



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE GUAYAQUIL**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**REPOTENCIACIÓN DEL ROBOT HUMANOIDE SUPER ANTHONY  
MEDIANTE EL REDISEÑO MECÁNICO PARA LA RECUPERACIÓN  
DE SU OPERATIVIDAD**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: José Carlos Castillo García  
Britney Scarlet Gualle Díaz

TUTOR: Alberto Santiago Ramírez Farfán

Guayaquil - Ecuador  
2026

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **José Carlos Castillo García** con documento de identificación N° **2000102869** y **Britney Scarlet Gualle Díaz** con documento de identificación N° **0926609686**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

José Carlos Castillo García  
2000102869



---

Britney Scarlet Gualle Díaz  
0926609686

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **José Carlos Castillo García** con documento de identificación N° **2000102869** y **Britney Scarlet Gualle Díaz** con documento de identificación N° **0926609686**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: REPOTENCIACIÓN DEL ROBOT HUMANOIDE SUPER ANTHONY MEDIANTE EL REDISEÑO MECÁNICO PARA LA RECUPERACIÓN DE SU OPERATIVIDAD**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

José Carlos Castillo García  
2000102869



---

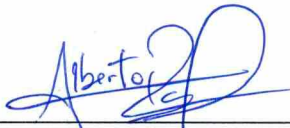
Britney Scarlet Gualle Díaz  
0926609686

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Alberto Santiago Ramírez Farfán**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **REPOTENCIACIÓN DEL ROBOT HUMANOIDE SUPER ANTHONY MEDIANTE EL REDISEÑO MECÁNICO PARA LA RECUPERACIÓN DE SU OPERATIVIDAD**, realizado por **José Carlos Castillo García** con documento de identificación N° **2000102869** y por **Britney Scarlet Gualle Díaz** con documento de identificación N° **0926609686**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



---

Ing. Alberto Santiago Ramírez Farfán.  
0923348890

## DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mis dos padres, José Luis Castillo y Juliana García, quienes fueron mi principal motivación durante toda la carrera y me brindaron apoyo y amor incondicional para asegurar mi bienestar y poder ejercer mis estudios con total enfoque.

Finalmente agradezco a mis dos abuelos maternos, Carlos García y Raquel Martínez, y a mi abuela paterna, Alba Dávila, quienes ayudaron a que pueda cursar mis estudios y estuvieron pendientes siempre a que me fuese excelente durante el transcurso de la carrera.

**José Carlos Castillo García**

El presente trabajo de titulación existe gracias al apoyo de mi familia. Mi mamá, Maira Díaz, quien con el cariño que solo conoce una madre, tenía las palabras correctas para alentarme y demostrarme que existe más de un camino para convertir tus objetivos en una realidad. A mi padre, Mario Gualle, quien fue el causante de muchos intereses y a quien debo hoy por hoy, la curiosidad de entender el cómo de las cosas. A mi hermana, Milka Gualle, con quien aprendí el arte del autodidactismo y la responsabilidad para superar cualquier adversidad.

**Britney Scarlet Gualle Díaz**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su guía e inmensa misericordia. A mis dos padres, quienes me ayudaron a afrontar las adversidades durante la carrera y me ayudaron a no rendirme cuando no contaba ni con tiempo para mí mismo.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, a los docentes y a mis compañeros que formaron parte de mi vida universitaria, por hacer de esta carrera un recuerdo que siempre atesoraré.

Agradezco a mis hermanos, Ariadna Castillo y José Julián Castillo, quienes también me apoyaron incondicionalmente mientras cursaba la carrera y sirvieron de motivación para nunca rendirme y darles un ejemplo como hermano mayor. Finalmente, agradezco a Domenica Criollo, por su amor y apoyo sincero y por nunca dejar de creer en mí.

**José Carlos Castillo García**

Agradezco a Dios por la fortaleza dada en cada momento de incertidumbre que cruzaba al cuestionarme mi lugar. Permanezco y permaneceré agradecida con mis padres Maira Díaz y Mario Gualle, quienes siempre creyeron en mí, ayudándome a entender que cada obstáculo es un aprendizaje y que ninguna batalla está perdida hasta que lo das todo hasta el final. A mis mascotas Muñeca, Rocco y Zeus, quienes me brindaban compañía en las madrugadas de estudio y llenaban el silencio de la noche con su resuello.

Agradezco a los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana por su paciencia en la resolución de dudas de los estudiantes. A mis amistades porque con ellos creció una nueva versión de mí y que ahora forman parte de mi vínculo más cercano.

Agradezco a mi hermana Milka Gualle por cuidar de mí durante mis episodios de discapacidad visual y ayudarme a comprender que el amor tiene más de una traducción.

**Britney Scarlet Gualle Díaz**

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación aborda la repotenciación del robot humanoide de combate Super Anthony perteneciente al Club de Robótica de la Universidad Politécnica Salesiana, cuya operatividad se vio comprometida debido al desgaste estructural y la obsolescencia de sus servomotores originales. La inexistencia de repuestos en el mercado hizo no factible una reparación convencional, por lo que se planteó una intervención basada en el rediseño mecánico adaptativo y la integración de nuevos actuadores de torque equivalente, garantizando compatibilidad con la arquitectura de control existente.

La metodología incluyó un diagnóstico técnico estructural, análisis de incompatibilidades geométricas, rediseño del sistema de fijación mediante insertos metálicos, modelado CAD de los nuevos componentes y fabricación aditiva del chasis optimizado. Posteriormente, se validó el desempeño del robot mediante simulaciones estructurales en SolidWorks y evaluaciones experimentales centradas en estabilidad estática y dinámica, consumo energético y resistencia al impacto. La estabilidad fue analizada a partir del cálculo del centro de masa y el polígono de soporte, mientras que la resistencia estructural se evaluó mediante análisis de esfuerzo de Von Mises y desplazamientos.

Los resultados demostraron mejoras significativas en estabilidad dinámica, reducción del desplazamiento lateral no deseado, mayor control rotacional y optimización del desempeño energético, manteniendo la capacidad de impacto en rutinas de combate. Se concluye que la repotenciación mecánica permitió recuperar la operatividad del robot y optimizar su comportamiento dinámico bajo criterios de ingeniería estructural y biomecánica aplicada. Este proyecto propone una metodología replicable para la modernización sostenible de robots humanoides sin disponibilidad de componentes originales.

**Palabras clave:** repotenciación mecánica, robot humanoide, rediseño estructural, estabilidad dinámica, resistencia al impacto, servomotores.

## ABSTRACT

This thesis presents the mechanical repowering of the humanoid combat robot Super Anthony, property of the Robotics Club of Universidad Politécnica Salesiana, whose operational performance was compromised due to structural wear and the obsolescence of its original servomotors. Since replacement components were no longer commercially available, a conventional repair approach became not feasible. Therefore, an adaptive mechanical redesign strategy was implemented, integrating new actuators with equivalent torque while maintaining compatibility with the existing control architecture.

The methodology involved a structural technical diagnosis, geometric incompatibility analysis, redesign of the fastening system using metallic threaded inserts, CAD modeling of new structural components, and additive manufacturing of an optimized chassis. The robot's performance was validated through structural simulations in SolidWorks and experimental evaluations focused on static and dynamic stability, energy consumption, and impact resistance. Stability was assessed through center of mass calculations and support polygon verification, while structural resistance was analyzed using Von Mises stress and displacement studies.

Results demonstrated significant improvements in dynamic stability, reduced undesired lateral displacement, enhanced rotational control, and optimized energy performance, while maintaining impact capability during combat routines. It is concluded that the mechanical repowering process restored the robot's functionality and optimized its dynamic behavior under structural and biomechanical engineering criteria. This work proposes a replicable methodology for the sustainable modernization of humanoid robotic platforms lacking original replacement components.

**Keywords:** mechanical repowering, humanoid robot, structural redesign, dynamic stability, impact resistance, servomotors.

