \frac{h}{2} = \frac{9,92}{2} = 4,96 \text{ mm}$$

Momento de inercia compuesto

- Rectángulo:

$$I_r = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{6 \cdot (9,92)^3}{12} = 487,67 \text{ mm}^4$$

- Redondeo (cuarto de círculo, aproximado):

$$I_f = 0,055 \cdot R^4 = 0,055 \cdot (10)^4 = 550 \text{ mm}^4$$

- Total:

$$I_{\text{total}} = I_r + I_f = 1037,67 \text{ mm}^4$$

Esfuerzo máximo (modelo conservador)

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M \cdot c}{I_{\text{total}}} = \frac{260 \cdot 4,96}{1037,67} \approx 1,24 \text{ MPa}$$

Modelo analítico realista mediante rigideces equivalentes en paralelo

Con el fin de obtener una estimación más precisa del esfuerzo real en la columna lateral, se desarrolló un modelo basado en la rigidez relativa de los elementos que participan en la transmisión de carga: la columna lateral y el refuerzo diagonal. Este último trabaja principalmente a compresión y posee una rigidez considerablemente mayor.

A partir del modelo CAD se midieron las siguientes dimensiones:

$$t = 15 \text{ mm}, \quad h = 25,5 \text{ mm}, \quad L_d = 33,7 \text{ mm}$$

El área de la sección es:

$$A = t h = 382,5 \text{ mm}^2$$

La rigidez axial del refuerzo es:

$$k_d = \frac{AE}{L_d} = \frac{382,5 \times 1800}{33,7} = 20435 \text{ N/mm}$$

La columna se modela como una viga empotrada-libre de longitud $L = 26 \text{ mm}$:

$$k_c = \frac{3EI}{L^3}$$

$$k_c = \frac{3(1800)(1037,67)}{26^3} = 318,8 \text{ N/mm}$$

La rigidez total es:

$$k_{\text{total}} = k_d + k_c = 20435 + 318,8 = 20753,8 \text{ N/mm}$$

La fracción de carga que realmente se transmite a la columna es:

$$\phi_c = \frac{k_c}{k_{\text{total}}} = \frac{318,8}{20753,8} = 0,0154$$

Dado que el desplazador recibe 20 N por lado, la carga efectiva que baja por la columna es:

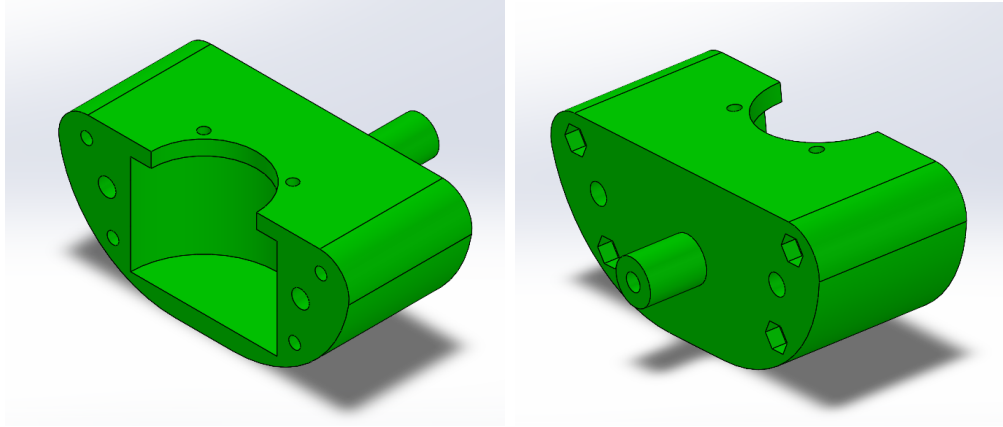
$$F_{\text{col}} = \phi_c \cdot 20 = 0,307 \text{ N}$$

Momento y esfuerzo real en la columna:

$$M_{\text{real}} = F_{\text{col}} L = 0,307 \times 26 = 7,99 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$c = \frac{h}{2} = \frac{9,92}{2} = 4,96 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{real}} = \frac{M_{\text{real}} c}{I_{\text{total}}} = \frac{7,99 \times 4,96}{1037,67} \approx 0,038 \text{ MPa}$$



(a) Pronosupinador parte 1

(b) Pronosupinador parte 2

Figura 4.9: Partes del pronosupinador

4.3.7. Pronosupinador

Este elemento es uno de los principales para el funcionamiento del robot. El pronosupinador está dividido en dos partes debido a que, en su interior, debe colocarse el joystick encargado de controlar el movimiento. Para facilitar el armado y el mantenimiento, se optó por dividir la pieza en dos secciones. Además, esta estructura recibirá la carga de la mano, tanto estática como dinámica.

El diseño de este componente incluye el uso de 4 tornillos que atraviesan axialmente la estructura, proporcionando rigidez y estabilidad. Adicionalmente, cada pieza contará con 2 tornillos laterales que ajustarán el joystick dentro de la cavidad, asegurando su fijación.

Para evitar giros no deseados durante el uso, el pronosupinador contará con 2 ejes que lo atravesarán por completo, garantizando que el movimiento rotatorio solo ocurra cuando sea intencionado.

Se analizará como una viga simplemente apoyada, sometida a una carga vertical distribuida de forma uniforme. El esfuerzo máximo se calculará aplicando también un factor de concentración de esfuerzos, debido al cambio brusco de sección donde inicia el eje, sin presencia de un radio.

Datos geométricos y de carga

- Fuerza total aplicada: $F = 40 \text{ N}$
- Longitud entre apoyos: $L = 84 \text{ mm}$
- Carga distribuida: $q = \frac{F}{L} = \frac{40}{84} = 0,476 \text{ N mm}^{-1}$
- Distancia del eje neutro a la fibra extrema: $c = 22,5 \text{ mm}$
- Momento de inercia (obtenido desde SolidWorks): $I_x = 321\,213,75 \text{ mm}^4$
- Factor de concentración de esfuerzos: $K_t = 3$

Momento flector máximo

La fórmula para el momento flector máximo en una viga simplemente apoyada bajo carga distribuida es:

$$M_{\text{máx}} = \frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{0,476 \cdot (84)^2}{8} = 419,14 \text{ N mm}$$

Esfuerzo máximo por flexión (sin concentración)

$$\sigma_{\text{teórico}} = \frac{M \cdot c}{I_x} = \frac{419,14 \cdot 22,5}{321213,75} = 0,0294 \text{ MPa}$$

Esfuerzo máximo real con concentración de esfuerzos

Dado que existe un cambio brusco de sección sin filete, se aplica un factor de concentración $K_t = 3$:

$$\sigma_{\text{real}} = K_t \cdot \sigma_{\text{teórico}} = 3 \cdot 0,0294 = 0,0883 \text{ MPa}$$

Se puede observar que la pieza es capaz de soportar la carga. Cabe recalcar que el peso de la mano equivale aproximadamente al 5 - 7 % del peso total del brazo, por lo que, en la práctica, la carga real será significativamente menor que la evaluada en este análisis.

La contraparte de esta pieza se incluye en el análisis realizado previamente, dado que presenta el mismo comportamiento y condiciones que la pieza analizada anteriormente.

4.3.8. Soporte para pronosupinador

La siguiente pieza fue diseñada con el objetivo de reducir la carga sobre el eje contrario. En el diseño inicial, el pronosupinador estaba conectado a la base rotativa superior pasiva únicamente por un lado. Sin embargo, este diseño presentaba un factor de seguridad muy bajo, con un alto riesgo de falla por cortante.

Por esta razón, se desarrolló el soporte mostrado en la Figura 4.10, el cual permite que el pronosupinador esté conectado por ambos lados, distribuyendo la carga de manera más uniforme y evitando que un solo eje soporte todo el esfuerzo. El propósito principal de este soporte es prevenir el pandeo del eje contrario y garantizar una correcta alineación del sistema.

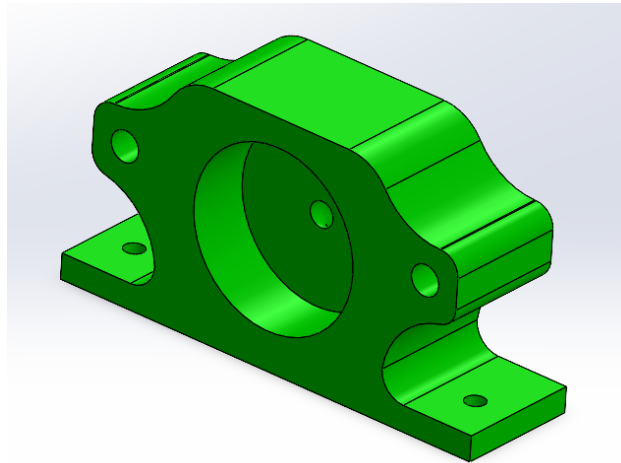


Figura 4.10: Soporte para pronosupinador

Este soporte no está diseñado para recibir una carga significativa directamente sobre su superficie. Sin embargo, sí estará sometido a una carga axial derivada del eje conectado al rodamiento alojado en su interior.

- Fuerza: $F = 40 \text{ N}$
- Diámetro interior del alojamiento: $d = 1,375 \text{ in} = 34,925 \text{ mm}$
- Profundidad del rodamiento en el alojamiento: $h = 9 \text{ mm}$

Se asume que la fuerza se distribuye uniformemente sobre la mitad del perímetro interno del alojamiento (semicilindro):

$$A = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d \cdot h = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 34,925 \cdot 9 = 493,3 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{40}{493,3} = 0,0811 \text{ MPa}$$

4.3.9. Seguro

Este es un elemento simple dentro del robot, pero con un objetivo importante: impedir la rotación del pronosupinador cuando no se desee utilizar este movimiento. El seguro atravesará tanto el soporte del pronosupinador como el propio pronosupinador, garantizando que permanezca fijo.

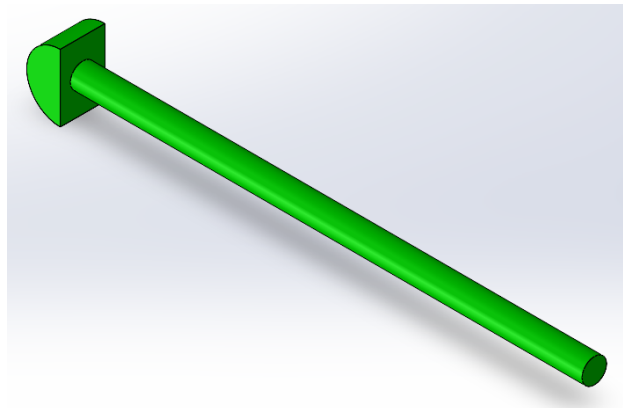


Figura 4.11: Seguro

Datos

- Diámetro del eje: $d = 6 \text{ mm}$
- Longitud del brazo de momento: $L = 5 \text{ mm}$
- Esfuerzo cortante admisible del PLA: $\tau_{\text{máx}} = 35 \text{ MPa}$
- Fuerza aplicada: $F = 20 \text{ N}$

Como peor caso, se asume inicialmente que toda la fuerza vertical aplicada sobre el pronosupinador ($F = 20$ N) se transmite completamente a través del seguro, trabajando en un solo plano de cortante. El área de la sección transversal del eje de diámetro $d = 6$ mm es:

$$A_{\text{seguro}} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(6)^2}{4} = 28,27 \text{ mm}^2.$$

El esfuerzo cortante conservador se obtiene como:

$$\tau_{\text{simple}} = \frac{F}{A_{\text{seguro}}} = \frac{20}{28,27} = 0,707 \text{ MPa}.$$

Este valor es considerablemente menor que el esfuerzo cortante admisible del PLA ($\tau_{\text{adm}} \approx 30$ MPa), por lo que incluso bajo esta hipótesis extrema el seguro es estructuralmente seguro.

En la configuración real, la mayor parte de la carga vertical se transmite a través de las superficies de apoyo del pronosupinador sobre el soporte, mientras que el seguro sólo absorbe una fracción mínima. La rigidez de cada camino de carga puede aproximarse como proporcional al área de contacto, por lo que la fracción de carga que pasa por el seguro viene dada por:

$$\phi_c = \frac{A_{\text{seguro}}}{A_{\text{seguro}} + A_{\text{apoyos}}}.$$

El área de apoyo se obtuvo directamente desde SolidWorks, seleccionando la superficie de contacto del soporte, obteniéndose:

$$A_{\text{apoyos}} = 471,24 \text{ mm}^2.$$

Sustituyendo:

$$\phi_c = \frac{28,27}{28,27 + 471,24} = \frac{28,27}{499,51} = 0,0566.$$

La carga real que actúa sobre el seguro es entonces:

$$F_{\text{ef}} = \phi_c F = 0,0566 \times 20 = 1,13 \text{ N}.$$

El esfuerzo cortante realista resulta:

$$\tau_{\text{real}} = \frac{F_{\text{ef}}}{A_{\text{seguro}}} = \frac{1,13}{28,27} = 0,0399 \text{ MPa}.$$

Verificación a torsión

El seguro podría estar sometido a un momento torsional debido a los intentos de giro del pronosupinador. Para un eje de sección circular maciza de diámetro $d = 6$ mm, el momento polar de inercia es

$$J = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi(6 \text{ mm})^4}{32} = 127,23 \text{ mm}^4,$$

mientras que el radio es $r = d/2 = 3$ mm. Tomando un esfuerzo cortante admisible conservador de

$$\tau_{\text{adm}} = 30 \text{ MPa},$$

el torque máximo permisible sin exceder dicho esfuerzo resulta

$$T_{\text{máx}} = \frac{\tau_{\text{adm}} J}{r} = \frac{30 \times 127,23}{3} \approx 1272 \text{ N}\cdot\text{mm}.$$

El brazo de palanca geométrico L se obtuvo a partir del modelo CAD como la distancia perpendicular entre la superficie interna del pronosupinador que hace tope contra el seguro y el centro del barreno. SolidWorks arrojó una distancia mínima de 15,17 mm desde la pared hasta la generatriz del agujero, por lo que el brazo de palanca total resulta

$$L = 15,17 + \frac{d}{2} = 15,17 + 3 = 18,17 \text{ mm}.$$

La fuerza tangencial máxima asociada al torque permisible es entonces

$$F_{\text{máx}} = \frac{T_{\text{máx}}}{L} = \frac{1272}{18,17} \approx 70,0 \text{ N}.$$

4.3.10. Picaporte

El diseño de esta pieza se inspiró en el mecanismo de los picaportes utilizados en las puertas. Inicialmente, se consideró la posibilidad de emplear un picaporte comercial; sin embargo, como se mencionó en apartados previos, el objetivo final de este proyecto es que la mayor parte del robot se fabrique mediante manufactura aditiva, por lo que se optó por diseñar esta pieza específicamente para el sistema.

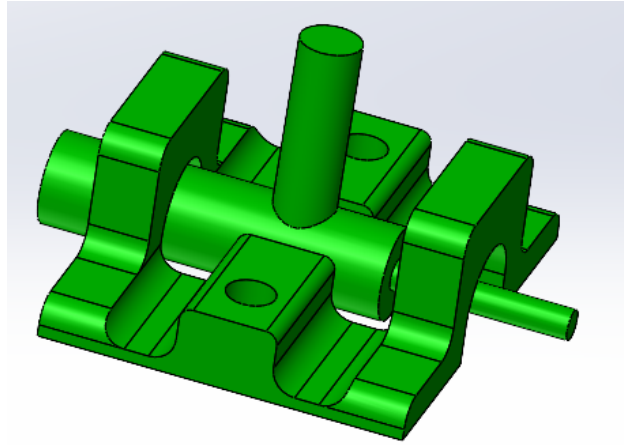


Figura 4.12: Ensamble de picaporte

El picaporte (ver Figura 4.12) está compuesto por dos elementos: la pieza estática, que se atornilla al desplazador, y la pieza dinámica, que queda encerrada dentro de la primera. Esta segunda parte es la encargada de moverse verticalmente para insertarse en el barreno de la guía, evitando así el movimiento del desplazador y manteniendo el ajuste deseado.

La segunda pieza estará sometida a esfuerzos debido a su función mecánica. Dado el tamaño de los barrenos en la guía, existe un límite en el diámetro de esta pieza, determinado por las dimensiones de dichos barrenos. Por lo tanto, el cálculo se centrará en determinar la fuerza máxima que la pieza puede soportar antes de fallar por esfuerzo cortante.

Datos del Problema

- Material: PETG
- Resistencia al corte (τ_{adm}): 30 MPa (valor conservador)
- Diámetros:
 - Mayor (D): 7,5 mm
 - Menor (d): 2,5 mm
- Radio de empalme (r): 0,5 mm
- Factor de seguridad (FS): 2

Cálculo del Factor de Concentración de Esfuerzos (K_t)

Para calcular el factor de concentración de esfuerzos para un cambio de sección circular bajo carga cortante, seguimos estos pasos:

1. Cálculo de las relaciones geométricas:

$$\frac{D}{d} = \frac{7,5}{2,5} = 3$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0,5}{2,5} = 0,2$$

2. **Usar gráficos o fórmulas empíricas:** Para cambios de sección en cortante, el factor K_t puede estimarse mediante:

$$K_t = C_1 + C_2 \left(\frac{r}{d}\right) + C_3 \left(\frac{r}{d}\right)^2 + C_4 \left(\frac{r}{d}\right)^3$$

Donde los coeficientes para $D/d = 3$ son aproximadamente:

$$C_1 = 2,00$$

$$C_2 = -0,51$$

$$C_3 = 3,83$$

$$C_4 = -1,43$$

Sustituyendo:

$$K_t = 2,00 - 0,51(0,2) + 3,83(0,2)^2 - 1,43(0,2)^3 = 1,82$$

Área transversal crítica

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(2,5 \times 10^{-3})^2}{4} = 4,91 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Fuerza máxima teórica

$$F_{\max} = \tau_{adm} \times A = 30 \times 10^6 \times 4,91 \times 10^{-6} = 147,3 \text{ N } (\sim 15 \text{ kg})$$

Ajuste por concentración de esfuerzos

$$F_{\text{ajustada}} = \frac{F_{\text{max}}}{K_t} = \frac{147,3}{1,82} = 80,9 \text{ N } (\sim 8,25 \text{ kg})$$

Aplicación del factor de seguridad

$$F_{\text{segura}} = \frac{F_{\text{ajustada}}}{\text{FS}} = \frac{80,9}{2} = 40,45 \text{ N } (\sim 4,12 \text{ kg})$$

4.4. Resultados de simulaciones mediante método del elemento finito

Con el objetivo de validar los diseños estructurales de los componentes críticos del sistema, se llevaron a cabo simulaciones mediante el método de elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés). Estas simulaciones permiten analizar el comportamiento mecánico de las piezas bajo condiciones de carga específicas, proporcionando información detallada sobre la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles zonas de falla.

El análisis FEM fue realizado utilizando el software *SolidWorks Simulation*, considerando las condiciones de carga reales del sistema, así como los materiales utilizados en la fabricación de cada componente. Se aplicaron restricciones de acuerdo con los apoyos físicos del diseño y se evaluaron tanto esfuerzos normales como esfuerzos de flexión y corte. Los resultados obtenidos sirvieron como referencia para validar los cálculos analíticos previos y para optimizar el diseño mecánico de la estructura.

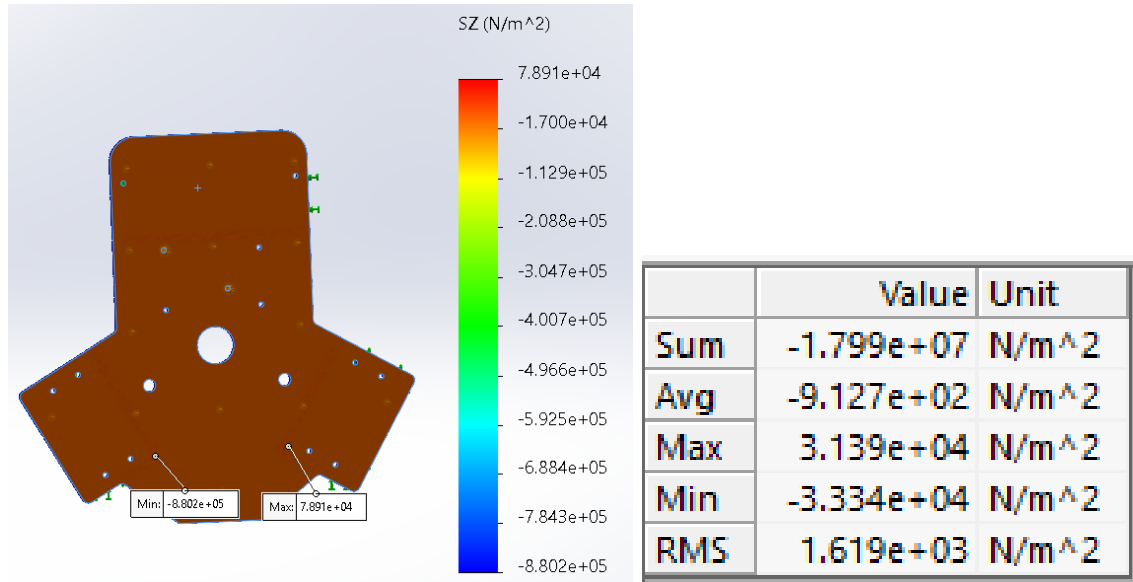
A continuación, se presentan los estudios realizados y los resultados obtenidos para las diferentes piezas que componen el sistema.

4.4.1. Base de MDF

Para validar estructuralmente la base de MDF, se realizó una simulación por el método de elementos finitos (FEM) en *SolidWorks*. Esta placa está sujeta a fuerzas distribuidas provenientes del peso y las reacciones de otros componentes montados sobre ella. El objetivo fue identificar el esfuerzo compresivo generado en la zona de contacto, específicamente en la dirección Z, correspondiente al eje vertical del modelo y donde se concentran las cargas transmitidas por el mecanismo superior.

En la simulación se aplicó una fuerza distribuida de 58.86 N sobre la cara superior de la placa, representando el contacto con la base del conjunto superior así como los electrónicos dispuestos en ella. Como condición de frontera, se utilizó una restricción fija (*fixed geometry*) en la zona inferior, simulando la fijación con los soportes. Para el mallado, se seleccionó una configuración estándar con tamaño global fino, correspondiente a 3.59 mm, asegurando una buena resolución en la geometría sin comprometer el tiempo de procesamiento.

Los resultados del análisis (Figura 4.13) muestran una distribución no uniforme de los esfuerzos, con un máximo de $7,891 \times 10^4 \text{ Pa}$ y un mínimo de $-8,802 \times 10^5 \text{ Pa}$. La magnitud y ubicación de estos valores indican que la base trabaja predominantemente a flexión, generando zonas sometidas tanto a tracción como a compresión alrededor del eje neutro.



(a) Distribución de esfuerzos en dirección Z sobre la base. (b) Valores promedio del esfuerzo sobre la superficie superior.

Figura 4.13: Análisis FEM de la base de MDF en dirección S_Z .

Por otro lado, el análisis manual permitió obtener dos estimaciones complementarias del esfuerzo aplicado sobre la base. La primera corresponde al esfuerzo promedio distribuido sobre toda la superficie de la placa, calculado como $\sigma_{\text{prom}} = 969,68 \text{ Pa}$. El promedio obtenido en la simulación FEM fue de $-912,7 \text{ Pa}$, donde el signo negativo indica compresión según la convención del software. La diferencia menor al 6 % valida la aproximación empleada para estimar la presión uniforme equivalente.

La segunda estimación corresponde al esfuerzo local generado en una zona puntual de transmisión de carga, considerando un diámetro efectivo de 9mm. Este modelo conservador arrojó un esfuerzo normal local de aproximadamente $\sigma_{\text{local}} \approx 0,925 \text{ MPa}$. Dicho valor refleja la concentración de carga cuando ésta se transmite a través de un área reducida, como ocurre en los puntos de fijación o contacto estructural.

En la simulación FEM, los valores extremos obtenidos en la dirección Z fueron de $-8,802 \times 10^5 \text{ Pa}$ (compresión) y $7,891 \times 10^4 \text{ Pa}$ (tracción). La magnitud del esfuerzo mínimo en FEM ($\approx 0,88 \text{ MPa}$) es coherente con el esfuerzo local calculado analíticamente, lo que confirma que la mayor parte de la carga se concentra en regiones específicas de apoyo y no sobre toda la superficie de la base.

A pesar de estas concentraciones locales, todos los esfuerzos obtenidos se encuentran muy por debajo de la resistencia típica del MDF ($\approx 20 \text{ MPa}$), por lo que la base opera con un margen de seguridad amplio bajo las condiciones de servicio previstas.

4.4.2. Carcasa

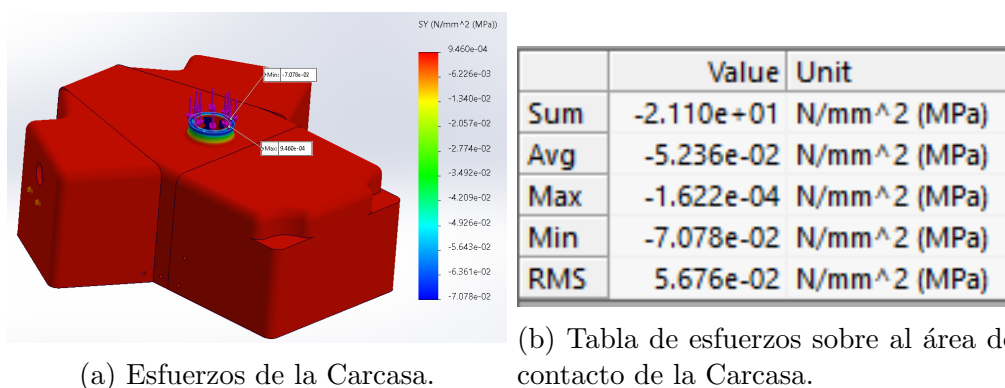
Para evaluar la resistencia de la carcasa del robot ante la fuerza vertical ejercida por el brazo del usuario, se aplicó una carga de 40 N distribuida sobre la cara superior de la

carcasa, la cual está diseñada para recibir el contacto directo del brazo del paciente.

En el entorno de simulación, se aplicaron condiciones de frontera específicas para emular el comportamiento real de la pieza dentro del ensamblaje: se utilizó una geometría fija en las cuatro bases inferiores, que están en contacto directo con la placa estructural de MDF, así como una condición tipo rodamiento en el barreno donde se inserta el cojinete que conecta con el eje de la base rotativa superior pasiva, lo que garantiza un anclaje realista en esa región.

El mallado fue del tipo combinado basado en curvatura, con un tamaño global fino de 3 mm, a fin de capturar con mayor fidelidad las concentraciones de esfuerzo en zonas críticas de la pieza.

El esfuerzo fue evaluado mediante el componente normal en el eje Y (S_Y), correspondiente a la dirección en la que actúa la compresión. Los resultados obtenidos (Figura 4.14), mostraron un esfuerzo mínimo de $-0,0767$ MPa, un valor máximo de $0,0025$ MPa y un esfuerzo promedio en la cara superior de $-0,0560$ MPa, medido a través de una herramienta de sonda (“sonda”) aplicada sobre la zona donde se ejerció la carga. El signo negativo indica que la fuerza aplicada es vertical descendente y genera un estado de compresión, lo cual es coherente con la carga aplicada en esta región.



(a) Esfuerzos de la Carcasa.

(b) Tabla de esfuerzos sobre al área de contacto de la Carcasa.

Figura 4.14: Análisis FEM Carcasa

Para obtener una referencia global del nivel de carga, se realizó un cálculo analítico simplificado utilizando la expresión

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde $F = 40$ N y el área efectiva de contacto es $A = 632.44$ mm². Este procedimiento produjo un esfuerzo promedio de 0.0633 MPa, el cual representa la presión global teórica transmitida a la zona del barreno.

La diferencia entre este valor teórico y el promedio obtenido mediante FEM se debe a que ambos modelos representan fenómenos distintos. El cálculo manual asume una distribución uniforme de carga sobre el área de contacto, mientras que el análisis por elementos finitos captura la flexión local, la geometría tridimensional de la carcasa y la manera real en que las cargas se transmiten a través del material. Por ello, los esfuerzos máximos y mínimos locales difieren del valor teórico promedio.

Aun así, ambos métodos coinciden en la conclusión fundamental: incluso los esfuerzos más altos obtenidos en FEM (del orden de 0.0025 MPa) son extremadamente bajos en comparación con la resistencia a la tracción del PLA (aprox. 57 MPa). Esto demuestra que la carcasa presenta un comportamiento estructural altamente seguro, operando muy por debajo del límite del material bajo las condiciones de carga previstas.

4.4.3. Soportes

Soportes 1 y 2.

Para el análisis estructural del Soporte 1 y 2 se aplicó una carga distribuida de 39,24 N sobre la cara superior de la pieza, en dirección vertical hacia abajo, representando el peso que transmite el mecanismo superior. Debido a que esta misma cara debía funcionar también como punto de fijación, los resultados arrojados con geometría fija convencional fueron inconsistentes. Por ello, se optó por utilizar la opción de alivio inercial (*inertial relief*), la cual permite simular el equilibrio de fuerzas sin necesidad de fijar de forma rígida ninguna superficie, distribuyendo internamente las reacciones necesarias para mantener la pieza en equilibrio.

El mallado se generó mediante el método de curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño global fino de 4 mm, lo cual mejora la detección de concentraciones de esfuerzo en zonas críticas.

Para la evaluación del esfuerzo se utilizó el componente S_X , ya que corresponde a la dirección longitudinal de la base del soporte, la cual actúa como una viga en voladizo. Este componente refleja los esfuerzos normales generados por flexión, lo que permite una comparación directa con el análisis manual.

En la simulación por elementos finitos (Figura 4.15), el esfuerzo máximo registrado fue de 0,3244 MPa, mientras que el esfuerzo mínimo fue de $-0,5587$ MPa, estos valores corresponden a la distribución típica de esfuerzos normales en flexión donde una cara trabaja a tracción y la opuesta a compresión.

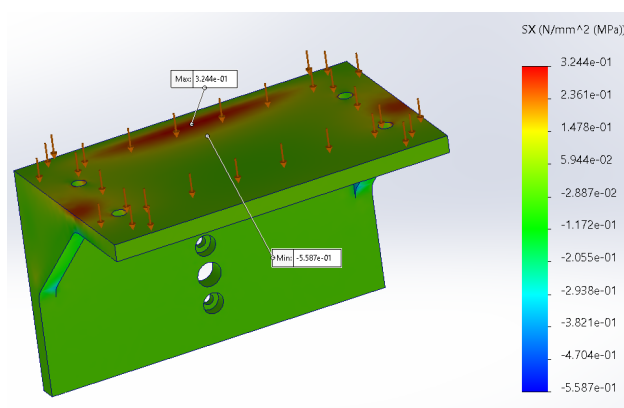


Figura 4.15: Esfuerzos de los soportes 1 y 2.

Por su parte, el análisis manual empleando el modelo adecuado de viga empotrada con carga distribuida, arrojó un esfuerzo máximo aproximado de 0,47 MPa. La diferencia entre ambos resultados se debe a las simplificaciones del modelo teórico (sección idealizada, apoyo

perfecto, ausencia de interacción entre placas) y al hecho de que la pieza real cuenta con costillas laterales, uniones rígidas y mayor rigidez tridimensional, lo cual reduce la magnitud de los esfuerzos obtenidos mediante FEM. Aun con estas diferencias, la tendencia del comportamiento estructural es coherente con la flexión esperada en una placa rígidamente unida a la base, por lo que el modelo numérico se considera consistente y adecuado para validar el análisis teórico.

Soporte 3. Para esta simulación se utilizó la opción de *alivio inercial* (inertial relief), debido a que la carga se aplica directamente sobre la cara superior de la pieza, región donde normalmente se definirían las condiciones de frontera. Cuando se aplicaban simultáneamente la carga distribuida y las restricciones en la misma cara, el modelo presentaba inconsistencias numéricas tales como desplazamientos excesivos no físicos, picos de esfuerzo localizados y mensajes del solver indicando un sistema insuficientemente restringido. Estas inconsistencias se originan porque la pieza queda matemáticamente libre para trasladarse o rotar, generando una matriz de rigidez singular y evitando que se establezca un equilibrio estático. Por ello, se optó por emplear el alivio inercial, el cual introduce fuerzas de inercia equivalentes que equilibran la carga aplicada y permiten obtener una distribución de esfuerzos físicamente coherente sin imponer restricciones irreales sobre la pieza.

Se aplicó una fuerza distribuida de 39,24 N sobre la cara superior del soporte, replicando las condiciones reales de carga durante la operación del robot. Para el mallado se seleccionó el método de curvatura combinada *blended curvature-based* con un tamaño global de malla de 4 mm, lo que permitió capturar de forma eficiente las concentraciones de esfuerzo sin incrementar significativamente el tiempo de cómputo.

El resultado de la simulación se visualizó mediante el componente de esfuerzo normal en la dirección X (SX), ya que el análisis manual se realizó considerando la flexión del soporte y este componente representa los esfuerzos longitudinales asociados a dicho fenómeno. La evaluación en este eje permite realizar una comparación directa entre el modelo analítico y el modelo numérico.

En la Figura 4.16 se observa que el esfuerzo máximo por flexión en la pieza alcanza aproximadamente 0,2999 MPa, mientras que el mínimo llega a $-0,4840$ MPa.

Comparando estos valores con el resultado obtenido analíticamente mediante el cálculo por flexión, cuyo valor máximo fue de 0,294 MPa, se observa una concordancia muy cercana entre ambos métodos. La ligera diferencia se atribuye a las idealizaciones empleadas en el modelo teórico (como la simplificación geométrica y la distribución uniforme de carga) y al hecho de que el análisis numérico captura con mayor detalle las variaciones locales de geometría y rigidez. Asimismo, el uso de alivio inercial suaviza las condiciones de frontera y permite que la carga se distribuya de forma más realista sobre toda la cara superior del soporte, lo cual genera pequeñas redistribuciones del esfuerzo sin afectar la validación global.

En conjunto, la similitud entre los resultados analíticos y numéricos confirma la validez del modelo teórico y respalda el diseño estructural del soporte.

4.4.4. Base rotativa superior pasiva

Parte 1.

La simulación de esta pieza se realizó aplicando una fuerza distribuida de 40 N sobre el extremo superior. Para restringir los desplazamientos, se utilizó una condición de frontera

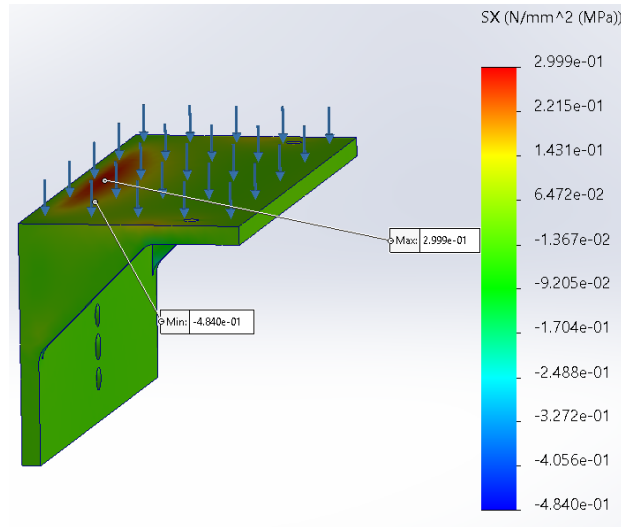


Figura 4.16: Esfuerzos del Soporte 3.

tipo rodillo/deslizador (*roller/slider*) en la zona del eje inferior, permitiendo así un desplazamiento controlado en ciertas direcciones y simulando con mayor realismo la interacción con la parte fija de la estructura.

El mallado aplicado fue de tipo método de curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño promedio, permitiendo capturar adecuadamente los gradientes de esfuerzo sin incrementar excesivamente el costo computacional.

Para visualizar los resultados se seleccionó el componente de esfuerzo normal en dirección X (SX), dado que el análisis manual fue realizado considerando flexión a lo largo del eje longitudinal de la pieza. Este componente refleja de manera directa los esfuerzos longitudinales generados por dicha flexión, por lo que es el más adecuado para realizar la comparación entre ambos métodos de análisis.

En la Figura 4.17 se observa que el esfuerzo máximo alcanza un valor de 4,092 MPa y el mínimo $-4,222$ MPa. Estas magnitudes reflejan el comportamiento típico de una viga en flexión, donde existe una región sometida a tracción y la contraria a compresión.

Comparando con el resultado obtenido analíticamente mediante el cálculo por flexión, que fue de 4,07 MPa, se observa una excelente correlación, con una diferencia mínima atribuible al mallado y a las idealizaciones geométricas del modelo teórico. Esto confirma la validez estructural de la pieza y la consistencia entre el modelo analítico y el modelo por elementos finitos.

Partes 2 y 3.

La simulación del conjunto formado por las Partes 2 y 3 de la base rotativa superior pasiva se llevó a cabo aplicando una fuerza de 60 N en el extremo de la cara superior, la cual representa el peso y la reacción transmitida por el mecanismo de pronosupinación. Para restringir los desplazamientos, se utilizó una condición de frontera tipo geometría fija (*fixed geometry*) en la cara inferior que hace contacto con la Parte 1 de la base rotativa superior pasiva, reproduciendo el comportamiento real del ensamble.

El mallado utilizado fue de tipo método de curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño de malla fino de 2 mm, con el objetivo de capturar con mayor precisión

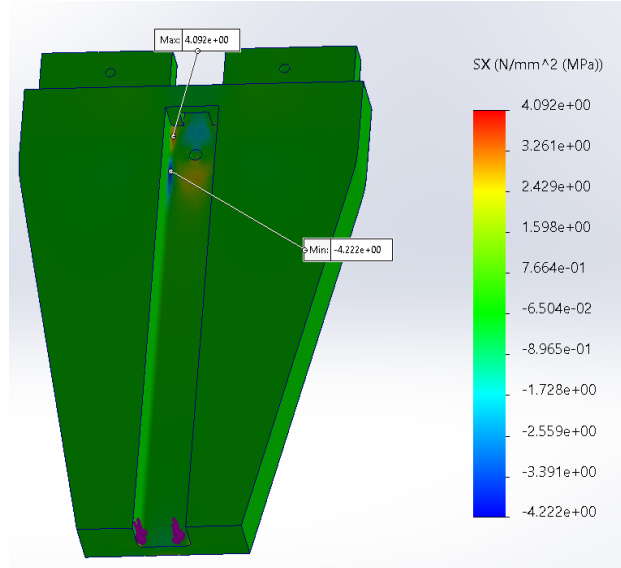


Figura 4.17: Esfuerzos de la base rotativa superior pasiva parte 1.

las concentraciones de esfuerzos en las zonas críticas, especialmente en las uniones de ambas piezas. La parte superior se simplificó para facilitar la generación del mallado, ya que la geometría original impedía su correcta definición. Esta región se evalúa por separado en el análisis del soporte del pronosupinador, por lo que la simplificación no afecta al estudio presentado en esta sección.

Para la interpretación de resultados, se utilizó el componente de esfuerzo normal en la dirección Z (**SZ**), ya que este eje coincide con la dirección de aplicación de la fuerza y representa adecuadamente el estado de flexión generado en la estructura. Este componente permite realizar una comparación directa con el análisis analítico por flexión.

En la Figura 4.18 se observa que el esfuerzo máximo alcanza un valor de 5,047 MPa, mientras que el mínimo registrado es de $-1,217$ MPa. Estos valores corresponden al comportamiento típico de una viga en flexión, con una zona sometida a tensión y la opuesta en compresión. El signo negativo indica la región comprimida del material, resultado directo de la dirección de la carga aplicada.

Al comparar estos resultados con el valor obtenido analíticamente, que fue de 5,744 MPa, se aprecia una diferencia cercana al 12 %, la cual es razonable considerando la simplificación geométrica aplicada, la idealización de la carga como puntual y las características del mallado. Estas diferencias tienden a suavizar los gradientes de esfuerzo en el modelo FEM, reduciendo ligeramente el valor máximo.

No obstante, la correlación entre ambos métodos es adecuada y valida el comportamiento estructural del diseño. Además, el esfuerzo máximo obtenido (≈ 5 MPa) es significativamente menor que el límite elástico y la resistencia a la tracción del PLA ($\approx 45\text{--}50$ MPa), lo que confirma que la pieza opera dentro de un rango seguro bajo las condiciones de servicio previstas.

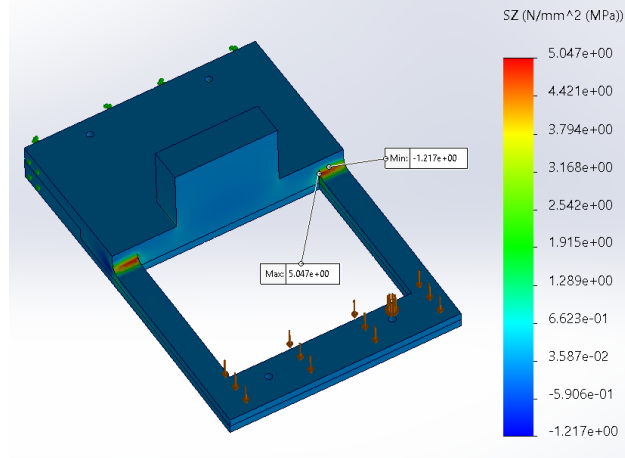


Figura 4.18: Esfuerzos de la base rotativa superior pasiva parte 2 y 3.

4.4.5. Guía

Para el análisis por elementos finitos del ensamble correspondiente a la guía, se aplicó una carga distribuida de 40 N sobre la cara superior del componente. Esta fuerza representa la carga vertical transmitida por la base rotativa superior pasiva durante el funcionamiento del dispositivo. Como condición de frontera se utilizó una restricción de geometría fija en la parte inferior del ensamble, simulando el contacto de la guía con la estructura principal del robot.

El mallado empleado fue de tipo curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño global fino de 1 mm, permitiendo capturar adecuadamente las concentraciones de esfuerzo en las zonas críticas, especialmente en las esquinas inferiores y alrededor de los barrenos.

La visualización de resultados se realizó mediante el componente de esfuerzo normal en la dirección Z (SZ), ya que la carga actúa predominantemente en este eje y genera esfuerzos de compresión que se distribuyen a lo largo de la longitud de la guía.

El esfuerzo máximo observado en la simulación se encuentra del orden de 10^{-1} MPa, con zonas de compresión ligeramente mayores en regiones cercanas a los apoyos y en las áreas donde se concentran los barrenos. Este comportamiento es coherente con la geometría real de la pieza, ya que las perforaciones generan ligeras variaciones locales en la rigidez y en el flujo de tensiones.

Al comparar estos resultados con el cálculo analítico, cuyo valor nominal fue de aproximadamente 0,18 MPa, se aprecia que ambas estimaciones se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, lo cual valida la aproximación analítica utilizada. La diferencia entre ambos métodos proviene principalmente de las simplificaciones del modelo teórico, que asume una sección uniforme y esfuerzos distribuidos homogéneamente. En contraste, el modelo por elementos finitos considera la geometría completa, la presencia de barrenos, la variación real de área resistente y las condiciones específicas de restricción, por lo que captura detalles locales que no están incluidos en el análisis manual.

A pesar de estas variaciones locales, los valores obtenidos se mantienen muy por debajo de la resistencia a tracción del PLA (50–70 MPa), por lo que la guía opera dentro de un margen

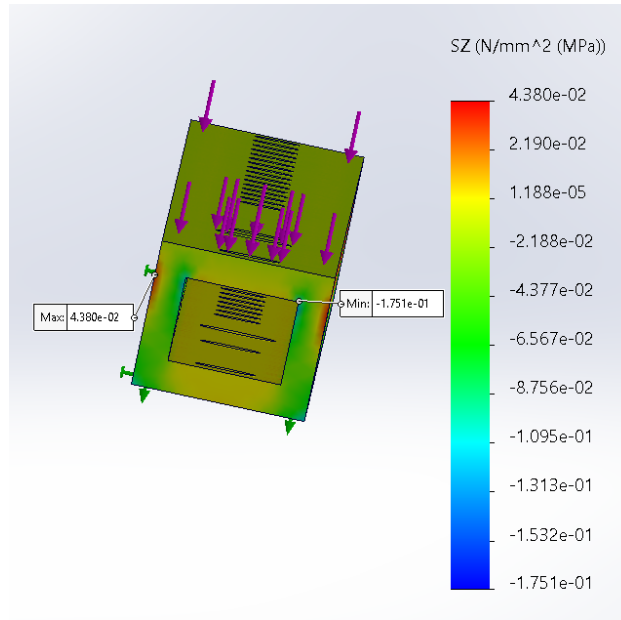


Figura 4.19: Esfuerzos de la Guía.

amplio de seguridad. En resumen, tanto el análisis analítico como el numérico confirman que la guía presenta un desempeño estructural adecuado y no está en riesgo de falla bajo las condiciones de servicio previstas.

4.4.6. Desplazador

Para el análisis por elementos finitos del componente denominado desplazador, se aplicó una fuerza distribuida de 40 N sobre la superficie superior curva, representando la acción del brazo del usuario durante el proceso de rehabilitación. Las condiciones de frontera utilizadas fueron de geometría fija en las bases inferiores del ensamble, las cuales simulan el apoyo rígido sobre la superficie de trabajo.

El mallado se generó utilizando el método de curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño global estándar, permitiendo una resolución adecuada en las zonas con curvaturas pronunciadas, como la parte superior cóncava y los refuerzos inferiores.

Para la visualización de resultados se seleccionó el esfuerzo normal en el eje X (**SX**), ya que se buscaba evaluar el esfuerzo de flexión máximo inducido por la carga. Esta elección es adecuada porque la dirección X corresponde al eje longitudinal de la columna lateral, a lo largo del cual se genera el momento flector principal. Por tanto, comparar este esfuerzo con el cálculo manual resulta coherente y técnicamente correcto.

En primer lugar, se realizó un cálculo manual conservador suponiendo que la columna lateral trabaja como una viga en voladizo independiente y que soporta directamente la mitad de la carga aplicada en ese lado. Bajo esta hipótesis simplificada, el esfuerzo máximo obtenido es de aproximadamente 1,24 MPa. Este modelo deliberadamente extremo ignora la presencia del refuerzo diagonal, de la base inferior y de la placa curva superior, por lo que representa un escenario de *peor caso* centrado exclusivamente en la columna lateral.

Posteriormente, se desarrolló un modelo analítico más realista basado en rigideces equi-

valentes en paralelo. Este enfoque considera que la carga aplicada sobre la superficie curva no se transmite únicamente a la columna lateral, sino que se distribuye entre varios elementos estructurales: la columna, el refuerzo diagonal y la base inferior. A partir de las dimensiones reales del componente, se determinó que la rigidez axial del refuerzo diagonal ($k_d = 20435 \text{ N/mm}$) es aproximadamente 64 veces mayor que la rigidez a flexión de la columna lateral ($k_c = 318,8 \text{ N/mm}$). Como consecuencia, solo un 1,54 % de la carga del lado llega realmente a la columna. Al aplicar este reparto, el esfuerzo máximo resultante es:

$$\sigma_{\text{real}} \approx 0,038 \text{ MPa},$$

valor coherente con la rigidez del conjunto y considerablemente menor que el obtenido mediante el modelo conservador.

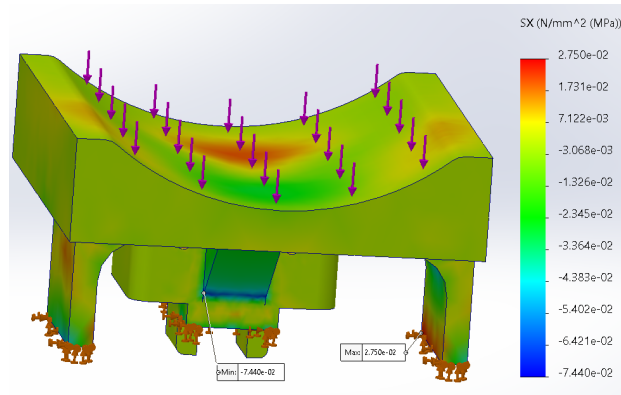


Figura 4.20: Distribución de esfuerzos SX en el desplazador obtenida mediante FEM.

Finalmente, el análisis FEM arrojó un esfuerzo máximo de aproximadamente 0,0275 MPa en la zona de unión entre la columna lateral, la base y el refuerzo diagonal. Este valor es incluso menor que el del modelo analítico realista, lo cual se explica por la alta rigidez global del conjunto tridimensional: la placa curva superior, los cambios de espesor y las transiciones geométricas redistribuyen la carga de manera muy eficiente, reduciendo los picos de esfuerzo locales y evitando que la columna lateral trabaje como una viga aislada.

A pesar de las diferencias entre los tres métodos, todos convergen en la misma conclusión: el desplazador opera con esfuerzos muy reducidos. Incluso en el escenario más conservador (1,24 MPa), los valores obtenidos son muy inferiores a la resistencia a la tracción del PLA (45–50 MPa). Por tanto, el diseño presenta un margen de seguridad amplio y un comportamiento estructural adecuado para las condiciones de servicio previstas.

4.4.7. Pronosupinador

En el análisis por elementos finitos del pronosupinador, se aplicó una carga distribuida de 40 N sobre la superficie superior, simulando el peso ejercido por el antebrazo del usuario durante la sesión de rehabilitación. Para representar adecuadamente el efecto estructural de los rodamientos, se emplearon condiciones de frontera de geometría fija en las zonas de alojamiento, asumiendo que estos elementos restringen completamente el movimiento de las superficies en contacto. El mallado se generó mediante el método de curvatura combinada

con un tamaño global fino de 2 mm, lo que permitió capturar los cambios bruscos de sección, la entrada del eje y los barrenos cercanos con suficiente resolución matemática.

El criterio de evaluación seleccionado fue el esfuerzo normal en la dirección X (SX), ya que corresponde al esfuerzo de flexión a lo largo del eje longitudinal del pronosupinador y resulta directamente comparable con la teoría clásica de flexión en vigas. La Figura 4.21 muestra la distribución final de esfuerzos obtenida mediante el análisis por elementos finitos.

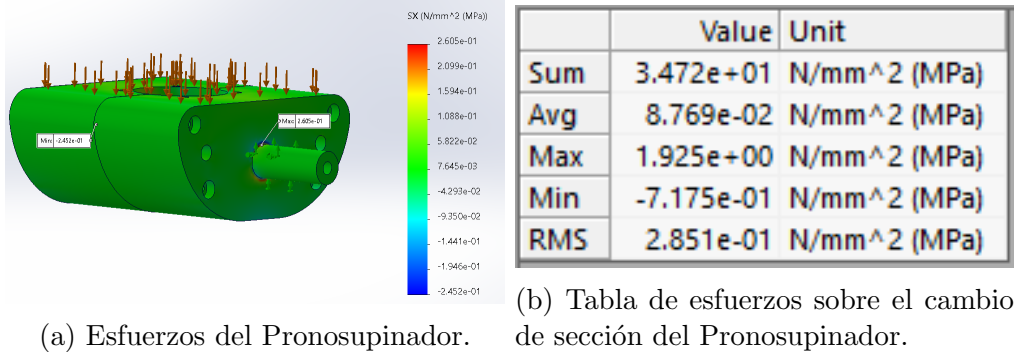


Figura 4.21: Análisis FEM Pronosupinador

El cálculo manual se realizó idealizando el pronosupinador como una viga simplemente apoyada sometida a una carga distribuida uniforme. Bajo esta aproximación, el esfuerzo nominal de flexión resultante fue de 0,0294 MPa. Debido a la presencia de un escalón geométrico en la zona donde se inserta el eje, se aplicó inicialmente un factor de concentración de esfuerzos típico de los casos tabulados más comunes para cambios bruscos de sección, lo cual condujo a un valor estimado de 0,0883 MPa. Sin embargo, esta aproximación asume una geometría mucho más simple que la real. El pronosupinador presenta simultáneamente un cambio abrupto en la sección transversal, una cavidad interna para alojar el eje, barrenos cercanos y un espesor finito que modifica el flujo tridimensional de esfuerzos; estas características no se encuentran representadas en los modelos bidimensionales clásicos de los que provienen los valores comúnmente utilizados para K_t .

Como consecuencia, la concentración real de esfuerzos en esta zona es mayor. El análisis por elementos finitos arrojó un esfuerzo máximo de 0,2605 MPa (Figura 4.21a). A partir de la relación entre el esfuerzo nominal y el valor obtenido mediante FEM, se obtiene un factor de concentración de esfuerzos efectivo de $K_{t,eq} \approx 8,9$. Este valor, si bien más elevado que los factores típicos de casos idealizados, es completamente coherente con la combinación tridimensional de discontinuidades presentes en la geometría real, las cuales producen un aumento significativo en la intensificación local del esfuerzo que no puede ser capturado adecuadamente por métodos analíticos simplificados.

A pesar de estas diferencias entre el modelo manual y el análisis por elementos finitos, ambos métodos coinciden en la conclusión estructural: incluso el valor más alto obtenido, correspondiente al análisis FEM, es extremadamente bajo en comparación con la resistencia a la tracción del PLA (45–50 MPa). Por lo tanto, el pronosupinador opera bajo un margen de seguridad amplio y adecuado para las condiciones de servicio previstas, y el modelo numérico constituye la representación más precisa del comportamiento real de la pieza bajo carga.

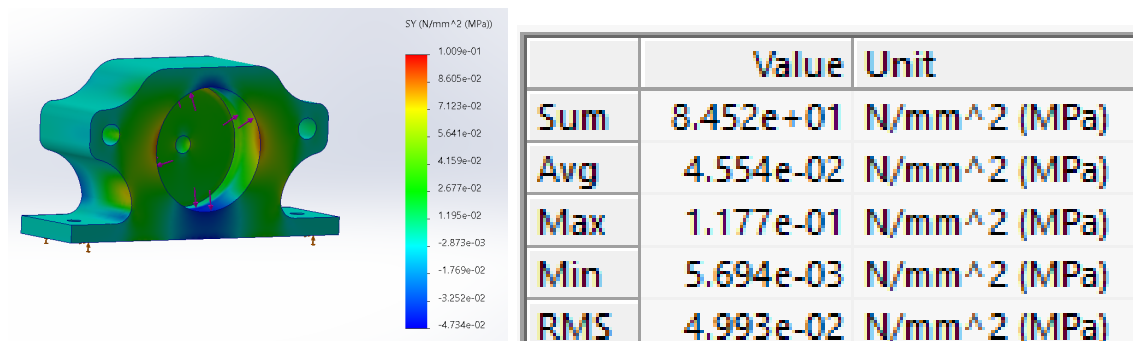
4.4.8. Soporte para pronosupinador

Para esta pieza se evaluó el esfuerzo generado por la carga axial transmitida a través del eje alojado en el rodamiento. El cálculo manual, basado en la suposición de una distribución uniforme de la fuerza sobre la mitad del perímetro interno del alojamiento, arrojó un esfuerzo promedio de aproximadamente 0,081 MPa. Este valor representa una aproximación conservadora que permite obtener una estimación inicial del comportamiento de la pieza bajo carga.

En el análisis por elementos finitos se aplicó la misma fuerza vertical de 40 N sobre la superficie interna del alojamiento, representando la interacción real entre el eje y el soporte. La base del componente se consideró completamente fija, simulando las condiciones de montaje mediante tornillos en la estructura del robot. El mallado se generó mediante el método de curvatura combinada, empleando un tamaño de elemento de 2 mm, lo cual permitió capturar adecuadamente la distribución tridimensional de esfuerzos en la zona de contacto y en las transiciones geométricas circundantes.

Los resultados se analizaron utilizando el esfuerzo normal en el eje vertical (SY), ya que esta componente coincide con la dirección de la carga aplicada y permite una comparación directa con el esfuerzo axial obtenido de forma analítica. Como se muestra en la Figura 4.22a, el esfuerzo máximo obtenido mediante FEM fue de aproximadamente 0,1009 MPa, ligeramente superior al valor calculado manualmente. Esta diferencia se explica por la presencia de concentraciones locales de esfuerzo en la superficie curva del alojamiento, las cuales no están incluidas en el modelo simplificado que asume una presión perfectamente uniforme. Además, la geometría tridimensional real produce variaciones del esfuerzo a lo largo del espesor y genera efectos locales que sólo pueden capturarse mediante un análisis numérico.

A pesar de estas diferencias puntuales, ambos resultados son consistentes en orden de magnitud y confirman que el soporte opera con esfuerzos muy bajos en relación con la resistencia mecánica del PLA. En consecuencia, la pieza presenta un comportamiento estructural adecuado y seguro bajo las condiciones normales de operación previstas, validando así tanto el análisis analítico como la simulación numérica.



(a) Esfuerzos del Soporte del Pronosupinador. (b) Tabla de esfuerzos sobre Soporte del Pronosupinador.

Figura 4.22: Análisis FEM Soporte del Pronosupinador

4.4.9. Seguro

Para esta pieza, se realizó una simulación con el objetivo de evaluar el esfuerzo cortante al que se ve sometido debido a la fuerza ejercida por la guía móvil. El análisis manual arrojó un esfuerzo cortante máximo de aproximadamente 0.7073 MPa.

En el análisis por elementos finitos, se aplicó una fuerza vertical distribuida de 20 N sobre la cara superior del seguro, en la zona de contacto con la guía. Para las condiciones de frontera, se estableció una restricción de cara cilíndrica dejando libres únicamente los 5 mm que no están encerrados

Se empleó un mallado tipo curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño global de elemento de 0.8 mm, buscando una adecuada precisión en zonas con geometría detallada y cambios angulares relevantes.

Los resultados se visualizaron mediante el parámetro τ_{YZ} , correspondiente al esfuerzo cortante en el plano YZ, ya que se trata del plano formado por el eje vertical (Y) y el eje longitudinal de transmisión del esfuerzo (Z). Esta visualización es la más adecuada para comparar con el esfuerzo cortante obtenido por medio del cálculo manual, ya que representa directamente la magnitud de cizalladura en la dirección esperada de deslizamiento.

El resultado máximo obtenido en la simulación (Figura 4.23) fue de aproximadamente **0.0124 MPa**, lo cual representa una diferencia considerable respecto al análisis manual. Esta discrepancia puede deberse a la rigidez local de la pieza, a una distribución real de carga diferente a la asumida teóricamente, o a la disipación parcial de carga por las condiciones geométricas y de apoyo presentes en el modelo de elementos finitos. A pesar de ello, los resultados se encuentran dentro de un orden de magnitud razonable para validar su resistencia bajo condiciones normales de operación.

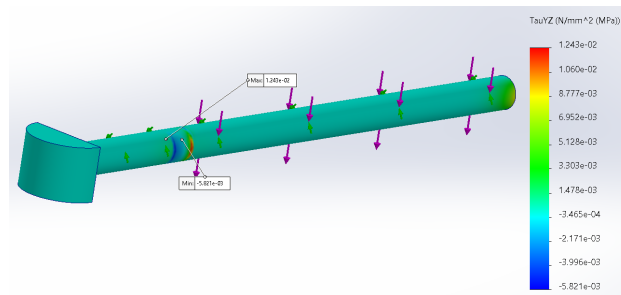


Figura 4.23: Esfuerzos del Seguro.

4.4.10. Picaporte

En el análisis teórico del picaporte, se calculó que para alcanzar un esfuerzo cortante de 30 MPa se requiere una fuerza de aproximadamente 80.9 N. Este esfuerzo es crítico para garantizar que el componente resista el contacto con la guía sin fallar.

En la simulación por elementos finitos, se aplicó una fuerza creciente en la zona de contacto lateral del picaporte hasta encontrar la fuerza mínima necesaria para alcanzar también un esfuerzo cortante de 30 MPa. El resultado arrojó un valor de 60.1 N, es decir, una diferencia con respecto al cálculo manual. Esta diferencia puede atribuirse a la forma

real del modelo, la concentración local de tensiones y la distribución no uniforme del esfuerzo en zonas de contacto con la guía.

Se utilizó una condición de frontera de geometría fija (*fixed geometry*) en la parte posterior del picaporte, correspondiente al diámetro mayor, simulando su sujeción contra desplazamientos axiales. Asimismo, se empleó un mallado tipo curvatura combinada (*blended curvature-based*) con un tamaño de malla fino de 0.5 mm, lo que permitió capturar con precisión los esfuerzos generados en la zona de cuello del picaporte.

Para la visualización de los resultados, se seleccionó el parámetro τ_{XY} , correspondiente al *esfuerzo cortante en el plano XY*, ya que en este componente el eje Z es el eje vertical y el esfuerzo de cizalladura se transmite perpendicularmente sobre ese plano. Esta elección es adecuada para evaluar y comparar directamente con el cálculo manual, en el que también se consideró el esfuerzo cortante sobre un área transversal en el mismo sentido.

El hecho de que la simulación arroje un valor menor de fuerza requerida para alcanzar los 30 MPa puede explicarse por la acumulación localizada de tensiones en el cuello del picaporte y la forma del modelo 3D que incrementa los esfuerzos puntuales en comparación con el modelo teórico más simplificado.

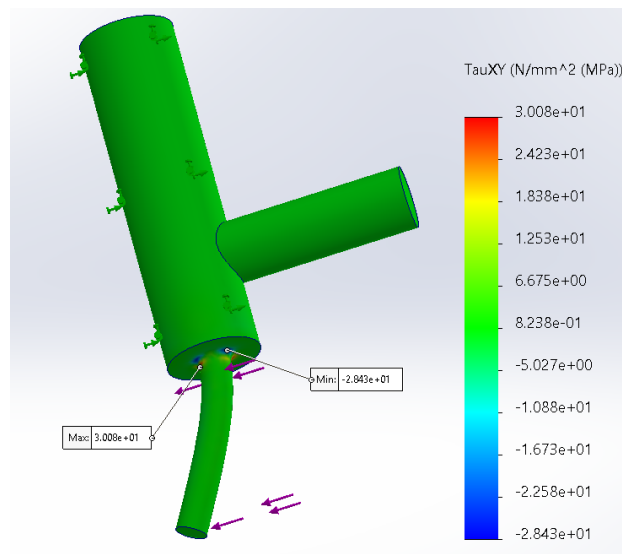


Figura 4.24: Esfuerzos en el picaporte

4.5. Componentes del robot

Antes de continuar con la descripción individual de los componentes del robot, es importante señalar que tanto los cálculos manuales como las simulaciones por elementos finitos (FEM) se realizaron únicamente para aquellas piezas que, por su función estructural, geometría o nivel de carga, podrían estar sometidas a esfuerzos significativos durante la operación del sistema. En dichos casos, se desarrolló primero un análisis analítico para estimar el comportamiento mecánico bajo carga, y posteriormente se validaron o complementaron los resultados mediante simulación por computadora.

En cambio, otras partes del ensamble no fueron analizadas mediante FEM ni con modelos analíticos detallados, ya que no están sometidas a esfuerzos relevantes que comprometan su integridad o funcionamiento. Estas piezas trabajan principalmente bajo cargas de montaje, su peso propio o esfuerzos menores, por lo que su diseño se valida mediante consideraciones geométricas, propiedades básicas del material y buenas prácticas de manufactura.

Con esta aclaración, a continuación se presentan todos los componentes del robot, describiendo su función dentro del sistema y su papel dentro del diseño mecánico general.

4.5.1. Base de MDF

La base de MDF (Medium Density Fiberboard) constituye la plataforma estructural principal sobre la cual se ensamblan algunos de los diferentes subsistemas del robot. Su función es proporcionar soporte mecánico estable para los soportes de los motores, las baterías, la tarjeta electrónica y otros elementos. Está diseñada para soportar el peso total del dispositivo y las cargas dinámicas transmitidas por las ruedas durante el movimiento, garantizando rigidez estructural, al tiempo que su bajo peso facilita el transporte y manipulación del robot.

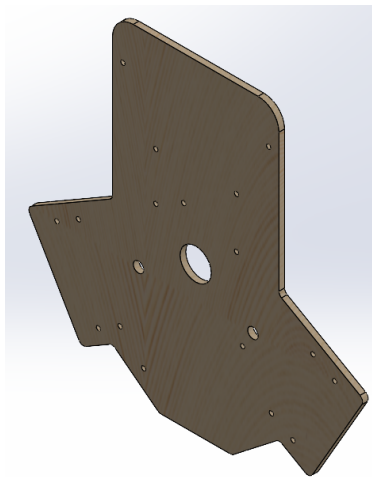


Figura 4.25: Base de MDF.

4.5.2. Soporte para la base de MDF

El soporte estabilizador para la base de MDF es una pieza fabricada en PLA mediante impresión 3D, cuya función principal es aportar estabilidad y reforzar la rigidez de la base sin intervenir directamente en la transmisión de cargas de los motores o las ruedas. Su diseño busca evitar deformaciones o movimientos no deseados de la base de MDF durante el funcionamiento del robot, asegurando una plataforma más sólida y alineada para el resto de los componentes.

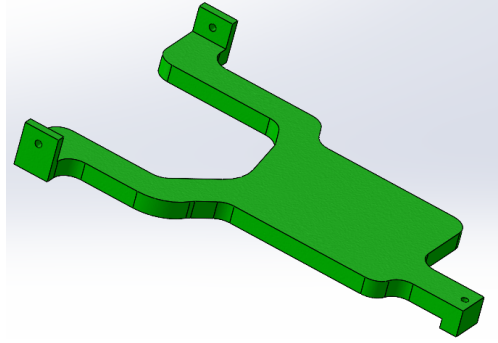
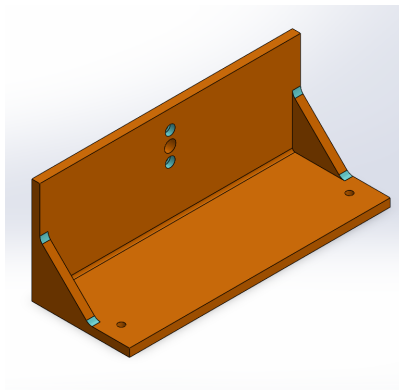


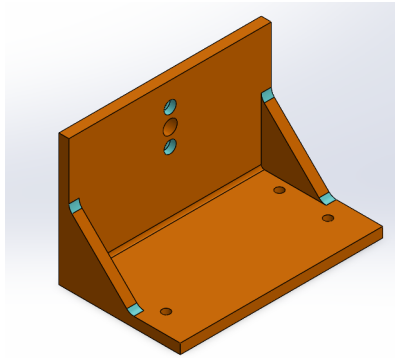
Figura 4.26: Soporte para la base de MDF.

4.5.3. Soportes

Los soportes 1, 2 y 3 están fijados a la base de MDF y actúan como puntos de montaje para los motores eléctricos. Su diseño asegura la correcta alineación de los ejes de los motores con las ruedas omnidireccionales, permitiendo una transmisión efectiva de movimiento. Estos soportes también contribuyen a distribuir las cargas mecánicas generadas durante el desplazamiento del robot y protegen a los motores frente a vibraciones y desajustes.



(a) Soporte 1.



(b) Soporte 2 y 3.

Figura 4.27: Soportes

4.5.4. Carcasa

La carcasa está compuesta por cuatro piezas diferentes que, al ensamblarse, forman una estructura envolvente que protege los componentes internos del robot. Su diseño modular permite un acceso sencillo al interior para tareas de mantenimiento o ajustes, facilitando además el ensamblaje y desensamblaje parcial del sistema cuando sea necesario. Además de su función protectora frente a polvo, impactos accidentales y posibles interferencias externas, la carcasa también cumple un rol estructural al integrar alojamientos precisos para los rodamientos que soportan el movimiento de la base rotativa superior pasiva, garantizando su correcta alineación y funcionamiento. Su geometría incluye canales y aberturas estratégicas para el paso de cables y montaje de otros componentes del sistema.

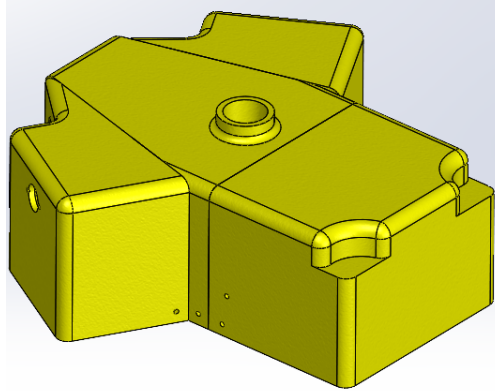
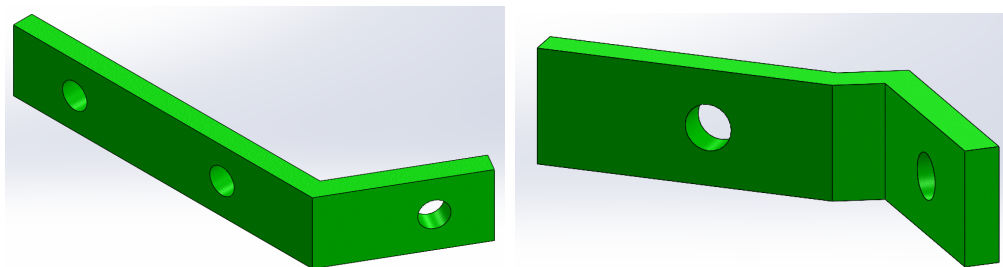


Figura 4.28: Carcasa.

4.5.5. Guías para unir la carcasa

Las guías son piezas metálicas en forma de "L" diseñadas para proporcionar refuerzo estructural a la parte inferior de la carcasa. Su función principal es evitar que las paredes inferiores de la carcasa se abran o desalineen cuando se aplica una carga vertical sobre la estructura, ya que originalmente solo estaba asegurada mediante tornillos en la parte superior. Estas guías se fijan mediante tornillos y tuercas, distribuyendo las fuerzas y mejorando la rigidez general del ensamble, permitiendo que la carcasa mantenga su forma y contacto adecuado en las uniones laterales. Su implementación fue una solución de diseño correctiva tras identificar desplazamientos no deseados durante pruebas preliminares de carga.



(a) Guía para carcasa 1.

(b) Guía para carcasa 2.

Figura 4.29: Guías para unir la carcasa

4.5.6. Base rotativa superior pasiva

La base rotativa superior pasiva está compuesta por tres partes ensambladas que trabajan de manera conjunta para permitir el desplazamiento lineal controlado dentro de la carcasa. Estas tres piezas están diseñadas para integrarse de forma precisa, formando una estructura funcional que aloja el pronosupinador, la guía y otros componentes del sistema de rehabilitación. Cada parte de la base rotativa superior pasiva cumple funciones específicas: proporcionar soporte estructural, servir como canal de guiado de cables, permitir la sujeción de rodamientos y alojar los mecanismos de transmisión de movimiento. Su diseño

modular facilita el montaje y desmontaje durante el mantenimiento, al tiempo que asegura una correcta alineación y estabilidad durante el uso del robot. Además, su geometría está optimizada para minimizar el peso sin comprometer la rigidez necesaria para soportar las cargas funcionales.

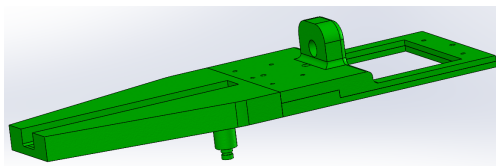


Figura 4.30: Base rotativa superior pasiva.

4.5.7. Guía

La guía es el elemento encargado de permitir el desplazamiento lineal controlado del soporte del antebrazo a lo largo de la base rotativa superior pasiva, asegurando que el movimiento sea suave, preciso y estable. Además de su función de soporte y guiado mecánico, la guía está diseñada para actuar como canal interno para el paso de cables, permitiendo que los cables provenientes del joystick y del encoder sean conducidos de manera ordenada y protegida hacia el interior del sistema sin interferir con las partes móviles. Esta doble funcionalidad optimiza el espacio interno y minimiza el riesgo de daño a los cables por fricción o atrapamiento durante la operación.

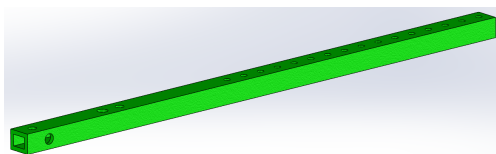


Figura 4.31: Guía.

4.5.8. Desplazador

El desplazador es la pieza que conecta el soporte del antebrazo con la guía, transmitiendo el movimiento lineal de manera controlada. Su diseño incluye un canal o riel de acoplamiento que asegura el desplazamiento en una sola dirección, evitando holguras o desplazamientos no deseados que comprometan la ergonomía o el control del ejercicio.

4.5.9. Pronosupinador

El pronosupinador es el mecanismo encargado de permitir los movimientos de pronación y supinación del antebrazo de manera asistida y controlada, replicando los movimientos naturales de esta articulación. Está compuesto por dos partes principales ensambladas que en sus extremos cuentan con ejes que proporcionan soporte para el montaje del joystick en los rodamientos. Ambas partes trabajan en conjunto para permitir la rotación suave dentro de

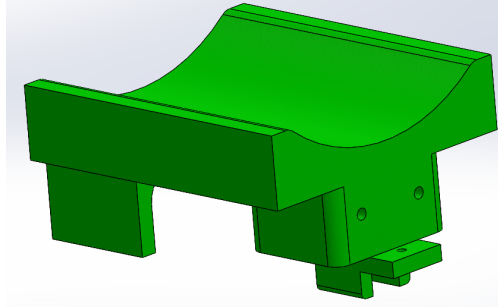


Figura 4.32: Desplazador.

los rodamientos, garantizando baja fricción y precisión en el movimiento. Además, su diseño incluye un espacio interno para alojar el cableado del joystick, asegurando que no interfiera con la rotación ni con la estructura exterior. Este mecanismo es esencial para la terapia funcional de la articulación del antebrazo, proporcionando estabilidad, control y ergonomía durante su uso.

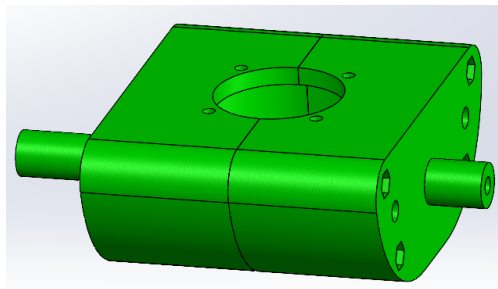


Figura 4.33: Pronosupinador.

4.5.10. Soporte del pronosupinador

Este soporte es el encargado de fijar mecánicamente el sistema de pronosupinación al resto de la estructura. Alberga uno de los rodamientos que soportan el eje del pronosupinador, garantizando una rotación suave y precisa. Además, contribuye a la estabilidad general del sistema al absorber parte de las cargas transmitidas por los movimientos rotacionales del brazo.

4.5.11. Seguro

El seguro es un componente mecánico diseñado para inmovilizar el mecanismo de pronosupinación cuando no se desea realizar dicho movimiento. Su función principal es bloquear de manera manual la rotación del pronosupinador, garantizando que permanezca fijo durante etapas específicas de la terapia o en situaciones donde solo se requiera el movimiento de flexión-extensión. Este elemento actúa insertándose dentro de una ranura desde el soporte del pronosupinador hasta el final del pronosupinador, bloqueando físicamente el giro del eje.

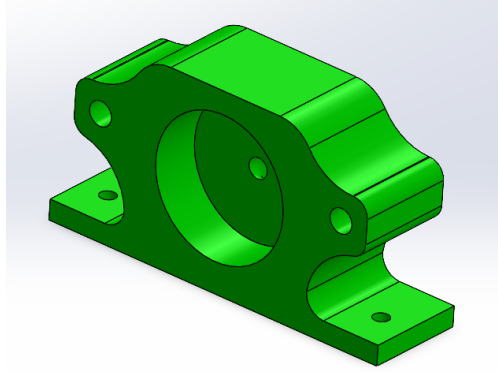


Figura 4.34: Soporte del pronosupinador.

Su diseño es sencillo y permite al usuario o al terapeuta colocar o retirar el seguro sin herramientas adicionales, facilitando su operación y asegurando la estabilidad del sistema durante el uso.

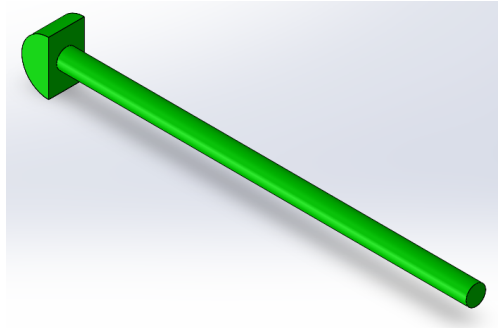


Figura 4.35: Seguro.

4.5.12. Joystick

Para este proyecto se utilizará un Thumb Joystick de la serie TRY20 de la marca Megatron, en su presentación con cubierta de goma. Este joystick fue seleccionado por su ergonomía, durabilidad y alta precisión en la medición de movimientos. El joystick actúa como la interfaz mecánica directa entre la mano del usuario y el sistema de pronosupinación, permitiendo ejecutar movimientos controlados de pronación y supinación de forma natural. Su diseño robusto asegura una integración efectiva con el pronosupinador y una larga vida útil bajo condiciones de uso repetitivo en sesiones de rehabilitación.

Aunque un joystick tipo Thumb no es el actuador específicamente diseñado para movimientos biomecánicos finos de la mano, su uso en este proyecto resulta adecuado por varias razones prácticas y funcionales. En primer lugar, ofrece una interfaz ergonómica y cómoda para el usuario, permitiendo una interacción intuitiva sin necesidad de ejercer grandes fuerzas ni adoptar posiciones incómodas. Además, su arquitectura mecánica interna proporciona una señal estable y precisa para detectar desviaciones angulares, lo que lo hace compatible con los requerimientos del sistema de pronosupinación.



Figura 4.36: Joystick.

Existen dispositivos especializados, como sensores de pinza, potenciómetros rotacionales biomédicos o manipuladores esféricos, que podrían utilizarse para movimientos más complejos de la mano. Sin embargo, el joystick se seleccionó debido a su disponibilidad, su facilidad de integración tanto mecánica como electrónica y su compatibilidad directa con la arquitectura del prototipo. Al tratarse de un proyecto en etapa conceptual, la prioridad recae en contar con un dispositivo confiable, fácil de montar y capaz de reproducir movimientos controlados, más que en incorporar dispositivos avanzados cuyo costo, complejidad o tiempo de adquisición dificultarían el desarrollo.

Por ello, el joystick empleado no sólo cumple con los requerimientos funcionales actuales, sino que también permite una futura sustitución por interfaces biomédicas más especializadas si el proyecto evoluciona hacia etapas avanzadas de prototipado o ensayos clínicos.

4.5.13. Picaporte

El picaporte es un mecanismo de bloqueo que permite inmovilizar el desplazador en una posición determinada a lo largo de la guía. Su objetivo es fijar el brazo del usuario en un punto específico para realizar ejercicios estáticos o para asegurar la posición durante ajustes y calibraciones del sistema. Su diseño facilita la liberación rápida y segura sin herramientas adicionales.

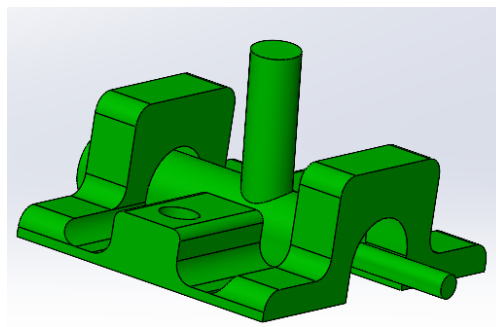


Figura 4.37: Picaporte.

4.5.14. Rodamientos

Los rodamientos son componentes mecánicos fundamentales en el sistema, encargados de permitir el giro libre y controlado de los ejes al reducir la fricción y facilitar el movimiento

rotacional. En este proyecto se emplean dos tipos principales de rodamientos, cada uno con una función específica:

- Rodamientos del pronosupinador: Estos rodamientos están montados en la base rotativa superior pasiva y en el soporte del pronosupinador. Su función es alojar los ejes del pronosupinador, permitiendo el movimiento de pronación y supinación del antebrazo. Al tener pestañas (bridas) en su diseño, aseguran su fijación al interior de las piezas de soporte, evitando desplazamientos axiales y garantizando una rotación suave y precisa. Estos rodamientos están dimensionados para soportar las cargas radiales generadas por el peso del brazo del usuario y las fuerzas del movimiento de rehabilitación.
- Rodamientos de la carcasa: Estos rodamientos están ubicados en la carcasa del robot y sirven como soporte de la base rotativa superior pasiva, permitiendo su desplazamiento rotacional (según el diseño del sistema). Su objetivo es mantener la alineación de la base rotativa superior pasiva mientras permite su movilidad controlada dentro de la carcasa. Gracias a su pestaña, se asegura su montaje correcto contra la superficie externa de los barrenos de la carcasa, ofreciendo estabilidad estructural al sistema completo.

Ambos tipos de rodamientos contribuyen a prolongar la vida útil del mecanismo, reducir el desgaste por fricción y proporcionar una experiencia más cómoda y segura para el usuario durante las sesiones de rehabilitación.



(a) Rodamientos para el pronosupinador.

(b) Rodamientos para la carcasa.

Figura 4.38: Rodamientos.

4.5.15. Extensor

El extensor es una pieza cilíndrica diseñada específicamente para adaptarse al joystick, alargando su agarre original. Su principal función es incrementar la altura y superficie de contacto del joystick, facilitando su manipulación por parte del usuario, especialmente en

casos donde se requiere mayor alcance, comodidad o adaptaciones ergonómicas según las necesidades de rehabilitación.

Este componente se fabrica mediante impresión 3D, lo que permite personalizar su geometría y peso. Su montaje es sencillo, ya que se ensambla directamente sobre el joystick sin necesidad de fijaciones adicionales, aprovechando la forma cónica de su base para asegurar un ajuste por interferencia. El extensor contribuye a mejorar la ergonomía y la accesibilidad del sistema, permitiendo una interacción más natural y cómoda para diferentes tamaños de mano y niveles de movilidad del usuario.