## ÍNDICE

<b>I.</b>	<b>Introducción</b>	1
<b>II.</b>	<b>Problema</b>	2
<b>III.</b>	<b>Justificación</b>	3
<b>IV.</b>	<b>Objetivos</b>	4
IV-A.	Objetivo General . . . . .	4
IV-B.	Objetivos Específicos . . . . .	4
<b>V.</b>	<b>Marco Teórico</b>	5
V-A.	Fundamentos de la Robótica Humanoide . . . . .	5
V-A1.	Conceptualización del Robot Humanoide . . . . .	5
V-A2.	Evolución Histórica . . . . .	5
V-A3.	Tipos de Robots Humanoides . . . . .	6
V-B.	Arquitectura Mecánica de un Robot Humanoide . . . . .	7
V-B1.	Estructura de un Robot Humanoide . . . . .	7
V-B1.1.	Torso . . . . .	7
V-B1.2.	Extremidades Superiores e Inferiores . . . . .	7
V-B2.	Sensores . . . . .	8
V-B3.	Actuadores . . . . .	9
V-C.	Fundamentos Mecánicos de un Robot Humanoide . . . . .	9
V-C1.	Fundamentos Mecánicos del Movimiento . . . . .	9
V-C1.1.	Distribución de Grados de Libertad . . . . .	9
V-C1.2.	Espacio de Configuración . . . . .	11
V-C1.3.	Movimiento del Cuerpo Rígido . . . . .	11
V-C1.4.	Centro de Masa . . . . .	11
V-C1.5.	Polígono de Soporte . . . . .	12
V-C2.	Relación Estructura-Movimiento . . . . .	12
V-C3.	Locomoción Bípeda y Adaptación en el Entorno Humano . . . . .	12
V-D.	Selección de Materiales y Fabricación Aditiva en Robots Humanoides . . . . .	13
V-D1.	Selección de Materiales para Estructuras Humanoides . . . . .	13
V-D2.	Materiales utilizados por la industria de la robótica . . . . .	13
V-D3.	Fabricación Aditiva y Materiales Poliméricos en el desarrollo de Estructuras Humanoides . . . . .	13
V-E.	Sistemas de Control en Robots Humanoides . . . . .	14
V-F.	Descripción Técnica del Robot Humanoide Super Anthony . . . . .	15
V-F1.	Arquitectura Mecánica General . . . . .	16
V-F2.	Distribución de Grados de Libertad y Actuadores . . . . .	16
V-F3.	Implicaciones Mecánicas de la Arquitectura Existente . . . . .	16
V-F3.1.	Relación con el proceso de Repotenciación Mecánica . . . . .	17
V-F4.	Caracterización Funcional Previa a la Repotenciación del Robot Humanoide Super Anthony . . . . .	18
V-F4.1.	Rutinas de Locomoción Programadas . . . . .	18
V-F4.2.	Rutinas de Combate y Defensa . . . . .	18
V-F4.3.	Limitaciones Funcionales Observadas . . . . .	19

<b>VI. Marco Metodológico</b>	20
VI-A. Enfoque Metodológico del proyecto . . . . .	20
VI-B. Delimitación del proyecto . . . . .	20
VI-C. Análisis de Procedimiento de Repotenciación . . . . .	20
VI-D. Procedimiento Metodológico . . . . .	21
VI-D1. Diagnóstico Técnico y Levantamiento Estructural . . . . .	21
VI-D2. Rediseño Mecánico y Adaptación de Actuadores . . . . .	24
VI-D2.1. Análisis de Incompatibilidad Geométrica y Estructural . . . . .	24
VI-D2.2. Diseño del Sistema de Fijación mediante Insertos Metálicos . . . . .	24
VI-D2.3. Rediseño Estructural del Chasis . . . . .	25
VI-D2.4. Modelado CAD de los Nuevos Elementos Estructurales . . . . .	25
VI-D3. Intervenciones Técnicas y Fabricación . . . . .	26
VI-D4. Evaluación Final basada en Rutinas Dinámicas . . . . .	27
VI-D5. Diagrama de Flujo . . . . .	27
VI-E. Métodos de Evaluación del Desempeño Mecánico . . . . .	29
VI-E1. Metodología de Evaluación de Estabilidad del Robot Humanoide . . . . .	29
VI-E1.1. Estabilidad Estática . . . . .	29
VI-E1.1.1. Definición de Variables para la Evaluación de la Estabilidad Estática . . . . .	29
VI-E1.1.2. Definición de Ecuaciones para la Evaluación de Estabilidad Estática . . . . .	29
VI-E1.1.3. Procedimiento de Obtención del Centro de Masa mediante Simulación CAD . . . . .	30
VI-E1.1.4. Definición del Polígono de Soporte . . . . .	31
VI-E1.1.5. Criterio de Evaluación de la Estabilidad . . . . .	32
VI-E1.2. Evaluación Experimental de la Estabilidad Dinámica . . . . .	33
VI-E1.2.1. Enfoque Dinámico aplicado al Robot Humanoide de Combate . . . . .	33
VI-E1.2.2. Criterios de Evaluación para Rutinas de Combate . . . . .	46
VI-E2. Evaluación del Consumo Energético . . . . .	47
VI-E2.1. Enfoque Metodológico de la Evaluación del Consumo Energético . . . . .	47
VI-E2.1.1. Indicadores del Consumo Energético . . . . .	48
VI-E2.2. Definición de las Variables Energéticas para la Evaluación del Consumo Energético . . . . .	48
VI-E2.3. Definición de las Ecuaciones para la Evaluación del Consumo Energético . . . . .	48
VI-E2.4. Protocolo Experimental . . . . .	49
VI-E2.5. Registro Experimental de la Evaluación del Consumo Energético . . . . .	49
VI-E2.6. Sistema de Evaluación Funcional . . . . .	51
VI-E2.7. Tabla de Validación Energética . . . . .	51
VI-E3. Evaluación de la Resistencia al Impacto de la Versión Repotenciada del Robot Super Anthony . . . . .	52
VI-E3.1. Enfoque de la Evaluación de la Resistencia al Impacto . . . . .	52
VI-E3.2. Determinación de Cargas Equivalentes . . . . .	52
VI-E3.3. Selección de Subensambles Críticos . . . . .	52
VI-E3.4. Configuración del estudio en SolidWorks . . . . .	53
VI-E3.5. Definición de Casos de Análisis Estructural . . . . .	53
VI-E3.6. Variables de Análisis y Criterios de Evaluación . . . . .	54
<b>VII. Cronograma</b>	55
<b>VIII. Presupuesto</b>	57

<b>IX. Resultados</b>	58
IX-A. Estado Inicial del Robot Humanoide Super Anthony . . . . .	58
IX-B. Cálculo de la Estabilidad Estática y Dinámica del Robot Humanoide Super Anthony . . . . .	58
IX-B1. Resultados del Cálculo de la Estabilidad Estática . . . . .	58
IX-B1.1. Determinación del Centro de Masa Global . . . . .	58
IX-B1.2. Verificación Geométrica de la Estabilidad Estática . . . . .	59
IX-B1.3. Margen Cuantitativo de la Estabilidad Estática . . . . .	59
IX-B1.4. Resultado Técnico . . . . .	60
IX-B2. Resultados del Cálculo de la Estabilidad Dinámica . . . . .	60
IX-B2.1. Evaluación de la Marcha Lineal: Robot Original vs Robot Repotenciado . . . . .	60
IX-B2.1.1. Parámetros globales obtenidos . . . . .	60
IX-B2.1.2. Análisis del Comportamiento Dinámico del Sistema . . . . .	62
IX-B2.1.3. Consideración del tamaño del área de combate . . . . .	62
IX-B2.2. Evaluación del Movimiento Rotacional: Robot Original vs Robot Repotenciado . . . . .	63
IX-B2.2.1. Evaluación del Movimiento Rotacional en Sentido Antihorario . . . . .	63
IX-B2.2.2. Evaluación del Movimiento Rotacional en Sentido Horario . . . . .	64
IX-B2.2.3. Análisis Comparativo Global del Movimiento Rotacional . . . . .	65
IX-B2.3. Evaluación del Desplazamiento Lateral: Robot Original vs Robot Repotenciado . . . . .	65
IX-B2.3.1. Parámetros Globales Obtenidos . . . . .	65
IX-B2.3.2. Análisis Dinámico y Estabilidad Lateral . . . . .	66
IX-B2.3.3. Interpretación Biomecánica Comparativa . . . . .	66
IX-B2.3.4. Relación entre Velocidad y Estabilidad . . . . .	67
IX-B2.3.5. Conclusión del Análisis Comparativo del Desplazamiento Lateral del Robot Original vs Robot Repotenciado . . . . .	67
IX-B2.4. Evaluación del Movimiento Uppercut: Robot Original vs Robot Repotenciado . . . . .	67
IX-B2.4.1. Parámetros Globales Obtenidos . . . . .	67
IX-B2.4.2. Análisis Comparativo del Movimiento Uppercut . . . . .	67
IX-B3. Síntesis Global del Comportamiento Dinámico . . . . .	68
IX-C. Resultados de la Evaluación del Consumo Energético . . . . .	70
IX-C1. Caracterización de las Baterías Evaluadas . . . . .	70
IX-C2. Evaluación del Consumo Energético de la Versión Original del Robot Humanoide . . . . .	71
IX-C3. Evaluación del Consumo Energético de la Versión Repotenciada del Robot Humanoide . . . . .	71
IX-C4. Índice de Desempeño Energético (IDE) . . . . .	72
IX-C5. Resultado Técnico de la Evaluación del Consumo Energético . . . . .	72
IX-D. Resultados de la Evaluación de la Resistencia al Impacto . . . . .	73
IX-D1. Aplicación de la carga equivalente . . . . .	73
IX-D2. Resultados de la Evaluación de la Resistencia al Impacto por Subensamble . . . . .	73
IX-D2.1. Evaluación del Subensamble 1A: Mano . . . . .	73
IX-D2.1.1. Análisis del Esfuerzo equivalente de Von Mises . . . . .	73
IX-D2.1.2. Análisis del Desplazamiento (URES) . . . . .	73
IX-D2.1.3. Análisis del Factor de Seguridad . . . . .	74
IX-D2.2. Evaluación del Subensamblaje 1B: Brazo Completo . . . . .	74
IX-D2.2.1. Esfuerzo equivalente de Von Mises . . . . .	74
IX-D2.2.2. Desplazamiento (URES) . . . . .	75
IX-D2.2.3. Factor de seguridad . . . . .	75
IX-D2.3. Evaluación del Subensamblaje 2: Torso . . . . .	76
IX-D2.3.1. Esfuerzo equivalente de Von Mises . . . . .	76
IX-D2.3.2. Desplazamiento (URES) . . . . .	76
IX-D2.3.3. Factor de Seguridad . . . . .	76