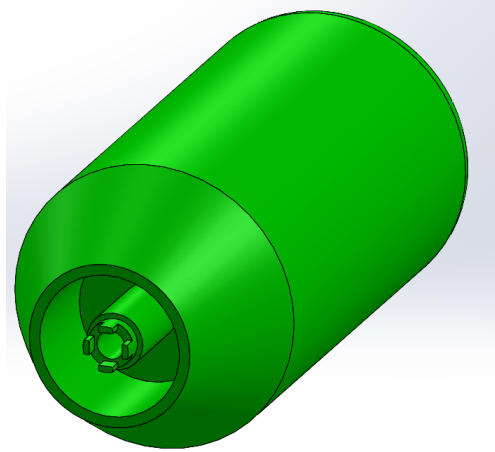


Figura 4.39: Extensor.

4.5.16. Soporte del encoder

El soporte del encoder es una pieza estructural cuya función principal es mantener fijo el sensor de rotación (encoder) en la posición adecuada respecto al eje de salida del sistema de pronosupinación. Este soporte permite atornillar el encoder de manera segura, garantizando que su eje quede alineado con el componente a medir para asegurar una lectura precisa de los ángulos de rotación. Está fabricado en PLA y su diseño incluye una base y laterales que envuelven parcialmente al encoder, proporcionando tanto estabilidad mecánica como protección frente a desplazamientos accidentales durante el uso del robot.

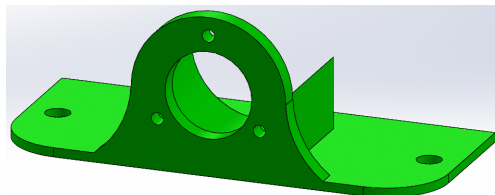


Figura 4.40: Soporte del encoder.

4.5.17. Cubre encoder

El cubre encoder es una pieza complementaria diseñada para proteger y cubrir el encoder, evitando la acumulación de polvo, suciedad u otros contaminantes que pudieran afectar su funcionamiento. Además de su función protectora, esta pieza sirve como canal guía para el cableado del encoder, permitiendo que los cables se dirijan de manera ordenada y segura hacia el interior de la base del robot sin riesgo de interferencias mecánicas o desconexiones accidentales. Su diseño también aporta un acabado estético uniforme, integrándose visualmente con el resto de la estructura y mejorando la apariencia general del sistema.

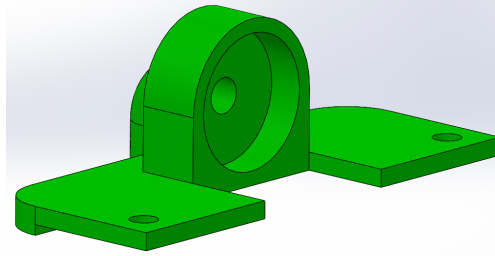


Figura 4.41: Cubre encoder.

4.5.18. Ruedas omnidireccionales

Las tres ruedas omnidireccionales otorgan al robot la capacidad de desplazarse en múltiples direcciones sin necesidad de realizar maniobras de giro tradicionales. Están montadas en los ejes de los motores ubicados sobre la base de MDF, permitiendo movimientos laterales, diagonales y rotacionales con alta maniobrabilidad, lo cual resulta útil en espacios reducidos o ambientes clínicos. Las ruedas omnidireccionales elegidas son de la empresa Vexrobotics, el producto se llama 2.75.ºmni Directional Wheel - Double Roller (2-pack) (276-1902).



Figura 4.42: Rueda omnidireccional.

4.5.19. Cople

El cople de transmisión es una pieza mecánica utilizada para unir el eje de salida del motor con el eje de las ruedas omnidireccionales, permitiendo la transferencia efectiva de torque y movimiento rotativo entre ambos componentes. Este elemento asegura que la rotación del motor se transmita directamente al eje de la rueda sin deslizamientos ni pérdidas significativas de energía. Además, su diseño facilita una alineación precisa entre los ejes, ayudando a evitar desalineaciones o vibraciones excesivas durante la operación. El cople elegido para este proyecto es el de la empresa Turbo Láser, con un diámetro exterior de 14 mm e interior de 5 mm por un lado y 8 mm del otro.



Figura 4.43: Cople.

4.5.20. Adaptador para el cople

El adaptador de eje es una pieza de conexión diseñada para permitir la compatibilidad entre el eje cuadrado de la rueda omnidireccional y el cople cilíndrico del motor. Su función principal es transformar la geometría cuadrada del eje de salida de la rueda a una sección cilíndrica compatible con el interior del cople de transmisión, garantizando una unión firme y segura. Este adaptador evita deslizamientos o pérdidas de torque durante la transmisión de movimiento, además de facilitar el montaje sin necesidad de mecanizados adicionales en los ejes. Su incorporación es crucial para mantener la integridad mecánica del sistema de rodamiento y asegurar un acoplamiento eficiente entre la rueda y el motor.

4.5.21. Eje cuadrado de transmisión

Es una pieza de sección transversal cuadrada diseñada para servir como eje de transmisión entre la rueda omnidireccional y el adaptador intermedio que conecta con el cople cilíndrico del motor. Esta barra asegura la transferencia directa de par desde la rueda hacia el sistema de tracción, manteniendo la geometría necesaria para evitar deslizamientos rotacionales. En uno de sus extremos cuenta con una ampliación mecanizada, también de perfil cuadrado, que se aloja firmemente dentro de la cavidad de la rueda, mientras que el extremo opuesto se inserta en el adaptador fabricado para conectar con el motor. De esta forma, la pieza garantiza

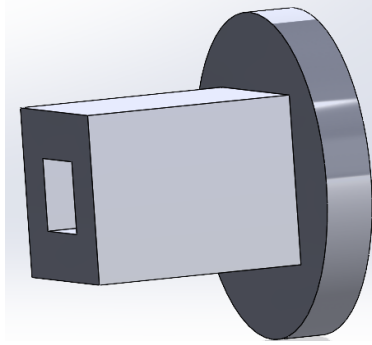


Figura 4.44: Adaptador para el cople.

compatibilidad geométrica entre componentes de distintas normativas y una transmisión de movimiento confiable.

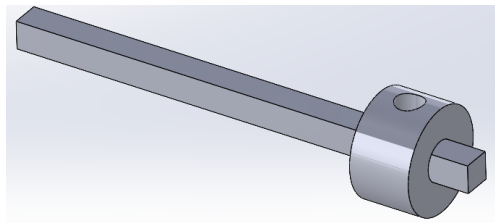


Figura 4.45: Eje cuadrado de transmisión.

Aunque este eje forma parte del sistema encargado de transmitir el par desde la rueda hacia el conjunto de tracción, no fue necesario realizar un análisis estructural mediante elementos finitos para esta pieza. Esto se debe a que el eje cuadrado no fue diseñado específicamente para este proyecto, sino que forma parte del conjunto comercial de las ruedas omnidireccionales utilizadas. Al venir integrado como elemento original del fabricante, su geometría, dimensiones y material ya están definidos para garantizar una transmisión de par segura bajo condiciones de operación típicas, las cuales suelen ser considerablemente mayores a las cargas que el robot de rehabilitación aplica.

El componente está fabricado en acero, con un límite elástico muy superior a los esfuerzos generados por el sistema. Incluso considerando posibles concentraciones de esfuerzo en la zona de transición entre el cuerpo principal y la ampliación mecanizada, los niveles de carga del proyecto son demasiado bajos para representar un riesgo estructural. Su sección maciza, la ausencia de perforaciones y su reducida longitud aseguran una alta rigidez torsional y flexional.

Por estas razones, el eje se considera un componente comercial ya optimizado y probado, por lo que su validación mediante resistencia de materiales básica es suficiente. De esta manera, el análisis FEM se centra en las piezas fabricadas en PLA y MDF, que sí representan los elementos estructuralmente críticos dentro del sistema.

4.5.22. Botón de paro de emergencia

El botón de paro de emergencia es un elemento de seguridad diseñado para interrumpir de manera inmediata el suministro eléctrico del sistema en caso de fallo o riesgo. Su diseño tipo hongo permite una activación rápida y sencilla, incluso mediante un golpe, asegurando la protección del usuario y del equipo.

Se seleccionó el botón de paro de emergencia tipo hongo con retención de la marca Segetek. Este dispositivo es un botón de seguridad de acción inmediata y retención mecánica, diseñado para detener el funcionamiento de sistemas eléctricos o electromecánicos en situaciones de emergencia. Su diseño tipo “hongo” proporciona una superficie amplia de fácil acceso, permitiendo una activación rápida con el golpe de la mano o el puño. Posee un diámetro estándar de 22 mm y su mecanismo de retención requiere una acción de giro para liberar el botón tras la activación, garantizando que el operador intervenga conscientemente para reiniciar el sistema. El modelo mostrado, está diseñado para instalarse en botoneras o tableros de control, cumpliendo con normativas básicas de seguridad. Es ideal para aplicaciones en robótica, automatización y maquinaria, ofreciendo un método de parada confiable ante eventos imprevistos o fallas operativas.



Figura 4.46: Botón de paro de emergencia de la marca Segetek.

4.5.23. Soporte para las baterías

El soporte para baterías es una estructura fabricada en PLA diseñada para rodear y sujetar lateralmente el conjunto de baterías del robot, evitando su desplazamiento durante el movimiento o las vibraciones. Carece de fondo, ya que las baterías descansan directamente sobre la base de MDF, y su función principal es mantenerlas alineadas y estables mediante sujeción perimetral. Este soporte está fijado a la base mediante tornillos, asegurando una instalación firme y facilitando el acceso a las baterías en caso de mantenimiento o sustitución.

4.5.24. Botón de encendido y puerto de carga

El botón de encendido y el puerto de carga fueron adaptados e integrados al diseño del proyecto para permitir su instalación en la carcasa y su conexión funcional con el sistema eléctrico general. Su incorporación asegura una compatibilidad directa con el sistema de

alimentación, facilitando el encendido, apagado y recarga del robot de manera práctica y segura, sin necesidad de modificaciones eléctricas complejas.

4.5.25. PCB Núcleo

Para la elaboración de esta placa se utilizará una placa fenólica de una cara. Para comenzar con el proceso de creación, se empleará el diseño de PCB mostrado en el apéndice B, el cual se imprimirá sobre la placa mediante el siguiente proceso:

1. El diseño se debe imprimir en una hoja de papel de transferencia para PCB.
2. Posteriormente, el lado impreso se coloca frente a frente con la cara cubierta de cobre. Una vez alineadas, se aplica calor para lograr un pegado perfecto, preferentemente con un dispositivo que permita una aplicación de fuerza constante, como una enmicadora térmica.
3. Una vez que la hoja esté correctamente adherida, la placa con la hoja pegada se introduce en un recipiente con agua, asegurándose de que quede completamente sumergida. Esto facilitará el despegado del papel.
4. Tras el despegado, y verificando que la impresión haya quedado correctamente transferida a la placa, se procede a sumergir la placa en un molde con cloruro férrico, cubriendo toda la superficie. Se deja reposar durante unos minutos.
5. Finalmente, se retira la placa del cloruro férrico cuando se observe que el fluido ha consumido el cobre sobrante, dejando únicamente el diseño de la PCB. Se limpia la placa cuidadosamente para retirar residuos del agente corrosivo.

Ya que se manufacturó la PCB, se procede a insertar los componentes necesarios como lo son resistencias y capacitores.

4.5.26. STM32 Núcleo

La tarjeta STM32 Nucleo funciona como el controlador principal del robot, gestionando las señales provenientes de los sensores, controlando los actuadores y ejecutando la lógica de control programada. Su integración permite la coordinación entre los subsistemas mecánicos y electrónicos para lograr un funcionamiento fluido y seguro.

4.5.27. Tornillería

La tornillería empleada en el presente proyecto desempeña un papel fundamental en la unión, fijación y ensamblaje de los distintos componentes estructurales y funcionales del robot. La correcta selección de tornillos y tuercas garantiza la integridad mecánica, la estabilidad del sistema y la capacidad de desmontaje para tareas de mantenimiento. Para este diseño se han considerado elementos normalizados que permitan asegurar las piezas sin comprometer su resistencia, considerando las fuerzas a las que estarán sometidas y la facilidad de montaje y desmontaje. A continuación se describen los tipos, dimensiones y aplicaciones específicas de la tornillería utilizada en cada parte del robot.

Tabla 4.1: Listado de tornillería utilizada.

Tipo	Cantidad
M2 x 0.4 x 8	3
M3 x 0.5 x 6	6
M3.5 x 0.5 x 15	3
M4 x 0.7 x 13	12
M4 x 0.7 x 16	12
M4 x 0.7 x 20	2
M4 x 0.7 x 25	2
M4 x 0.7 x 30	5
M4 x 0.7 x 40	5
M4 x 0.7 x 50	2
M4 x 0.7 x 80	4
Opresor M4 (Incluidos con cada cople)	12

Capítulo 5

Manufactura y ensamble del sistema

5.1. Impresión de componentes

Para la fabricación de los componentes diseñados se usó la tecnología de impresión 3D por deposición de filamento fundido (FDM). El equipo empleado fue una impresora Creality K1C (Figura 5.1), elegida por su velocidad de impresión, compatibilidad con múltiples materiales y confiabilidad en la producción de piezas funcionales.

En cuanto a los materiales, se utilizó principalmente filamento PLA de la marca Creality, específicamente el modelo HyperPLA, en colores verde, negro y amarillo, destinado a la fabricación de las distintas piezas estructurales y decorativas del robot. Sin embargo, para el extensor del joystick se optó por filamento PETG de color blanco, debido a su mayor resistencia mecánica y mejor comportamiento frente a esfuerzos repetitivos, considerando que esta pieza está en contacto frecuente con el usuario. Además, dado que los dientes de acoplamiento de esta pieza son de pequeñas dimensiones, el uso inicial de PLA provocaba fracturas prematuras; al emplear PETG se eliminó este problema, asegurando una mayor durabilidad y funcionalidad de la pieza.

Las configuraciones de impresión empleadas fueron las recomendadas por el fabricante del material, ajustadas para obtener un buen balance entre resistencia, tiempo de fabricación y calidad superficial. Los parámetros principales fueron una altura de capa de 0.2 mm, 100 % de relleno, temperatura de boquilla de 220 °C para PLA y 250 °C para PETG, y una temperatura de cama de 50 °C para PLA y 70 °C para PETG. El uso de soportes se limitó a las piezas con geometrías sobresalientes, voladizos críticos o barrenos.

Todas las piezas fueron impresas orientadas estratégicamente para maximizar la resistencia en la dirección de los esfuerzos esperados y, al mismo tiempo, minimizar la necesidad de soportes adicionales. Se configuraron tres vueltas de pared (wall loops) para reforzar las paredes externas, junto con un patrón monotónico para las superficies superior e inferior, y un patrón cúbico para el relleno interno. Tras la impresión, se llevó a cabo un proceso de retiro de soportes, lijado ligero en las áreas de contacto y una verificación dimensional básica de las piezas antes de su ensamblaje final.



Figura 5.1: Impresora K1C.

5.2. Proceso de ensamblaje del robot

Esta sección describirá el procedimiento para ensamblar físicamente el robot de rehabilitación, partiendo de sus componentes individuales hasta la integración completa del sistema. El objetivo principal de este apartado es detallar el orden lógico de armado, las herramientas necesarias, las consideraciones mecánicas y las precauciones a tomar para asegurar un ensamblaje eficiente y funcional.

El robot está conformado por varios subconjuntos, entre los que destacan la base de MDF, la carcasa, la base rotativa superior pasiva, el mecanismo de pronosupinación, el soporte del antebrazo y los elementos de fijación, entre otros. Cada uno de estos subconjuntos ha sido previamente diseñado y analizado, por lo que en esta etapa se especifica cómo deben integrarse entre sí de forma precisa.

A continuación, se presenta el paso a paso del ensamblaje, incluyendo referencias a las figuras correspondientes del modelo CAD, los puntos de fijación, el tipo de tornillería empleada y las verificaciones necesarias en cada etapa para garantizar el correcto alineamiento y funcionamiento del sistema.

1. **Instalación de los soportes inferiores (Figura 5.2):** Colocar los soportes 1, 2 y 3 sobre la base de MDF en las posiciones establecidas en el plano de ensamble. Asegurarse de que estén correctamente alineados y fijarlos con tornillos M4 de 16 mm de largo y sus respectivas tuercas.
2. **Instalación de rodamientos (Figura 5.3):** Colocar los rodamientos correspondien-

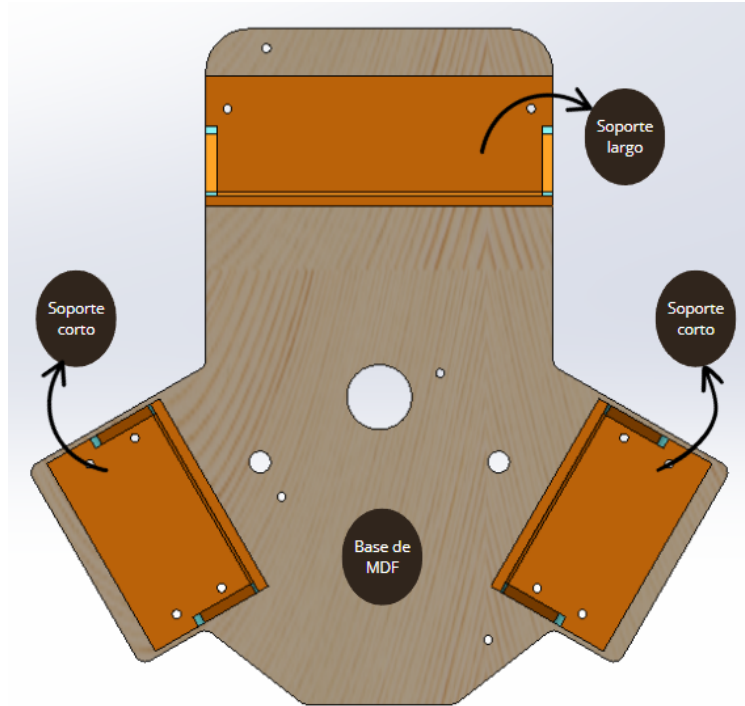
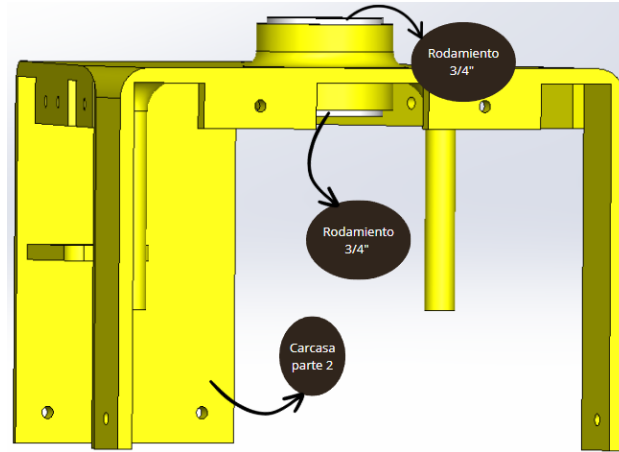


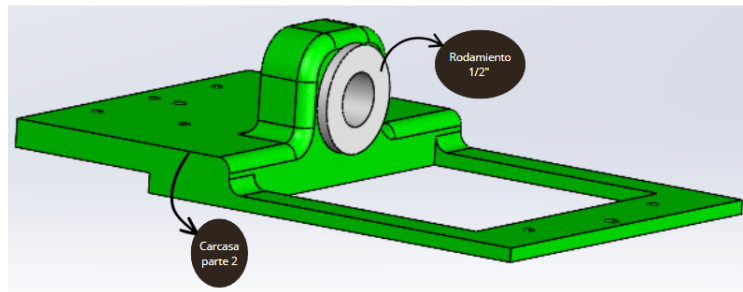
Figura 5.2: Instalación de soportes inferiores.

tes en sus ubicaciones asignadas, de acuerdo con la siguiente lista:

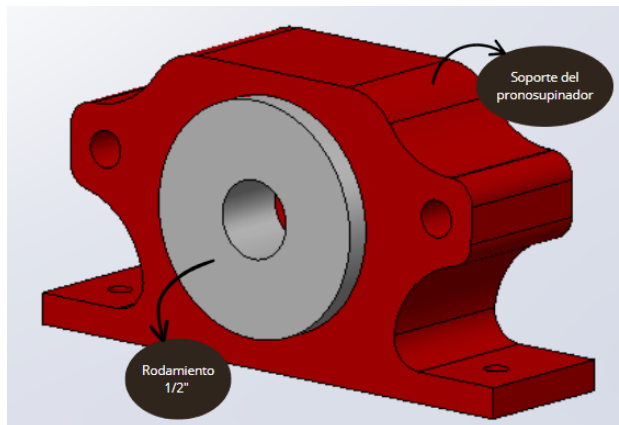
- Rodamientos $3/4'' \times 1\ 3/8''$: Insertar los dos rodamientos (marca PGN en este caso) con pestaña en los espacios destinados dentro de la parte 2 de la carcasa. Estos deben colocarse en lados opuestos, de manera que la pestaña de cada rodamiento quede en contacto con el reborde exterior del barreno correspondiente. El diseño del ensamble proporciona la orientación adecuada para su correcta colocación.
 - **Rodamientos $1/2'' \times 1\ 3/8''$** : Colocar los rodamientos (marca Xike en este caso) en los alojamientos correspondientes de los soportes para el pronosupinador, insertando uno en cada lado. Cada rodamiento debe quedar con la pestaña apoyada contra la pared de la cara frontal del respectivo soporte, asegurando una sujeción firme y una alineación adecuada con el eje del pronosupinador.
3. **Ensamble del pronosupinador y joystick (Figura 5.4)**: Insertar el joystick entre las dos mitades del pronosupinador y asegurar con tornillos M4 de 80 mm de longitud, insertar la tuerca hexagonal en el espacio dedicado a eso del pronosupinador parte 2. El joystick atornillar con tornillos M3.5 de 15 mm de longitud.
 4. **Unión del picaporte con el desplazador (Figura 5.5)**: Atornillar el picaporte en su espacio correspondiente dentro del desplazador con tornillos M4 de 50 mm de longitud.
 5. **Inserción del pronosupinador en la base rotativa superior pasiva y el soporte correspondiente (Figura 5.6)**: Introducir el pronosupinador en los rodamientos



(a) Rodamientos 3/4 pulgada en la parte 2 de la carcasa.



(b) Rodamiento 1/2 pulgada en base rotativa superior pasiva.



(c) Rodamiento 1/2 pulgada en soporte.

Figura 5.3: Rodamientos.

designados. El eje más largo debe insertarse en el rodamiento de la base rotativa superior pasiva y el más corto en el soporte para pronosupinador. Asegurarse de que los cables del joystick pasen por su canal de salida en el soporte y sigan el recorrido por la base rotativa superior pasiva. Se recomienda insertar el tornillo cercano al eje de salida del pronosupinador parte 1 en el espacio correspondiente de la base rotativa superior

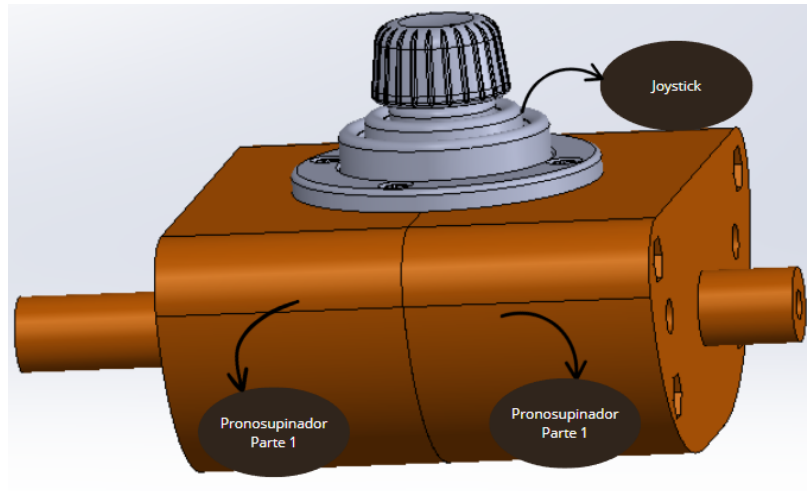


Figura 5.4: Ensamble del pronosupinador y joystick.

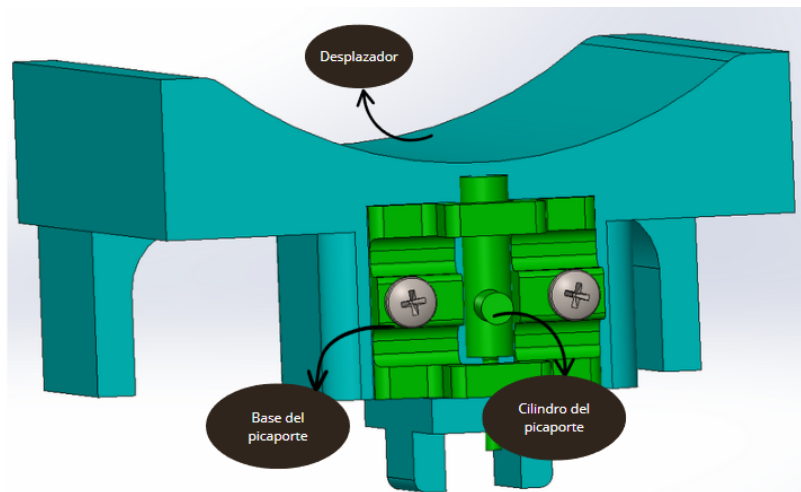


Figura 5.5: Ensamble del desplazador y picaporte.

pasiva parte 2, con el fin de evitar problemas de inserción en los pasos siguientes, este tornillo es un M4 con 25 mm de longitud y su tuerca.

6. **Colocación de la guía en las partes 1 y 2 de la base rotativa superior pasiva (Figura 5.7):** Insertar la guía en la base rotativa superior pasiva para canalizar los cables del joystick hasta que emerjan por el eje de la parte 1.
7. **Finalización del ensamblaje de la base rotativa superior pasiva (Figura 5.8):** Una vez guiados los cables a través de la base, fijar la parte 3 de la base rotativa superior pasiva junto con las otras dos secciones y el soporte del pronosupinador. Para unir el soporte del pronosupinador con la base rotativa, usar tornillos M4 de 20 mm de longitud. Los otros 3 tornillos son M4 de 30 mm de longitud.
8. **Instalación del encoder en la base rotativa superior pasiva (Figura 5.9):**

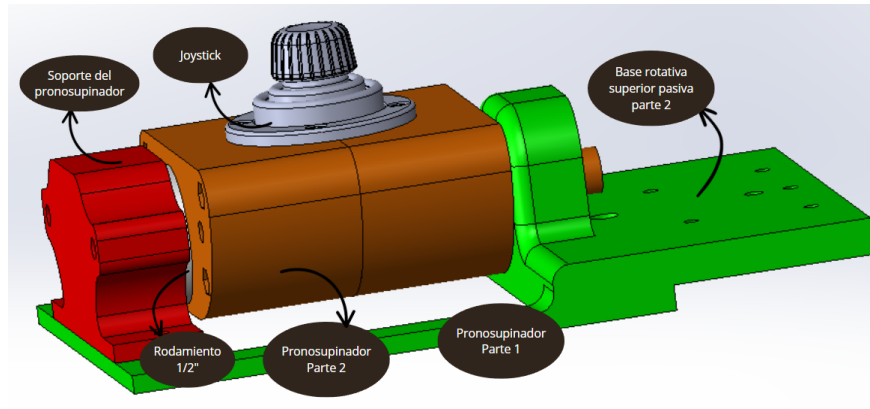


Figura 5.6: Ensamble del pronosupinador y la base rotativa superior pasiva parte 2.

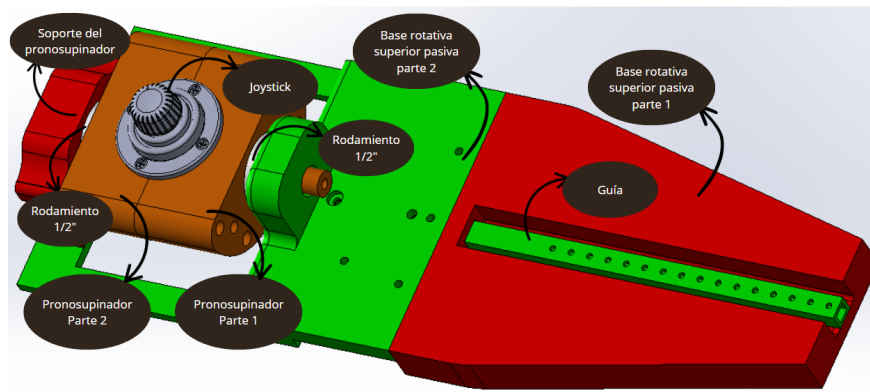


Figura 5.7: Ensamble de la guía.

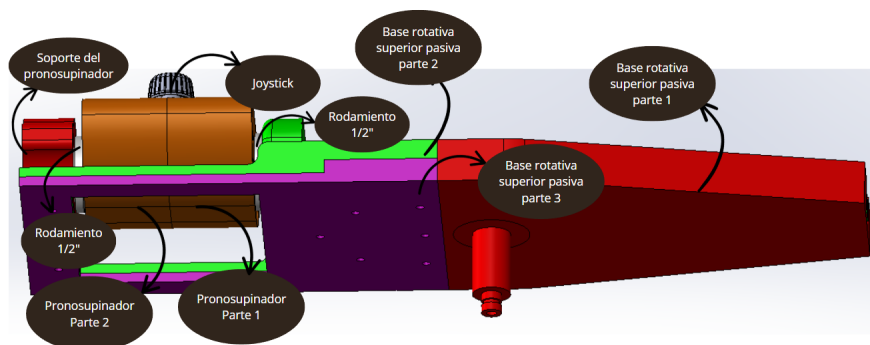


Figura 5.8: Ensamble de la base rotativa superior pasiva.

Colocar el encoder en su ubicación correspondiente dentro de la base rotativa superior pasiva, guiando sus cables a través del conducto hasta que salgan por el eje. Para atornillar el encoder en su soporte, se hará uso de 3 tornillos M2 con 8 mm de longitud. Después colocar la cubierta y atornillar con tornillos M4 de 30 mm de longitud y su respectiva tuerca.

9. **Montaje de botones y puerto de carga (Figura 5.10):** Insertar el botón de

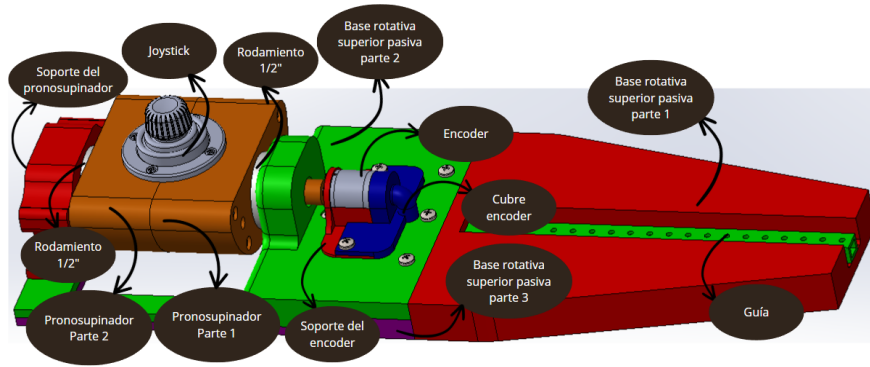
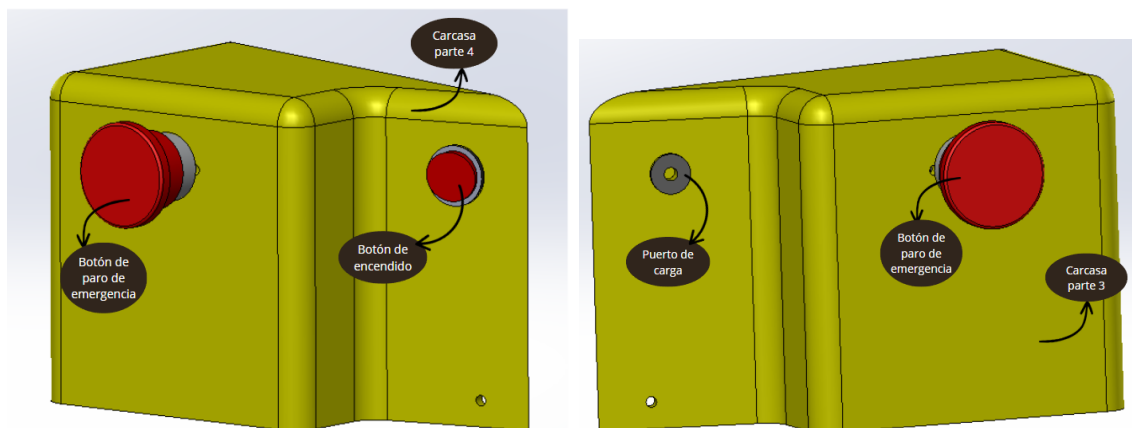


Figura 5.9: Ensamble del encoder.

paro de emergencia, el botón de encendido y el puerto de carga en sus respectivos alojamientos.



(a) Montaje de botón de paro de emergencia y botón de encendido. (b) Montaje de botón de paro de emergencia y puerto de carga.

Figura 5.10: Ensamble de botones y puerto de carga.

10. **Ensamble de la carcasa (Figura 5.11):** Ensamblar las partes de la carcasa y fijarlas con tornillos M4 tipo Allen de 16 mm de longitud, facilitando así el ensamblaje y desmontaje en caso de mantenimiento. Además, se atornillarán las guías de union en la parte interna e inferior de la carcasa, se hará uso de tornillos M4 de 13 mm de longitud con tuercas.
11. **Montaje de la base rotativa superior pasiva en la carcasa (Figura 5.12):** Insertar a presión la base rotativa superior pasiva en los rodamientos integrados en la carcasa, asegurando un correcto ajuste.
12. **Instalación de soporte, motores y ruedas omnidireccionales (Figura 5.13):** Insertar el soporte en la base de MDF; en esta etapa no es necesario fijarlo, pero su colocación previa es indispensable antes de montar los motores y las ruedas. Posteriormente, fijar los motores a los soportes de la base de MDF con tornillos M3 de 6 mm

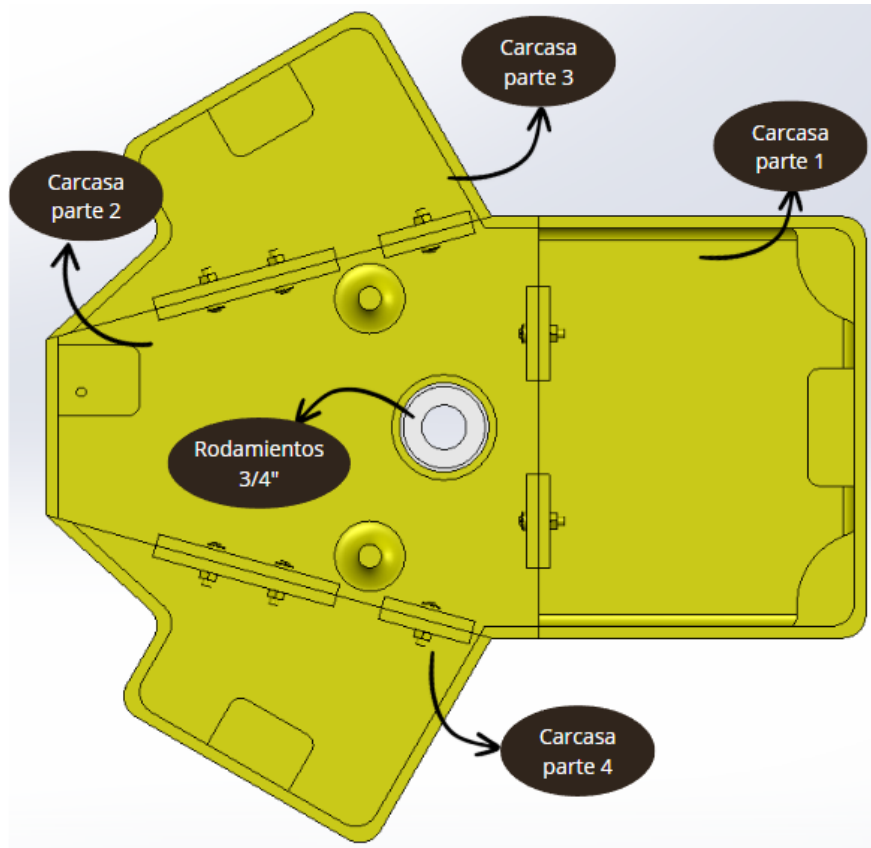


Figura 5.11: Ensamble de la carcasa.

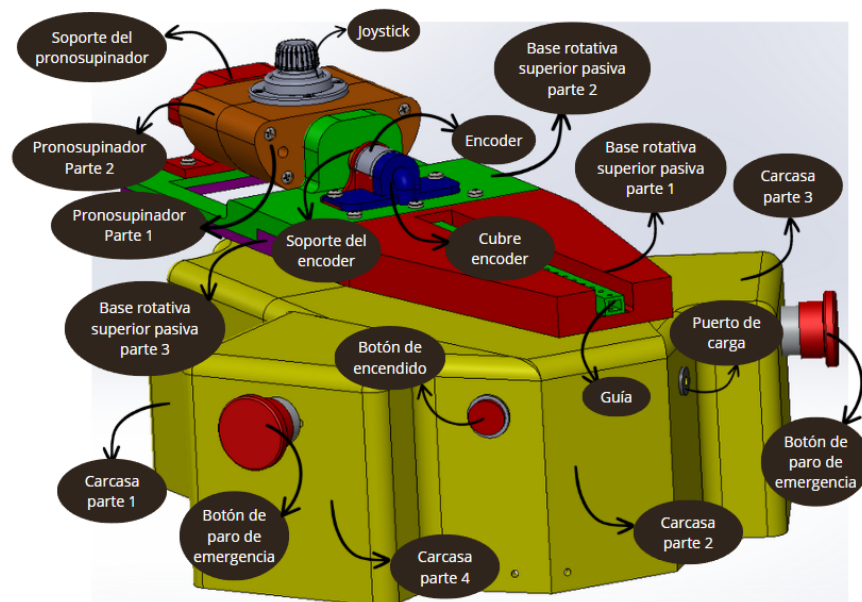


Figura 5.12: Ensamble de la base rotativa superior pasiva con la carcasa.

de longitud y acoplar las ruedas omnidireccionales a sus respectivos ejes, apretando los tornillos prisioneros del cople y del eje cuadrado de transmisión para asegurar un montaje firme y una correcta alineación.

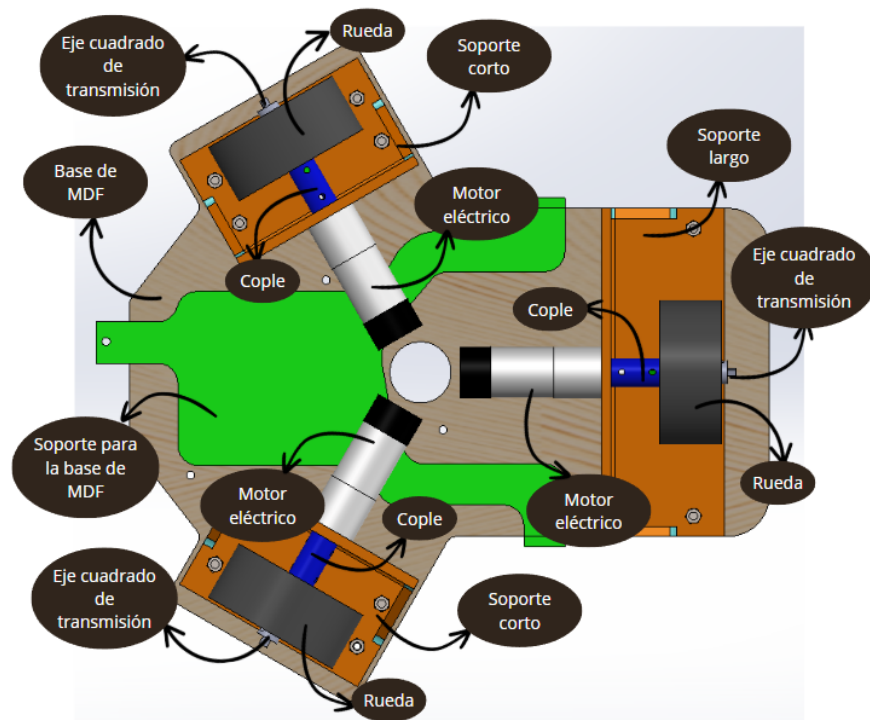


Figura 5.13: Motores y ruedas en la base.

13. **Conexión del sistema eléctrico:** Realizar las conexiones por soldadura del puerto de carga y del botón de encendido hacia la batería. Asimismo, integrar los botones de paro de emergencia en el trayecto eléctrico entre las baterías y la PCB STM32 Nucleo para permitir el corte de corriente independiente de la tarjeta.
14. **Colocación de las baterías y la PCB en la base (Figura 5.14):** Montar las baterías y la tarjeta STM32 Nucleo sobre la base de MDF en sus respectivos espacios y sus soportes, asegurando también las conexiones eléctricas correspondientes. Usar tornillos M4 de 13 mm de longitud
15. **Montaje del soporte para el antebrazo y del extensor de joystick:** Fijar el soporte del antebrazo sobre la guía, asegurando una correcta alineación, estabilidad estructural y un contacto cómodo para el usuario. En el caso del extensor, este debe colocarse cuidadosamente sobre el joystick, siguiendo la geometría de acoplamiento prevista para garantizar una inserción segura y sin forzamientos.
16. **Verificación final del ensamble:** Para terminar, atornillar el soporte de la base de MDF en la carcasa con tornillos M4 de 16 mm de longitud. Comprobar que todos los tornillos estén correctamente ajustados, que las piezas móviles se desplacen sin

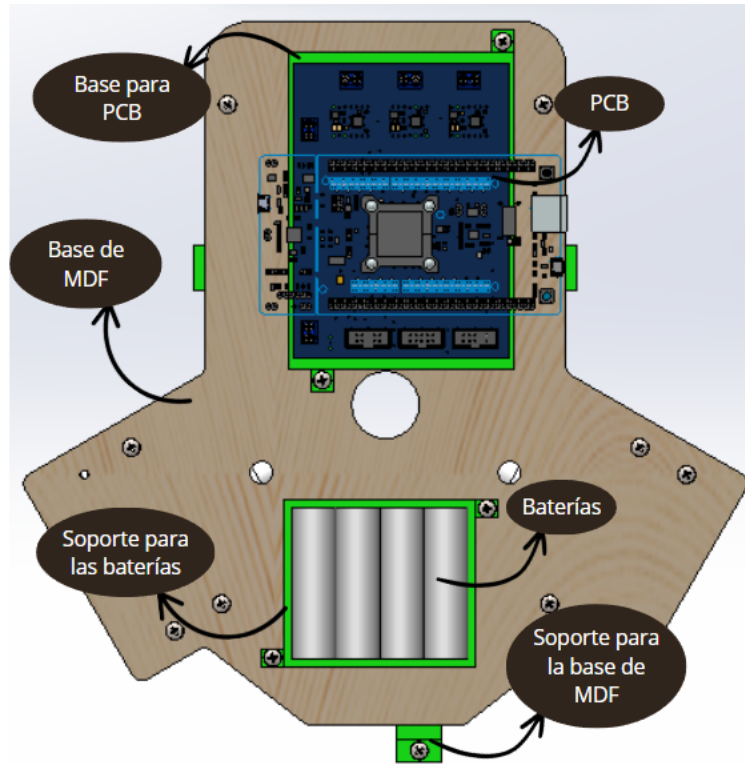
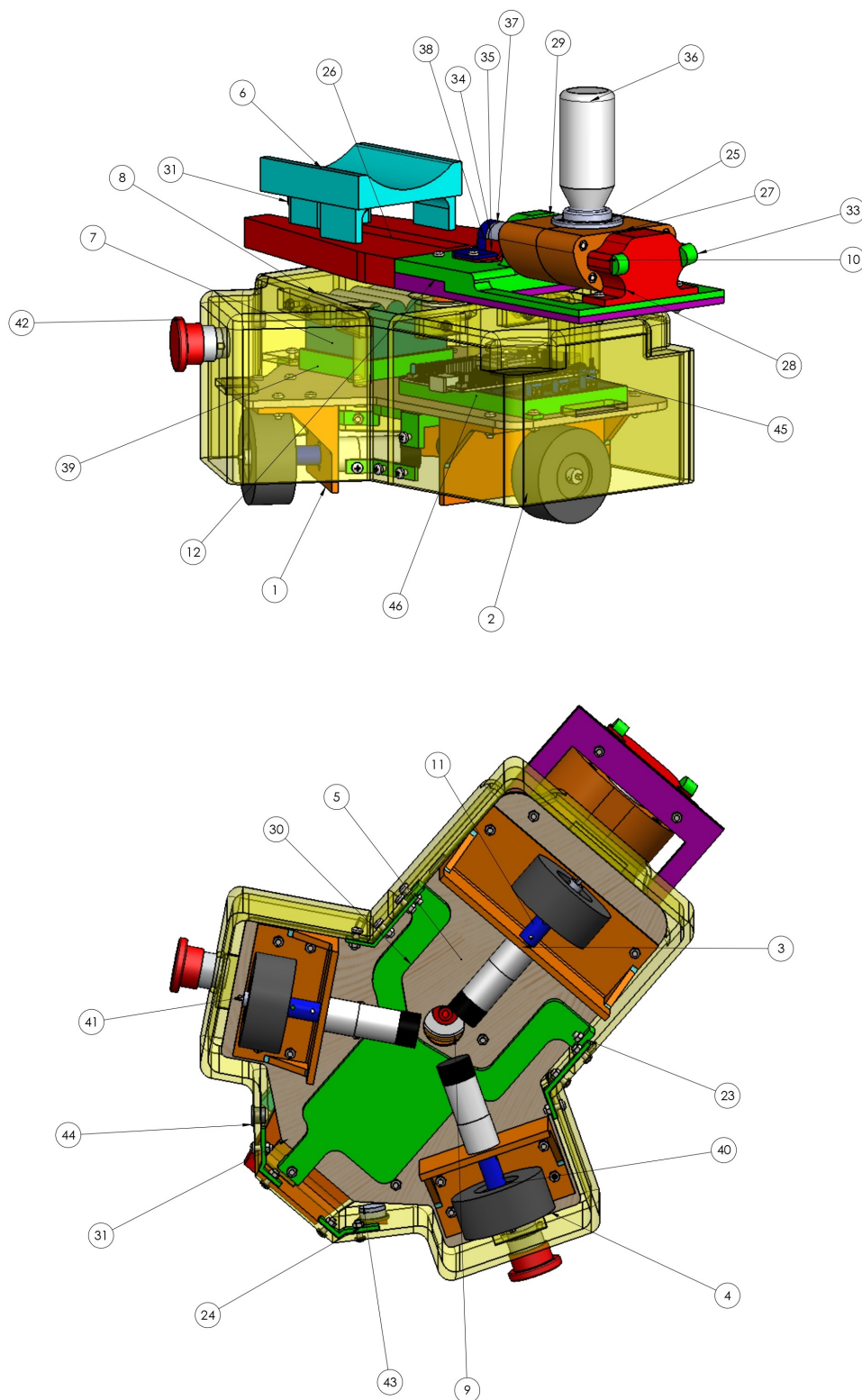


Figura 5.14: Ensamble de baterías y PCB.

interferencias, y que los ejes estén bien alineados. Realizar una prueba manual completa del recorrido del sistema.



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Soporte corto	2
2	Soporte largo	1
3	Motor eléctrico	3
4	Rueda	3
5	Base de MDF	1
6	Desplazador	1
7	Baterías	1
8	Ensamble carcasa	1
9	Rodamiento 3/4"	2
10	Rodamiento 1/2"	2
11	Cople rueda-motor	3
12	Ensamble base rotativa superior pasiva	1
13	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 30 Type I Cross Recessed PHMS -- 30N	5
14	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 16 Type I Cross Recessed PHMS -- 16N	11
15	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 13 Type I Cross Recessed PHMS -- 13N	14
16	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 25 Type I Cross Recessed PHMS -- 25N	2
17	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 20 Type I Cross Recessed PHMS -- 20N	2
18	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 80 Type I Cross Recessed PHMS -- 80N	4
19	B18.6.7M - M2 x 0.4 x 8 Type I Cross Recessed PHMS -- 8N	3
20	B18.6.7M - M4 x 0.7 x 50 Type I Cross Recessed PHMS -- 50N	2
21	B18.6.7M - M3 x 0.5 x 6 Type I Cross Recessed PHMS -- 6N	6
22	B18.2.4.1M - Hex nut, Style 1, M4 x 0.7 --D-N	42
23	Guía frontal para carcasa	2
24	Guía trasera para carcasa	2
25	Joystick	1
26	Guía	1
27	Pronosupinador Parte 2	1
28	Soporte del pronosupinador	1
29	Pronosupinador Parte 1	1
30	Soporte para la base de MDF	1
31	Base del picaporte	1
32	Cilindro del picaporte	1
33	Seguro	2
34	Encoder	1
35	Soporte del encoder	1
36	Extensor	1
37	Tapa del encoder	1
38	Cubre Encoder	1
39	Soporte para las baterías	1
40	Adaptador para cople	3
41	Eje cuadrado de transmisión	3
42	Boton de paro de emergencia	2
43	Botón de encendido	1
44	Puerto de carga	1
45	PCB_Nucleo_encoders	1
46	Base para PCB	1

Figura 5.15: Ensamble final.

5.3. Modelo físico experimental en impresión 3D

En esta sección se presentan las imágenes del prototipo físico del robot de rehabilitación desarrollado, el cual fue diseñado con el objetivo de permitir movimientos de pronosupinación y flexoextensión del miembro superior. La fabricación del modelo se llevó a cabo principalmente mediante impresión 3D utilizando materiales como PLA y PETG, y se complementó con un componente de MDF para la base estructural.

Las fotografías muestran los distintos ángulos y ensambles del sistema, permitiendo observar tanto la geometría general del dispositivo como los detalles de unión, soporte y funcionalidad de cada uno de los módulos. Estas imágenes permiten validar la correcta materialización del diseño asistido por computadora (CAD) y representan un paso importante en la transición del diseño conceptual al producto físico funcional.

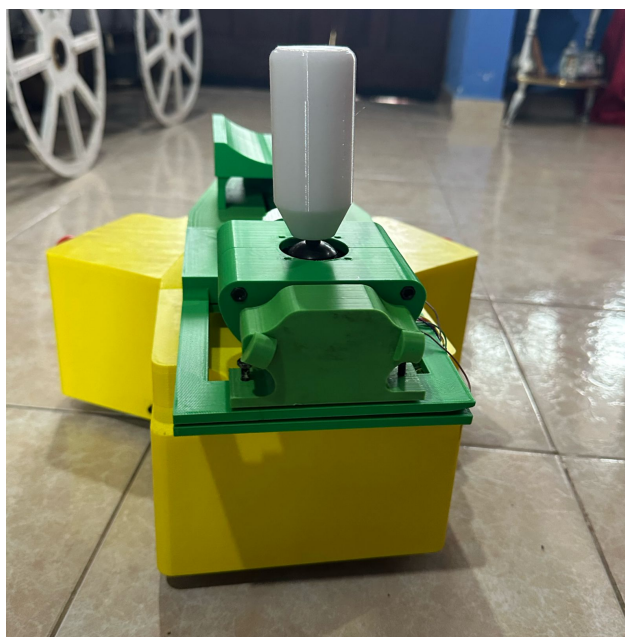


Figura 5.16: Vista frontal del modelo físico.

En la Figura 5.16 se muestra el prototipo físico del robot de rehabilitación de miembro superior en su vista frontal. La estructura principal está compuesta por piezas impresas en 3D en color verde y amarillo de PLA. Al centro se observa el extensor (en color blanco), diseñada para el agarre del usuario. Esta se encuentra montada sobre el joystick que permite el movimiento del robot. El conjunto verde contiene la base rotativa superior pasiva, el soporte del pronosupinador, el pronosupinador y los seguros. Es visible también el sistema de desplazamiento lineal montado sobre guías, para mejor ubicación de los elementos del robot, consultar la Figura 5.15.

En la Figura 5.17 se presenta una vista lateral izquierda del prototipo físico del robot de rehabilitación para miembro superior. La estructura verde contiene el sistema mecánico de desplazamiento lineal, encargado de guiar el movimiento de flexoextensión del brazo, y el módulo de pronosupinación con el extensor blanco.

La base estructural amarilla, fabricada en PLA, proporciona estabilidad al conjunto.

En el extremo derecho se observa un botón rojo de paro de emergencia, diseñado para interrumpir de inmediato el funcionamiento del sistema ante cualquier situación de riesgo o mal funcionamiento. La incorporación de este botón forma parte de las medidas de seguridad contempladas en el diseño.

En la Figura 5.18 se observa una vista posterior del prototipo físico del robot de rehabilitación, donde se destacan claramente los elementos de control y seguridad integrados en la base amarilla. Se pueden ver dos botones de paro de emergencia, uno a cada extremo lateral, diseñados para facilitar el acceso desde ambos lados del dispositivo y garantizar una rápida detención del sistema en caso necesario.



Figura 5.17: Vista lateral del modelo físico.

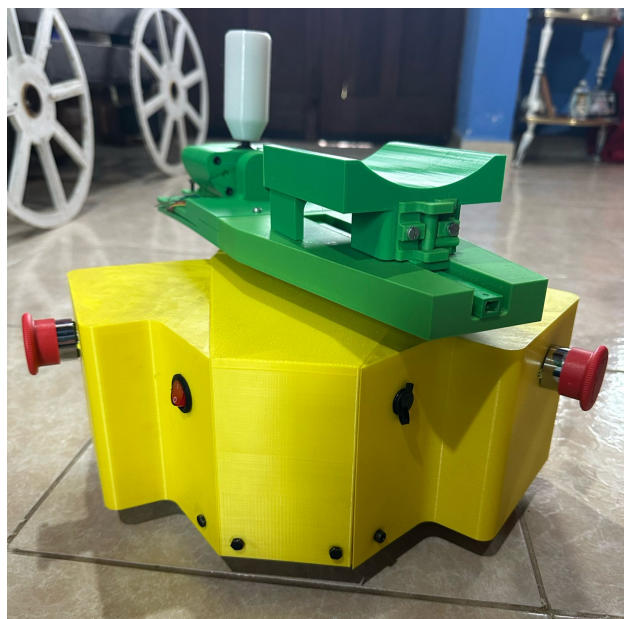


Figura 5.18: Vista trasera del modelo físico.

Además, se identifica, del lado izquierdo, un interruptor de encendido/apagado (color rojo) y, del lado derecho, un puerto de alimentación, permitiendo una conexión sencilla a la fuente de energía del sistema.

En la parte superior, la estructura verde con forma de U, corresponde al desplazador, que incluye el soporte ergonómico para el antebrazo del usuario. El diseño de esta base móvil, montada sobre una guía lineal, permite el desplazamiento controlado hacia adelante y hacia atrás para realizar un ajuste dependiendo del tamaño del miembro superior. También se aprecian las guías de unión para la carcasa que garantizan que esta no se separe debido a la carga.

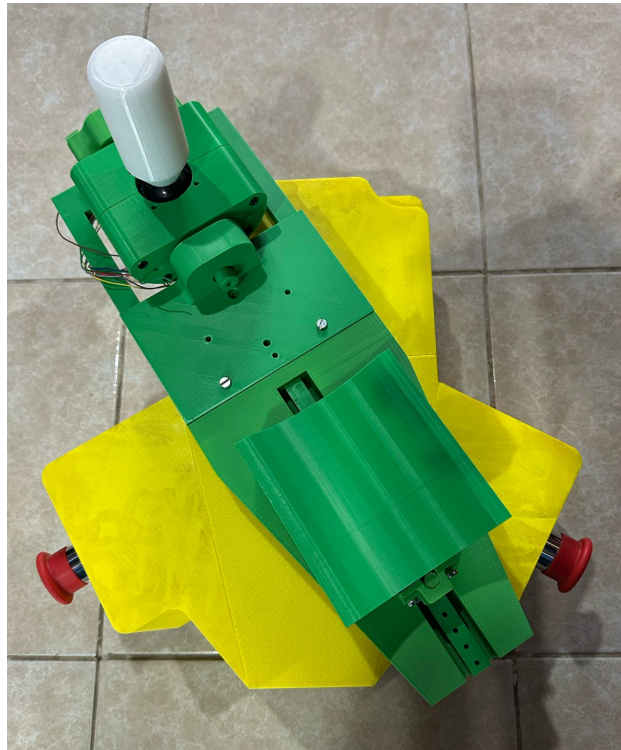


Figura 5.19: Vista superior del modelo físico.

La Figura 5.19 presenta una vista superior del prototipo del robot de rehabilitación, permitiendo observar la alineación y distribución de sus módulos principales. En el extremo superior se encuentra el extensor blanco utilizada para el agarre y el ejercicio de pronosupinación.

En la parte inferior se encuentra el soporte del antebrazo, cuyo diseño curvo busca adaptarse a la anatomía del usuario, proporcionando mayor estabilidad durante el ejercicio. Se aprecian también los orificios de fijación y ranuras de desplazamiento, que forman parte del sistema mecánico impreso para controlar el movimiento lineal.

A ambos lados de la base se ubican los botones rojos de paro de emergencia. Su disposición no es arbitraria: se eligieron posiciones laterales y opuestas con el objetivo de garantizar su accesibilidad inmediata durante la operación. Debido a que el mecanismo de rehabilitación y el brazo del usuario se desplazan únicamente en la dirección longitudinal de la guía, ninguna parte móvil del sistema puede bloquear simultáneamente ambos botones.

Esto implica que, aun si uno de los lados queda temporalmente cubierto por la posición del usuario o por el desplazador, el botón del lado opuesto permanece completamente accesible. Este criterio cumple con la práctica común en dispositivos de interacción humana, donde la duplicación lateral del elemento de seguridad asegura la activación rápida sin importar la orientación del robot, la postura del usuario o la posición del mecanismo.

Por lo tanto, aunque en la vista superior del prototipo la presencia de componentes cercanos pudiera sugerir lo contrario, en las condiciones reales de uso los botones de emergencia sí son accesibles en todo momento, y su ubicación garantiza la posibilidad de detener el sistema de manera inmediata ante cualquier eventualidad.

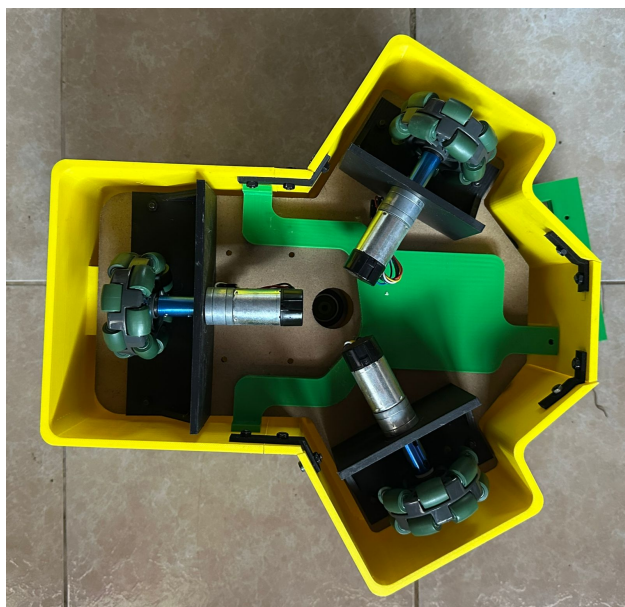


Figura 5.20: Vista inferior del modelo físico.

La imagen muestra la vista inferior del robot de rehabilitación, donde se observa la configuración mecánica del sistema de movilidad. El chasis interno está compuesto por una estructura de MDF que sirve como base rígida para el montaje de los componentes. Se identifican tres ruedas omnidireccionales, montadas sobre soportes impresos en 3D y acopladas a motores eléctricos de corriente continua mediante ejes metálicos.

Esta disposición triangular de las ruedas permite al sistema realizar desplazamientos con alta maniobrabilidad en cualquier dirección, característica esencial para ajustar la posición del robot durante la terapia sin necesidad de rotar la estructura completa.

El cableado interno y los alojamientos facilitan la organización de los elementos eléctricos y protegen el sistema de posibles interferencias mecánicas. Esta vista evidencia la integración entre partes comerciales (ruedas, motores) y partes impresas, confirmando la funcionalidad estructural de la base móvil.

Análisis de modo y efecto de falla (AMEF)

El presente apartado expone el análisis de riesgos aplicado a los distintos componentes del robot de rehabilitación, mediante la metodología del Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF). Esta herramienta permite identificar de manera sistemática los posibles modos de falla que pueden presentarse en cada una de las partes del sistema, sus efectos potenciales, las causas que los originan, y los controles de prevención y detección actualmente implementados.

El objetivo principal de este análisis es evaluar el nivel de riesgo asociado a cada modo de falla mediante la asignación de valores de severidad (SEV), ocurrencia (OCU) y detección (DET), calculando así el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) para priorizar acciones correctivas. Este proceso asegura que se implementen las medidas necesarias para mejorar la confiabilidad, seguridad y desempeño del sistema, optimizando el diseño y reduciendo la probabilidad de fallas durante su operación.

A continuación, se presentan los AMEF correspondientes a cada componente crítico del robot, considerando tanto las condiciones de carga mecánica a las que estarán sometidos, como los mecanismos de ensamblaje y las condiciones de uso previstas.

Para la elaboración del Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF), se utilizó una escala numérica estandarizada para evaluar cada uno de los parámetros involucrados, que son los siguientes:

Severidad (SEV): Representa el nivel de impacto o consecuencias que tendría una falla en el sistema o en la seguridad del usuario.

- 9–10: Fallo que compromete el funcionamiento total o la seguridad.
- 7–8: Fallo que reduce significativamente el rendimiento del robot.
- 5–6: Fallo que afecta el funcionamiento pero no impide su uso.
- 3–4: Fallo que causa molestias menores o desgaste prematuro.
- 1–2: Fallo apenas perceptible.

Ocurrencia (OCU): Mide la probabilidad de que ocurra una falla.

- 8–10: Muy frecuente, casi seguro sin control.
- 5–7: Posible si no se tiene cuidado.
- 3–4: Poco frecuente, pero factible.
- 1–2: Muy raro.

Detección (DET): Representa la capacidad de los procedimientos, inspecciones o herramientas disponibles para detectar la causa de la falla a tiempo.

- 9–10: Casi imposible de detectar a tiempo.
- 6–8: Difícil de detectar.
- 3–5: Puede detectarse con controles estándar.
- 1–2: Muy fácil de detectar.

Número de Prioridad de Riesgo (NPR): Es el producto de los tres factores anteriores ($NPR = S \times O \times D$) y permite priorizar las acciones correctivas. Mientras mayor sea el NPR, mayor será la urgencia para implementar mejoras.

Clasificación de la Acción (CLA): Después de implementar las acciones recomendadas, se recalculan los valores de S, O y D para evaluar el nuevo NPR. Este valor actualizado se utiliza para definir la prioridad de seguimiento mediante la siguiente escala:

- **Baja prioridad (CLA = B):** NPR entre 1 y 40.
- **Moderada prioridad (CLA = M):** NPR entre 41 y 100.
- **Alta prioridad (CLA = A):** NPR mayor a 100.

Tabla 5.1: AMEF Base de MDF

				Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño						Codigo del Documento: AMEF-030420-01									
										Pagina No. : 1						Fecha : 21/04/2025			
				Tipo de Producto: Robot para rehabilitación															
				Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote				Revisó :				Aprobó:				Revision :			
Aplicacion:				Cliente:				Fecha de Aprobacion:											
Articulo	Modo Potencial de la Falla	Efecto Potencial de la Falla	S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla	O C U	Controles de Prevención	Controles de Detección.	D E T	N P R	Acciones Recomendadas	Responsable/ Fecha Objetivo	Resultado de las Acciones						
													Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R		
Base de MDF	Deformación por carga excesiva o impacto	Inestabilidad en la estructura del robot	8	B	Espesor insuficiente del MDF	3	Validación estructural mediante cálculos	Inspección visual del ensamblaje	2	48	Incrementar el espesor del MDF	Sebastián Arámbula Coyote	Se reforzó la base y se seleccionó MDF de mejor calidad para garantizar la estabilidad	4	2	2	16		
		Alineación deficiente de los componentes	7	B	Calidad variable del material	3	Selección de MDF de alta densidad	Prueba de estabilidad del robot	2	42	Incluir refuerzos adicionales en zonas críticas								
		Vibraciones en el conjunto	6	B	Diseño sin refuerzos adecuados	3	Implementación de refuerzos en el diseño	Verificación dimensional de la base	2	36	Seleccionar MDF con certificación de calidad	Abril 2025							
	Desgaste o daño en las zonas de apoyo	Desnivelación del robot	7	B	Fricción repetitiva en las zonas de contacto	3	Aplicación de protecciones en las zonas de apoyo	Inspección visual de las zonas de apoyo	2	42	Añadir protecciones o refuerzos en las zonas de apoyo	Sebastián Arámbula Coyote	Se mejoró la estructura de apoyo con protecciones adicionales	4	2	2	16		
		Movimiento irregular o vibraciones	6	B	Uso prolongado en superficies irregulares	3	Revisión periódica de las superficies de contacto	Medición de nivelación del robot	2	36	Mejorar las patas ajustables para compensar desgaste	Abril 2025							
	Hinchazón o degradación por humedad	Deformación de la base	8	B	Exposición a ambientes húmedos	4	Aplicación de selladores o recubrimientos impermeabilizantes	Inspección visual periódica en zonas expuestas	2	64	Aplicar recubrimientos adicionales resistentes a la humedad	Sebastián Arámbula Coyote	Se implementaron recubrimientos protectores y se ajustaron las condiciones de almacenamiento	4	2	2	16		
		Deterioro estructural progresivo	7	B	Material sensible a la humedad	4	Validación de condiciones de operación	Revisión de condiciones ambientales	2	56	Mejorar las condiciones de almacenamiento y operación	Abril 2025							

El análisis de modo y efecto de falla aplicado a la base de MDF del robot de rehabilitación permitió identificar y evaluar tres modos de falla críticos que podrían comprometer el desempeño estructural del sistema: deformación por carga excesiva o impacto, desgaste en las zonas de apoyo, e hinchazón o degradación del material debido a la humedad. Estos modos de falla fueron seleccionados considerando las propiedades físicas del MDF y el entorno operativo del robot.

En primer lugar, la deformación por carga excesiva o impacto se identificó como un riesgo significativo, especialmente por la posibilidad de generar inestabilidad estructural, alineaciones deficientes de componentes y vibraciones indeseadas. La severidad de estos efectos se calificó con valores entre 6 y 8, reflejando su impacto potencial en la precisión del movimiento del robot y en la seguridad del usuario. Las causas asociadas incluyeron un espesor insuficiente del MDF, variabilidad en la calidad del material y la ausencia de refuerzos estructurales. Para mitigar este riesgo, se implementaron acciones como el incremento del espesor en zonas críticas, el refuerzo de la base y la selección de un MDF de mayor densidad y calidad, lo cual permitió reducir

el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) de 48 a 16. Como parte de los controles preventivos, se llevó a cabo una validación estructural mediante simulaciones por elementos finitos (FEM), lo que permitió anticipar zonas de concentración de esfuerzos y optimizar el diseño antes de la fabricación. Estas medidas se complementaron con pruebas físicas de estabilidad y verificaciones dimensionales como controles de detección.

El segundo modo de falla abordado fue el desgaste o daño en las zonas de apoyo, causado por fricción repetitiva o uso prolongado del robot sobre superficies rugosas. Los efectos principales de este modo de falla, como la desnivelación o el movimiento irregular, aunque de menor severidad ($Sev = 6$), podrían deteriorar la experiencia del usuario y afectar la repetibilidad del movimiento. La ocurrencia se valoró en nivel 3, dada la probabilidad de desgaste con el uso constante, y se propusieron acciones correctivas enfocadas en la adición de protecciones en las zonas de apoyo y en la mejora de las patas ajustables. La implementación de estas medidas, junto con inspecciones visuales y revisiones periódicas, resultó eficaz para reducir el NPR de 36 a 16, mejorando la robustez del diseño sin requerir intervenciones complejas. También en este caso, el diseño fue previamente evaluado mediante simulación FEM para confirmar la integridad estructural de la base bajo condiciones de carga repetitiva.

Finalmente, se analizó el modo de falla por hinchazón o degradación del MDF debido a la humedad, un problema frecuente en materiales derivados de la madera expuestos a ambientes húmedos o mal ventilados. En este caso, los efectos incluyeron la deformación de la base y el deterioro progresivo de la estructura, con una severidad alta ($SEV = 7$). La causa principal identificada fue la selección de materiales sensibles a la humedad sin un tratamiento o recubrimiento adecuado. Se establecieron como controles preventivos la validación de condiciones de operación y la aplicación de selladores o recubrimientos impermeabilizantes. Gracias a estas acciones, así como a la mejora de las condiciones de almacenamiento, el NPR disminuyó de 56 a 16, garantizando un mayor tiempo de vida útil del componente.

En conjunto, este AMEF demuestra una adecuada identificación de riesgos potenciales en el diseño estructural de la base del robot, así como la implementación de medidas correctivas realistas y efectivas. La incorporación de simulación por elementos finitos en el proceso de diseño refuerza la confiabilidad de las decisiones tomadas y permite justificar cuantitativamente la efectividad de los cambios propuestos. Los resultados evidencian un diseño optimizado tras las acciones aplicadas, con todos los NPR finales dentro de niveles aceptables. Se recomienda, como mejora futura, la exploración de materiales alternativos con mayor resistencia a la humedad y la implementación de monitoreo ambiental básico para reforzar la durabilidad del sistema en distintas condiciones de operación.

Tabla 5.2: AMEF Carcasa

		Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño						Codigo del Documento: AMEF-030420-02									
								Pagina No. : 2				Fecha : 21/04/2025					
		Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote			Revisó :		Aprobó:		Revision :			Edicion : 1					
		Aplicacion:			Cliente:		Fecha de Aprobacion:										
Artículo	Modo Potencial de la Falla	Efecto Potencial de la Falla	S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla	O C U	Controles de Prevención	Controles de Detección.	D E T	N P R	Acciones Recomendadas	Responsable/ Fecha Objetivo	Resultado de las Acciones				
													Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R
Carcasa	Deformación en el alojamiento del rodamiento por carga axial	Desalineación del eje	8	B	Espesor insuficiente en la zona de carga	3	Simulación FEM bajo carga axial	Inspección visual del alojamiento	2	48	Incrementar el espesor en la zona de carga	Sebastián Arámbula Coyote	Se rediseñó la carcasa incrementando el espesor y mejorando la distribución de esfuerzos	4	2	2	16
		Holgura en el alojamiento	7	B	Concentración de esfuerzos	3	Revisión dimensional del alojamiento	Prueba funcional de ajuste con el rodamiento	2	42	Redistribuir esfuerzos mediante refuerzos						
		Desgaste prematuro del alojamiento	6	B	Tolerancias inadecuadas en el alojamiento	3	Validación de tolerancias en el diseño	Verificación dimensional	2	36	Ajustar las tolerancias						
	Fisura o fractura por esfuerzos concentrados en esquinas internas	Fallo estructural localizado	8	B	Concentración de esfuerzos en esquinas internas	2	Diseño con radios de filete adecuados	Inspección visual durante ensamble	2	32	Aumentar el radio de filete en zonas críticas	Sebastián Arámbula Coyote	Se aumentaron los radios de redondeo y se reforzó la geometría en las zonas críticas	4	2	2	16
		Deformación permanente	7	B	Radio de filete insuficiente	2	Simulación FEM para identificar zonas críticas	Validación del diseño con simulaciones	2	28	Reforzar las esquinas internas con geometría optimizada						
					Carga repetitiva		Selección apropiada del material	Control dimensional en esquinas internas									
	Desgaste por fricción entre las paredes de la carcasa y componentes móviles	Reducción de la vida útil	6	B	Contacto continuo con componentes móviles	3	Selección de material resistente al desgaste	Inspección visual periódica	2	32	Mejorar ajuste de los componentes	Sebastián Arámbula Coyote	Se mejoró el ajuste	4	2	2	16
		Vibraciones o ruido durante el funcionamiento	5	B	Material de baja resistencia al desgaste	3	Validación geométrica de ensamblaje	Prueba funcional del movimiento	2	30	Utilizar material con mayor resistencia al desgaste						
					Desalineación en el ensamblaje		Revisión de tolerancias	Medición de holgura			Aplicar recubrimientos protectores						

El análisis de modo y efecto de falla aplicado a la carcasa del robot de rehabilitación identificó tres modos de falla fundamentales asociados a las condiciones mecánicas que enfrenta esta pieza durante la operación. Debido a que la carcasa sirve como alojamiento para elementos móviles, electrónicos y de soporte estructural, su integridad es esencial para la precisión, durabilidad y funcionalidad del sistema. Los modos de falla analizados fueron: deformación en el alojamiento del rodamiento por carga axial, fisura o fractura por esfuerzos concentrados, y desgaste por fricción entre componentes móviles.

El primer modo de falla, la deformación en el alojamiento del rodamiento por carga axial, representa una amenaza importante para la alineación del eje y el correcto funcionamiento del sistema. Los efectos derivados incluyen desde holguras indeseadas hasta el desgaste prematuro del alojamiento. La severidad fue calificada con valores de 6 a 8, reflejando la posible pérdida de precisión o incluso el fallo funcional del eje. Las causas fueron principalmente geométricas y de diseño, tales como espesor insuficiente en la zona de carga o tolerancias inadecuadas. Para su análisis y control, se utilizó simulación por elementos finitos

(FEM) bajo condiciones de carga axial, lo cual permitió identificar zonas de concentración de esfuerzos y ajustar el espesor de la carcasa y la distribución interna de refuerzos. Estas acciones, en conjunto con inspecciones visuales y pruebas funcionales, permitieron reducir el NPR de 48 a 16, validando un rediseño eficaz del alojamiento.

El segundo modo de falla abordado fue la fisura o fractura por esfuerzos concentrados en esquinas internas, una problemática común en piezas con geometrías agudas o radios de filete insuficientes. En este caso, la severidad se consideró alta ($SEV = 8$) debido al riesgo de fractura localizada que comprometa la integridad estructural del conjunto. Mediante simulaciones FEM específicas para identificar zonas críticas, se detectaron concentraciones elevadas de tensiones en zonas sin fileteado adecuado. Esto derivó en un rediseño con radios de filete más amplios y geometría optimizada, lo que, en conjunto con la validación dimensional y control visual, redujo el NPR inicial de 32 a 16. El tratamiento de este modo de falla evidencia la aplicación adecuada de principios de diseño mecánico para reducir la fatiga por concentraciones de esfuerzo.

Finalmente, se evaluó el desgaste por fricción entre las paredes de la carcasa y componentes móviles, un modo de falla que, si bien presenta una severidad menor ($SEV = 6$), puede acumular efectos negativos sobre la vida útil del sistema y la estabilidad durante el funcionamiento. Las causas identificadas fueron el contacto continuo sin aislamiento y el uso de materiales con baja resistencia al desgaste. Para prevenir este fallo, se mejoró el ajuste dimensional, se seleccionaron materiales con mayor resistencia y se aplicaron recubrimientos protectores. Estas acciones correctivas fueron eficaces, reduciendo el NPR de 32 a 16. Adicionalmente, se aplicaron controles de detección como pruebas funcionales y medición de holgura para garantizar la precisión del ensamble.

Cabe destacar que en todos los modos de falla analizados se utilizaron simulaciones por elementos finitos (FEM) como herramienta fundamental para anticipar fallas estructurales, identificar zonas críticas y validar los rediseños propuestos. Esto no solo permitió una reducción significativa de los niveles de riesgo, sino que también refuerza la solidez del diseño final.

En resumen, el AMEF de la carcasa demuestra un enfoque riguroso en la identificación, evaluación y mitigación de los principales riesgos estructurales. Las acciones tomadas, basadas en análisis por elementos finitos y rediseño geométrico, contribuyen de forma efectiva a la mejora del desempeño y durabilidad del sistema, cumpliendo con los criterios de seguridad y funcionalidad requeridos para un dispositivo de rehabilitación.

Tabla 5.3: AMEF Soportes

				Analisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño						Codigo del Documento: AMEF-030420-03							
										Pagina No. : 3				Fecha : 21/04/2025			
				Tipo de Producto: Robot para rehabilitación				De :		Revision :		Edicion : 1					
				Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote				Revisó :		Aprobó:							
Aplicacion:				Cliente:		Fecha de Aprobacion:											
Articulo	Modo Potencial de la Falla	Efecto Potencial de la Falla	S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla	O C U	Controles de Prevención	Controles de Detección.	D E T	N P R	Acciones Recomendadas	Responsable/ Fecha Objetivo	Resultado de las Acciones				
													Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R
Soportes	Deformación por flexión excesiva en la zona superior	Fisura visible en superficie	6	B	Grosor insuficiente en la plataforma	3	Simulación FEM de carga en soportes	Inspección visual del refuerzo y superficie	2	36	Incrementar el grosor del soporte	Sebastián Arámbula Coyote	Se rediseñó el perfil del soporte y se reforzó la zona de mayor sollicitación	4	2	2	16
		Desplazamiento del soporte bajo carga	7	B	Geometría inadecuada del refuerzo diagonal	3	Revisión de tolerancias y grosor en CAD	Prueba de ensamble con plantillas	2	42	Rediseñar el refuerzo diagonal						
		Reducción de rigidez estructural	7	B	Carga concentrada sin distribución	3	Validación de diseño en prototipo funcional	Verificación dimensional de barrenos y unión	2	42	Redistribuir la carga o utilizar placas de soporte						
	Desalineación de los orificios de montaje	Dificultad en el ensamble	5	B	Tolerancia de mecanizado incorrecta	3	Revisión de tolerancias y grosor en CAD	Verificación dimensional de barrenos y unión	2	30	Ajustar tolerancias de los barrenos	Sebastián Arámbula Coyote	Se ajustaron las tolerancias y se incorporó control dimensional en preensamble	4	2	2	16
		Holguras no deseadas	6	B	Errores en diseño CAD	3	Validación de diseño en prototipo funcional	Prueba de ensamble con plantillas	2	36	Validar posición con plantilla de ensamble						
		Desajuste con otras piezas	6	B	Falta de verificación durante manufactura	4	Simulación FEM de carga en soportes	Inspección visual del refuerzo y superficie	2	48	Simular el montaje con análisis CAD						
	Falla en la unión entre las piezas del soporte	Separación de las partes	6	B	Uso de adhesivo inadecuado	3	Validación de diseño en prototipo funcional	Prueba de ensamble con plantillas	3	54	Instrucciones claras sobre apriete de tornillos	Sebastián Arámbula Coyote	Se aseguró que los tornillos estén correctamente colocados	4	2	2	16
		Ruido en operación	5	B	Ausencia de tornillos de refuerzo	4	Simulación FEM de carga en soportes	Verificación dimensional de barrenos y unión	3	60	Incluir fijación mecánica adicional						
		Pérdida de rigidez global	7	B	Cargas dinámicas no previstas	3	Revisión de tolerancias y grosor en CAD	Inspección visual del refuerzo y superficie	3	63	Simular condiciones de carga en operación						

El análisis de los posibles modos de falla en los soportes del robot de rehabilitación se centró en tres aspectos críticos: la deformación estructural por flexión en la zona superior, la desalineación de los orificios de montaje y las fallas en la unión entre las piezas del soporte. Estos componentes tienen un rol fundamental en la integridad mecánica del robot, ya que reciben cargas directas y garantizan el correcto ensamble del sistema.

El primer modo de falla identificado fue la deformación por flexión excesiva en la zona superior del soporte, con efectos potenciales como fisuras visibles, desplazamiento bajo carga y reducción de rigidez estructural. La severidad de estos efectos fue valorada entre 6 y 7, dado que comprometen tanto la estética como la funcionalidad del robot. Entre las causas destacan el grosor insuficiente del soporte, errores geométricos en el refuerzo diagonal y distribución de cargas no balanceada. Para mitigar estos riesgos, se implementaron controles preventivos como el análisis mediante simulaciones FEM, revisión de espesores en CAD y validación del diseño en prototipos funcionales. Las acciones correctivas incluyeron el rediseño del perfil del soporte, el refuerzo en la zona crítica y la distribución optimizada de esfuerzos, logrando reducir el NPR a un valor aceptable de 16. Además, la inspección visual del refuerzo y pruebas de ensamble complementaron el proceso de verificación.

El segundo modo de falla corresponde a la desalineación de los orificios de montaje, una situación que podría dificultar

el ensamblaje, generar holguras o provocar desajustes con otras piezas. Aunque los efectos asociados presentan una severidad menor, entre 5 y 6, afectan directamente la precisión del armado y la estabilidad del robot. Las causas fueron atribuidas a errores en el diseño CAD, tolerancias mal asignadas o alineaciones incorrectas. Como parte del control preventivo se revisaron tolerancias y se validaron los modelos mediante simulaciones FEM de apoyo. Se reforzaron los controles de detección con verificaciones dimensionales de los barrenos y pruebas con plantillas de ensamblaje. Gracias a estas acciones y al ajuste de tolerancias, se logró garantizar un montaje preciso, y se redujo el NPR también a 16.

Finalmente, se abordó el modo de falla en la unión entre las piezas del soporte, el cual incluye efectos como separación de las partes, ruidos operacionales o pérdida de rigidez global del conjunto. Este tipo de falla, aunque en algunos casos puede parecer menor, fue valorada con severidades de hasta 7 debido a que puede comprometer el desempeño estructural con el uso prolongado. Las causas identificadas fueron el uso de elementos de unión inadecuados o mal colocados, junto con errores de diseño en los barrenos y selección incorrecta de tornillería. Se utilizaron simulaciones FEM para validar la integridad de las zonas de unión y se realizaron revisiones de tolerancias y especificaciones mecánicas de los tornillos. Las acciones tomadas incluyeron asegurar la correcta colocación y especificación de los elementos de fijación, lo que, junto con pruebas de ensamble y controles visuales, redujo el NPR a un nivel aceptable de 16.