IX-D2.4.	Evaluacion del Subensamble 3: Cintura . . . . .	77
IX-D2.4.1.	Esfuerzo equivalente de Von Mises . . . . .	77
IX-D2.4.2.	Desplazamiento (URES) . . . . .	77
IX-D2.4.3.	Factor de seguridad . . . . .	78
IX-D2.5.	Evaluacion del Subensamble 4: Estructura de Apoyo Inferior . . . . .	78
IX-D2.5.1.	Esfuerzo equivalente de Von Mises . . . . .	78
IX-D2.5.2.	Desplazamiento (URES) . . . . .	78
IX-D2.5.3.	Factor de seguridad . . . . .	79
IX-D2.6.	Síntesis Global de la Resistencia al Impacto . . . . .	79
<b>X.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>81</b>
<b>XI.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>82</b>
<b>Anexo A: Planos de la versión repotenciada del robot humanoide Super Anthony</b>		<b>87</b>
<b>Anexo B: Estudios de Simulación Estructural en SolidWorks de Cargas de Impacto</b>		<b>114</b>
B-A.	Subensamble 1A – Mano . . . . .	114
B-B.	Subensamble 1B – Brazo . . . . .	116
B-C.	Subensamblaje 2 - Torso . . . . .	118
B-D.	Subensamble 3 - Cintura . . . . .	120
B-E.	Subensamble 4 - Estructura de Apoyo Inferior . . . . .	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Ejes de rotación X (roll), Y (pitch), Z (yaw). . . . .	11
2.	Vista frontal del robot con identificación de servomotores (S0–S14) . . . . .	23
3.	Vista superior y lateral comparativa de los servomotores . . . . .	24
4.	Vista superior y lateral comparativa de los servomotores . . . . .	25
5.	Distribución de pines y placa de control . . . . .	26
6.	Diagrama de Flujo del robot humanoide Super Anthony elaborado por autores. . . . .	28
7.	Proyección del centro de masa sobre el plano horizontal y delimitación del polígono de soporte en postura bipodal estática. . . . .	32
8.	Análisis de marcha del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	36
9.	Análisis de marcha del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	37
10.	Análisis del movimiento de rotación del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	39
11.	Análisis del movimiento de rotación del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	41
12.	Análisis de desplazamiento lateral del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	43
13.	Análisis de desplazamiento lateral del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	44
14.	Análisis del uppercut del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	45
15.	Análisis del uppercut del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores. . . . .	46
16.	Análisis de Von Mises del subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores. . . . .	74
17.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores. . . . .	75
18.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores. . . . .	76
19.	Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores. . . . .	77
20.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores. . . . .	78
21.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores. . . . .	79
22.	Lámina acotada de la mano del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	87
23.	Lámina acotada de la placa de unión para piernas del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	88
24.	Lámina acotada de la tibia y fémur del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	89
25.	Lámina acotada del tobillo y hombro del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	90
26.	Lámina acotada del pie del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	91
27.	Lámina acotada del disco de la cintura del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	92
28.	Lámina acotada del disco de los brazos del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	93
29.	Lámina acotada de los cilindros del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	94
30.	Lámina acotada de la rodilla del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	95
31.	Lámina acotada del talón del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	96
32.	Lámina acotada de la placa de unión para brazos del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	97
33.	Lámina acotada de la cadera izquierda del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	98
34.	Lámina acotada de la cadera derecha del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	99
35.	Lámina acotada de la tapa con extensión lateral del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	100
36.	Lámina acotada de la tapa con doble extensión lateral del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	101
37.	Lámina acotada de la tapa con extensión frontal del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	102
38.	Lámina acotada de la tapa con doble extensión frontal del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	103

39.	Lámina acotada del húmero del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	104
40.	Lámina acotada del disco de los servomotores del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	105
41.	Lámina acotada de la cara del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	106
42.	Lámina acotada de las orejas del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	107
43.	Lámina acotada de la espalda del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	108
44.	Lámina acotada del pecho del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	109
45.	Lámina acotada de la cintura del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	110
46.	Lámina acotada de la vista explosionada del ensamblaje de las piernas del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	111
47.	Lámina acotada de la vista explosionada del ensamblaje de los brazos del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	112
48.	Lámina acotada de la vista explosionada del ensamblaje del torso y la cabeza del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks . . . . .	113
49.	Análisis de Von Mises del subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores. . . . .	114
50.	Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores. . . . .	115
51.	Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores. . . . .	115
52.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores. . . . .	116
53.	Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores. . . . .	117
54.	Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores. . . . .	117
55.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores. . . . .	118
56.	Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores. . . . .	119
57.	Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores. . . . .	119
58.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores. . . . .	120
59.	Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores. . . . .	121
60.	Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores. . . . .	121
61.	Análisis de Von Mises del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores. . . . .	122
62.	Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores. . . . .	123
63.	Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores. . . . .	123

## ÍNDICE DE TABLAS

I.	Distribución de grados de libertad del robot humanoide Super Anthony . . . . .	17
II.	Distribución de servomotores y pines de control – Extremidades superiores . . . . .	21
III.	Distribución de servomotores y pines de control – Extremidades inferiores . . . . .	22
IV.	Registro de geometría del soporte en postura bipodal estática . . . . .	31
V.	Registro del centro de masa global obtenido mediante SolidWorks . . . . .	31
VI.	Criterios de validación para la estabilidad estática . . . . .	32
VII.	Robot original: marcha hacia atrás (por repetición) . . . . .	35
VIII.	Robot original: marcha hacia adelante (por repetición) . . . . .	35
IX.	Robot repotenciado: marcha hacia atrás (por repetición) . . . . .	36
X.	Robot repotenciado: marcha hacia adelante (por repetición) . . . . .	37
XI.	Robot original: rotación antihoraria . . . . .	39
XII.	Robot original: rotación horaria . . . . .	40
XIII.	Robot repotenciado: rotación antihoraria . . . . .	40
XIV.	Robot repotenciado: rotación horaria . . . . .	41
XV.	Ensayos de desplazamiento lateral del robot original. . . . .	42
XVI.	Ensayos de desplazamiento lateral del robot repotenciado. . . . .	43
XVII.	Datos experimentales del robot original para el movimiento uppercut. . . . .	45
XVIII.	Datos experimentales del robot repotenciado para el movimiento uppercut. . . . .	46
XIX.	Criterios de aceptación para la evaluación de estabilidad dinámica . . . . .	47
XX.	Resultados individuales del consumo energético – Versión original . . . . .	50
XXI.	Resultados individuales del consumo energético – Versión repotenciada . . . . .	50
XXII.	Tabla de criterios de evaluación del consumo energético . . . . .	51
XXIII.	Criterios de validación del desempeño energético . . . . .	51
XXIV.	Criterios de evaluación de resistencia estructural al impacto . . . . .	55
XXV.	Cronograma detallado del proyecto de repotenciación del robot humanoide Super Anthony . . . . .	56
XXVI.	Presupuesto detallado de componentes y servicios . . . . .	57
XXVII.	Marcha hacia atrás: parámetros globales y variación porcentual . . . . .	61
XXVIII.	Marcha hacia adelante: parámetros globales y variación porcentual . . . . .	61
XXIX.	Tasa de deriva angular durante la marcha lineal . . . . .	62
XXX.	Índice de asimetría direccional basado en deriva angular (adelante/atrás) . . . . .	62
XXXI.	Resultados globales – Robot original, rotación antihoraria . . . . .	63
XXXII.	Resultados globales – Robot repotenciado, rotación antihoraria . . . . .	63
XXXIII.	Variación porcentual del movimiento rotacional – Sentido antihorario . . . . .	64
XXXIV.	Resultados globales – Robot original, rotación horaria . . . . .	64
XXXV.	Resultados globales – Robot repotenciado, rotación horaria . . . . .	64
XXXVI.	Variación porcentual del movimiento rotacional – Sentido horario . . . . .	65
XXXVII.	Desplazamiento lateral: parámetros globales y variación porcentual . . . . .	66
XXXVIII.	Desplazamiento lateral: promedios por lado (derecha vs izquierda) . . . . .	66
XXXIX.	Comparación cuantitativa entre robot original y robot repotenciado para el movimiento uppercut . . . . .	68
XL.	Parámetros eléctricos de las baterías . . . . .	70
XLI.	Promedio de los tres ensayos – Versión original . . . . .	71
XLII.	Promedio de los tres ensayos – Versión repotenciada . . . . .	72
XLIII.	Resultados de simulación FEA por subensamble . . . . .	80

## I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería, los sistemas no solo se diseñan, estos evolucionan, se desgastan y, en ocasiones, quedan atrapados en la obsolescencia. En particular, los robots humanoides diseñados para entornos de combate reciben con más agresividad los resultados de la exposición a condiciones dinámicas exigentes. Es innegable que la tecnología avanza con rapidez, sin embargo, un problema común que enfrentan estos sistemas corresponde a la viabilidad de una reparación convencional, dejando atrás a estructuras incompletas, actuadores sin reemplazo y plataformas que, pese a su historia y potencial, parecen destinadas al abandono. Frente a este escenario, la reingeniería no surge como una opción secundaria, sino como un acto deliberado de recuperación y adaptación.

El robot humanoide de combate Super Anthony, perteneciente al Club de Robótica de la Universidad Politécnica Salesiana, representa más que una plataforma mecánica, puesto que es el resultado de años de competencia, aprendizaje y exigencia dinámica. Sin embargo, el desgaste estructural acumulado, la pérdida progresiva de torque en sus servomotores y la inexistencia de repuestos originales comprometieron su desempeño operativo, reduciendo su estabilidad, precisión y capacidad de impacto. Entonces, la reparación convencional dejó de ser suficiente, pues era necesario replantear su arquitectura desde una visión estructural integral.

El presente trabajo aborda la repotenciación del sistema como un proceso de rediseño mecánico adaptativo. Partiendo de un diagnóstico técnico riguroso, la metodología contempla el modelado CAD de nuevas piezas estructurales, la fabricación aditiva del chasis optimizado y la integración de actuadores de alto torque compatibles con la arquitectura de control existente. De esta manera, la validación del sistema se fundamenta en criterios de ingeniería mecánica, dinámica de sistemas y análisis energético, evaluando su comportamiento en rutinas reales de combate.

Más allá de restituir la operatividad del robot, este estudio propone una metodología replicable para la modernización sostenible de plataformas humanoides sin disponibilidad de componentes originales. En este sentido, el proyecto no solo restituye la funcionalidad de Super Anthony, sino que establece un precedente técnico que demuestra cómo incluso ante la obsolescencia, la ingeniería puede redefinir los límites funcionales de un sistema.

## II. PROBLEMA

En la actualidad, la industria tecnológica atraviesa un problema creciente relacionado con la obsolescencia de componentes mecánicos y electrónicos, especialmente en sistemas robóticos [1]. Cuando los fabricantes descontinúan los repuestos originales, los procesos de mantenimiento y reparación dejan de ser viables y los ingenieros se ven obligados a idear soluciones alternativas mediante rediseño estructural, adaptación electrónica o integración de componentes modernos no originales [2]. Esta situación ha generado un cambio en la práctica profesional: ya no basta con reemplazar piezas dañadas, sino que es necesario readaptar máquinas mediante reingeniería, modificando su diseño para hacerlas compatibles con materiales actuales. La falta de recambios y la imposibilidad de acceder a componentes originales es hoy uno de los principales obstáculos para la continuidad operativa de robots educativos, industriales y competitivos [3].

El Club de Robótica de la Universidad Politécnica Salesiana, constituye un espacio clave para el desarrollo y promoción del espíritu competitivo y educativo de proyectos tecnológicos como las competencias de combate de robots humanoides [4]. Entre las adquisiciones más destacadas se mantiene el robot humanoide de combate Super Anthony, el cual ha sido ganador de múltiples competencias a lo largo de su carrera [5]. Sin embargo, las condiciones exigentes propias de una competencia son factores que aceleran el deterioro progresivo de los componentes críticos [6], variable que se ha hecho presente en los servomotores y la estructura del chasis [7], [8]. El desgaste mencionado influye de manera directa en el desempeño operativo del robot [9], afectando su fuerza, velocidad de respuesta, maniobrabilidad y resistencia estructural [10].

Los servomotores originales ya no cuentan con repuestos disponibles en el mercado, lo que impide su reparación tradicional. Frente a esta realidad, se vuelve imprescindible rediseñar su estructura mecánica y adaptar el robot a servomotores actuales, garantizando compatibilidad con el chasis, electrónica y arquitectura de control existente [11]. No se trata únicamente de reparar el daño, sino de repotenciar el robot mediante un rediseño adaptativo, aplicando criterios de ingeniería que permitan prolongar su vida útil y recuperar su operatividad [12].

Entre los diferentes desperfectos encontrados se manifiesta la pérdida de fuerza en la ejecución de golpes debido al desgaste de los servomotores y el uso durante los años, un chasis deteriorado producto de los intensos combates y adaptaciones poco efectivas, mismas que fueron colocadas como resultado de una solución temporal a los problemas de desempeño de los servomotores.

Es así como estas desventajas mecánicas representan una gran limitación en el itinerario de competencia del club de robótica salesiano, impidiendo la capacidad para realizar una participación eficaz frente a eventos que exigen un alto estándar de rendimiento [13], [14].

### III. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de robots humanoides no solo representa un avance tecnológico, sino una oportunidad para fortalecer la formación práctica en la ingeniería mediante la creación de soluciones aplicables a entornos reales. Iniciativas como la repotenciación del Super Anthony permiten abordar desafíos contemporáneos de la robótica desde una perspectiva académica experimental, aplicando métodos de rediseño mecánico y adaptación electrónica que fomentan la innovación en condiciones de recursos limitados. Este proyecto surge como una propuesta formativa y técnica, orientada a prolongar la vida útil de sistemas robóticos mediante estrategias de modernización estructural y evaluación funcional en campo [15].

En el caso del robot humanoide Super Anthony, la repotenciación no busca únicamente reemplazar piezas deterioradas, sino ofrecer una intervención mecánica fundamentada en el análisis funcional del movimiento. Para ello, se estudiarán rutinas predeterminadas de locomoción y combate a fin de observar la fluidez de desplazamiento, el balance dinámico durante cambios de dirección, la coordinación entre extremidades y la capacidad de recuperación postural frente a perturbaciones externas. Este tipo de evaluación basada en comportamiento real ha demostrado ser más cercana a escenarios competitivos y aporta datos prácticos para validar mejoras mecánicas o electrónicas [16].

Desde el punto de vista del diseño y control, la interacción entre los actuadores, el chasis y la fuente de poder conforma un sistema integrado cuyo rendimiento no puede evaluarse de forma aislada. Estudios recientes coinciden en que la mejora real de un robot depende de comprender cómo sus elementos interactúan durante tareas complejas, lo que convierte las rutinas de locomoción y combate en una plataforma experimental ideal para validar modificaciones estructurales o de potencia. [17].

Este tipo de investigación presenta un valor adicional en el campo académico: propone una metodología replicable para la recuperación y modernización de robots sin recambios originales; una problemática frecuente en clubes de robótica, prototipos educativos y proyectos de bajo presupuesto. Con ello, se contribuye a la formación de ingenieros capaces de desarrollar soluciones adaptativas frente a sistemas obsoletos, empleando el rediseño mecánico, el análisis funcional y la adaptación tecnológica como herramientas de continuidad operativa [18].

Finalmente, la validación en campo permitirá determinar la viabilidad de utilizar rutinas prediseñadas como método estandarizado de evaluación para robots humanoides competitivos. De obtener resultados exitosos, el estudio podría convertirse en una referencia para futuras investigaciones en mantenimiento inteligente, repotenciación sostenible y reingeniería aplicada a plataformas humanoides, fortaleciendo el vínculo entre la investigación universitaria y las necesidades reales de la industria tecnológica actual [19].

## IV. OBJETIVOS

### *IV-A. Objetivo General*

Repotenciar el robot humanoide Super Anthony rediseñando su sistema mecánico e integrando motores de alto torque para la recuperación de su funcionalidad validando sus rutinas de movimiento de combate preestablecidas.

### *IV-B. Objetivos Específicos*

- Diseñar la estructura mecánica del robot Super Anthony, mejorando su estabilidad, consumo energético y resistencia al impacto, mediante el uso de software de simulación avanzado.
- Implementar la nueva estructura mecánica del robot Super Anthony asegurando su compatibilidad con el sistema de control y los servomotores seleccionados, garantizando su operatividad en rutinas de combate.
- Evaluar el rendimiento general del robot mediante el análisis de los movimientos de combate preestablecidos.

## V. MARCO TEÓRICO

### V-A. *Fundamentos de la Robótica Humanoide*

#### V-A1. *Conceptualización del Robot Humanoide*

Si bien no existe una definición universalmente aceptada del término “robot humanoide”, este se entiende como un sistema mecatrónico dotado de un diseño basado en la morfología humana. El robot humanoide se erige como una síntesis avanzada entre la inspiración morfológica y la funcionalidad adaptativa, orientada a la reproducción de las capacidades humanas mediante sistemas mecatrónicos complejos [20].

En un principio, la pregunta rodeaba en cuanto al estudio de máquinas compuestas de piernas sin importar su cantidad. El uso de la locomoción suponía un atractivo frente a los diferentes retos a los que se enfrentaban máquinas comunes industriales como manipuladores de base fija o robots móviles con ruedas. En este sentido, la necesidad de la movilidad entre espacios irregulares fue de importancia para el nuevo interés descubierto en la locomoción bípeda que respondía a dicho problema. Pues, mientras los sistemas rodantes se veían limitados estructuralmente, la bipedestación robótica permitía el desenvolvimiento en entornos diseñados para humanos mediante la integración de subsistemas de control, percepción y actuación, distribuidos en múltiples grados de libertad que garantizaban la estabilidad dinámica durante la locomoción mediante el criterio de control basado en el Punto de Momento Cero (ZMP) [21].