En todos los casos, las decisiones de rediseño y ajuste fueron respaldadas por análisis estructurales mediante elementos finitos (FEM), lo cual aportó evidencia técnica robusta para justificar los cambios realizados. Este enfoque permitió no solo anticipar fallas, sino también optimizar el diseño de los soportes desde etapas tempranas del desarrollo.

En conclusión, el AMEF de los soportes muestra un enfoque integral y técnico para abordar los principales riesgos mecánicos asociados a estos componentes. Las medidas implementadas permiten garantizar tanto la funcionalidad como la durabilidad del sistema, lo cual es esencial para un dispositivo de rehabilitación donde la repetibilidad y la seguridad son prioritarias.

Tabla 5.4: AMEF Base rotativa superior pasiva

		Analisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño							Codigo del Documento: AMEF-030420-04								
									Pagina No. : 4			Fecha : 21/04/2025					
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación							De :								
		Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote		Revisó :		Aprobó:			Revision :		Edición : 1						
Aplicacion:		Cliente:			Fecha de Aprobacion:												
Base rotativa superior pasiva	Deformación por flexión excesiva bajo carga de antebrazo	Pérdida de alineación del soporte del pronosupinador	7	B	Espesor insuficiente en la plataforma	3	Simulación FEM en condición de carga	Inspección visual	2	42	Reforzar la base con nervaduras	Sebastián Arámbula Coyote	Se rediseñó la geometría de la base y se reforzaron zonas críticas con material adicional	4	2	2	16
		Movimiento no controlado	6	B	Geometría poco rígida	3	Validación dimensional del grosor de plataforma	Comparación de deformación durante carga	2	36	Aumentar el grosor de pared						
		Reducción de precisión del ejercicio	6	B	Material inadecuado (PLA con alta deformación)	3	Evaluación de rigidez en pruebas funcionales	Revisión de precisión del movimiento	2	36	Considerar material alternativo						
	Ruptura en la zona de inserción de eje / soporte del desplazador	Caída del sistema móvil	8	B	Zona de inserción muy delgada	2	Simulación FEM de torsión y flexión	Inspección de ensamblaje	2	32	Aumentar sección transversal en unión	Sebastián Arámbula Coyote	Se optimizó la zona de unión y se incluyeron refuerzos locales	4	2	2	16
		Falla en el movimiento de empuje	7	B	Transición brusca sin redondeo	3	Revisión de geometría en zona de unión	Prueba de carga estática	2	42	Aplicar redondeos para suavizar concentraciones de esfuerzo						
		Ruido o fricción excesiva	6	B	Esfuerzo concentrado por carga mal distribuida	3	Validación con prototipo funcional	Observación del movimiento en simulador	2	36	Verificar carga máxima soportada en ensamble						
	Deformación por flexión lateral durante movimiento transversal	Inclinación del eje desplazador	6	B	Espesor reducido en costillas laterales	3	Validación con pruebas físicas del conjunto	Revisión visual de deformación	2	36	Engrosar costillas laterales	Sebastián Arámbula Coyote	Se rediseñaron las guías y se estabilizó la estructura del conjunto	4	2	2	16
		Reducción de precisión en movimiento guiado	5	B	Carga desequilibrada	3	Simulación FEM con carga transversal	Comparación de paralelismo	2	30	Rediseñar el acoplamiento con guía						
		Aumento del esfuerzo sobre las guías laterales	6	B	Poca altura de contacto con guía	3	Revisión geométrica en CAD	Ensayo de alineación bajo carga	2	36	Reforzar con placas externas						
	Separación entre piezas o del conjunto base móvil	Movimiento no uniforme	7	B	Tornillos flojos	3	Aplicación de par de apriete	Revisión mecánica post-ensamble	2	42	Uso de freno de tornillo como arandelas o pasadores de seguridad	Sebastián Arámbula Coyote	Se aplicaron aprietos correctos y mejoraron los ensambles de unión	4	2	2	16
		Vibración anormal	6	B	Juego en acoplamiento	3	Verificación del ajuste dimensional	Inspección visual	2	36	Estudio de tolerancias con GD&T						
		Juego en sistema móvil	6	B	Tolerancias mal controladas	3	Diseño con interferencia controlada	Prueba funcional en carga	2	36	Ajuste en CAD y verificación física						
	Interferencia con otros componentes (desplazador, pronosupinador, guía)	Desgaste prematuro	6	B	Tolerancias mal calculadas	3	Simulación de interferencias en CAD	Prueba funcional	2	36	Validar espacio de juego funcional	Sebastián Arámbula Coyote	Se ajustó el diseño y se aseguraron los espacios funcionales	4	2	2	16
		Bloqueo del movimiento	6	B	Falta de análisis de interferencias	3	Ajuste de tolerancias	Inspección de holguras	2	36	Ajustar geometrías en base al movimiento						
		Ruidos no deseados	5	B	Movimiento mal alineado	3	Revisión del recorrido de piezas	Verificación con animaciones de movimiento	2	30	Aplicar control de interferencias en ensamblaje CAD						

La base rotativa superior pasiva es una parte crítica del robot de rehabilitación, ya que conecta el soporte principal con el sistema móvil e interactúa directamente con el eje del pronosupinador y el desplazador. El análisis de modos de falla aplicado a esta pieza permite anticipar diversos problemas estructurales, de ensamblaje y de interferencia funcional, considerando tanto

las cargas a las que estará sometida como las condiciones de contacto con otros componentes.

Uno de los modos de falla principales identificados fue la deformación por flexión excesiva bajo carga del antebrazo, el cual puede provocar pérdida de alineación del soporte del pronosupinador, movimientos no controlados o reducción de la precisión durante el ejercicio. La severidad de estos efectos se valoró entre 6 y 7, dado que afectan la funcionalidad y seguridad del sistema. Las causas apuntaron a geometrías rígidas, materiales con alta deformación (como PLA sin refuerzo) y espesores insuficientes en la plataforma. Como medidas preventivas se aplicaron simulaciones FEM bajo condiciones de carga y se validaron los espesores mediante CAD y pruebas funcionales. Se tomaron acciones como el refuerzo de la base y el rediseño de zonas críticas, logrando una reducción efectiva del NPR de 42 a 16.

Otro modo de falla relevante fue la ruptura en la zona de inserción del eje o del soporte del desplazador, con efectos como caída del sistema móvil o fallo en el empuje. Aquí la severidad alcanzó valores de hasta 7 debido al riesgo de interrupción total del movimiento. Entre las causas se encontraron uniones delgadas, transiciones bruscas y esfuerzos concentrados. El uso de simulaciones FEM en torsión y flexión, así como revisiones geométricas en CAD, permitió proponer refuerzos locales y aplicar redondeos en las zonas críticas. Estas acciones optimizaron el diseño, reduciendo el NPR de 42 a 16.

También se identificaron fallos relacionados con la flexión lateral, lo que podría llevar a inclinación del eje, reducción de precisión y sobreesfuerzo. Se evaluaron causas como espesor reducido en costillas laterales, carga desequilibrada o baja altura de contacto. A través de simulación FEM y validación física del conjunto, se rediseñaron las guías y se reforzaron con placas externas, disminuyendo el NPR de forma efectiva.

Otros modos de falla importantes fueron aquellos ligados a problemas de ensamblaje y vibración, como la separación entre piezas o movimientos no uniformes, provocados por tornillos flojos, juegos en acoplamientos o tolerancias incorrectas. Estos problemas, con severidades entre 5 y 6, fueron mitigados mediante verificaciones de ajuste dimensional, inspección en simuladores y aplicación de par de apriete controlado. Las soluciones implementadas incluyeron mejores prácticas de ensamblaje, estudios de tolerancias con GD&T y ajustes CAD específicos.

Finalmente, se abordaron posibles interferencias con otros componentes como el desplazador, el soporte y el pronosupinador. Estos modos de falla generaban bloqueos de movimiento o ruidos no deseados, debido a análisis incompletos de interferencias o ajustes deficientes. Gracias a inspecciones visuales, animaciones de movimiento y simulación de ensamblajes, se ajustaron tolerancias y se aseguraron los espacios funcionales, alcanzando nuevamente un NPR final de 16.

Tabla 5.5: AMEF Guía

		Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño										Codigo del Documento: AMEF-030420-05							
												Pagina No. : 5					Fecha : 21/04/2025		
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación					De :					Edición : 1							
		Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote					Revisó :					Aprobó:					Revision :		
Aplicacion:					Cliente:					Fecha de Aprobacion:									
Guía	Deformación o rotura por carga excesiva durante el desplazamiento	Pérdida de precisión en el movimiento del desplazador	7	B	Espesor insuficiente en la zona de carga	3	Simulación FEM de cargas en operación	Inspección visual	2	42	Engrosar zonas críticas	Sebastián Arámbula Coyote	Se reforzaron las zonas de carga y se suavizaron las transiciones geométricas	4	2	2	16		
		Bloqueo parcial del sistema	6	B	Concentración de esfuerzos en esquinas	3	Validación geométrica en CAD	Prueba funcional de desplazamiento	2	36	Aplicar radios en transiciones geométricas	Abril 2025							
		Incremento de esfuerzo en el desplazador	6	B	Material con baja rigidez	3	Selección adecuada de material	Comparación de recorrido efectivo	2	36	Evaluar material alternativo								
	Holgura excesiva en los ajustes con el desplazador	Movimiento lateral no deseado	6	B	Tolerancias mal controladas	3	Revisión de tolerancias en CAD	Inspección del ensamble	2	36	Ajustar tolerancias en CAD	Sebastián Arámbula Coyote	Se ajustaron las tolerancias y validaron interferencias en ensamble	4	2	2	16		
		Vibración o ruido	5	B	Desgaste de las superficies	3	Aplicación de normas GD&T	Verificación de holgura funcional	2	30	Validar interferencias en SolidWorks	Abril 2025							
		Desgaste prematuro de las superficies de contacto	5	B	Material blando en las zonas de ajuste	3	Simulación de interferencias	Prueba de vibración	2	30	Ensayar con prototipo								
	Fisuras o fracturas en zonas de barrenos	Pérdida de integridad estructural	8	B	Concentración de esfuerzos en zonas de barrenos	2	Simulación FEM de concentraciones de esfuerzo	Inspección visual	2	32	Redistribuir la ubicación de los barrenos	Sebastián Arámbula Coyote	Se ajustaron las posiciones de los barrenos y se reforzaron las zonas de concentración de esfuerzo	4	2	2	16		
		Juego o vibración en el desplazador	7	B	Diámetros inadecuados	3	Aplicación de filetes en zonas críticas	Prueba de resistencia en ensamble	2	42	Aplicar refuerzos locales	Abril 2025							
		Degradación progresiva	6	B	Ubicación crítica de orificios	3	Verificación dimensional de los orificios	Seguimiento de desgaste en zonas críticas	2	36	Controlar el diámetro y acabado superficial de los orificios								
	Acumulación de residuos o polvo en las perforaciones y ranuras	Bloqueo parcial del movimiento	5	B	Exposición al ambiente	4	Diseño con ranuras de evacuación	Inspección visual periódica	3	60	Incluir ranuras de limpieza	Sebastián Arámbula Coyote	Se añadió protección contra residuos y programó mantenimiento regular	4	2	2	16		
		Movimiento áspero	5	B	Diseño sin zonas de evacuación	4	Protección con cubiertas	Prueba de suavidad en movimiento	3	60	Implementar cubierta protectora	Abril 2025							
		Incremento del desgaste por fricción	5	B	Ausencia de limpieza programada	4	Manual de mantenimiento	Revisión de acumulación de residuos	3	60	Definir mantenimiento preventivo								

La guía es un componente esencial en el sistema de desplazamiento del robot de rehabilitación, ya que asegura el recorrido preciso y estable del desplazador. El AMEF aplicado a esta pieza permitió identificar riesgos estructurales y funcionales derivados del uso prolongado, errores de diseño o condiciones operativas adversas.

El primer modo de falla considerado fue la deformación o rotura por carga excesiva durante el desplazamiento, lo cual puede provocar pérdida de precisión en el movimiento del desplazador, bloqueos parciales e incremento de esfuerzo transmitido a otros componentes. La severidad de estos efectos se consideró alta, al comprometer la funcionalidad del sistema. Las causas principales fueron el espesor insuficiente en zonas críticas, la concentración de esfuerzos en esquinas agudas y el uso de materiales con baja rigidez. Entre los controles implementados estuvieron la validación geométrica y el ajuste del grosor de pared. Las acciones

tomadas incluyeron el refuerzo de zonas de carga y la mejora de las transiciones geométricas, lo cual permitió disminuir el nivel de riesgo.

El segundo grupo de fallas identificadas fue la holgura excesiva en los ajustes con el desplazador, lo cual puede generar vibraciones, movimientos laterales no deseados y desgaste prematuro en las superficies de contacto. Entre las causas se detectaron tolerancias mal definidas y desgaste en las zonas de unión. Se corrigieron estos aspectos mediante revisión de tolerancias en CAD, aplicación de normas de ajuste dimensional y validación del ensamble. Las acciones correctivas permitieron lograr un mejor acoplamiento funcional, asegurando el buen contacto entre piezas y reduciendo el NPR a niveles aceptables.

También se abordaron posibles fisuras o fracturas en zonas de barrenos, asociadas a concentraciones de esfuerzo, diámetros inadecuados o ubicaciones poco óptimas de los orificios. Estas fallas pueden comprometer la integridad estructural o provocar vibraciones en el desplazador durante el movimiento. Se implementaron como medidas preventivas la optimización de la ubicación de los barrenos y el uso de filetes en zonas críticas. Las acciones adoptadas incluyeron redistribuir las posiciones de los barrenos y reforzar localmente las áreas propensas a falla, logrando una reducción significativa del riesgo.

Finalmente, se contemplaron fallas por acumulación de residuos o polvo en perforaciones y ranuras, lo cual puede dificultar el movimiento suave, generar aspereza o incluso bloquear parcialmente el desplazamiento. Las causas se asociaron con la exposición al ambiente, diseño sin salidas de evacuación o falta de mantenimiento. Se tomaron acciones como el diseño de ranuras de limpieza, la incorporación de protecciones y la implementación de rutinas de mantenimiento preventivo, lo cual resultó eficaz para mantener el buen funcionamiento del sistema a largo plazo.

En conjunto, este AMEF demuestra una adecuada identificación y tratamiento de los modos de falla más relevantes en la guía. Las acciones implementadas son técnicamente sólidas y coherentes con el propósito funcional del componente, asegurando un rendimiento confiable, preciso y seguro dentro del sistema de rehabilitación.

Tabla 5.6: AMEF Desplazador

		Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño						Codigo del Documento: AMEF-030420-06					
								Pagina No. : 6				Fecha : 23/04/2025	
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación						Revision :				Edicion : 1	
		Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote			Revisó :			Aprobó:					
Aplicacion:			Cliente:			Fecha de Aprobacion:							

Artículo	Modo Potencial de la Falla	Efecto Potencial de la Falla	S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla	O C U	Controles de Prevención	Controles de Detección.	D E T	N P R	Acciones Recomendadas	Responsable/ Fecha Objetivo	Resultado de las Acciones				
													Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R
Desplazador	Deformación o fractura en la zona de contacto por carga excesiva	Pérdida de alineación del brazo	8	B	Espesor insuficiente en zonas de carga	3	Simulación FEM	Inspección visual de zonas críticas	2	48	Reforzar zonas de carga	Sebastián Arámbula Coyote	Se reforzaron las zonas críticas y optimizó la geometría estructural	4	2	16	
		Bloqueo parcial del desplazador	7	B	Concentración de esfuerzos	3	Validación geométrica en CAD	Prueba funcional del desplazador	2	42	Aplicar redondeos en transiciones						
		Incremento del esfuerzo en la guía	6	B	Material con baja resistencia a fatiga	3	Selección adecuada de material	Verificación dimensional	2	36	Evaluar material alternativo						
	Desgaste prematuro en la superficie de apoyo por fricción	Vibraciones o ruido	6	B	Falta de lubricación	4	Elección de material resistente al desgaste	Inspección periódica de la superficie	3	72	Mejorar la selección de material	Sebastián Arámbula Coyote	Se implementaron materiales resistentes al desgaste y plan de mantenimiento preventivo	4	2	16	
		Disminución de la vida útil	5	B	Material con bajo coeficiente de desgaste	3	recubrimientos	Prueba de vibración	3	45	Definir plan de mantenimiento						
		Falta de repetibilidad del	5	B	Condiciones ambientales adversas	3	Manual de lubricación	Verificación del estado superficial	3	45	Aplicar recubrimientos anti-desgaste						
	Fisuras en las uniones entre componentes	Pérdida de integridad estructural	7	B	Concentración de esfuerzos en zonas de unión	3	Simulación FEM en zonas de unión	Inspección visual	2	42	Redistribuir zonas de unión	Sebastián Arámbula Coyote	Se optimizó la calidad de impresión 3D	4	2	16	
		Aparición de juego o vibración	6	B	Ensamble incorrecto	3	Revisión de calidad en impresión 3D	Prueba de resistencia estructural	2	36	Aplicar refuerzos						
		Fallos en la estructura del brazo	6	B	Baja calidad de impresión 3D	3	Control dimensional en ensamble	Seguimiento de desgaste	2	36	Mejorar parámetros de impresión 3D						
	Desalineación del desplazador en su recorrido	Movimiento irregular	6	B	Tolerancias inadecuadas	3	Revisión de tolerancias en CAD	Verificación dimensional	2	36	Ajustar tolerancias	Sebastián Arámbula Coyote	Se ajustaron las tolerancias y validaron las interferencias en el recorrido	4	2	16	
		Incremento de esfuerzos en las guías	5	B	Desgaste en zonas de ajuste	3	Aplicación de GD&T	Prueba funcional del recorrido	2	30	Validar interferencias						

El desplazador es uno de los elementos móviles más importantes del robot de rehabilitación, ya que guía el brazo del usuario a lo largo del sistema. Por su función, está sometido a cargas variables, fricción constante y condiciones de contacto exigentes. El AMEF aplicado a este componente identificó cuatro categorías principales de riesgo: deformación por carga excesiva, desgaste por fricción, fallas en uniones internas y desalineación en su recorrido.

El primer modo de falla considerado fue la deformación o fractura en la zona de contacto por carga excesiva, con efectos como pérdida de alineación del brazo, bloqueo parcial del desplazador e incremento del esfuerzo sobre la guía. Se detectaron como causas principales el espesor insuficiente en zonas críticas, concentración de esfuerzos y uso de materiales con baja resistencia a fatiga. La severidad de estos efectos fue alta, ya que afectan directamente la funcionalidad y seguridad del sistema. Se implementaron medidas correctivas como el refuerzo de las zonas de carga, la aplicación de redondeos en las transiciones geométricas y la optimización estructural, lo cual redujo el número de prioridad de riesgo a un nivel aceptable.

En segundo lugar, se evaluó el desgaste prematuro en la superficie de apoyo por fricción, que puede generar vibraciones, ruidos y una disminución significativa en la vida útil del componente. Las causas se relacionaron con la falta de lubricación, el uso de materiales poco resistentes al desgaste y condiciones ambientales poco controladas. Se abordó esta problemática mediante la elección de materiales adecuados, la implementación de recubrimientos resistentes al desgaste y rutinas de verificación periódica.

El tercer grupo de fallos identificados corresponde a fisuras en las uniones entre componentes, que pueden causar pérdida de integridad estructural, aparición de juego o vibración, e incluso fallos en la estructura del brazo. Las causas incluyeron zonas de unión mal distribuidas, calidad deficiente de impresión 3D y errores en los parámetros del ensamblaje. Las medidas adoptadas incluyeron la redistribución de las zonas de unión, la mejora en la calidad del proceso de impresión y la aplicación de controles dimensionales para garantizar el correcto acoplamiento entre partes.

Finalmente, se abordó la desalineación del desplazador en su recorrido, que puede manifestarse como movimiento irregular o incremento del esfuerzo en zonas de guía. Entre las causas se identificaron tolerancias inadecuadas, interferencias por diseño o errores de ajuste. Las acciones recomendadas incluyeron el ajuste de tolerancias, validaciones de interferencia en CAD y la verificación funcional del recorrido. Estas medidas permitieron estabilizar el desplazamiento y mantener la trayectoria precisa del sistema durante su operación.

En conjunto, el AMEF del desplazador muestra un enfoque detallado para anticipar los principales riesgos mecánicos y funcionales asociados a este componente clave. Las acciones tomadas fueron técnicamente sólidas, fáciles de implementar y coherentes con las exigencias del sistema de rehabilitación, permitiendo mantener bajo control los niveles de riesgo y asegurar un desempeño seguro, repetible y eficiente.

Tabla 5.7: AMEF Pronosupinador

		Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño							Codigo del Documento: AMEF-030420-07											
									Pagina No. : 7				Fecha : 23/04/2025							
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación				Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote			Revisó :			Aprobó:			Revision :			Edición : 1		
		Aplicacion:				Cliente:			Fecha de Aprobacion:											
Articulo	Modo Potencial de la Falla	Efecto Potencial de la Falla	S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla	O C U	Controles de Prevención	Controles de Detección.	D E T	N P R	Acciones Recomendadas	Responsable/ Fecha Objetivo	Resultado de las Acciones							
													Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R			
Pronosupinador	Deformación localizada por carga en la cara superior	Desalineación del eje	8	B	Espesor insuficiente en zona de carga	3	Simulación FEM bajo carga axial	Inspección visual de zonas de carga	2	48	Incrementar espesor en zonas críticas	Sebastián Arámbula Coyote	Se optimizó el diseño reforzando las zonas críticas y ajustando el espesor	4	2	2	16			
		Incremento del esfuerzo en rodamientos	7	B	Concentración de esfuerzos	3	Revisión de espesores críticos	Prueba funcional en conjunto	2	42	Aplicar radios para reducir concentraciones de esfuerzo									
		Desgaste prematuro en la zona de contacto	6	B	Material de baja rigidez	3	Selección adecuada de material	Verificación de deformaciones	2	36	Evaluar materiales con mayor módulo elástico									
	Desgaste en la zona de apoyo sobre rodamientos	Holgura en el ensamblaje	7	B	Ajuste inadecuado con los rodamientos	4	Validación del encastre con rodamientos	Inspección visual	2	56	Ajustar tolerancias de encastre	Sebastián Arámbula Coyote	Se optimizó el ajuste con los rodamientos y se definió un plan de mantenimiento	4	2	2	16			
		Movimiento irregular del eje	6	B	Material con bajo coeficiente de desgaste	3	Elección de material resistente al desgaste	Verificación de ajuste con galgas	2	36	Aplicar recubrimientos resistentes al desgaste									
		Ruido o vibración durante el uso	6	B	Falta de lubricación adecuada	3	Manual de lubricación	Prueba de funcionamiento prolongada	2	36	Definir plan de mantenimiento									
	Problemas en la zona de unión de las piezas	Pérdida de integridad estructural	7	B	Concentración de esfuerzos en uniones	3	Simulación FEM en uniones bajo carga	Inspección visual	2	42	Redistribuir geometría de uniones	Sebastián Arámbula Coyote	Se reforzaron las zonas de unión y mejoró la calidad de la impresión 3D.	4	2	2	16			
		Fallo del movimiento de pronosupinación	7	B	Deficiencia en la calidad de impresión 3D	3	Validación de ensamblaje	Seguimiento del comportamiento en el uso	2	42	Optimizar parámetros de impresión 3D									
		Aumento de esfuerzos en el ensamble	6	B	Ensamble incorrecto	3	Revisión de calidad en impresión 3D	Prueba de resistencia	2	36	Aplicar refuerzos									

El pronosupinador es el componente encargado de permitir el giro rotacional de antebrazo durante la rehabilitación del brazo, por lo que está sometido a esfuerzos cíclicos, contacto constante con rodamientos y exige una alta precisión de ensamblaje. El AMEF permitió identificar riesgos mecánicos, funcionales y estructurales relevantes que fueron atendidos mediante acciones de diseño y manufactura correctivas.

El primer grupo de fallas corresponde a la deformación localizada por carga en la cara superior, la cual puede generar desalineación del eje, incremento de esfuerzo en los rodamientos y desgaste prematuro en la zona de contacto. Las causas incluyeron espesores insuficientes en zonas críticas, concentración de esfuerzos y materiales con baja rigidez. La severidad de estos efectos se consideró alta, ya que afectan directamente la estabilidad del eje. Se aplicaron acciones como el incremento del espesor, la redistribución de esfuerzos mediante radios de transición y la selección de materiales con mejores propiedades elásticas. Estas acciones permitieron reducir el número de prioridad de riesgo (NPR) de forma significativa, pasando de valores altos a un nivel final de 16 tras la implementación.

Un segundo conjunto de fallos fue identificado como desgaste en la zona de apoyo sobre rodamientos, con consecuencias como holgura en el ensamble, movimiento irregular del eje y aparición de ruido o vibración durante el uso. Las causas más importantes fueron el ajuste deficiente entre componentes, uso de materiales poco resistentes al desgaste y falta de lubricación adecuada. Las acciones adoptadas incluyeron el ajuste del encastre de los rodamientos y el desarrollo de un plan de mantenimiento. Como resultado, se logró un funcionamiento más estable del eje y un NPR final de 16.

Finalmente, se analizaron problemas en la zona de unión entre piezas, con efectos como pérdida de integridad estructural, fallos en el movimiento de pronosupinación y aumento del esfuerzo en el ensamble. Las causas incluyeron la concentración de esfuerzos en zonas unidas, parámetros deficientes de impresión 3D y errores de ensamblaje. Se propusieron acciones como rediseñar las geometrías de unión, ajustar los parámetros de manufactura y aplicar refuerzos en zonas críticas. Estas medidas permitieron mejorar la calidad del ensamblaje y reforzar las uniones, asegurando la integridad funcional del pronosupinador durante su operación.

En conjunto, el AMEF del pronosupinador demuestra un enfoque sólido y bien estructurado en la identificación de riesgos y aplicación de mejoras técnicas. Las acciones implementadas reflejan un control cuidadoso del diseño y del proceso de fabricación, lo que garantiza un rendimiento confiable y seguro de esta parte esencial del sistema de rehabilitación.

Tabla 5.8: AMEF Soporte de pronosupinador

		Análisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño										Codigo del Documento: AMEF-030420-08						
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación										Pagina No. : 8		Fecha : 23/04/2025				
		Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote			Revisó :			Aprobó:				Revision :		Edición : 1				
		Aplicación:			Cliente:			Fecha de Aprobacion:										
Soporte para pronosupinador		Deformación localizada en el alojamiento del rodamiento por carga	Desalineación de eje	8	B	Espesor insuficiente en la zona de carga	3	Simulación FEM bajo carga	Inspección visual del alojamiento	2	48	Incrementar espesor en zona de alojamiento	Sebastián Arámbula Coyote	Se reforzó el alojamiento y se ajustaron las tolerancias	4	2	2	16
			Holgura en el rodamiento	7	B	Concentración de esfuerzos	3	Revisión dimensional del alojamiento	Prueba funcional del encastre con el rodamiento	2	42	Optimizar el diseño para redistribuir esfuerzos						
			Desgaste prematuro del alojamiento	6	B	Tolerancias inadecuadas en el alojamiento	3	Validación de tolerancias	Verificación dimensional con galgas	2	36	Ajustar tolerancias						
		Desgaste en la superficie de contacto del alojamiento con el rodamiento	Holgura en el rodamiento	7	B	Fricción continua entre el alojamiento y el rodamiento	4	Selección de material con buena resistencia al desgaste	Inspección visual del ensamblaje	2	56	Mejorar el ajuste del diseño	Sebastián Arámbula Coyote	Se optimizó el ajuste y se aplicaron recubrimientos resistentes al desgaste	4	2	2	16
			Movimiento irregular del eje	6	B	Deficiencia en material de impresión	3	Validación de ajustes en diseño	Prueba de funcionamiento	2	36	Revisar parámetros de impresión						
			Aumento de vibraciones	6	B	Falta de ajustes correctos	3	Instrucciones de ensamblaje	Medición con galgas	2	36	Incluir refuerzos en las zonas de contacto						
		Fallas en la unión estructural de las paredes laterales	Pérdida de rigidez	7	B	Concentración de esfuerzos en zonas de unión	3	Simulación FEM en zonas de unión	Inspección visual	2	42	Reforzar las uniones	Sebastián Arámbula Coyote	Se reforzaron las uniones y se mejoró la calidad de impresión 3D	4	2	2	16
			Deformación del conjunto	6	B	Mala calidad en la impresión 3D	3	Validación de parámetros de impresión	Prueba de resistencia mecánica	2	36	Mejorar parámetros de impresión						
			Desplazamiento del eje	6	B	Ensamble deficiente	3	Inspección de calidad del ensamble	Control dimensional	2	36	Redistribuir geometría para mejorar la resistencia						

El soporte para pronosupinador cumple una función estructural clave en el sistema, al mantener fijo el alojamiento del rodamiento que guía el eje del movimiento de pronosupinación. Por ello, debe soportar cargas de contacto, resistir al desgaste por fricción e integrarse correctamente con otros elementos mediante uniones impresas en 3D. El AMEF aplicado a esta pieza permitió identificar tres grupos principales de riesgo: deformaciones por carga, desgaste en la zona de contacto y fallas en la unión estructural.

El primer grupo de fallas fue el de deformación localizada en el alojamiento del rodamiento por carga, con efectos como desalineación del eje, holgura o incluso desgaste acelerado del rodamiento. Las causas incluyeron espesor insuficiente, concentración de esfuerzos y tolerancias inadecuadas. Estos efectos fueron considerados críticos por su impacto directo en la precisión del sistema. Las acciones tomadas consistieron en aumentar el espesor de las zonas críticas, redistribuir esfuerzos mediante optimización geométrica y ajustar tolerancias del alojamiento, con lo cual se redujo el NPR final a 16 en todos los casos.

El segundo grupo de riesgos corresponde al desgaste en la superficie de contacto entre el alojamiento y el rodamiento, lo cual

puede ocasionar vibraciones, movimiento irregular o pérdida progresiva de rigidez. Las causas se relacionaron con deficiencias en la selección de material, falta de instrucciones claras de ensamble y errores en parámetros de impresión. Se aplicaron acciones correctivas como mejorar el ajuste del diseño, revisar los parámetros de impresión y aplicar recubrimientos resistentes al desgaste. Estas soluciones permitieron estabilizar el comportamiento del sistema durante su uso repetido.

Por último, se identificaron fallas en la unión estructural de las paredes laterales, debido a impresión de baja calidad, mala calibración de parámetros o ensambles deficientes. Estas fallas pueden generar pérdida de rigidez estructural, deformación del conjunto y desplazamiento del eje, especialmente en sesiones prolongadas de uso. Como respuesta, se reforzaron las uniones, se mejoraron los parámetros de impresión 3D y se redistribuyó la geometría para aumentar la resistencia del conjunto. Gracias a estas medidas, el diseño logró un comportamiento confiable y el NPR asociado se redujo también a niveles seguros.

Este AMEF refleja una evaluación precisa de los riesgos asociados al soporte del pronosupinador y demuestra una aplicación adecuada de controles de calidad, ajustes geométricos y selección de materiales. Las acciones implementadas aseguran un ensamblaje funcional, resistente y estable, con una integración efectiva del componente en el sistema de rehabilitación.

Tabla 5.9: AMEF Seguro

		Analisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño										Codigo del Documento: AMEF-030420-09					
												Pagina No. : 9		Fecha : 23/04/2025			
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación		Elaboró: Sebastián Arámula Coyote		Revisó :		Aprobó:		Revision :		Edicion : 1					
		Aplicacion:		Cliente:		Fecha de Aprobacion:											
Articulo	Modo Potencial de la Falla	Efecto Potencial de la Falla	S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla	O C U	Controles de Prevención	Controles de Detección.	D E T	N P R	Acciones Recomendadas	Responsable/ Fecha Objetivo	Resultado de las Acciones				
													Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R
Seguro	Deformación o ruptura por esfuerzo cortante	Pérdida de sujeción del desplazador	8	B	Sobrecarga accidental	3	Validación por simulación FEM de esfuerzos cortantes	Inspección visual del seguro	2	48	Incrementar espesor en la zona crítica	Sebastián Arámula Coyote Abril 2025	Se rediseñó el seguro con mayor espesor y mejor geometría	4	2	2	16
		Movimiento inadecuado del eje	7	B	Diseño inadecuado del espesor	3	Revisión del diseño geométrico	Prueba de ajuste funcional	2	42	Optimizar el diseño del seguro para distribución de esfuerzos						
		Desprendimiento del seguro	6	B	Material deficiente en resistencia al corte	3	Selección adecuada del material	Medición del espesor y geometría	2	36	Cambiar a material de mayor resistencia						
	Desgaste progresivo en la zona de contacto	Holgura en el sistema de retención	7	B	Fricción continua en el contacto	4	Revisión de calidad en impresión 3D	Inspección visual periódica	2	56	Mejorar ajuste del diseño	Sebastián Arámula Coyote Abril 2025	Se ajustó el diseño y se configuró la impresión 3D para mejores resultados	4	2	2	16
		Fallo parcial del seguro	6	B	Material de baja resistencia al desgaste	3	Validación geométrica de ajuste	Prueba funcional del ajuste	2	36	Optimizar parámetros de impresión 3D						
		Vibraciones durante el movimiento	6	B	Desalineación del ensamblaje	3	Revisión de tolerancias de ensamblaje	Medición de holgura	2	36	Implementar monitoreo periódico del seguro						

El seguro tiene como función principal mantener fijo al pronosupinador, asegurando que no gire o se desplace de forma no deseada durante el uso del robot de rehabilitación cuando así se requiera. Al ser un elemento que interviene directamente en la precisión del movimiento y la estabilidad del sistema, su correcto funcionamiento es crítico para la seguridad y efectividad del ejercicio terapéutico. El AMEF permitió identificar riesgos mecánicos asociados a esfuerzos de corte, desgaste por uso y errores dimensionales de fabricación.

Uno de los modos de falla más importantes fue la deformación o ruptura por esfuerzo cortante, que puede ocasionar pérdida de sujeción del pronosupinador, movimiento inadecuado del eje o incluso el desprendimiento del seguro. Estos efectos fueron considerados de alta severidad, ya que comprometen la estabilidad del sistema. Las causas incluyeron sobrecargas accidentales, diseño deficiente en la geometría y uso de materiales con baja resistencia. Las acciones tomadas incluyeron el rediseño del seguro con mayor espesor en zonas críticas, la mejora en la distribución de esfuerzos y la selección de un material más adecuado, lo que permitió reducir el NPR de 48 a 16.

También se abordó el desgaste progresivo en la zona de contacto, el cual puede generar holgura en el sistema de retención, fallos parciales del seguro y vibraciones durante el uso. Las causas detectadas fueron la fricción continua, la calidad deficiente en la impresión 3D y el uso de materiales poco resistentes al desgaste. Como medidas correctivas se mejoró el diseño del ajuste, se ajustaron los parámetros de impresión y se implementó un monitoreo periódico del sistema para detectar desgaste

anticipadamente. Estas acciones fueron efectivas para garantizar la firmeza del seguro durante el uso repetido.

Este AMEF refleja una evaluación acertada de los modos de falla potenciales en un componente de seguridad crítica. Las acciones de rediseño y control dimensional permitieron fortalecer el desempeño del seguro, asegurando su función como fijador del pronosupinador sin riesgo de desplazamientos accidentales. Todos los modos de falla quedaron controlados con un NPR final de 16, validando la efectividad de las mejoras implementadas.

Tabla 5.10: AMEF Picaporte

		Analisis del Modo y Efecto de Falla de Diseño										Codigo del Documento: AMEF-030420-10																			
												Pagina No. : 10					Fecha : 23/04/2025														
		Tipo de Producto: Robot para rehabilitación					Elaboró: Sebastián Arámbula Coyote					Revisó :					Aprobó:					Revision :					Edicion : 1				
		Aplicacion:					Cliente:					Fecha de Aprobacion:																			
Articulo		Modo Potencial de la Falla		Efecto Potencial de la Falla		S E V	C L A	Causa Potencial de la Falla		O C U	Controles de Prevención		Controles de Detección.		D E T	N P R	Acciones Recomendadas		Responsable/ Fecha Objetivo		Resultado de las Acciones										
																					Acciones Tomadas	S E V	O C U	D E T	N P R						
Picaporte		Deformación o fractura por sobreesfuerzo en el mecanismo de retención		Fallo en la sujeción del seguro		8	B	Exceso de carga sobre el picaporte		5	Validación por simulación FEM del picaporte		Inspección visual del componente		2	80	Optimizar diseño del picaporte para mejor distribución de esfuerzos		Sebastián Arámbula Coyote		Se rediseñó el picaporte con refuerzos en zonas críticas										
				Liberación inesperada		8	B	Geometría inadecuada		4	Revisión de la geometría del mecanismo de retención		Prueba funcional de retención		2	64	Incrementar el espesor en zonas críticas														
				Riesgo de desplazamiento libre del brazo		8	B	Material con baja resistencia a la tracción o corte		3	Selección adecuada del material		Medición del espesor y ajuste del picaporte		2	48	Utilizar material de mayor resistencia mecánica		Abril 2025												
		Desgaste excesivo en el punto de contacto		Holgura en el sistema de retención		7	B	Fricción continua durante el uso		4	Selección de material resistente al desgaste		Inspección visual periódica		2	56	Mejorar el diseño del ajuste		Sebastián Arámbula Coyote		Se ajustó el diseño del picaporte y se estableció un monitoreo periódico										
				Pérdida progresiva de funcionalidad		7	B	Material de baja resistencia al desgaste		4	Validación geométrica de ajuste		Prueba funcional del ajuste		2	56	Seleccionar materiales con mayor resistencia al desgaste														
				Vibraciones en el mecanismo		7	B	Desalineación en el ensamblaje		4	Revisión de tolerancias de ensamblaje		4	Medición de holgura en el mecanismo		2	56	Establecer un monitoreo periódico		Abril 2025											

El picaporte es el mecanismo encargado de mantener fijo al desplazador, asegurando que permanezca en la posición deseada durante las fases de reposo o trabajo en el sistema de rehabilitación. Su correcto funcionamiento es esencial para evitar deslizamientos no controlados del desplazador que puedan comprometer la precisión del ejercicio o la seguridad del usuario. El análisis de modos y efectos de falla permitió identificar dos grupos principales de riesgo: fallas estructurales por sobreesfuerzo en el mecanismo de retención y desgaste en zonas de contacto.

El primer conjunto de fallas corresponde a la deformación o fractura del picaporte por sobreesfuerzo, lo que podría generar fallos en la sujeción, liberación inesperada del desplazador o incluso su desplazamiento libre. Estos efectos fueron clasificados con severidad alta debido a su impacto directo sobre la estabilidad del sistema. Las causas incluyeron cargas excesivas sobre el componente, geometrías inadecuadas y materiales con baja resistencia a la tracción y corte. Se aplicaron acciones como el rediseño del picaporte para optimizar la distribución de esfuerzos, el incremento del espesor en zonas críticas y la selección de materiales con mayor resistencia mecánica. Estas medidas lograron reducir los niveles de NPR desde valores críticos (hasta 80) a 16 tras su implementación.

El segundo grupo de fallas identificadas fue el desgaste progresivo en el punto de contacto, lo cual puede provocar holgura

en el sistema de retención, pérdida gradual de funcionalidad y aparición de vibraciones durante el uso. Las causas se asociaron con fricción continua durante el uso, materiales con baja resistencia al desgaste y tolerancias incorrectas en el diseño del ajuste. Se adoptaron soluciones como mejorar el diseño del contacto, seleccionar materiales más resistentes y establecer un monitoreo periódico para mantener el sistema en condiciones adecuadas. Estas acciones permitieron mantener la funcionalidad del picaporte a lo largo del uso repetido del sistema y reducir los niveles de riesgo.

A partir de los resultados del AMEF se tomaron decisiones concretas de diseño para mejorar la confiabilidad del picaporte. En primer lugar, la identificación de altos niveles de riesgo asociados a la deformación y fractura en la zona de sujeción condujo a incrementar el espesor del componente y a redistribuir material en áreas críticas para reducir las concentraciones de esfuerzo. Asimismo, la posibilidad de selección de un material con mayor resistencia mecánica y mejor comportamiento frente a fricción, así como el ajuste de tolerancias en la geometría del acople para asegurar un contacto más estable.

Estas decisiones derivadas del AMEF permitieron reforzar la capacidad del picaporte para soportar cargas repetitivas, disminuir la probabilidad de falla durante el uso y asegurar un funcionamiento más confiable del mecanismo de retención del desplazador. De esta manera, el AMEF no solo identificó los modos de falla potenciales, sino que guió directamente las mejoras implementadas en el diseño final.

En resumen, este AMEF refleja un análisis detallado de los riesgos que podrían comprometer la función del picaporte como mecanismo de sujeción del desplazador. Las acciones implementadas mejoraron tanto el diseño estructural como la resistencia al desgaste, asegurando un desempeño confiable en las condiciones operativas del robot de rehabilitación.

Conclusiones y trabajo a futuro

El desarrollo de esta tesis representa el resultado de un proceso riguroso de diseño, análisis y reflexión en torno a la creación de un sistema de rehabilitación pasiva para miembro superior, con énfasis en los movimientos de pronosupinación y flexoextensión del brazo humano. Este trabajo no solo constituye un ejercicio académico, sino también una aportación concreta al campo de la ingeniería y la rehabilitación física, mediante el diseño y construcción de un robot funcional, económico y manufacturable con tecnologías accesibles.

Desde las primeras etapas, se estableció como prioridad diseñar un sistema centrado en el usuario, de bajo costo, pero sin comprometer la funcionalidad ni la seguridad. Para lograrlo, se eligieron materiales como el PLA, PETG y MDF, que ofrecen una excelente relación entre propiedades mecánicas, disponibilidad y facilidad de manufactura. Gracias al uso de impresión 3D y mecanizado simple, el robot puede fabricarse y replicarse fácilmente, lo que refuerza su viabilidad en contextos clínicos con recursos limitados o en instituciones educativas.

El diseño fue sometido a múltiples evaluaciones estructurales mediante simulaciones por elementos finitos bajo condiciones de carga estática, permitiendo detectar zonas críticas y optimizar cada componente sin recurrir a sobreingeniería. Toda la validación técnica se desarrolló empleando valores realistas de carga estática derivados de datos antropométricos del miembro superior, lo cual garantiza que el sistema es capaz de soportar adecuadamente el peso del antebrazo humano durante escenarios típicos de rehabilitación pasiva.

De manera complementaria, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de Modo y Efecto de Falla (AMEF) para los componentes sometidos a carga estática. Este análisis permitió identificar los puntos vulnerables del diseño y aplicar mejoras específicas que redujeron todos los números de prioridad de riesgo (NPR) a niveles aceptables. El AMEF se consolidó así como una herramienta clave para reforzar la confiabilidad y seguridad del sistema bajo las condiciones de uso previstas.

Adicionalmente, como parte del proceso de maduración tecnológica y de protección de la innovación generada, el diseño del robot fue sometido a una solicitud de registro de diseño industrial, la cual se presenta de manera íntegra en el Apéndice B. Este trámite refleja el carácter original y aplicable del sistema desarrollado, así como su potencial de transferencia hacia entornos productivos, clínicos o comerciales.

A pesar del alcance logrado, el sistema desarrollado permanece como un robot pasivo, es decir, sin actuadores ni control automático, y diseñado para condiciones estáticas de carga. Esta limitación no representa un problema, sino que constituye una base sólida sobre la cual pueden integrarse futuras mejoras mecánicas y tecnológicas. La plataforma propuesta es modular y permite evolucionar hacia un dispositivo más complejo sin requerir rediseños

drásticos, demostrando una planificación de ingeniería flexible y escalable.

En resumen, esta tesis no solo cumplió con el objetivo planteado, sino que permitió consolidar un modelo funcional y manufacturable de robot de rehabilitación pasiva. Las decisiones de diseño, las simulaciones estructurales y el análisis de riesgos se sustentaron en fundamentos técnicos sólidos y en principios de ingeniería centrada en el usuario. El proyecto demuestra que es posible combinar simplicidad, bajo costo y seguridad en una solución mecánica con impacto directo en la rehabilitación del miembro superior.

Trabajo a futuro

Aunque la presente tesis culmina con un robot pasivo plenamente funcional, el análisis realizado se limitó deliberadamente a condiciones estáticas de carga. Por ello, uno de los pasos más importantes para la siguiente etapa de desarrollo consiste en incorporar evaluaciones bajo cargas dinámicas, que permitan estudiar el comportamiento del sistema ante movimientos repetitivos, transitorios o con aceleraciones propias de la terapia física.

Entre las principales líneas de trabajo a futuro se plantea:

- **Incluir el análisis estructural dinámico** (fatiga, vibraciones y cargas transitorias) para evaluar la durabilidad del sistema ante ejercicios repetitivos y movimientos reales del usuario.
- **Incorporar un sistema de control electrónico**, mediante motores de precisión, sensores de posición o fuerza, y microcontroladores que permitan ejecutar movimientos controlados, programables y adaptados a las necesidades del paciente.
- **Desarrollar un entorno virtual interactivo**, donde el usuario pueda visualizar su progreso en tiempo real, ejecutar ejercicios en un contexto interactivo o incluso integrarse en sesiones remotas de terapia supervisada.
- **Realizar validaciones clínicas o biomecánicas**, mediante pruebas controladas con usuarios reales, para evaluar la eficacia del robot en términos funcionales, ergonómicos y terapéuticos.
- **Optimizar la ergonomía y la adaptabilidad del sistema**, incluyendo ajustes para usuarios con distintas tallas, niveles de movilidad o requerimientos específicos, lo cual permitiría una personalización más eficiente y una mayor cobertura poblacional.
- **Explorar el uso de materiales avanzados o estructuras híbridas**, como refuerzos internos, polímeros compuestos o geometrías topológicamente optimizadas, que permitan aligerar la estructura sin perder resistencia.

Cada una de estas propuestas representa un paso necesario para la evolución del robot hacia un sistema de rehabilitación más completo, inteligente y adaptable a distintos contextos clínicos. De esta manera, esta tesis no solo culmina con un robot diseñado y fabricado, sino que abre el camino para futuras innovaciones con impacto real en la vida de los pacientes y en el ejercicio de la ingeniería aplicada al bienestar humano.

Bibliografía

- [1] R. Rao, “What are manipulator robots? understanding their design, types, and applications,” *Wevolver*, 2023.
- [2] V. R. B. Sotelo, J. R. G. Sánchez, and R. S. Ortigoza, “Robots móviles: Evolución y estado del arte,” *Polibits*, no. 35, pp. 12–17, 2007.
- [3] Redacción, “Robots de manufactura industrial: Características y funcionalidades,” May 2023. <https://tecnologiaparalaindustria.com/robots-de-manufactura-industrial-caracteristicas-funcionalidades-y-variables-de-calificacion/>.
- [4] Rhbneuromad, ““gloreha sinfonia”: Un robot para la rehabilitación del miembro superior neurológico,” Jul 2018. <https://rhbneuromad.com/2018/11/20/gloreha-sinfonia-un-robot-para-la-rehabilitacion-del-miembro-superior-neurologico/>.
- [5] “Miembro inferior rehabilitación médica traje de robot exoesqueleto fisioterapia de la marcha del equipo de formación,” 2024. https://es.made-in-china.com/co_iclearmic/product_Medical-Lower-Limb-Rehabilitation-Exoskeleton-Robot-Suit-Physical-Therapy-Gait-Training-Equipment_eohhegrsy.html.
- [6] A. J. Carrascosa Fernández, “Articulación esternoclavicular,” *Dolopedia*, 2019.
- [7] J. Daza, “Test de movilidad articular y examen muscular de las extremidades,” *Bogotá: panamericana*, 1996.
- [8] R. Cailliet, *Anatomía funcional biomecánica*. Marbán, 2006.
- [9] E. Farmalastic, “Artrosis de la muñeca o de la mano,” 2021. <https://farmalastic.cinfa.com/blog/artrosis-en-las-manos>.
- [10] R. Avila-Chaurand, L. Prado-León, and E. González-Muñoz, “Dimensiones antropométricas de población latinoamericana: México, cuba, colombia, chile,” *Universidad de Guadalajara, México*, 2007.
- [11] G. ARZ and A. TÓTH, “Reharob,” in *Integration of Assistive Technology in the Information Age: ICORR’2001, 7th International Conference on Rehabilitation Robotics*, vol. 9, p. 93, IOS Press, 2001.
- [12] A. Trafton, “Robotic therapy helps stroke patients regain function,” *MIT News [Online]*, vol. 80, 2010. <https://news.mit.edu/2010/stroke-therapy-0419>.

- [13] J. Hidler, D. Nichols, M. Pelliccio, and K. Brady, “Advances in the understanding and treatment of stroke impairment using robotic devices,” *Topics in stroke rehabilitation*, vol. 12, pp. 22–35, 02 2005.
- [14] T. Nef, V. Klamroth-Marganska, U. Keller, and R. Riener, “Three-dimensional multi-degree-of-freedom arm therapy robot (armin),” in *Neurorehabilitation technology*, pp. 623–648, Springer, 2022.
- [15] M. Satler, C. A. Avizzano, and E. Ruffaldi, “Control of a desktop mobile haptic interface,” in *2011 IEEE World Haptics Conference*, pp. 415–420, IEEE, 2011.
- [16] D. Luo, M. Roth, C. Wiesener, T. Schauer, H. Schmidt, and J. Raisch, “Reha-maus: A novel robot for upper limb rehabilitation,” in *Workshop Automatisierungstechnische Verfahren für die Medizin (AUTOMED)*, pp. 33–34, 2010.
- [17] L. Saracino, C. A. Avizzano, E. Ruffaldi, G. Cappiello, Z. Curto, and A. Scoglio, “Moto-re++ a portable haptic device for domestic rehabilitation,” in *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 728–734, IEEE, 2016.
- [18] K. Ogata, Y. Hirabayashi, K. Kubota, Y. Hasegawa, and T. Tsuji, “Rehabilitation for hemiplegia using an upper limb training system based on a force direction,” in *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pp. 533–538, IEEE, 2017.
- [19] “Armassist: Robot asistivo para rehabilitación de extremidades superiores,” 2024. <https://www.tecnalia.com/activos/armassist-robot-asistivo-para-rehabilitacion-de-extremidades-superiores>.
- [20] S. Plagenhoef, F. G. Evans, and T. Abdelnour, “Anatomical data for analyzing human motion,” *Research quarterly for exercise and sport*, vol. 54, no. 2, pp. 169–178, 1983.
- [21] INEGI, “Estadísticas a propósito del día internacional de las personas con discapacidad (datos nacionales),” in *Comunicado de prensa Núm 713/21*, 2021.
- [22] DIF, “Rehabilitación, asunto de salud pública fundamental para el bienestar de las personas.” <https://www.gob.mx/difnacional/articulos/rehabilitacion-asunto-de-salud-publica-fundamental-para-el-bienestar-de-las-personas?idiom=es>.
- [23] SRE, “Datos básicos de México - consulado de México,” Feb 2014. <https://consulmex.sre.gob.mx/sanpedrosula/index.php/bienvenida-y-directorio/34>.
- [24] A. O. Baturone, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [25] A. B. B. S.A., “Robots industriales,” 2024. https://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/2829/Robot_Industrial-Aplicaciones.pdf.
- [26] R. Aracil, C. Balaguer, and M. Armada, “Robots de servicio,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 5, no. 2, pp. 6–13, 2008.

- [27] I. F. of Robotics, “Chapter 1 reviews definitions and classifications of service robots.,” *World Robotics*, 2021.
- [28] M. P. Azcona, C. S. Gómez, and E. J. F. Rodríguez, “Efectividad de la robótica en terapia ocupacional para recuperación funcional del miembro superior: revisión sistemática,” *Revista electrónica de terapia ocupacional Galicia, TOG*, no. 20, pp. 63–76, 2023.
- [29] B. Y. N. Pelier, M. T. Aguilar, and J. N. Rabelo, “Terapia robótica en la rehabilitación del miembro superior hemipléjico en pacientes con enfermedad cerebrovascular,” *Medimay*, vol. 28, no. 1, pp. 132–141, 2021.
- [30] W. H. Organization, “Rehabilitación.” <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>.
- [31] M. en español[Internet], “Rehabilitación,” 2021. <https://medlineplus.gov/spanish/rehabilitation.html>.
- [32] “Rehabilitación en los sistemas de salud: guía de acción,” 2019. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/331228/9789240001763-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [33] C. Oliveira, R. Navarro García, R. Navarro Navarro, J. A. Ruiz Caballero, J. F. Jiménez Díaz, and M. E. Brito Ojeda, “Biomecánica del hombro y sus lesiones,” *Canarias médica y quirúrgica*, 2007.
- [34] T. Sawyers, “Normal shoulder range of motion,” Sep 2018. <https://www.healthline.com/health/shoulder-range-of-motion>.
- [35] J. E. Muscolino, *The muscular system manual: the skeletal muscles of the human body*. Elsevier Health Sciences, 2016.
- [36] N. Palastanga and R. Soames, *Anatomy and human movement, structure and function with PAGEBURST access, 6: anatomy and human movement*. Elsevier Health Sciences, 2011.
- [37] G. Tortora and B. Derrickson, *Principios de Anatomía y Fisiología*. Editorial Médica Panamericana S.A., 2021.
- [38] J. Part Soriano and E. Sánchez Alepuz, “Biomecánica y exploración física del codo,” *Revista Española de Traumatología Laboral*, 2021.
- [39] J. Bicocca, “Importancia de la estabilidad de la muñeca y de la mano en los gestos técnicos de pases,” in *X Congreso Argentino y V Latinoamericano de Educación Física y Ciencias (La Plata, 2013)*, 2013.
- [40] R. Uribe-Carvajal, A. Jiménez-Aguilar, M. d. C. Morales-Ruan, A. A. Salazar-Coronel, and T. Shamah-Levy, “Percepción del peso corporal y de la probabilidad de desarrollar obesidad en adultos mexicanos,” *salud pública de méxico*, vol. 60, pp. 254–262, 2018.

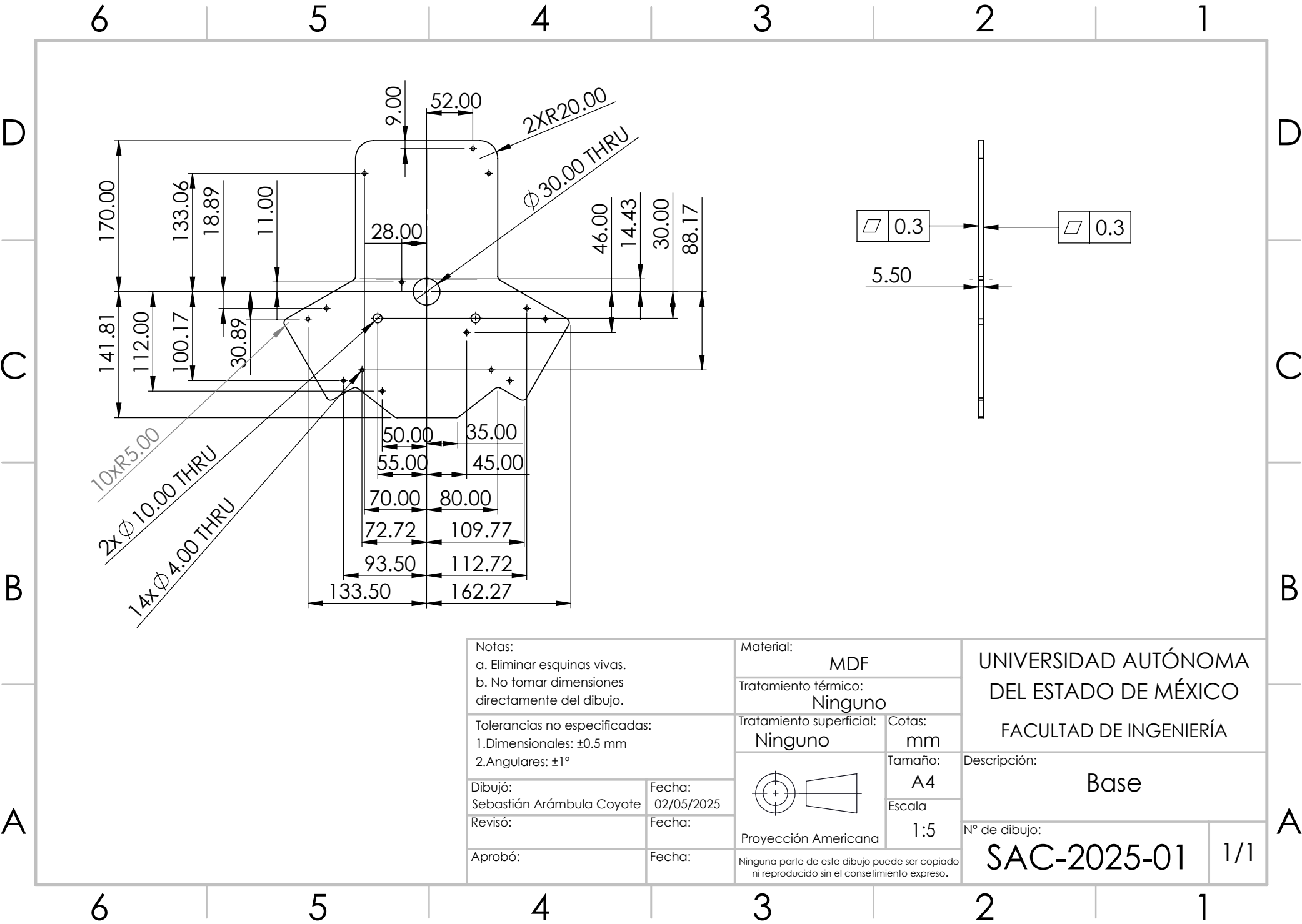
- [41] P. Irimia Sieira, “Ictus-acv síntomas y tratamiento: Clínica universidad de navarra.” <https://www.cun.es/enfermedades-tratamientos/enfermedades/ictus>.
- [42] M. Piera, “Esguinces y torceduras,” Jan 2005. <https://www.elsevier.es/es-revista-farmacia-profesional-3-articulo-esguinces-torceduras-13072095>.
- [43] L. C. Aguilar, “Traumatismos y tendinitis de las extremidades superiores,” Oct 2001. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-traumatismos-tendinitis-las-extremidades-superiores-13019949>.
- [44] V. de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas, “Anexo 1. technology readiness levels - trl.” https://investigacionesyposgrados.ucaldas.edu.co/wp-content/uploads/Anexo-1_TRL.pdf.
- [45] H. M. Qassim and W. Wan Hasan, “A review on upper limb rehabilitation robots,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, p. 6976, 2020.
- [46] A. Mancisidor, *Control avanzado para robótica asistencial y sanitaria*. PhD thesis, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, 2018.
- [47] I. Ermolaev and A. Toth, “Robots para los pacientes.:¿ es posible que los robots y los humanos cooperen para mejorar los programas de fisioterapia?,” *Revista ABB*, no. 3, pp. 21–24, 2006.
- [48] G. Fazekas, M. Horvath, T. Troznai, and A. Toth, “Robot-mediated upper limb physiotherapy for patients with spastic hemiparesis: a preliminary study,” *Journal of rehabilitation medicine*, vol. 39, no. 7, pp. 580–582, 2007.
- [49] A. Tóth, Z. Zoller, and G. Arz, “List of selection criteria and specification of the selected industrial robot,” 2000.
- [50] H. I. Krebs, N. Hogan, M. L. Aisen, and B. T. Volpe, “Robot-aided neurorehabilitation,” *IEEE transactions on rehabilitation engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 75–87, 1998.
- [51] H. I. Krebs, M. Ferraro, S. P. Buerger, M. J. Newbery, A. Makiyama, M. Sandmann, D. Lynch, B. T. Volpe, and N. Hogan, “Rehabilitation robotics: pilot trial of a spatial extension for mit-manus,” *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 1, pp. 1–15, 2004.
- [52] N. Hogan, H. I. Krebs, J. Charnnarong, P. Srikrishna, and A. Sharon, “Mit-manus: a workstation for manual therapy and training. i,” in *[1992] Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 161–165, IEEE, 1992.
- [53] D. J. Reinkensmeyer, B. D. Schmit, and W. Z. Rymer, “Can robots improve arm movement recovery after chronic brain injury? a rationale for their use based on experimentally identified motor impairments,” in *Proc. 6th Intl. Conf. on Rehabilitation Robotics: ICORR*, vol. 99, pp. 9–15, Citeseer, 1999.

- [54] D. J. Reinkensmeyer, C. D. Takahashi, W. K. Timoszyk, A. N. Reinkensmeyer, and L. E. Kahn, “Design of robot assistance for arm movement therapy following stroke,” *Advanced robotics*, vol. 14, no. 7, pp. 625–637, 2001.
- [55] T. Nef, M. Mihelj, G. Colombo, and R. Riener, “Armin-robot for rehabilitation of the upper extremities,” in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pp. 3152–3157, IEEE, 2006.
- [56] F. G. Pin and S. M. Killough, “A new family of omnidirectional and holonomic wheeled platforms for mobile robots,” *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 10, no. 4, pp. 480–489, 1994.
- [57] R. L. Williams, B. E. Carter, P. Gallina, and G. Rosati, “Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots,” *IEEE transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 3, pp. 285–293, 2002.
- [58] Y. Liu, R. L. Williams, and J. J. Zhu, “Integrated control and navigation for omnidirectional mobile robot based on trajectory linearization,” in *2007 American Control Conference*, pp. 2153–2158, IEEE, 2007.
- [59] A. Scoglio, G. Cappiello, Z. Curto, A. Rossi, C. A. Avizzano, M. Satler, E. Ruffaldi, *et al.*, “Haptic system and device for man-machine interaction,” *IRIS*, 2012.
- [60] M. Sarac, M. A. Ergin, A. Erdogan, and V. Patoglu, “Assiston-mobile: a series elastic holonomic mobile platform for upper extremity rehabilitation,” *Robotica*, vol. 32, no. 8, pp. 1433–1459, 2014.
- [61] T. J. D. Tomić, A. M. Savić, A. S. Vidaković, S. Z. Rodić, M. S. Isaković, C. Rodríguez-de Pablo, T. Keller, L. M. Konstantinović, *et al.*, “Armassist robotic system versus matched conventional therapy for poststroke upper limb rehabilitation: a randomized clinical trial,” *BioMed research international*, vol. 2017, 2017.
- [62] J. C. Perry, H. Zabaleta, A. Belloso, and T. Keller, “Armassist: A low-cost device for telerehabilitation of post-stroke arm deficits,” in *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7-12, 2009, Munich, Germany: Vol. 25/9 Neuroengineering, Neural Systems, Rehabilitation and Prosthetics*, pp. 64–67, Springer, 2009.
- [63] J. C. Perry, H. Zabaleta, A. Belloso, C. Rodríguez-de Pablo, F. I. Cavallaro, and T. Keller, “Armassist: development of a functional prototype for at-home telerehabilitation of post-stroke arm impairment,” in *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)*, pp. 1561–1566, IEEE, 2012.
- [64] S. G. Rozevink, C. K. van der Sluis, A. Garzo, T. Keller, and J. M. Hijmans, “Homecare arm rehabilitation (merlin): Telerehabilitation using an unactuated device based on serious games improves the upper limb function in chronic stroke,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 18, pp. 1–12, 2021.

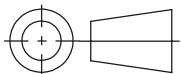
- [65] D. Luo, T. Schauer, M. Roth, and J. Raisch, “Position and orientation control of an omni-directional mobile rehabilitation robot,” in *2012 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 50–56, IEEE, 2012.
- [66] K. Ogata, Y. Hirabayashi, K. Kubota, and T. Tsuji, “Home rehabilitation assist robot to facilitate isolated movements for hemiplegia patients,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 527–532, IEEE, 2017.
- [67] MatWeb. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1>.
- [68] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 4th ed., 2009.
- [69] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mecánica de materiales*. México: Cengage Learning, 7 ed., 2010.
- [70] R. L. Norton, *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado*. México: Pearson Educación, 4 ed., 2011.

Apéndice A

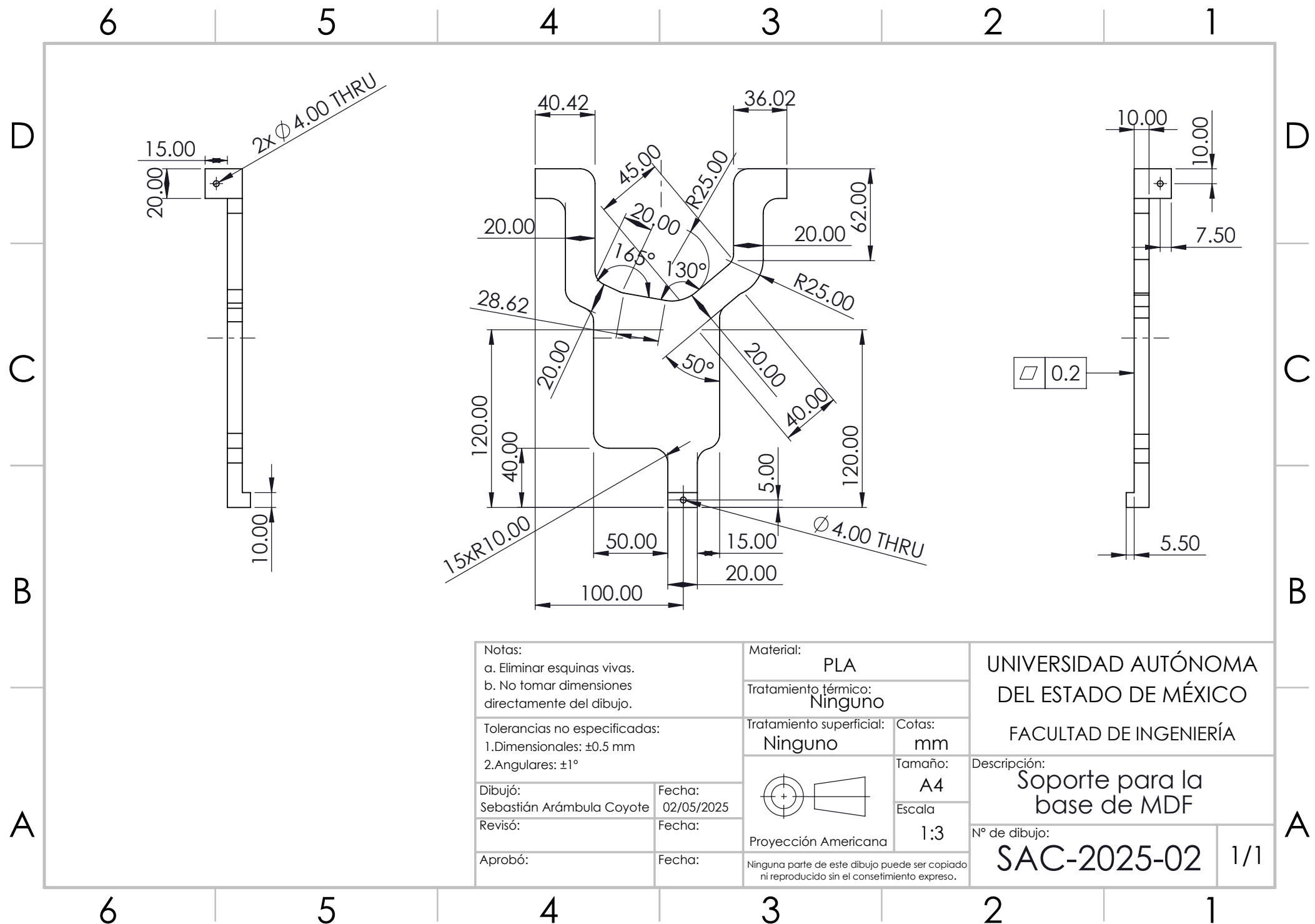
Dibujos técnicos de las piezas



Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.	
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$	
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote	Fecha: 02/05/2025
Revisó:	Fecha:
Aprobó:	Fecha:

Material: MDF	
Tratamiento térmico: Ninguno	
Tratamiento superficial: Ninguno	Cotas: mm
	Tamaño: A4
	Escala: 1:5
Proyección Americana	
Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin el consentimiento expreso.	

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA	
Descripción: Base	
Nº de dibujo: SAC-2025-01	1/1



A

A

B

B

C

C

D

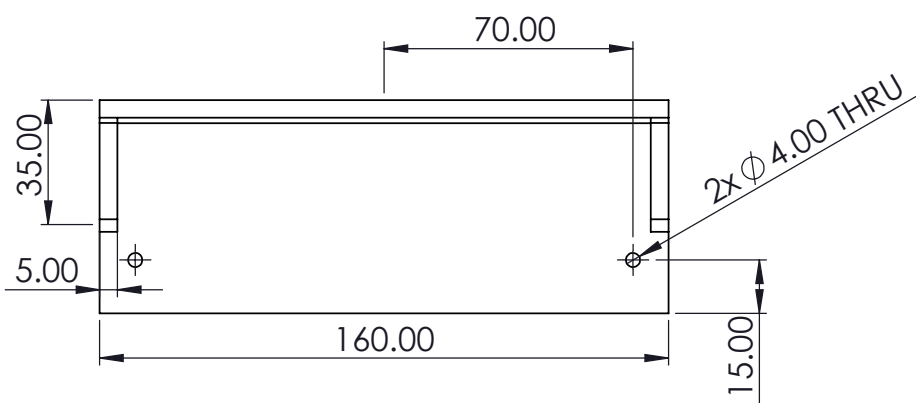
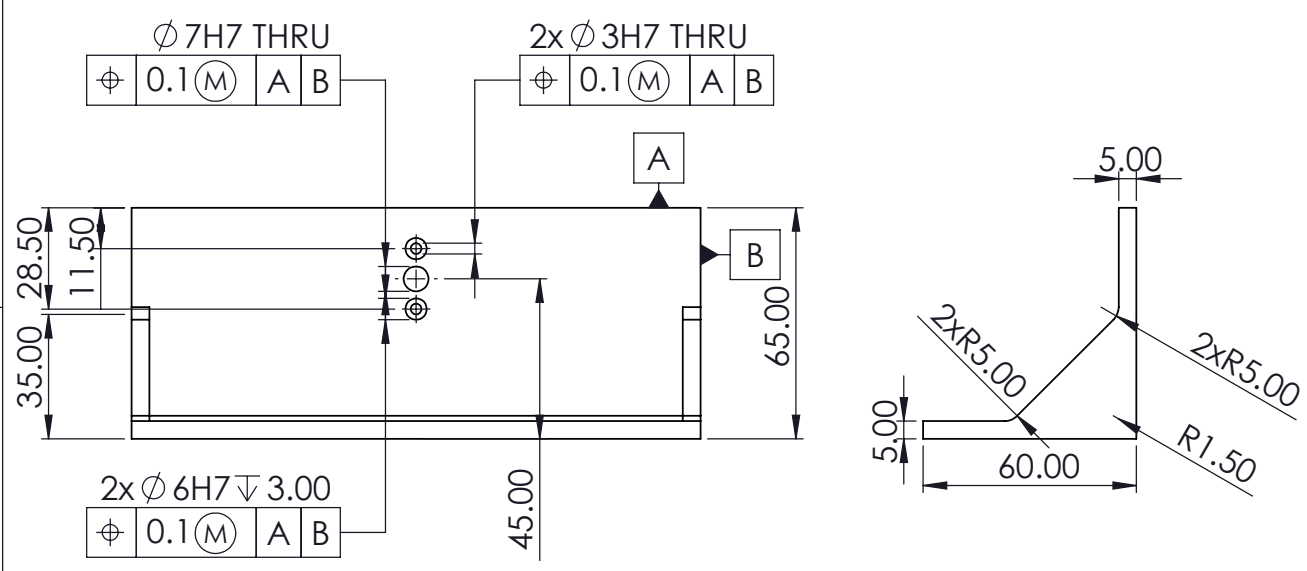
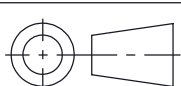
D

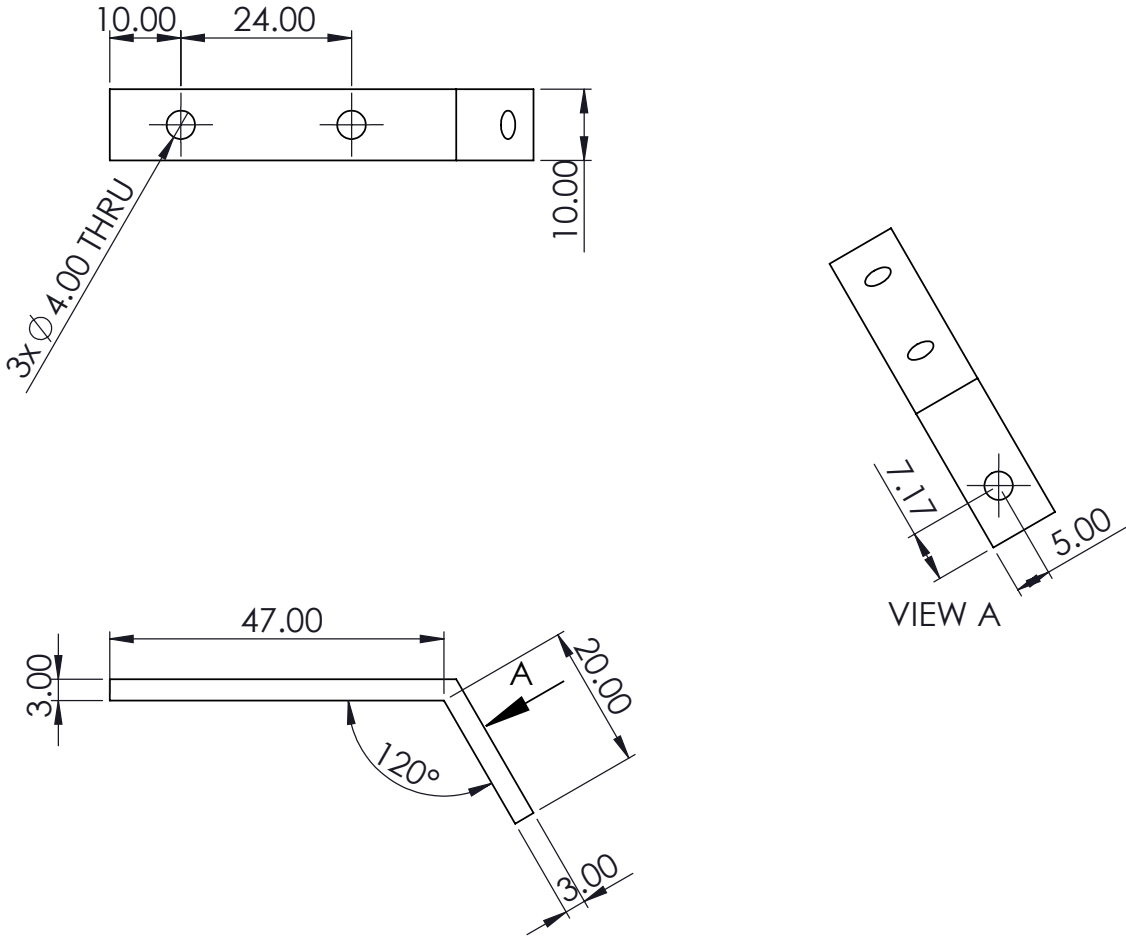
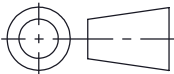
1		2		3	
N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma	Aprobado
Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.			Material: PLA		
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$			Tratamiento térmico: Ninguno		
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote			Trat. superficial: Ninguno		
Revisó:			Cotas: mm		
Aprobó:			Tamaño: A4		
Fecha: 02/05/2025			Escala: 1:2		
Proyección Americana			Descripción: Soporte corto		
Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.			N° de dibujo: SAC-2025-03		
			1/1		

1

2

3

	1	2	3	
	N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma
				Aprobado
A				A
B				B
C				C
D	Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo. Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$ Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote Revisó: Aprobó:	Material: PLA Tratamiento térmico: Ninguno Trat. superficial: Ninguno  Proyección Americana	Cotas: mm Tamaño: A4 Escala: 1:2 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA Descripción: Soporte largo N° de dibujo: SAC-2025-04	D 1/1
	1	2	3	

	1	2	3			
N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma	Aprobado	
A						A
B						B
C						C
D	Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo. Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ±0.5 mm 2. Angulares: ±1° Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote Fecha: 02/05/2025 Revisó Fecha: Aprobó: Fecha: Material: PLA Tratamiento térmico: Ninguno Trat. superficial: Ninguno Cotas: mm  Tamaño: A4 Proyección Americana Escala: 1:1 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA Descripción: Guía frontal para carcasa N° de dibujo: SAC-2025-05 1/1					D
	1	2	3			

A

A

B

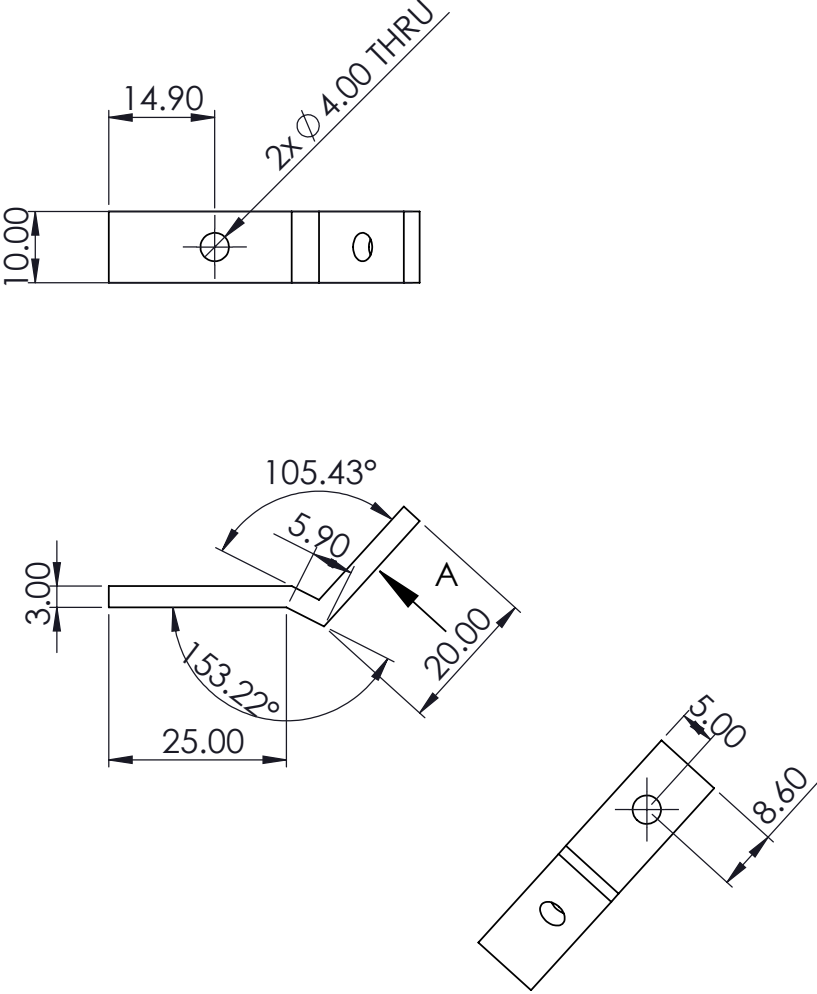
B

C

C

D

D

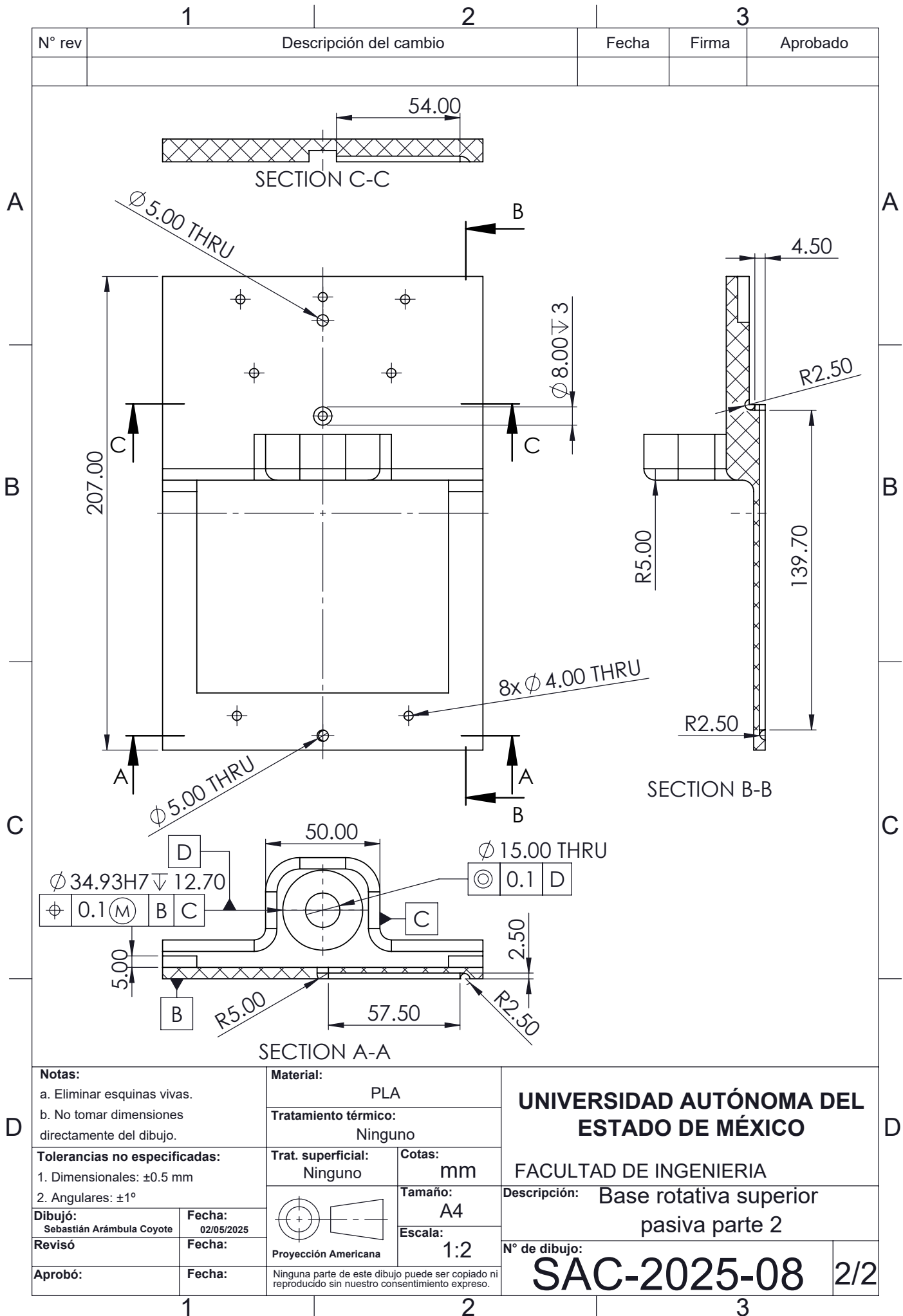
1		2		3	
N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma	Aprobado
 14.90 10.00 2x Ø 4.00 THRU 3.00 105.43° 5.90 153.22° 25.00 20.00 VIEW A 5.00 8.60					
Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.			Material: PLA		
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$			Tratamiento térmico: Ninguno		
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote			Trat. superficial: Ninguno		
Revisó			Cotas: mm		
Aprobó:			Tamaño: A4		
Fecha:			Escala: 1:1		
Fecha:			Proyección Americana		
Fecha:			Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		
Fecha:			UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO		
Fecha:			FACULTAD DE INGENIERIA		
Fecha:			Descripción: Guía trasera para carcasa		
Fecha:			N° de dibujo: SAC-2025-06		
Fecha:			1/1		