#### V-A2. *Evolución Histórica*

El desarrollo de una máquina con apariencia humana no refiere una solicitud reciente, sino que su interés se remonta a la mitología griega. Un ser inerte dotado de movimiento e inteligencia era el gigante conocido como Talos que preconfiguró la noción de un autómatas antropomorfo. Este antecedente evidencia el deseo histórico del ser humano de copiar su naturaleza y plasmarla a través de mecanismos artificiales como es el caso del período grecorromano y la construcción de autómatas mecánicos con la capacidad de imitar forma, movimiento y voz [22]. Posteriormente, esta concepción evolucionó hacia un enfoque más funcional, permitiendo la introducción del término “robot” en 1921 por el autor checoslovaco Karel Čapek, derivado del vocablo checo “robota” que significa trabajo duro. Esta teoría encaja con la historia satírica del autor mencionado anteriormente al abordar un relato basado en un ser inerte capaz de imitar tareas desarrolladas por el humano. Estos poseían extremidades y rostro, con capacidad de caminar, hablar, correr y luchar; funcionalidades propias de un ser humano [23]. No obstante, su replicación morfológica y funcional tuvo que esperar hasta la segunda mitad del siglo XX con el desarrollo de la tecnología de control y computación [22]. De tal forma, la robótica humanoide fue elaborando su camino de manera simultánea con el campo general de la robótica. Mientras en 1960 el estudio y desarrollo de la robótica se enfocaba en la repetición de tareas para fines industriales, por otra parte, investigadores exploraban la locomoción bípeda [24].

De acuerdo con la evolución de los sistemas de control, un desarrollo tecnológico vital correspondió a la introducción del concepto de Punto de Momento Cero (ZMP) propuesto por Miomir Vukobratovic en el año 1970. El término establece hasta el día de hoy la base del control de la estabilidad dinámica de la bipedestación [25]. Tal percepción evolucionó con la presentación del robot P2 en 1996, un desarrollo de Honda que marcó un nuevo precedente en la robótica bípeda. Con un avance sostenido pero decidido, en 1997 se presentó el modelo P3, y tan solo tres años después, en el 2000, hizo su aparición ASIMO. Este androide, de 1.2 m de altura, poseía la capacidad de caminar y correr a velocidades moderadas, subir y descender escaleras, así como manipular objetos

con destreza básica. Durante 20 años, ASIMO se mantuvo en constante refinamiento de sus capacidades mediante la evolución de los sistemas de control ZMP y la integración de sensores giroscópicos. El progreso alcanzado fue un éxito para la aceleración de inversiones y colaboraciones en proyectos vinculados a la robótica humanoide [26]. A mediados de la década del 2000, se evidenció un período de gran versatilidad funcional en esta evolución. Entre los modelos más representativos destacaron HUBO (KAIST, 2004), Partner Robots (Toyota, 2005–2007) y QRIO (Sony, 2003), orientados a la asistencia, el entretenimiento y la interacción social. En el continente europeo surgieron modelos como Johnnie (TUM, 2003) y Rh-1 (UC3M, 2005), centrados en la locomoción estable. La tendencia fue orientándose progresivamente hacia la miniaturización y el incremento de grados de libertad, característica que impulsó el empleo de actuadores más ligeros y algoritmos de control más eficientes [27].

Hasta este punto, es relevante destacar que, pese a su afinidad, la aplicación de los distintos androides se diversificó progresivamente en múltiples campos. Es así como, durante la década del 2000, sus funcionalidades se extendieron progresivamente hacia sectores de seguridad, rescate y atención al público. [28]. A partir de la década del 2020, se atestigua un renovado interés en la robótica humanoide, impulsado por la inteligencia artificial y la automatización [20]. La línea de madurez alcanzada es clara y responde a las necesidades actuales de numerosas empresas industriales. Si bien persisten retos relacionados con los costos de producción y la integración segura en entornos humanos, el progreso alcanzado evidencia el sólido avance de la robótica humanoide hacia su consolidación práctica.

#### V-A3. *Tipos de Robots Humanoides*

La madurez alcanzada en el estudio y desarrollo de los androides ha permitido la diversificación de su diseño y de sus aplicaciones funcionales. En este contexto, a continuación se describen los principales tipos de robots humanoides [20]:

- **Humanoide bípedo de cuerpo completo:** Arquetipo clásico del androide bípedo, corresponde a robots dotados de cabeza, torso, dos brazos y dos piernas, características que le permiten imitar la movilidad y destreza humana. Su diseño es ideal para la interacción en espacios diseñados para el ser humano, lo que les permite desempeñarse en una amplia gama de tareas físicas.
- **Humanoides móviles de medio cuerpo:** A diferencia de la categoría anteriormente descrita, los humanoides móviles de medio cuerpo carecen de piernas. Es decir, poseen torso, brazos y una cabeza que los hace ideales robots de servicio o de interacción social. Pues su prioridad es definida por sus habilidades comunicativas y de asistencia por encima de la locomoción bípeda estricta. El robot Pepper (2014), prototipo de Softbank, es un ejemplo de la empleabilidad de esta categoría. Gracias a su morfología simple basada en una pantalla en el pecho y ruedas ocultas, ha sido visto como recepcionista y guía en tiendas.
- **Robot humanoide con apariencia hiperrealista:** El objetivo principal de los robots que forman parte de esta categoría es la reproducción de la apariencia física humana. Para ello, emplean materiales de simulación cutánea y rostros detallados y expresivos en contextos sociales, educativos o demostrativos. Generalmente, tienen un cuerpo completo estático o con movilidad limitada.

- **Humanoides pequeños o de competición:** Robots con forma humanoide de escala reducida (30 cm a 1 m) empleados para objeto educativo, académico o competitivo. Su popularidad radica en su uso en laboratorios como instrumentos de enseñanza de programación, inteligencia y visión artificial, así como para la comprensión del balance y la coordinación de la locomoción bípeda. Por esta razón, constituyen plataformas experimentales ideales, gracias al formato seguro que ofrece su tamaño y relativa asequibilidad.
- **Humanoides especializados por función:** En esta categoría, la morfología de cada robot puede desviarse del “humano promedio”, pues, son diseños ingenieriles desarrollados para un alto nivel de desempeño y rendimiento en un ámbito específico. Por ejemplo, el robot Petman de Boston Dynamics posee la altura y peso de un humano, sin embargo, su locomoción es limitada por una cinta ya que su función es el uso de trajes militares anti-químicos para la evaluación frente a condiciones reales.

## *V-B. Arquitectura Mecánica de un Robot Humanoide*

### *V-B1. Estructura de un Robot Humanoide*

El diseño estructural del robot humanoide imita la forma y movimiento del cuerpo humano, razón por la cual se compone, típicamente, por un torso central, una cabeza, dos brazos y dos piernas. Cada elemento cumple un objetivo vital común: el desempeño de tareas humanas y la locomoción bípeda. A continuación, se describen las partes estructurales del robot humanoide.

#### *V-B1.1 Torso*

Equivalente al tronco del cuerpo humano, el torso corresponde a la sección central del robot humanoide al que se conectan el resto de las extremidades, cabeza y sensores principales. Incluso, suelen ser anfitriones de la fuente de energía (baterías) y la unidad de computación principal para el control [20].

No obstante, desde el punto de vista dinámico, el papel que cumple el torso no difiere de la ya conocida funcionalidad humana. La posición y orientación del torso son factores determinantes de la ubicación del centro de masa de un robot por lo que, contribuye directamente en la estabilidad y equilibrio. Un pequeño ajuste puede marcar la diferencia en el desempeño, influyendo en el momento angular del cuerpo durante giros o cambios de dirección. En otras ocasiones, el torso suele hacer uso de sensores inerciales para objeto de medición de inclinación y aceleración, datos que contribuyen en la corrección de la postura del robot [27].

#### *V-B1.2 Extremidades Superiores e Inferiores*

De forma correspondientes, los brazos y piernas comprenden las extremidades superiores e inferiores. Ambos grupos son dotados de múltiples articulaciones que permiten la movilidad total del robot mediante varios grados de libertad (GDL). Por ejemplo, el modelo ASIMO de Honda posee 24 GDL distribuidos en su estructura: tres en el cuello, siete en cada brazo, dos en cada mano, uno en la cintura y seis en cada pierna.

Para comprender mejor la operación de las partes estudiadas en este punto, hay que empezar con la descripción funcional de las piernas. La locomoción bípeda debe su existencia a las piernas, cuyos GDL se distribuyen a lo

largo de articulaciones localizadas en la cadera, rodilla y tobillo. Por su parte, la cadera debe tener la capacidad de moverse en diferentes planos por lo que posee entre 2 y 3 GDL. En el caso de la rodilla, esta realiza el movimiento de flexión y extensión por lo que posee 1 GDL, mientras que, el tobillo posee 2 GDL debido a los movimientos *pitch* y *roll*. De esta manera, cada configuración suma a la imitación de la marcha humana mediante fases alternadas de apoyo y balanceo. No obstante, existen casos más avanzados de movilidad dinámica empleada en las extremidades inferiores. El robot Atlas de Boston Dynamics es uno de estos, un humanoide que incorpora actuadores hidráulicos de alta potencia que le otorgan la capacidad de salto y desplazamiento en terrenos irregulares con facilidad.