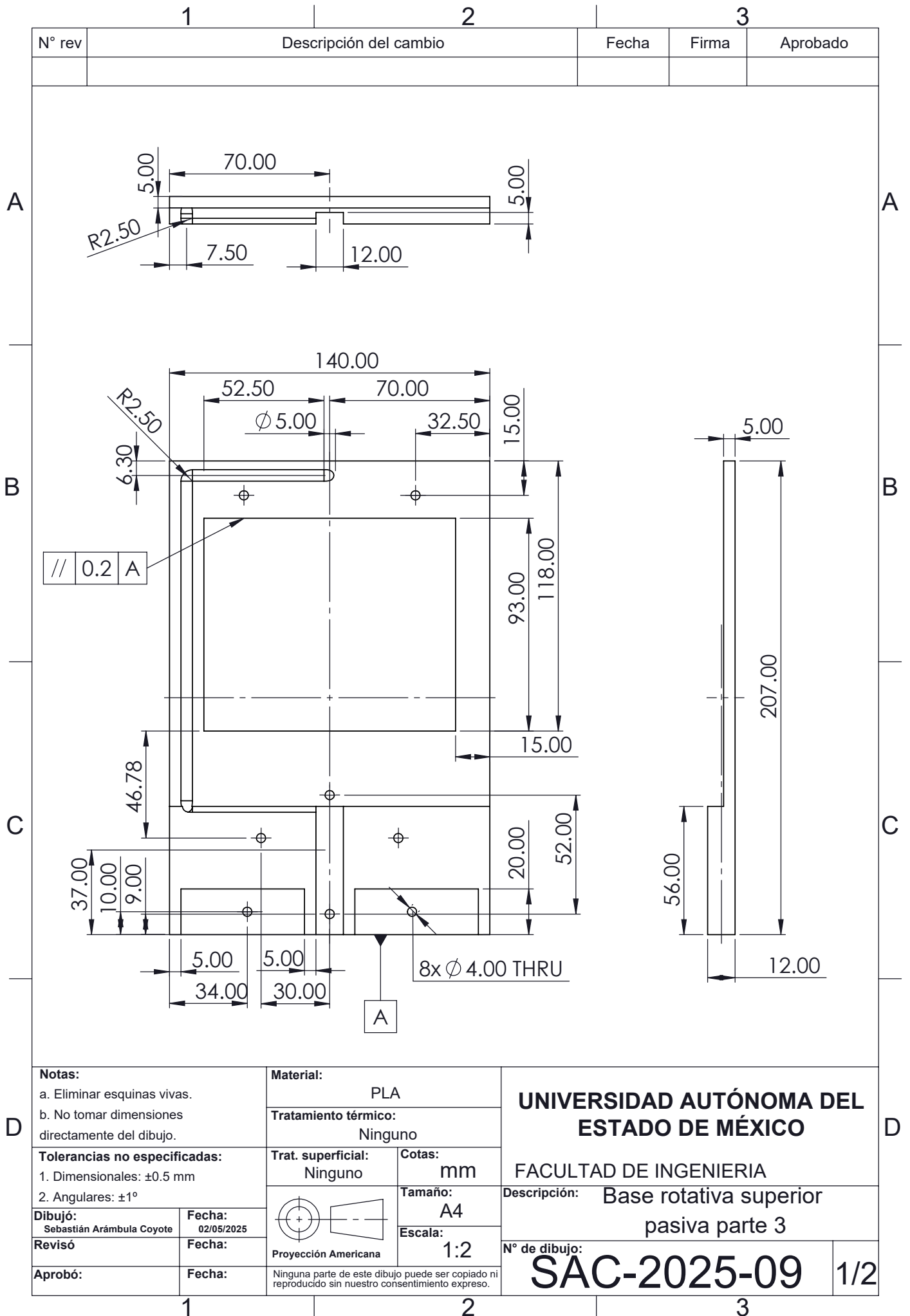
1

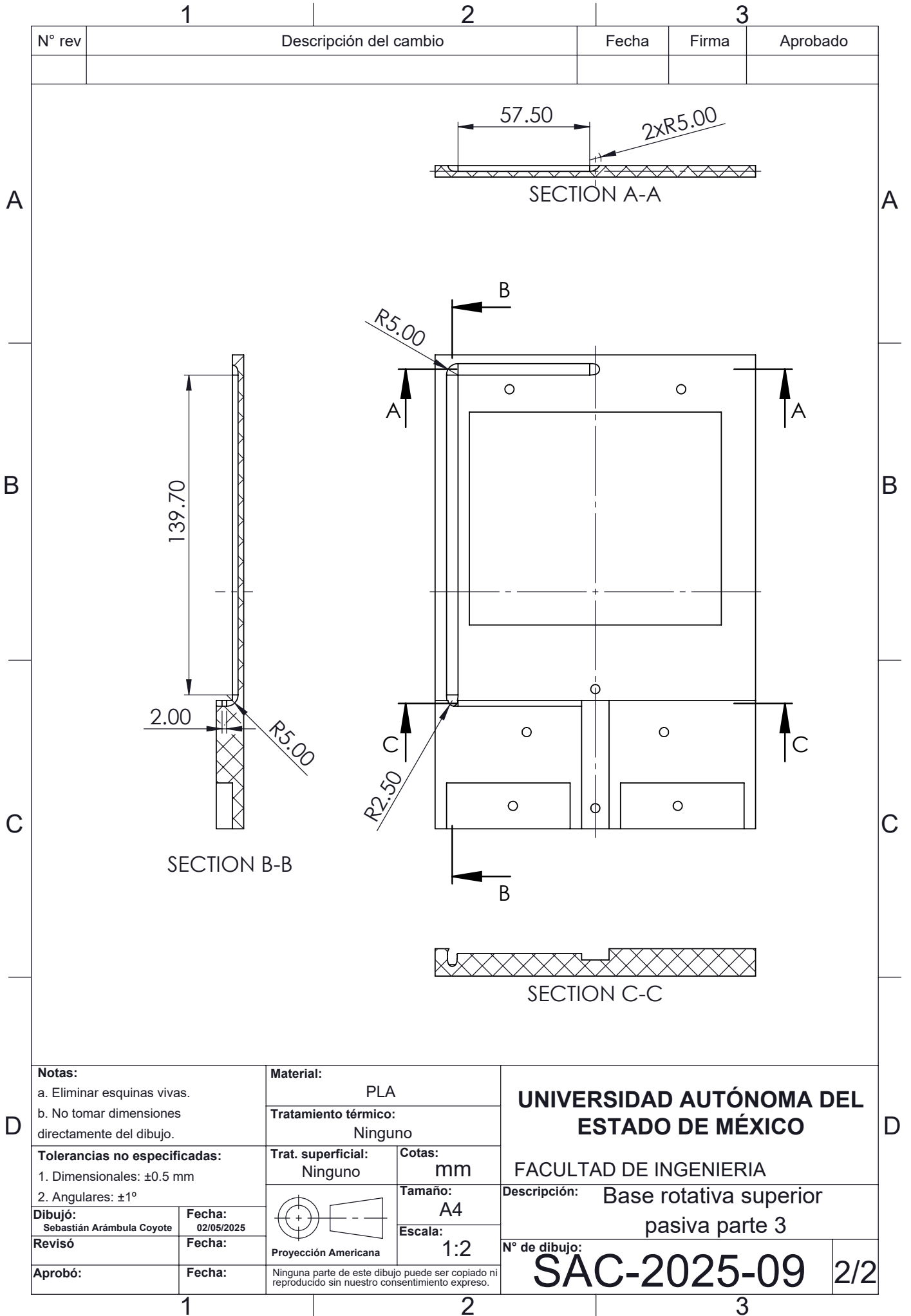
2

3

	1	2	3			
N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma	Aprobado	
A						
B						
C						
D	Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo. Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$ Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote Revisó: Aprobó:		Material: PLA Tratamiento térmico: Ninguno Trat. superficial: Ninguno Cotas: mm Tamaño: A4 Escala: 1:2 Proyección Americana Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA Descripción: Base rotativa superior pasiva parte 2 N° de dibujo: SAC-2025-08 1/2	
	1	2	3			

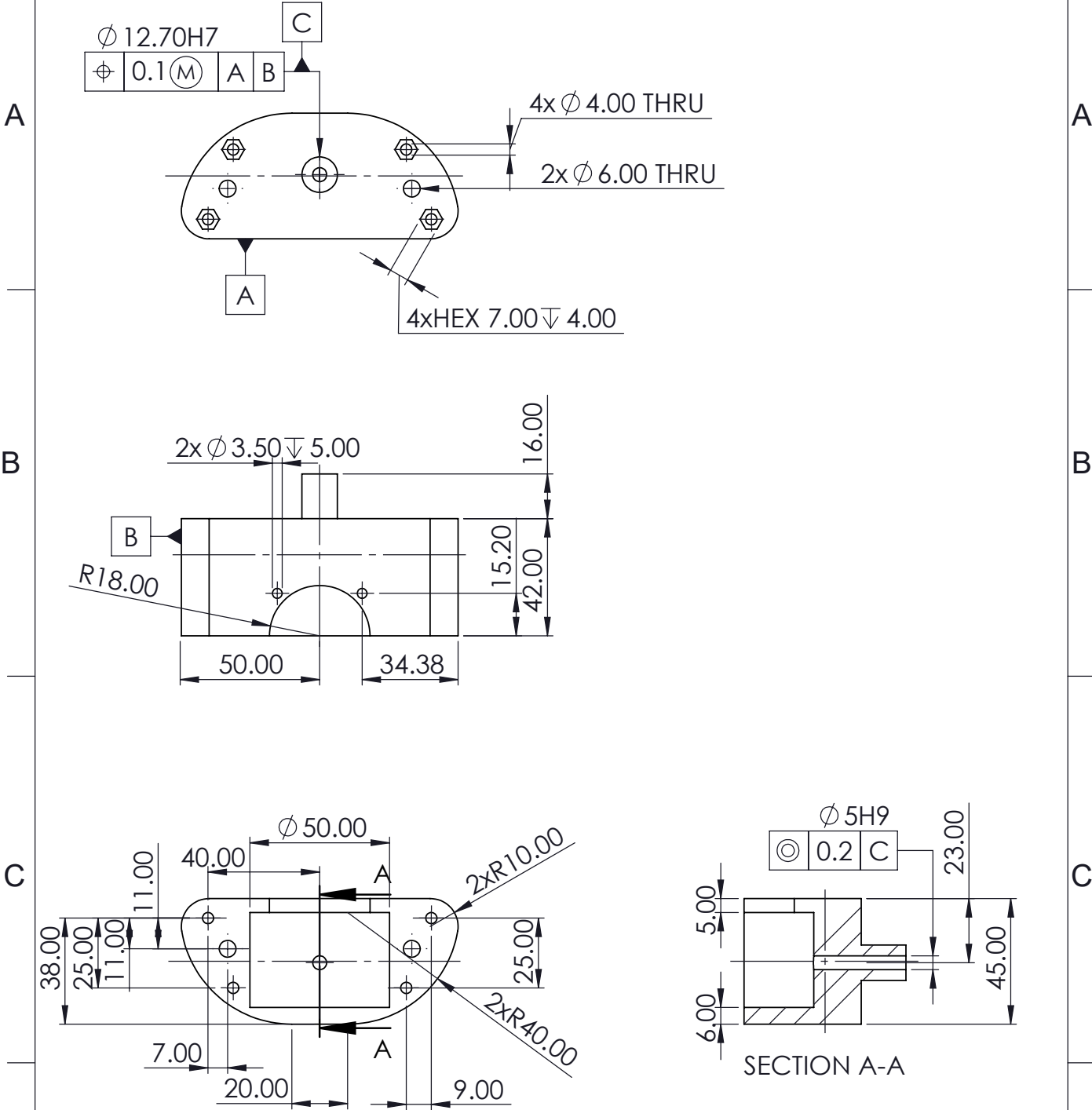




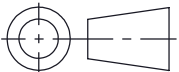


	1	2	3																																					
N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma																																				
A																																								
B																																								
C																																								
	SECTION A-A																																							
D	<table><tr><td colspan="2">Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.</td><td colspan="2">Material: PLA</td></tr><tr><td colspan="2">Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$</td><td colspan="2">Tratamiento térmico: Ninguno</td></tr><tr><td colspan="2">Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote</td><td colspan="2">Trat. superficial: Ninguno</td></tr><tr><td colspan="2">Revisó:</td><td colspan="2">Cotas: mm</td></tr><tr><td colspan="2">Aprobó:</td><td colspan="2">Tamaño: A4</td></tr><tr><td colspan="2">Fecha: 02/05/2025</td><td colspan="2">Escala: 1:2</td></tr><tr><td colspan="2">Proyección Americana</td><td colspan="2">Descripción: Pronosupinador Parte 1</td></tr><tr><td colspan="2">Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.</td><td colspan="2">N° de dibujo: SAC-2025-12</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">1/1</td></tr></table>				Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA		Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Tratamiento térmico: Ninguno		Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote		Trat. superficial: Ninguno		Revisó:		Cotas: mm		Aprobó:		Tamaño: A4		Fecha: 02/05/2025		Escala: 1:2		Proyección Americana		Descripción: Pronosupinador Parte 1		Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		N° de dibujo: SAC-2025-12				1/1	
Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA																																						
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Tratamiento térmico: Ninguno																																						
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote		Trat. superficial: Ninguno																																						
Revisó:		Cotas: mm																																						
Aprobó:		Tamaño: A4																																						
Fecha: 02/05/2025		Escala: 1:2																																						
Proyección Americana		Descripción: Pronosupinador Parte 1																																						
Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		N° de dibujo: SAC-2025-12																																						
		1/1																																						
	1	2	3																																					

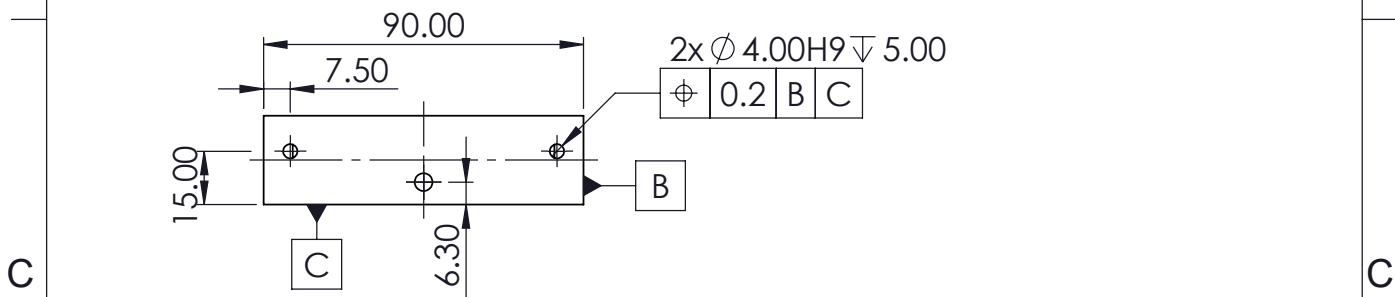
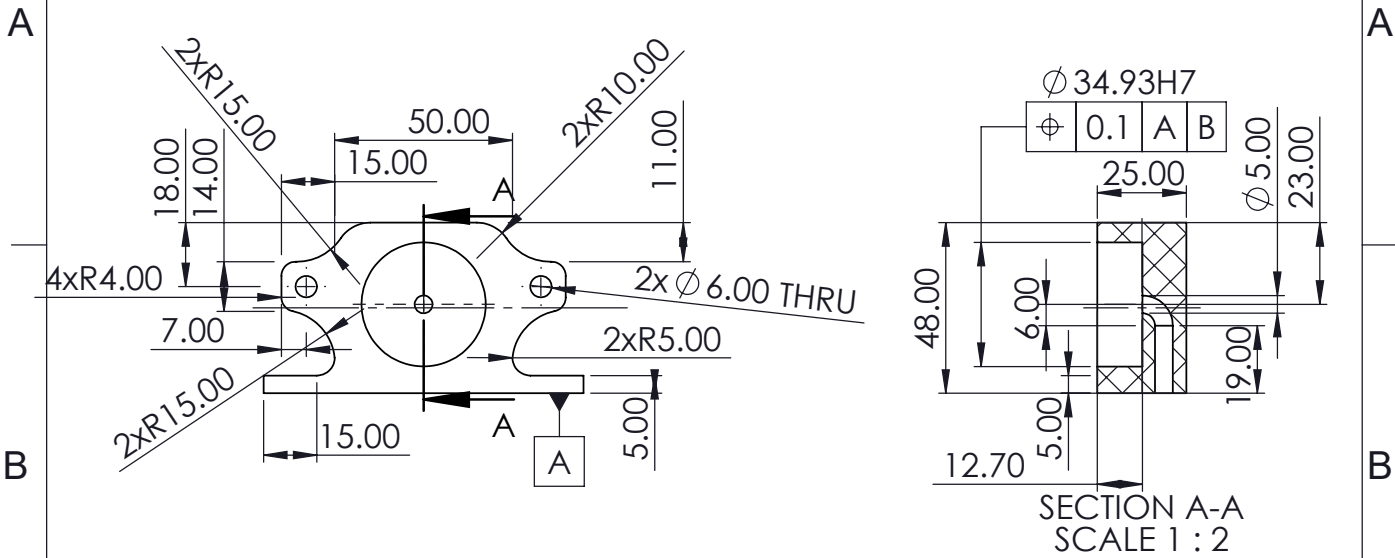
N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado



D

Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO	
		Tratamiento térmico: Ninguno			
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ±0.5 mm 2. Angulares: ±1°		Trat. superficial: Ninguno	Cotas: mm	FACULTAD DE INGENIERIA	
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote	Fecha: 02/05/2025		Tamaño: A4		
Revisó	Fecha:		Escala: 1:2	N° de dibujo:	
Aprobó:	Fecha:	Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		SAC-2025-13	1/1

1		2		3	
N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado	



D

Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO	
		Tratamiento térmico: Ninguno			
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ±0.5 mm 2. Angulares: ±1°		Trat. superficial: Ninguno		FACULTAD DE INGENIERIA	
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote				Descripción: Soporte del pronosupinador	
Revisó				N° de dibujo: SAC-2025-14	
Aprobó:		Fecha:		1/1	
		Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.			

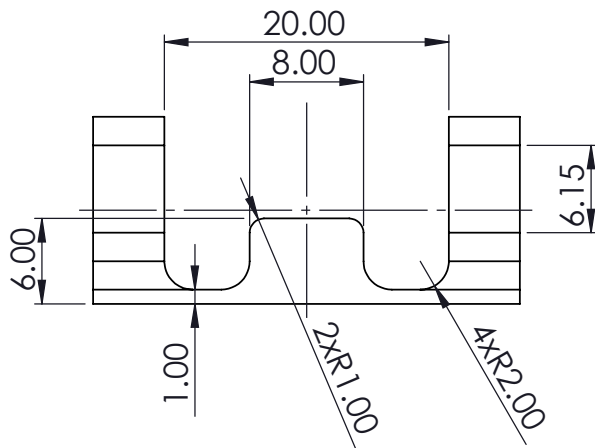
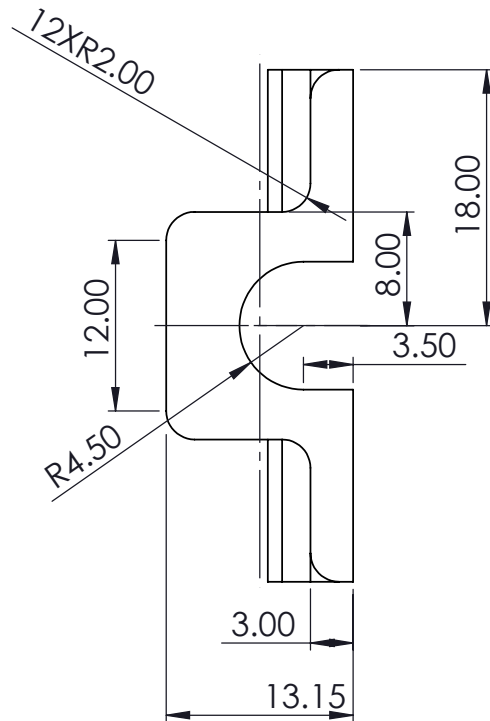
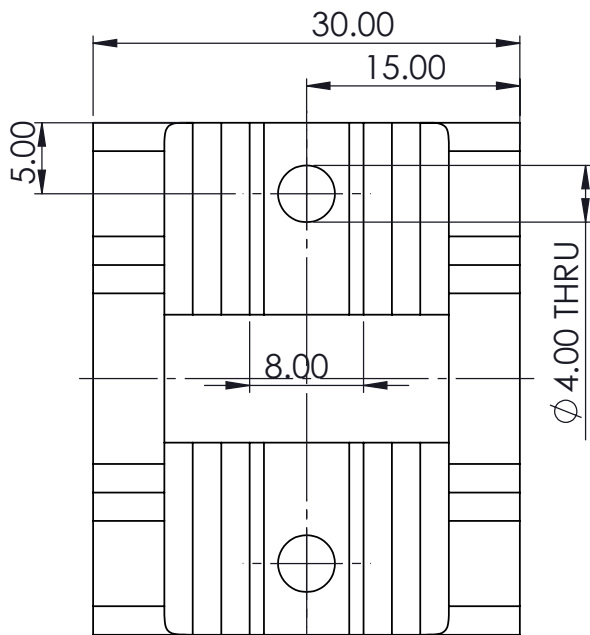
1		2		3	
N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado	

A

B

C

D

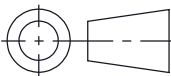


A

B

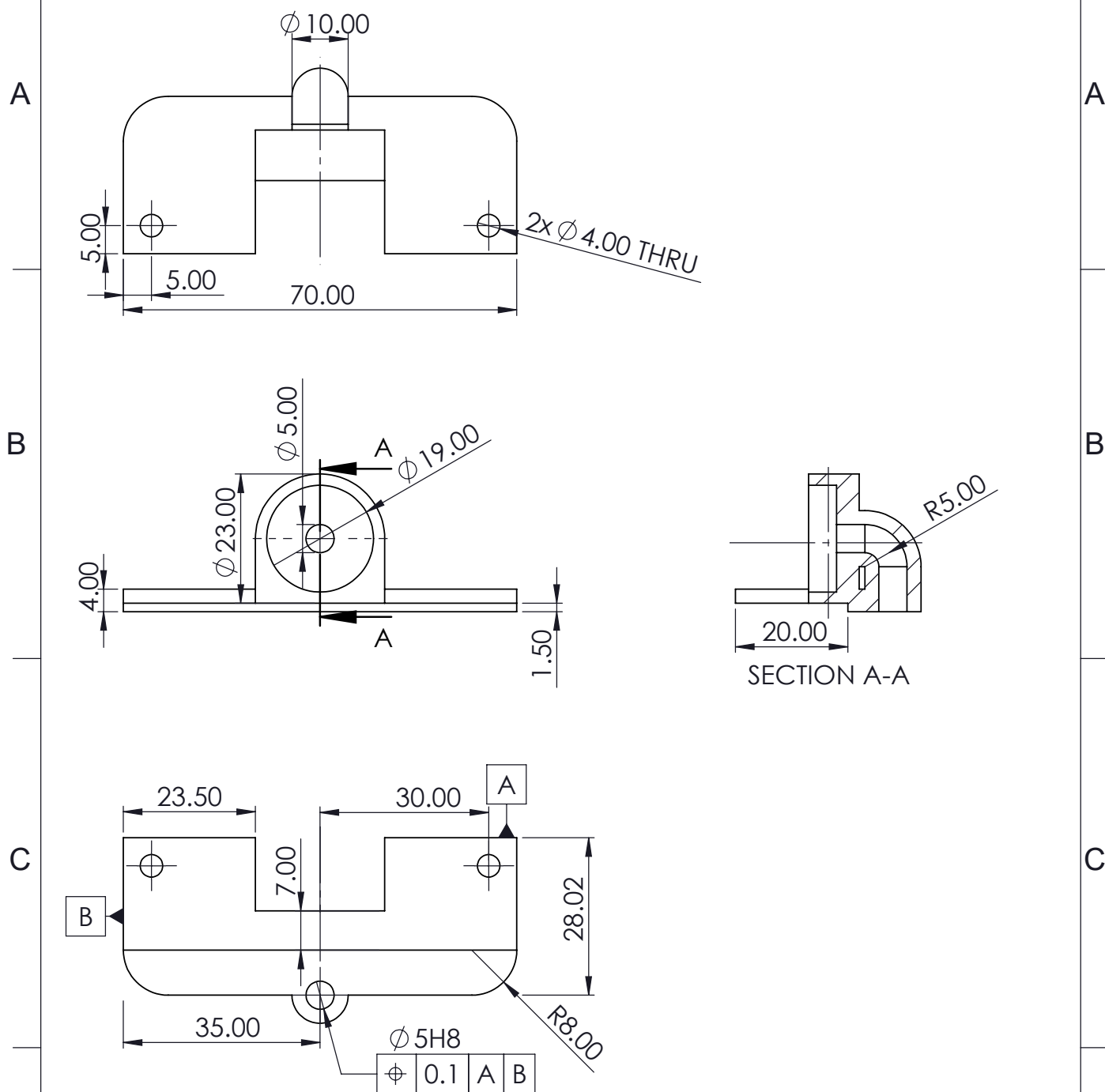
C

D

Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO	
		Tratamiento térmico: Ninguno			
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Trat. superficial: Ninguno	Cotas: mm	FACULTAD DE INGENIERIA	
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote	Fecha: 03/05/2025	 Proyección Americana	Tamaño: A4		
Revisó	Fecha:		Escala: 2:1		
Aprobó:		Fecha:		Descripción: Base del picaporte	
		Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		N° de dibujo: SAC-2025-16	1/1

	1	2	3																																																					
	N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma	Aprobado																																																		
A																																																								
B																																																								
C																																																								
D	<table><tr><td colspan="2">Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.</td><td colspan="2">Material: PETG</td><td colspan="2" rowspan="3">UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">Tratamiento térmico: Ninguno</td></tr><tr><td colspan="2">Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$</td><td colspan="2">Trat. superficial: Ninguno</td></tr><tr><td colspan="2">Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote</td><td colspan="2">Fecha: 03/05/2025</td><td colspan="2">Cotas: mm</td></tr><tr><td colspan="2">Revisó</td><td colspan="2">Fecha:</td><td colspan="2">Tamaño: A4</td></tr><tr><td colspan="2">Aprobó:</td><td colspan="2">Fecha:</td><td colspan="2">Escala: 1:1</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2">Descripción: Extensor</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.</td><td colspan="2">N° de dibujo: SAC-2025-18</td></tr><tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2">1/1</td></tr></table>						Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PETG		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA				Tratamiento térmico: Ninguno		Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Trat. superficial: Ninguno		Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote		Fecha: 03/05/2025		Cotas: mm		Revisó		Fecha:		Tamaño: A4		Aprobó:		Fecha:		Escala: 1:1						Descripción: Extensor				Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		N° de dibujo: SAC-2025-18						1/1	
Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PETG		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA																																																				
		Tratamiento térmico: Ninguno																																																						
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Trat. superficial: Ninguno																																																						
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote		Fecha: 03/05/2025		Cotas: mm																																																				
Revisó		Fecha:		Tamaño: A4																																																				
Aprobó:		Fecha:		Escala: 1:1																																																				
				Descripción: Extensor																																																				
		Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		N° de dibujo: SAC-2025-18																																																				
				1/1																																																				
	1	2	3																																																					

1		2		3	
Nº rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado	



Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO	
		Tratamiento térmico: Ninguno			
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Trat. superficial: Ninguno	Cotas: mm	FACULTAD DE INGENIERIA	
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote	Fecha: 03/05/2025		Tamaño: A4		
Revisó	Fecha:		Proyección Americana	Escala: 1:1	Descripción: Cubre Encoder
Aprobó:	Fecha:	Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		N° de dibujo: SAC-2025-20	1/1

N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado

A

A

B

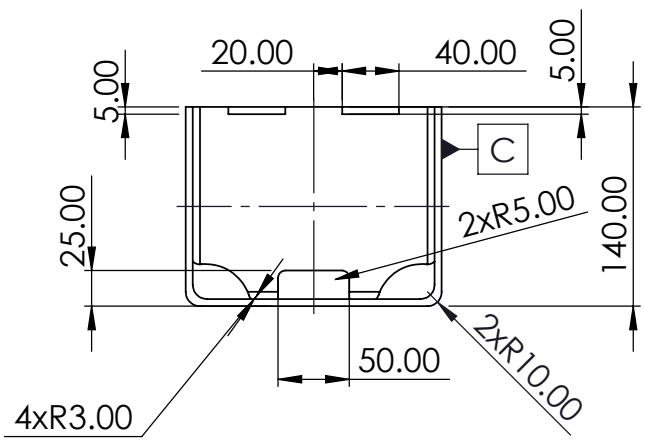
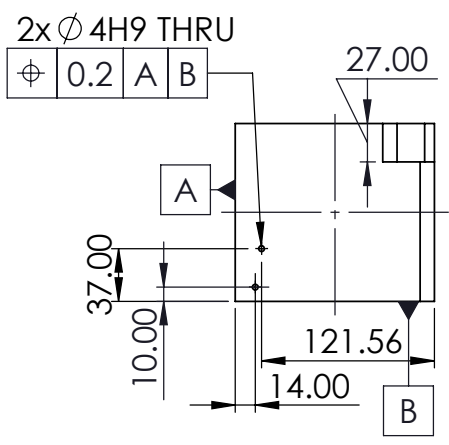
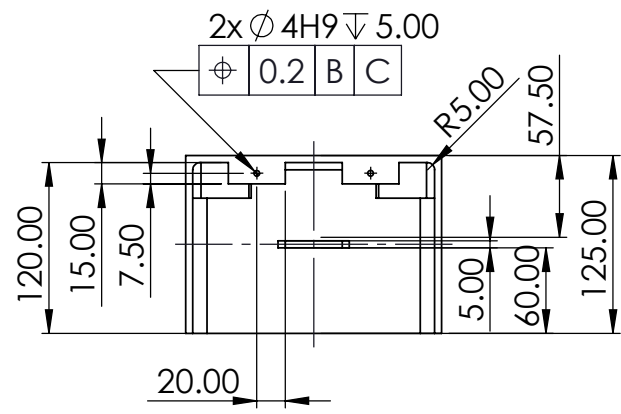
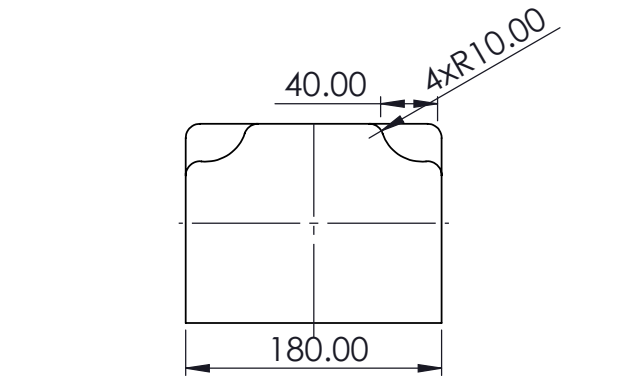
B

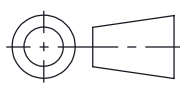
C

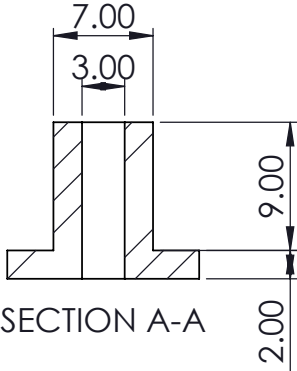
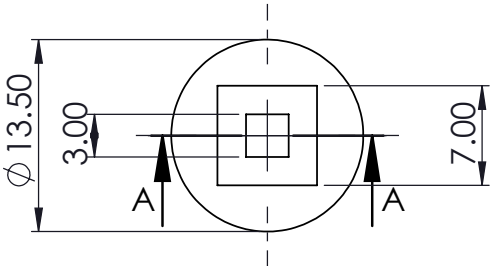
C

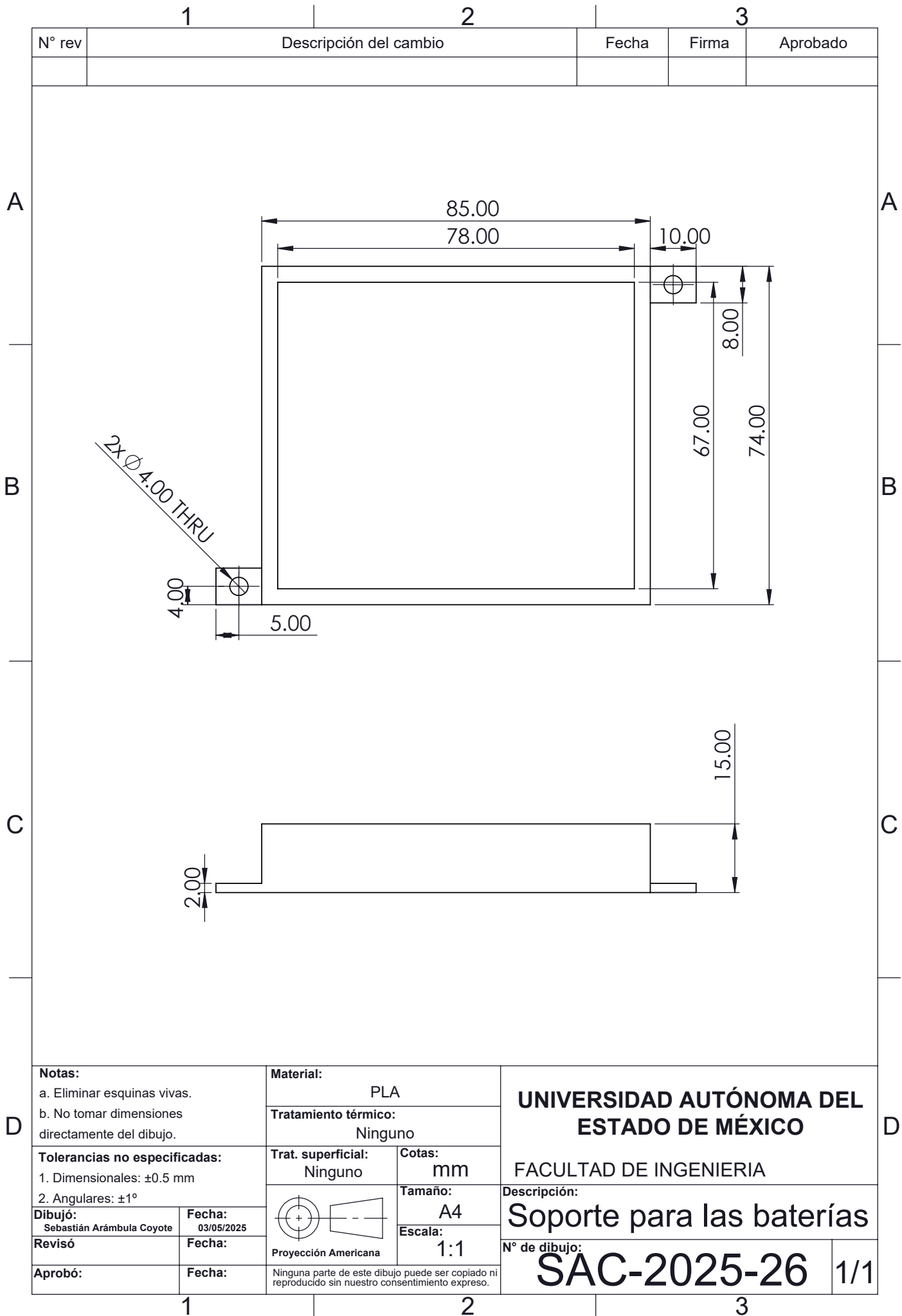
D

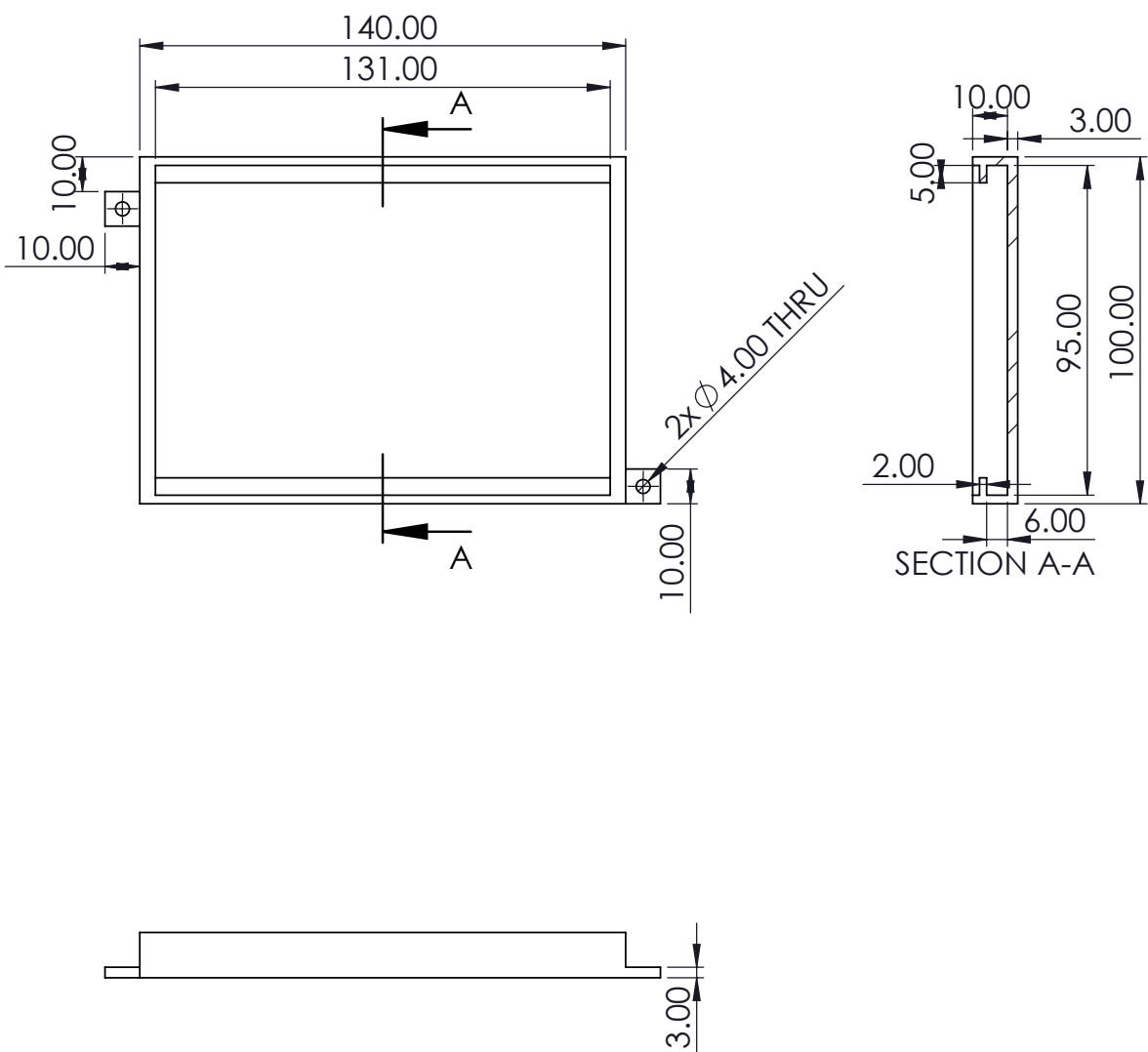
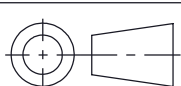
D



Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: PLA		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO	
		Tratamiento térmico: Ninguno			
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ±0.5 mm 2. Angulares: ±1°		Trat. superficial: Ninguno	Cotas: mm	FACULTAD DE INGENIERIA	
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote	Fecha: 03/05/2025		Tamaño: A4		
Revisó	Fecha:		Escala: 1:5	N° de dibujo: SAC-2025-21	1/1
Aprobó:	Fecha:	Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.			

	1	2	3						
	N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado				
A						A			
B	 					B			
C						C			
D	Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo. Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$ Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote Fecha: 03/05/2025 Revisó Fecha: Aprobó: Fecha: Material: PETG Tratamiento térmico: Ninguno Trat. superficial: Ninguno Cotas: mm  Tamaño: A4 Proyección Americana Escala: 2:1 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA Descripción: Adaptador para cople N° de dibujo: SAC-2025-25 1/1 <tr><td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr>						1	2	3
	1	2	3						



	1	2	3			
	N° rev	Descripción del cambio	Fecha	Firma	Aprobado	
A						A
B						B
C						C
D	Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo. Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ±0.5 mm 2. Angulares: ±1° Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote Fecha: 03/05/2025 Revisó Fecha: Aprobó: Fecha: Material: PLA Tratamiento térmico: Ninguno Trat. superficial: Ninguno Cotas: mm  Tamaño: A4 Proyección Americana Escala: 1:2 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA Base para PCB N° de dibujo: SAC-2025-27 1/1					D
	1	2	3			

A

B

C

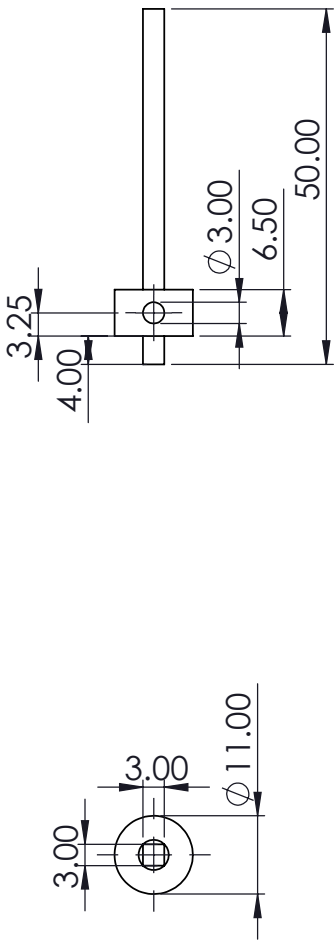
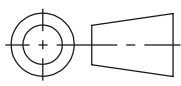
D

A

B

C

D

	1	2	3		
N° rev	Descripción del cambio		Fecha	Firma	Aprobado
					
Notas: a. Eliminar esquinas vivas. b. No tomar dimensiones directamente del dibujo.		Material: Acero 1018		UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERIA	
		Tratamiento térmico: Ninguno			
Tolerancias no especificadas: 1. Dimensionales: ± 0.5 mm 2. Angulares: $\pm 1^\circ$		Trat. superficial: Ninguno	Cotas: mm		
Dibujó: Sebastián Arámbula Coyote				Descripción: Eje cuadrado de transmisión	
Revisó		Proyección Americana		N° de dibujo: SAC-2025-28	
Aprobó:		Fecha: Ninguna parte de este dibujo puede ser copiado ni reproducido sin nuestro consentimiento expreso.		1/1	
	1	2	3		

Apéndice B

Solicitud de registro de diseño industrial

REPRESENTACIÓN DE LA SOLICITUD DE REGISTRO DE DISEÑO INDUSTRIAL ENVIADA A TRAVÉS DEL PORTAL DE ACCESO A SERVICIOS ELECTRÓNICOS (PASE).

Homoclave del formato	
IMPI-00-009	

Folio		
Folio: MX/E/2025/082888		

Fecha de solicitud del trámite		
18		11 2025

Datos generales de la solicitud

☐ Solicitud de Patente ☐ Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad ☒ Solicitud de Registro de Diseño Industrial Especifique cual: ☒ Modelo Industrial ☐ Dibujo Industrial	Expediente: MX/f/2025/004094 ID Solicitud: 221206 Fecha: 18/11/2025 01:06:56
--	--

Datos del (de los) solicitante(s)

Personas físicas	Personas morales
CURP:	RFC: UAE560321II2
Nombre(s):	Denominación o razón social:
Primer apellido:	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Segundo apellido:	
Género:	
Nacionalidad:	Nacionalidad: MÉXICO
Teléfono (Lada, Número, Extensión):	Teléfono (Lada, Número, Extensión):
Correo electrónico:	Correo electrónico:
☐ Continúa en anexo	☒ Continúa en anexo

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Domicilio del (de los) solicitante(s)

Código postal: 50000

Calle: INSTITUTO LITERARIO OTE.

Número exterior: 100

Número interior:

Colonia:

Municipio o delegación:

Localidad:

Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO

Entre calles:

País: MÉXICO

Datos del (de los) inventor(es) /diseñador(es)

CURP:

Nombre(s): Sebastián

Primer apellido: ARÁMBULA

Segundo apellido: COYOTE

Nacionalidad: MÉXICO

Teléfono (Lada, Número, Extensión):

Género: Masculino

Correo electrónico:

☒ Continúa en anexo

Domicilio del (de los) inventor(es)/diseñador(es)

Código postal: 51367

Calle: PENSADOR MEXICANO

Número exterior: 217

Número interior:

Colonia:

Municipio o delegación:

Localidad:

Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO

Entre calles:

País: MÉXICO

**MÉXICO**
PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA**Contacto:**

Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.
Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana, del interior de la República sin
costo para el usuario 800-570-59-90.
Correo electrónico: buzón@impi.gob.mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Datos del (de los) apoderado(s)

CURP: VIBR741007MMCLRS01	RGP:
Nombre(s): Maria Del Rosario	Personas autorizadas para oír/recibir notificaciones:
Primer apellido: VILCHIS	
Segundo apellido: BERNAL	
Nacionalidad: MÉXICO	
Teléfono (Lada, Número, Extensión):	
Correo electrónico: charovb@gmail.com	☐ Continúa en anexo

Domicilio del (de los) apoderado(s)

Código postal: 50000	
Calle: INSTITUTO LITERARIO OTE.	
Número exterior: 100	Número interior:
Colonia: CENTRO	
Municipio o delegación: TOLUCA	Localidad:
Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO	Entre calles:
País: MÉXICO	

Datos de la Solicitud

Denominación o título de la invención: MODELO INDUSTRIAL DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR
Fecha divulgación previa:

Divisional de la solicitud

Fecha presentación:
Número:
Figura jurídica:

Prioridad Reclamada

País:	Fecha de Presentación:	Número de Serie:	Código DAS

**Contacto:**

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Observaciones

Bajo protesta de decir verdad, el firmante manifiesta que los datos asentados en esta solicitud son ciertos y que en caso de actuar como mandatario, cuenta con facultades para llevar a cabo el presente trámite.

**Cadena Original**

MARIA DEL ROSARIO VILCHIS BERNAL|CURP|VIBR741007MMCLRS01|RENAPO|18/11/2025 13:06:55|1248237|20|Documento_Firma_Electronica.pdf|4564.97 KB|S0o2eQ6aeu0tGikD7ZfzWUw0pY8=|000221206|DISEÑO INDUSTRIAL|Modelo Industrial |DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR|UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO|MORAL|Sebastián ARÁMBULA COYOTE|Maria Del Rosario VILCHIS BERNAL|VIBR741007MMCLRS01|

Sello Digital

TU+tlOnSD9+jGuCbXb4+ZmotfjVDPmJq4luQoCgNmho=

Anexo(s)

Hoja anexa a la solicitud ID: 221206

De Fecha: 18/11/2025 01:06:56

**MÉXICO**
PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA**Contacto:**

Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.
Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana, del interior de la República sin costo para el usuario 800-570-59-90.
Correo electrónico: buzón@impi.gob.mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Lista Inventores/Diseñadores

Inventor/Diseñador 2

- Nombre: Juan Manuel JACINTO VILLEGAS

- CURP:

- Género: Masculino

- Nacionalidad: MÉXICO

- Domicilio: Calle CAMINO REAL, Ext. 1, C. P. 50266

- Población, Estado y País: , ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

Inventor/Diseñador 3

- Nombre: Citlali Irais CANO DEL RAZO

- CURP:

- Género: Femenino

- Nacionalidad: MÉXICO

- Domicilio: Calle JOAQUIN AMARO, Ext. 103, C. P. 50180

- Población, Estado y País: , ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

Inventor/Diseñador 4

- Nombre: Rigoberto MARTÍNEZ MÉNDEZ

- CURP:

- Género: Masculino

- Nacionalidad: MÉXICO

- Domicilio: Calle SOL, Ext. S/N, C. P. 51357

- Población, Estado y País: , ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

Total de Diseños Manifestados

- Número de Diseños : 1



MÉXICO
PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA

**Contacto:**

Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.
Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana, del interior de la República sin
costo para el usuario 800-570-59-90.
Correo electrónico: buzon@impi.gob.mx

COMPROBANTE ELECTRÓNICO DE PAGOS POR SERVICIOS

IMPI
INSTITUTO MEXICANO
DE LA PROPIEDAD
INDUSTRIAL



MX/2025/004094

NUMERO DE FOLIO
10079584487



10079584487

PERIFÉRICO SUR 3106, COL JARDINES DEL PEDREGAL
DEL ALVARO OBREGON, CP 01900, CIUDAD DE MEXICO
RFC: IMP-931211-NE1
REGIMEN FISCAL(803) PERSONAS MORALES CON FINES NO LUCRATIVOS

TRÁMITE EN LÍNEA: 1061840

CONCEPTO	CANTIDAD U.M.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE TARIFA	DESCUENTO	TOTAL TARIFA	IVA
9f Por la presentación de cada solicitud de registro de un diseño industrial	1	\$2,000.00	\$2,000.00	\$1,000.00	\$1,000.00	\$160.00
PUE - PAGO EN UNA SOLA EXHIBICIÓN						
ANOTACIONES : --- MIL CIENTO SESENTA PESOS 00/100 MN ---				TOTAL TARIFA	\$2,000.00	
				DESCUENTO	\$1,000.00	
				SUBTOTAL	\$1,000.00	
				IVA	\$160.00	
				ACTUALIZACIÓN	\$0.00	
				RECARGOS	\$0.00	
				TOTAL A PAGAR	\$1,160.00	

DATOS DEL TITULAR O SOLICITANTE

Nombre: UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO
C.P. 50000

RFC: UAE560321II2

BANCO: Santander

CONVENIO: 5366
FECHA DE OPERACION: 18/11/2025 13:03:44
FOLIO: 101269414100

LA REPRODUCCIÓN NO AUTORIZADA DE ESTE COMPROBANTE CONSTITUYE UN DELITO EN LOS TÉRMINOS DE LAS DISPOSICIONES DE LA LEY

* Este documento no es un comprobante fiscal.
* Su factura estará generada dentro de los tres días hábiles posteriores a su pago.
* El comprobante de pago FEPS sin factura es válido para presentar el trámite que ampara ante el IMPI.
* Si su RFC no coincide con el registrado ante el SAT, la factura se emitirá con un RFC genérico.



Ciudad de México, 18/11/2025

Solicitud de: DISEÑO INDUSTRIAL

Bajo Protesta de decir verdad declaro, con respecto al beneficio señalado en la Cuarta Disposición General de la Tarifa por los servicios que presta el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, y con fundamento en la fracción III de dicha Disposición, que me encuentro en el supuesto abajo señalado, por lo que solicito el 50% de descuento de la Tarifa establecida para el Artículo 9f.

Hago la presente declaración en cumplimiento de dicha disposición, según el Acuerdo por el que se da a conocer la Tarifa por los servicios que presta el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, publicado en el Diario Oficial de la Federación con fecha 23 de agosto de 1995.

Micro y Pequeña Empresa ()

Instituto de Investigación Científica y Tecnológica del Sector Público ()

Universidad (X)

Diseñador/Inventor Independiente ()

ATENTAMENTE:

Nombre: Maria Del Rosario VILCHIS BERNAL por poder de UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



Universidad Autónoma del Estado de México

MANDATO ESPECIAL

Que otorga la Doctora en Ciencias Sociales Martha Patricia Zarza Delgado, Rectora de la Universidad Autónoma del Estado de México, a la Maestra en Gestión Pública María del Rosario Vilchis Bernal, Jefa del Departamento de Vinculación y Transferencia de la Innovación de la Secretaría de Ciencia de la Universidad Autónoma del Estado de México, cuenta con facultades para ello con fundamento en lo dispuesto por los artículos 23 y 24, fracción X, de la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México, para que en nombre y representación de la institución, realice todas las acciones pendientes y necesarias ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial encaminadas a los registros de propiedad intelectual, ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI); obligándose a cumplir con los requerimientos establecidos en la Legislación Federal y Universitaria, así como a la rendición de cuentas en el momento requerido, mandato que no podrá delegarse, ni sustituirse total o parcialmente en el ejercicio de las facultades que por este se confieren.

En la Ciudad de Toluca de Lerdo, Estado de México, a trece de agosto de dos mil veinticinco.

OTORGA EL MANDATO

**DOCTORA EN CIENCIAS SOCIALES
MARTHA PATRICIA ZARZA DELGADO
RECTORA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE MÉXICO**



**DOCTORA EN CIENCIAS
COMPUTACIONALES
ARIANNA BECERRIL GARCÍA
SECRETARIA DE CIENCIA**



**DOCTOR EN URBANISMO
JUAN ROBERTO CALDERÓN MAYA
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN**

**R**

MODELO INDUSTRIAL DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR

La presente invención se refiere a un modelo industrial de robot móvil para
5 rehabilitación de miembro superior, totalmente diferente a los ya conocidos,
caracterizado por su forma especial y ornato que le dan un aspecto peculiar y propio.

Descripción:

- La Figura 1, es una vista superior del robot móvil.
- 10 La Figura 2, es una vista inferior del robot móvil.
- La Figura 3, es una vista frontal del robot móvil.
- La Figura 4, es una vista posterior del robot móvil.
- La Figura 5, es una vista del lado izquierdo del robot móvil.
- La Figura 6, es una vista del lado derecho del robot móvil.
- 15 La Figura 7, es una vista isométrica del lado derecho del robot móvil.

1 / 7

FIGURAS

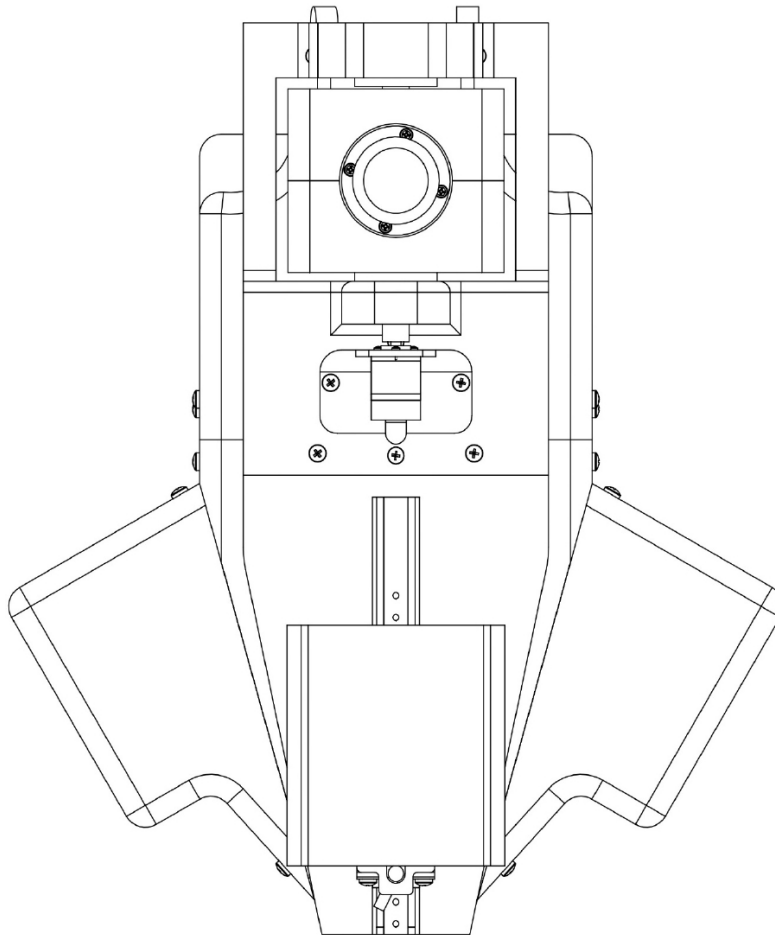


Figura 1.

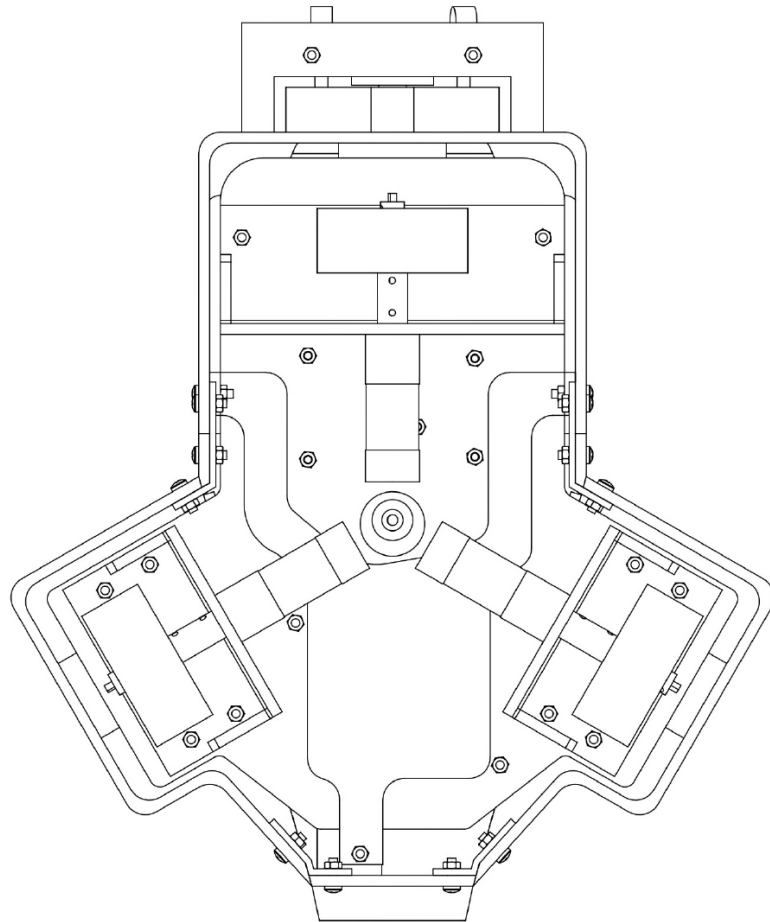


Figura 2.

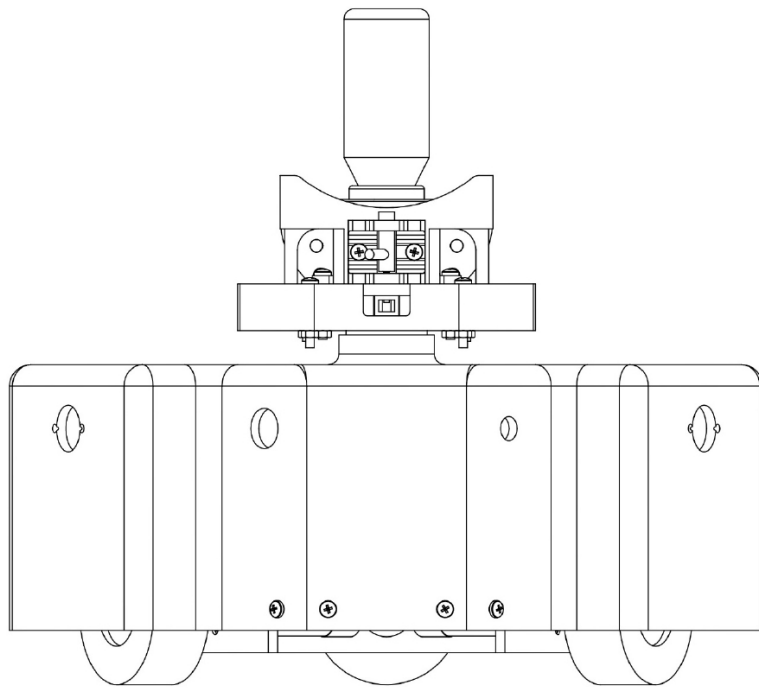


Figura 3.

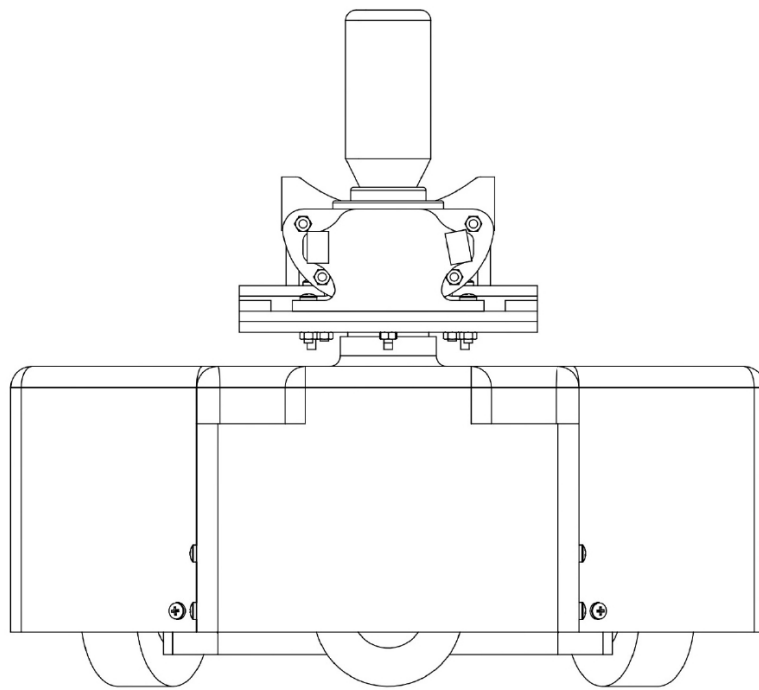


Figura 4.

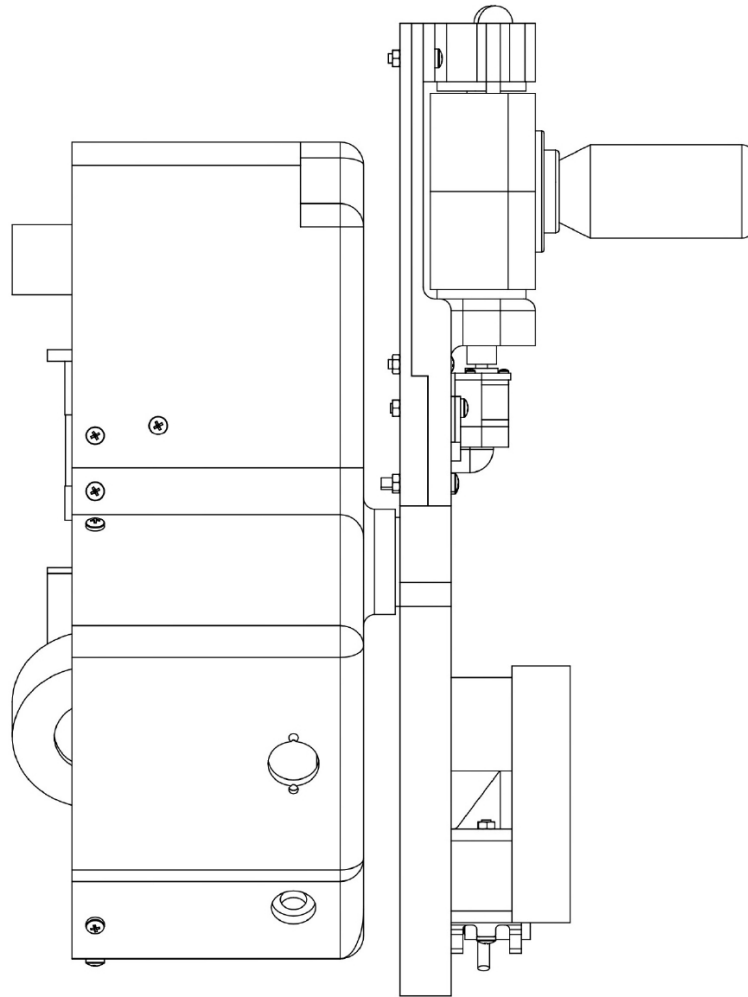


Figura 5.

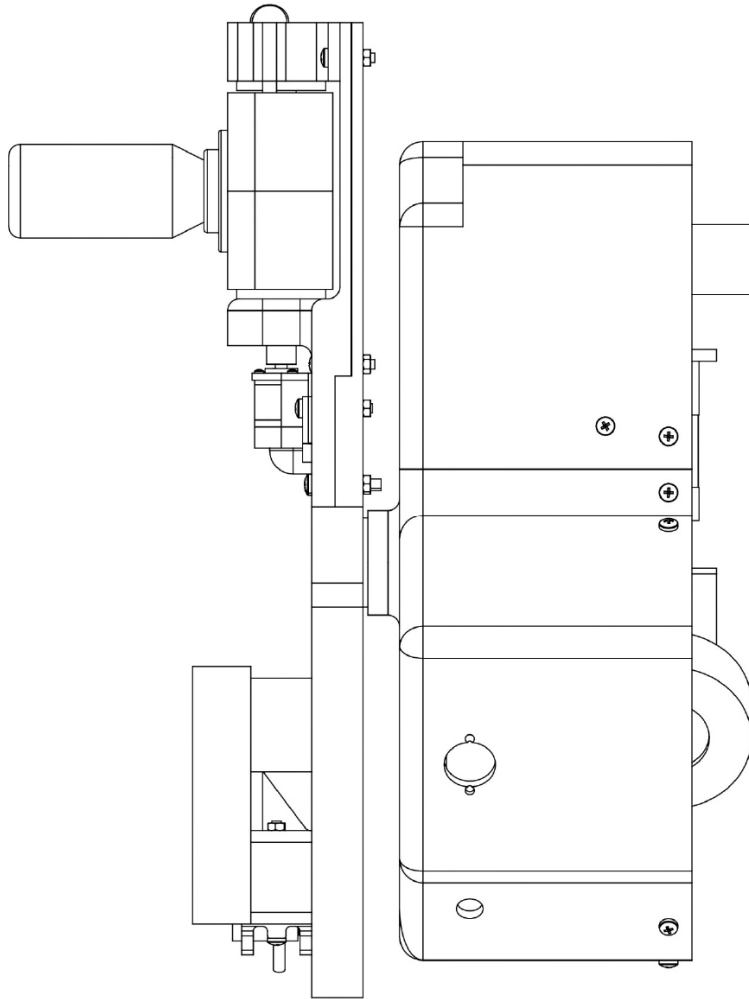


Figura 6.

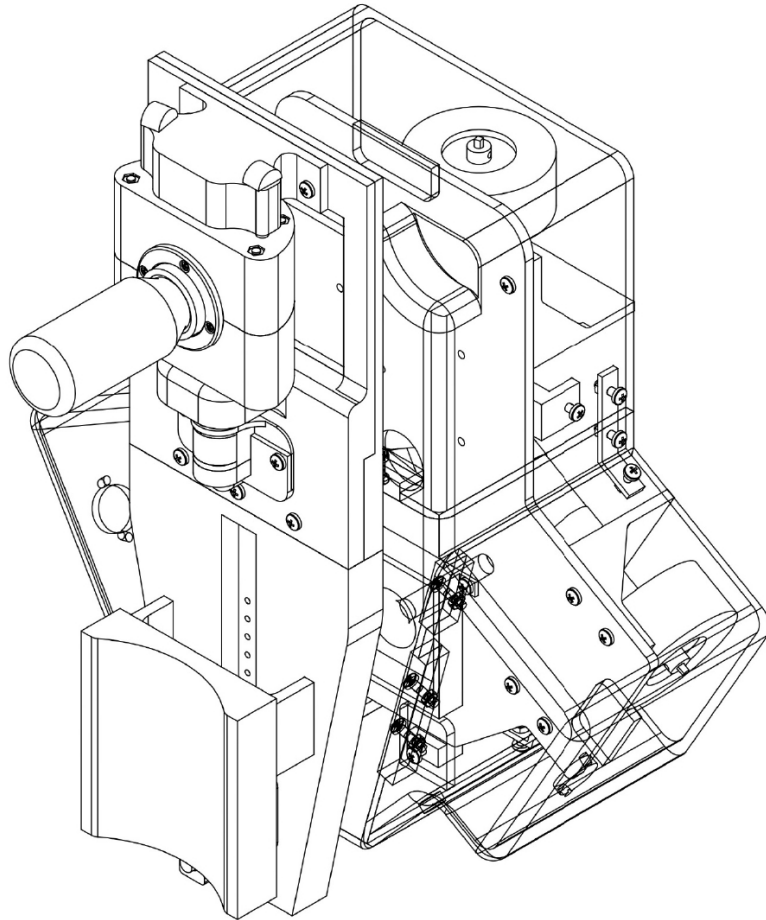


Figura 7.

CESIÓN DE DERECHOS

Ciudad de Toluca, Estado de México, México; 27 de octubre 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Instituto Literario 100, Centro, 50000 Toluca de Lerdo,
Estado de México, México.

P R E S E N T E

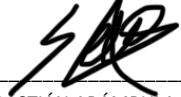
El que suscribe, **Sebastián Arámbula Coyote**, Licenciado en Ingeniería Mecánica, manifiesto que derivado de las actividades académicas y de investigación que realicé en la Facultad de Ingeniería, participé en el desarrollo del modelo industrial denominado: **MODELO INDUSTRIAL DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR**, cuya descripción se anexa a la presente, misma que pueden ser objeto de aclaraciones derivado del examen de forma y fondo que se practique ante cualquier oficina de propiedad intelectual.

Por lo que cedo y reconozco que el cien por ciento (100%) de los derechos patrimoniales pertenecen exclusivamente a la Universidad Autónoma del Estado de México, sin limitación alguna y libre de toda carga u obligación, por lo que no me reservo ningún derecho en el registro en territorio nacional o en el extranjero, uso, explotación, transferencia, y demás derivados, según convenga a sus fines y/o intereses, debiéndose reconocer los derechos morales a mi favor.

Asimismo, soy responsable de la autoría y originalidad del modelo industrial referido, por lo que manifiesto que no existe ninguna otra persona física o moral a la que le pertenezca y que, en su caso, cuento con los permisos y autorizaciones en materia de patentes, marcas, derechos de autor, o cualquier otro inherente a la propiedad intelectual de terceros, tanto en el ámbito nacional como internacional, y los reconozco mediante el derecho de cita, en su caso; y que no he contraído ni contraeré cargas o gravámenes de ninguna especie, y guardare la más estricta confidencialidad, por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México ante cualquier acción que llegará a formular persona alguna física o moral que considere derechos sobre el modelo industrial mencionado, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar, aceptando que el porcentaje de las regalías a las que tengo derecho sean pagadas una vez que se verifique su explotación.

Lo anterior con fundamento en la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México, y los artículos 27 fracción XVI del Estatuto Universitario; 13 del Reglamento de Ingresos Extraordinarios generados por organismo académicos, unidades académicas y espacios universitarios, por lo que me comprometo a realizar los procedimientos administrativos-fiscales y legales a que haya lugar, obligándome a proporcionar la documentación que se requiera conforme a las leyes en la materia.

Firmo la presente en la fecha y lugar establecidos



LIC. SEBASTIÁN ARÁMBULA COYOTE

CESIÓN DE DERECHOS

Ciudad de Toluca, Estado de México, México; 27 de octubre 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Instituto Literario 100, Centro, 50000 Toluca de Lerdo,
Estado de México, México.

P R E S E N T E

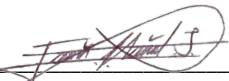
El que suscribe doctor en Tecnologías Digitales Emergentes, **Juan Manuel Jacinto Villegas**, miembro del programa "Investigadoras e Investigadores por México" adscrito a la Facultad de Ingeniería, manifiesto que derivado de las actividades académicas y de investigación que realizo en la institución, participe en el desarrollo del modelo industrial denominado: **MODELO INDUSTRIAL DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR**, cuya descripción se anexa a la presente, misma que pueden ser objeto de aclaraciones derivado del examen de forma y fondo que se practique ante cualquier oficina de propiedad intelectual.

Por lo que cedo y reconozco que el cien por ciento (100%) de los derechos patrimoniales pertenecen exclusivamente a la Universidad Autónoma del Estado de México, sin limitación alguna y libre de toda carga u obligación, por lo que no me reservo ningún derecho en el registro en territorio nacional o en el extranjero, uso, explotación, transferencia, y demás derivados, según convenga a sus fines y/o intereses, debiéndose reconocer los derechos morales a mi favor.

Asimismo, soy responsable de la autoría y originalidad del modelo industrial referido, por lo que manifiesto que no existe ninguna otra persona física o moral a la que le pertenezca y que, en su caso, cuento con los permisos y autorizaciones en materia de patentes, marcas, derechos de autor, o cualquier otro inherente a la propiedad intelectual de terceros, tanto en el ámbito nacional como internacional, y los reconozco mediante el derecho de cita, en su caso; y que no he contraído ni contraeré cargas o gravámenes de ninguna especie, y guardare la más estricta confidencialidad, por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México ante cualquier acción que llegará a formular persona alguna física o moral que considere derechos sobre el modelo industrial mencionado, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar, aceptando que el porcentaje de las regalías a las que tengo derecho sean pagadas una vez que se verifique su explotación.

Lo anterior con fundamento en la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México, y los artículos 27 fracción XVI del Estatuto Universitario; 13 del Reglamento de Ingresos Extraordinarios generados por organismo académicos, unidades académicas y espacios universitarios, por lo que me comprometo a realizar los procedimientos administrativos-fiscales y legales a que haya lugar, obligándome a proporcionar la documentación que se requiera conforme a las leyes en la materia.

Firmo la presente en la fecha y lugar establecidos


DR. JUAN MANUEL JACINTO VILLEGAS

CESIÓN DE DERECHOS

Ciudad de Toluca, Estado de México, México; 27 de octubre 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Instituto Literario 100, Centro, 50000 Toluca de Lerdo,
Estado de México, México.

P R E S E N T E

El que suscribe, **Citlali Irais Cano Del Razo**, Licenciada en Bioingeniería Médica de la Facultad de Medicina, manifiesto que derivado de las actividades académicas y de investigación que realicé en la Facultad de Ingeniería, participé en el desarrollo del modelo industrial denominado: **MODELO INDUSTRIAL DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR**, cuya descripción se anexa a la presente, misma que pueden ser objeto de aclaraciones derivado del examen de forma y fondo que se practique ante cualquier oficina de propiedad intelectual.

Por lo que cedo y reconozco que el cien por ciento (100%) de los derechos patrimoniales pertenecen exclusivamente a la Universidad Autónoma del Estado de México, sin limitación alguna y libre de toda carga u obligación, por lo que no me reservo ningún derecho en el registro en territorio nacional o en el extranjero, uso, explotación, transferencia, y demás derivados, según convenga a sus fines y/o intereses, debiéndose reconocer los derechos morales a mi favor.

Asimismo, soy responsable de la autoría y originalidad del modelo industrial referido, por lo que manifiesto que no existe ninguna otra persona física o moral a la que le pertenezca y que, en su caso, cuento con los permisos y autorizaciones en materia de patentes, marcas, derechos de autor, o cualquier otro inherente a la propiedad intelectual de terceros, tanto en el ámbito nacional como internacional, y los reconozco mediante el derecho de cita, en su caso; y que no he contraído ni contraeré cargas o gravámenes de ninguna especie, y guardare la más estricta confidencialidad, por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México ante cualquier acción que llegará a formular persona alguna física o moral que considere derechos sobre el modelo industrial mencionado, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar, aceptando que el porcentaje de las regalías a las que tengo derecho sean pagadas una vez que se verifique su explotación.

Lo anterior con fundamento en la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México, y los artículos 27 fracción XVI del Estatuto Universitario; 13 del Reglamento de Ingresos Extraordinarios generados por organismo académicos, unidades académicas y espacios universitarios, por lo que me comprometo a realizar los procedimientos administrativos-fiscales y legales a que haya lugar, obligándome a proporcionar la documentación que se requiera conforme a las leyes en la materia.

Firmo la presente en la fecha y lugar establecidos



LIC. CITLALI IRAIS CANO DEL RAZO

CESIÓN DE DERECHOS

Ciudad de Toluca, Estado de México, México; 27 de octubre de 2025.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Instituto Literario 100, Centro, 50000 Toluca de Lerdo,
Estado de México, México.

P R E S E N T E

El que suscribe doctor en Robótica Perceptual, **Rigoberto Martínez Méndez**, profesor de tiempo completo con número de empleado 35455 adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, manifiesto que derivado de las actividades académicas y de investigación que realizo en la institución, participe en el desarrollo del modelo industrial denominado: **MODELO INDUSTRIAL DE ROBOT MÓVIL PARA REHABILITACIÓN DE MIEMBRO SUPERIOR**, cuya descripción se anexa a la presente, misma que pueden ser objeto de aclaraciones derivado del examen de forma y fondo que se practique ante cualquier oficina de propiedad intelectual.

Por lo que cedo y reconozco que el cien por ciento (100%) de los derechos patrimoniales pertenecen exclusivamente a la Universidad Autónoma del Estado de México, sin limitación alguna y libre de toda carga u obligación, por lo que no me reservo ningún derecho en el registro en territorio nacional o en el extranjero, uso, explotación, transferencia, y demás derivados, según convenga a sus fines y/o intereses, debiéndose reconocer los derechos morales a mi favor.

Asimismo, soy responsable de la autoría y originalidad del modelo industrial referido, por lo que manifiesto que no existe ninguna otra persona física o moral a la que le pertenezca y que, en su caso, cuento con los permisos y autorizaciones en materia de patentes, marcas, derechos de autor, o cualquier otro inherente a la propiedad intelectual de terceros, tanto en el ámbito nacional como internacional, y los reconozco mediante el derecho de cita, en su caso; y que no he contraído ni contraeré cargas o gravámenes de ninguna especie, y guardare la más estricta confidencialidad, por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México ante cualquier acción que llegará a formular persona alguna física o moral que considere derechos sobre el modelo industrial mencionado, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar, aceptando que el porcentaje de las regalías a las que tengo derecho sean pagadas una vez que se verifique su explotación.

Lo anterior con fundamento en la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, la Ley de la Universidad Autónoma del Estado de México, y los artículos 27 fracción XVI del Estatuto Universitario; 13 del Reglamento de Ingresos Extraordinarios generados por organismo académicos, unidades académicas y espacios universitarios, por lo que me comprometo a realizar los procedimientos administrativos-fiscales y legales a que haya lugar, obligándome a proporcionar la documentación que se requiera conforme a las leyes en la materia.

Firmo la presente en la fecha y lugar establecidos



DR. RIGOBERTO MARTÍNEZ MÉNDEZ



Toluca, México a 10 de Febrero de 20 26

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa
Presente

Carta de autorización para publicación en el RI

Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.

Quien firma al calce, declaro bajo protesta de decir verdad que soy el(la) autor(a) de la obra (tipo de obra) Tesis de licenciatura
titulada (título de la obra) Diseño y construcción conceptual (TRL 3) de un robot de asistencia para rehabilitación de miembro superior
y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declaro que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Nombre y firma Sebastián Arámbula Coyote

No de cuenta: 1546017



Toluca, México a 10 de Febrero de 20 26

Hoja de datos del autor

Nombre: Sebastián Arámbula Coyote

Número de cuenta: 1546017

Grado académico obtenido: Ingeniero Mecánico

Programa educativo de procedencia: Licenciatura en Ingeniería Mecánica

Institución donde labora:

Domicilio: Pensador mexicano 217 int 6, San Cristobal Tecolot, Zinacantepec, México.

Teléfono/ Fax: +52 722 414 8262

Correo electrónico: sebasaracoyo@gmail.com

Sebastián Arámbula Coyote

Nombre y firma

Esta información es recabada con fines administrativos para el proceso de titulación del Espacio Académico que suscribe.

Conozco y acepto los términos de privacidad de la Universidad Autónoma del Estado de México
http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso_Privacidad.pdf