Por otro lado, las extremidades superiores aportan una capacidad funcional distinta. Las articulaciones ubicadas en los hombros, codos y muñecas son responsables del movimiento de los brazos, permitiendo la manipulación e interacción con el entorno. Sin embargo, debido a la versatilidad de campos en los que son empleados los robots humanoides, la prioridad y la funcionalidad de las extremidades dependen directamente de su aplicación. En entornos de servicio, la primacía de los brazos recae en la manipulación de objetos, el accionamiento de botones o realización de gestos, funciones que se logran mediante la incorporación de manos o pinzas. En cambio, en robots de investigación o competición, el enfoque se orienta a la optimización del equilibrio, ejecución de movimientos rápidos y la realización de acciones de alta precisión. La evidencia de estas diferencias se observa en modelos como Johnie (TUM), Super Anthony y HRP-4C. El primero presenta brazos simplificados con pocos grados de libertad, priorizando la estabilidad; el segundo integra servomotores de alto par para una mejor ejecución manual de gran velocidad y fuerza de impacto; y el tercero, con manos articuladas de múltiples dedos, es capaz de sujetar, sostener o manipular objetos con mayor precisión. Independientemente del diseño, el objetivo dinámico es común: contribuir al equilibrio general del robot. El movimiento pendular de los brazos durante la marcha permite contrarrestar los momentos generados por las piernas, mejorando así la estabilidad del torso y el control del movimiento [27].

#### V-B2. *Sensores*

Al igual que el ser humano depende de sus sentidos para percibir el entorno, los sensores de un robot humanoide funcionan como un receptor que recopila la información interna y externa para una mejor interacción con el medio [29], [30].

- **Sensores de posición (encoders):** Elementos de vital importancia en las articulaciones del robot para el reconocimiento de la posición angular o lineal del eje y el cierre de lazos de control asociados a esta variable. La mayoría de diseños basados en la robótica humanoide incorporan codificadores de tipo incremental o absoluto, encargados de medir el giro del eje y así, garantizar el movimiento de las extremidades de acuerdo con lo planificado.
- **Sensores de fuerza/torque:** Su función es la medición de las fuerzas ejercidas en puntos críticos como manos y pies. Su utilidad es encontrada en casos como la detección de las fuerzas de reacción sobre el suelo durante la marcha y, de esta manera, evaluar su estabilidad a través del criterio del Momento Cero (ZMP) que ayudarían en la corroboración del equilibrio en tiempo real [27]. Por otra parte, al posibilitar la implementación de controles de impedancia o de fuerza, estos sensores permiten regular la rigidez de una acción como el apretón de manos.
- **Sensores de visión:** Dado que las acciones del ser humano se basan en la percepción del entorno, el robot

humanoide toma como ejemplo esta característica mediante el uso de cámaras localizadas en la cabeza, y en su mayoría, integradas en los ojos. Estas permiten el reconocimiento de rostros, objetos y distancias, facilitando la navegación y la ejecución de tareas mediante la adquirida “visión” que puede potenciarse si es acompañada por inteligencia artificial.

- **Sensores inerciales:** De forma similar a la Unidad de Medición Inercial (IMU), su función es la medición de la aceleración lineal y velocidad angular del cuerpo. Son elementos estratégicamente instalados cerca del centro de la masa del robot para la realización de constantes retroalimentaciones inerciales en los controles de balance.

Cabe recalcar que no es mandatoria la aplicación de cada sensor mencionado dentro del diseño de un robot humanoide, sin embargo, su fusión sensorial desarrolla una múltiple fuente de datos que sirven de alimento para el sistema de control que es visualizado en el desempeño del robot humanoide durante su interacción con el entorno.

### *V-B3. Actuadores*

Entre la variedad de elementos que conforman un robot humanoide, los actuadores desempeñan un papel clave en la replicación de los músculos humanos. Su trabajo es la conversión de la energía en movimiento de las articulaciones, determinando directamente, la suavidad del movimiento, la precisión del control y la capacidad de respuesta dinámica. Un robot humanoide necesita un mecanismo de actuado en cada articulación que lo proporcione de grados de libertad (GDL) en el trabajo de reproducción del movimiento humano. Es decir, el trabajo de un actuador es otorgar la capacidad de locomoción, manipulación y expresión corporal.

Sin embargo, el desarrollo de estos elementos enfrenta varios desafíos técnicos. Por una parte, alcanzar un desempeño comparable al de los músculos biológicos continúa siendo un reto, especialmente, en lo referente a la densidad de fuerza, el ancho de banda y la precisión del control. Además, los actuadores deben integrarse en el volumen limitado de cada articulación sin comprometer la velocidad de respuesta ni aumentar la inercia del sistema. Esto exige un equilibrio entre potencia, compacidad y eficiencia energética, de modo que el robot pueda mantener una locomoción estable y manipulaciones precisas sin sacrificar autonomía ni seguridad operacional [31], [32], [33].

## *V-C. Fundamentos Mecánicos de un Robot Humanoide*

### *V-C1. Fundamentos Mecánicos del Movimiento*

#### *V-C1.1 Distribución de Grados de Libertad*

En la rama de la robótica, los grados de libertad se definen como el número de movimientos independientes necesarios para representar la configuración de un sistema mecánico en el espacio [34]. En el caso del robot humanoide, el concepto describe la función de las articulaciones en la reproducción de los movimientos relativos entre los distintos cuerpos rígidos que conforman su estructura, tales como hombros, codos, caderas, rodillas y tobillos. Cada grado de libertad define la capacidad del robot humanoide para emular tareas de manipulación o locomoción. No obstante, el incremento del número de grados de libertad es una variable que conlleva una mayor complejidad mecánica y de control al momento de garantizar la estabilidad y la exactitud del movimiento. [34]

En ingeniería, la orientación de un cuerpo rígido en el espacio tridimensional se describe mediante rotaciones alrededor de tres ejes ortogonales. Estas rotaciones se conocen como *pitch*, *roll* y *yaw*, y constituyen una forma particular de representar la orientación utilizando lo que se denominan ángulos de Euler.

- El roll corresponde a la rotación alrededor del eje longitudinal (X). El roll es especialmente relevante en sistemas que requieren estabilidad lateral, como aeronaves, plataformas móviles o manipuladores robóticos montados sobre bases móviles [35]. Este movimiento produce una inclinación lateral del cuerpo. Desde el punto de vista matemático, su matriz de rotación asociada es:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

- El pitch es la rotación alrededor del eje transversal (Y). Este movimiento modifica la inclinación del cuerpo en dirección anterior-posterior. El pitch influye directamente en el control de elevación y trayectoria en sistemas dinámicos, como drones, brazos robóticos o vehículos autónomos. [35]. Su representación matricial es:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

- El yaw corresponde a la rotación alrededor del eje vertical (Z), produciendo un cambio de orientación en el plano horizontal. El yaw es fundamental en sistemas de navegación y direccionamiento, ya que determina el rumbo u orientación horizontal del sistema. Su matriz de rotación es:

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La figura 1 muestra un cuerpo rígido junto con su sistema de referencia tridimensional representado por los ejes ortogonales "X"(eje rojo), "Y"(eje verde), y "Z"(eje azul).

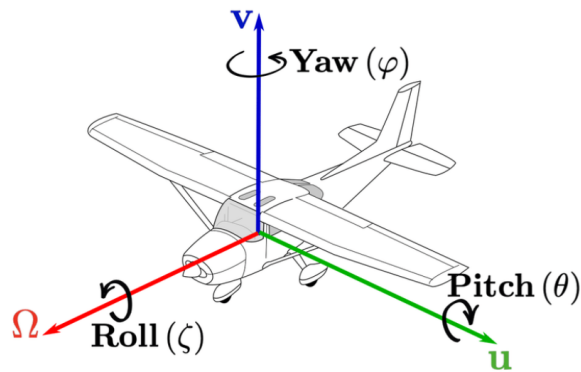


Figura 1. Ejes de rotación X (roll), Y (pitch), Z (yaw).

### V-C1.2 Espacio de Configuración

Cada robot posee la capacidad de adoptar un determinado número de configuraciones o posiciones [34]. En este sentido, el conjunto de todas las posiciones posibles determinado por los grados de libertad de las articulaciones de un robot corresponde al espacio de configuración que constituye el marco fundamental para la planificación y ejecución del movimiento [36]. Dado que estas variables se encuentran directamente relacionadas con la estructura y las dimensiones de los eslabones, cualquier modificación geométrica física altera el conjunto de transformaciones posibles y, por ende, modifica su espacio de configuración.

### V-C1.3 Movimiento del Cuerpo Rígido

En el estudio del movimiento de robots humanoides, cada componente estructural es identificado como un cuerpo rígido con la capacidad de ejecutar movimientos de traslación y rotación en el espacio tridimensional. Particularmente, el torso corresponde al cuerpo rígido central del sistema, dado que sirve como referencia para la orientación y el equilibrio global del robot. En consecuencia, las variaciones en su orientación influyen en la ubicación del centro de masa y en la estabilidad general del sistema [34].

### V-C1.4 Centro de Masa

El centro de masa (CoM) constituye un punto único dentro de un cuerpo en el espacio, cuya posición representa el promedio ponderado por la masa de todas las partículas; es decir, en este se puede considerar concentrada toda la masa de un sistema para el análisis de su movimiento y comportamiento dinámico [34]. En el contexto de la robótica humanoide, la estimación y el control del centro de masa representan un paso crítico para garantizar la estabilidad estática y dinámica durante la ejecución de tareas de locomoción bípeda. El centro de masa no es una variable fija, puesto que se desplaza continuamente como resultado del movimiento del torso y las extremidades durante la locomoción bípeda. Por esta razón, se han desarrollado diversas investigaciones orientadas al uso de técnicas de predicción y modelado del centro de masa a partir de la arquitectura cinemática del sistema, representando la estructura del robot mediante una cadena cinemática equivalente (Statically Equivalent Serial Chain), en la que no se requiere conocimiento explícito de la masa ni de las dimensiones individuales de cada componente. Esta técnica justifica que la localización del centro de masa se encuentra íntimamente ligada a la forma en que los cuerpos

rígidos del robot se articulan y conectan entre sí [37].

#### *V-C1.5 Polígono de Soporte*

El polígono de soporte es definido por el área delimitada por los puntos de contacto del robot con el suelo, típicamente los bordes de las superficies de los pies. La estabilidad durante la locomoción es un factor que depende de que las fuerzas resultantes del sistema actúen dentro de este polígono, caso contrario se producirán momentos en el que el robot pierda el equilibrio [34]. De acuerdo con el patrón de apoyo, el polígono de soporte varía en cada fase de la marcha. En la fase de doble apoyo, el polígono se extiende sobre el área correspondiente a ambos pies, mientras que en la fase de apoyo simple dicha área se reduce a un solo pie. Una condición que debe evitarse es la tendencia del robot a rotar alrededor de los bordes de los pies, ya que estos constituyen los límites del polígono y pueden ocasionar la pérdida de la estabilidad global del sistema. Este fenómeno es caracterizado mediante un indicador conocido como Foot Rotation Indicator (FRI) [38].

#### *V-C2. Relación Estructura-Movimiento*

El movimiento de un robot humanoide no es un concepto desvinculado del diseño de la estructura mecánica. No existen coincidencias cuando se trata de la definición de parámetros como la geometría de los eslabones, la ubicación estratégica de los actuadores y la distribución de masas puesto que, definen de manera directa las posibilidades dinámicas del sistema. Desde la perspectiva de la Dinámica Centroidal, la capacidad del robot para interactuar con el entorno mediante fuerzas de reacción en el suelo se encuentra gobernada por su matriz de inercia, variable determinada por la configuración física de sus Grados de Libertad. Bajo este margen, la ubicación del Centro de Masa sirve como elemento delimitante del conjunto de trayectorias viables en el que cualquier discordancia entre el diseño mecánico y el modelo de control limita los rangos de movimiento y compromete la estabilidad dinámica. De esta manera, el trabajo de repotenciación mecánica del robot obtiene su identidad en un proceso de reconfiguración inercial deliberada. Esta intervención garantiza la ejecución de rutinas de movimientos dentro de sus límites de Balance Estático y Dinámico, y mitigando el riesgo de colapso ante cargas funcionales [39].

#### *V-C3. Locomoción Bípeda y Adaptación en el Entorno Humano*

El hilo conductor en la evolución de los robots humanoides radica en la imitación de la morfología humana. Si bien, el ser humano ha aspirado, desde la mitología griega, hacia el desarrollo de un ser inerte dotado de capacidades humanas, es fundamental señalar que dicha imitación responde a un propósito funcional. Desde sus inicios, la automatización industrial ha sido la principal fuente de inspiración para el desarrollo robótico; no obstante, el interés por la robótica humanoide conlleva a la ampliación de sus funcionalidades a entornos más allá de los industriales. La vida cotidiana transcurre en casas, edificios y ciudades, cada uno diseñado para la morfología y movilidad humana. En consecuencia, un prototipo destinado para la convivencia y cooperación entre humanos debe ser capaz de subir escaleras, atravesar puertas, pulsar botones, manejar utensilios, etc. Es decir, “debe ser capaz de interactuar en un ambiente diseñado para el ser humano” para responder a las exigencias funcionales de su entorno [40].

La locomoción bípeda es de gran importancia ya que, la mitad de la superficie terrestre es inaccesible mediante transporte vehicular (con ruedas). Mientras las ruedas requieren un soporte continuo y terreno nivelado, las piernas pueden movilizarse en terrenos irregulares. Además, las extremidades articuladas actúan como suspensión activa.

Estos desacoplan el movimiento del torso del suelo y permiten un desplazamiento más suave y estable sin importar la irregularidad.

Otra ventaja dada por la morfología humana de los humanoides es el acceso a la interacción con herramientas y dispositivos diseñados para humanos, ampliando el rango de tareas que un robot puede desempeñar. En términos de comunicación e interacción, la figura humana resulta más intuitiva para la convivencia entre humanos, facilitando su integración y aceptación social [20].

#### *V-D. Selección de Materiales y Fabricación Aditiva en Robots Humanoides*

##### *V-D1. Selección de Materiales para Estructuras Humanoides*

Entre las etapas de mayor relevancia dentro del proceso de diseño mecánico se encuentra la selección de materiales, la cual adquiere una importancia particular en el desarrollo de robots humanoides debido a factores como la masa, la rigidez y el comportamiento dinámico del sistema. Estas variables influyen de manera directa en la estabilidad y en la locomoción bípeda, dado que cada componente estructural cumple funciones diferenciadas que condicionan el desempeño global del robot. A diferencia de mecanismos estáticos o sistemas industriales convencionales, en los cuales la movilidad y el balance dinámico no constituyen una restricción dominante, los robots humanoides requieren un criterio de diseño más cuidadoso que equilibre resistencia mecánica, peso estructural y viabilidad de fabricación.

La selección de materiales no debe abordarse como un proceso aislado, sino como una decisión integrada a múltiples criterios, entre los que se incluyen la función estructural de la pieza, su geometría, el proceso de manufactura y la etapa de desarrollo del producto. En este sentido, el fundamento de la elección de un material se encuentra regido por la definición del objetivo de diseño, el cual puede estar orientado a la validación conceptual, la optimización funcional o la fabricación de una versión definitiva del sistema [41].

##### *V-D2. Materiales utilizados por la industria de la robótica*

La realidad del entorno industrial actual responde, en gran medida, a la necesidad funcional de cada componente al momento de seleccionar un material. Metales como el aluminio y el acero inoxidable continúan predominando en el campo de la robótica debido a su elevada resistencia mecánica, rigidez estructural y durabilidad, mientras que, por su parte, materiales poliméricos como los acetales (POM/Delrin) y el nylon ofrecen ventajas asociadas a la estabilidad dimensional y a la reducción de peso. En este contexto, los elastómeros y polímeros se emplean principalmente en aplicaciones orientadas a la absorción de impactos o a la interacción segura con el entorno; no obstante, adquieren una relevancia aún más significativa en la fase prototipado y repotenciación. Estos materiales se destacan en funciones de validación estructural preliminar para una iteración rápida de diseño debido a su fácil manufactura, libertad geométrica y reducción de masa. De este modo, cada decisión asociada a la selección de un material responde al criterio de equilibrar propiedades mecánicas, peso y funcionalidad específica de cada elemento dentro de la estructura de un robot [42].

##### *V-D3. Fabricación Aditiva y Materiales Poliméricos en el desarrollo de Estructuras Humanoides*

Las etapas de diseño, validación funcional y adaptación mecánica de estructuras preexistentes en robots humanoides han encontrado en la fabricación aditiva una herramienta de alto valor técnico. Este enfoque de manufactura

abre la posibilidad de producir componentes con geometrías complejas, difíciles de materializar mediante métodos tradicionales como el mecanizado o el conformado de lámina. Desde la perspectiva de la robótica humanoide, su aplicación se extiende a sistemas compuestos por múltiples elementos, tales como componentes estructurales, carcasas externas y soportes para actuadores destinados a la interacción con el entorno. Esta capacidad permite la fabricación de elementos tridimensionales personalizados que conservan el diseño original del robot, independientemente de su complejidad, preservando su configuración cinemática y evitando modificaciones que puedan alterar su comportamiento dinámico. Pues, la aparición reciente de diversos estudios ha evidenciado que la calidad y el desempeño mecánico de una pieza no dependen exclusivamente del material empleado, sino, en gran medida, de su arquitectura interna. Esta posibilidad de fabricación abre un campo hacia la implementación de patrones estructurales específicos que permiten ajustar propiedades como la rigidez, la absorción de energía y la resistencia a la flexión. En este contexto, la repotenciación mecánica puede apoyarse en la fabricación aditiva como un método que garantiza el respeto por la integridad estructural de los robots humanoides, especialmente en componentes sometidos a esfuerzos dinámicos o a interacción física directa con el entorno.

Bajo esta misma línea de análisis, resulta pertinente abordar el concepto de diseños híbridos. Si bien muchos robots convencionales presentan una composición material uniforme, la selección del material debe responder a la función específica de cada elemento y a la etapa de desarrollo en la que se encuentra el sistema. De manera complementaria, la investigación contemporánea en robótica humanoide ha explorado el uso de materiales termoplásticos flexibles y polímeros de ingeniería en componentes exteriores, cubiertas estructurales y zonas de contacto. Estos materiales aportan ventajas asociadas a la absorción de impactos, la reducción de cargas transmitidas a los actuadores y la mejora de la seguridad durante la interacción física, particularmente en escenarios de proximidad humana. Asimismo, desde una perspectiva metodológica, la fabricación aditiva adquiere un valor adicional en las etapas de repotenciación mecánica. Los costos y tiempos asociados a la manufactura convencional representan un obstáculo significativo que puede ser mitigado mediante este enfoque, el cual permite la modificación, fabricación y evaluación de componentes en períodos reducidos. Esta flexibilidad resulta especialmente relevante en proyectos donde la arquitectura global del robot no puede ser alterada de manera sustancial [43].

En conjunto, la fabricación aditiva y el uso de materiales poliméricos se consolidan como herramientas estratégicas de validación en las etapas iniciales de la repotenciación mecánica, orientadas a la evaluación de la coherencia geométrica del sistema y de la distribución de masa, sentando las bases para una posterior transición hacia materiales definitivos [44].

#### *V-E. Sistemas de Control en Robots Humanoides*

Hasta este punto, se han descrito los múltiples sensores que tras la recepción, emiten datos o valores que deben ser interpretados. Sin embargo, el paso final para alcanzar la coordinación de elementos es dado por el sistema de control que es organizado de manera jerárquica [27].

- Control centralizado: Arquitectura basada en una computadora principal encargada del cálculo y envío de órdenes a los actuadores, a través de la recepción de los datos provenientes de los sensores. Ejemplos históricos de este enfoque incluyen HUBO, que emplea un PC Pentium III en tiempo real, y Johnnie, basado en un

Pentium IV con Linux RT para el cálculo de la cinemática y la dinámica. El atractivo funcional de esta categoría reside en la simplificación de la lógica de decisión, sin embargo, corre el riesgo de saturación de la CPU principal, razón por la cual, el reparto de procesamiento entre múltiples unidades especializadas es una solución común.

- **Control distribuido:** Como respuesta a la desventaja previamente planteada, las decisiones de control de esta arquitectura son repartidas entre múltiples microcontroladores o controladores ubicados en múltiples articulaciones del robot. Si bien la sincronización general continúa dependiendo de un computador principal, este enfoque permite mitigar problemas asociados a la latencia y a la carga de la red de comunicaciones.
- **Control basado en modelos:** Debido a la complejidad dinámica de un robot humanoide, los controladores buscan el marco matemático para la predicción del comportamiento y planificación de la estabilidad móvil. Un método popular corresponde a la modelación de la marcha mediante un péndulo invertido sumado al criterio de Momento Cero (ZMP). La lógica consiste en el ajuste de trayectorias en el centro de masa con objeto de no mal ajustar el ZMP por fuera de las delimitaciones del polígono de soporte. De manera complementaria, existen modelos como el control por impedancia, representado mediante un sistema masa-resorte-amortiguador puesto a prueba durante la interacción del robot con el entorno.
- **Control bio-inspirado:** En un campo apartado del físico-matemático, existen sistemas de control basados en la imitación del cómo el organismo humano gestiona el equilibrio y se coordina mediante reflejos locales y ajustes posturales. Por ejemplo, mediante el uso del sistema neuromotor humano, ciertos controladores se programan mediante tres enfoques: canales independientes, identificación de perturbaciones y movimientos propios. Estos factores contribuyen a la naturalidad del movimiento y desenvolvimiento del androide [45].

En el planteamiento práctico, los robots humanoides integran elementos de todas las categorías en sus sistemas de control. Consiste en una organización jerárquica dividida en niveles, que abarcan desde la secuenciación de pasos (nivel superior), la generación de trayectorias mediante el uso de modelos (nivel intermedio), hasta la ejecución de movimientos en cada articulación (nivel bajo).

#### *V-F. Descripción Técnica del Robot Humanoide Super Anthony*

Super Anthony es un androide humanoide a pequeña escala reconocido por su bipedestación y participación en competencias de combate, demostraciones de agilidad y pruebas de locomoción. Está compuesto por un chasis elaborado en material aluminio, material que le brinda compacidad y ligereza. Además, cuenta con 15 grados de libertad (GDL) que se distribuyen de forma estratégica entre sus brazos, piernas y torso permitiéndole un alto nivel de movilidad en la ejecución de posturas dinámicas y ajustes basados en el reflejo como patadas, volteretas o corrección de postura tras una caída. Este robot de batalla está equipado con 15 servomotores IQ4516HV patentados con engranajes de acero que le permite concentrar 45 kgF en el lanzamiento de golpes con puño. Adicionalmente, es portador de un módulo de conectividad Bluetooth que le permite versatilidad en el control, sea este un mando físico o a través de una aplicación móvil. Entre sus habilidades adicionales cabe destacar el reconocimiento de

imágenes, posición y control por voz [5].

### *V-F1. Arquitectura Mecánica General*

El robot de competencia Super Anthony corresponde a un sistema bípedo constituido por una arquitectura mecánica inspirada en la morfología humana. Esta analogía se materializa a través de un torso central, dos extremidades superiores y dos extremidades inferiores, cuya disposición permite reproducir patrones básicos de locomoción y movimiento humano. La estrategia de diseño prioriza el cumplimiento de criterios de estabilidad durante la marcha, la capacidad de absorción de impactos y la ejecución de movimientos dinámicos bajo condiciones de carga funcional. Desde el punto de vista estructural, el robot posee una configuración simétrica derecha-izquierda que permite una distribución equilibrada de actuadores que dotan de movimientos a los brazos, cadera, rodillas y tobillos. Además, dado que la programación interna del robot se encuentra directamente ligada a la arquitectura, cualquier modificación estructural implica una alteración directa de su geometría global y de su espacio de configuración.

### *V-F2. Distribución de Grados de Libertad y Actuadores*

El levantamiento de información realizado sobre el sistema de actuadores que conforman el robot humanoide Super Anthony confirma la presencia de quince servomotores, cada uno asociado a un canal de control independiente. Cada canal se encuentra asignado a una articulación específica de brazos, piernas y caderas, sobre las cuales se distribuyen los grados de libertad disponibles y, en consecuencia, las capacidades de movimiento del robot. Para esto, el mapa de asignación de servomotores y canales de control ha sido dividido mediante las articulaciones de extremidades superiores, extremidades inferiores y cadera.

- Las extremidades superiores se componen por dos brazos en el que 2 GDL se encuentran en el hombro y una 1 GDL en el codo.
- Las extremidades inferiores se componen por dos piernas en el que 2 GDL se ubican en la cadera, 1 GDL en la rodilla y 1 GDL en el tobillo.
- La cadera es un elemento que incorpora un 1 GDL adicional de tipo yaw, que permite las rotaciones del tronco respecto a las piernas, contribuyendo a la estabilidad y maniobrabilidad durante la locomoción

Por ende, la repotenciación estructural debe reflejarse en los siguientes criterios:

- Mayor autonomía operativa
- Menor degradación progresiva del desempeño
- Disminución del esfuerzo compensatorio de los actuadores

La Tabla I resume la distribución de los grados de libertad del robot humanoide Super Anthony, indicando la articulación correspondiente y el tipo de movimiento asociado.

### *V-F3. Implicaciones Mecánicas de la Arquitectura Existente*

Los elementos de servomotores, las articulaciones y los canales de placa son variables interdependientes de la arquitectura original. En consecuencia, la realización de modificaciones sustanciales en la geometría de las articulaciones desencadena la posibilidad de incompatibilidades con las rutinas de movimientos programadas, locomoción y desempeño dinámico del sistema.

Tabla I  
DISTRIBUCIÓN DE GRADOS DE LIBERTAD DEL ROBOT HUMANOIDE SUPER ANTHONY

Segmento	Articulación	Tipo de movimiento	GDL
<b>Extremidades superiores</b>			
Brazo derecho	Hombro	Pitch, Roll	2
Brazo derecho	Codo	Flexión–Extensión	1
Brazo izquierdo	Hombro	Pitch, Roll	2
Brazo izquierdo	Codo	Flexión–Extensión	1
<b>Extremidades inferiores</b>			
Pierna derecha	Cadera	Pitch, Roll	2
Pierna derecha	Rodilla	Flexión–Extensión	1
Pierna derecha	Tobillo	Pitch	1
Pierna izquierda	Cadera	Pitch, Roll	2
Pierna izquierda	Rodilla	Flexión–Extensión	1
Pierna izquierda	Tobillo	Pitch	1
<b>Tronco</b>			
Tronco	Cadera central	Yaw	1
<b>Total de grados de libertad</b>			<b>15</b>

Debido a esto, el enfoque planteado en el desarrollo del presente proyecto corresponde a una repotenciación mecánica conservadora con el objetivo de respetar los grados de libertad originales, la ubicación funcional de articulaciones y, la correspondencia entre actuadores y canales de control. Además, dado que la geometría de los servomotores incluidos en esta repotenciación corresponden a una versión comercial que difiere de la geometría del servomotor original, las modificaciones propuestas se limitan a la adaptación del diseño para su integración en el sistema bípedo sin alterar la arquitectura cinemática del robot.

#### *V-F3.1 Relación con el proceso de Repotenciación Mecánica*

El análisis de distribución de los servomotores y articulaciones del robot humanoide Super Anthony constituye la definición de criterios claros para el diseño de nuevas piezas estructurales que establecen lo siguiente:

- Mantener la compatibilidad con la placa de control existente.
- Preservar el espacio de configuración del robot.
- Evitar alteraciones que comprometan la estabilidad o las rutinas de locomoción.

Dado este enfoque, se concibe el proceso de repotenciación mecánica planteado como la primera etapa de intervención, enfocada en el rediseño estructural y la adaptación de actuadores, sin modificar el sistema electrónico ni los algoritmos de control del robot.

#### *V-F4. Caracterización Funcional Previa a la Repotenciación del Robot Humanoide Super Anthony*

El rendimiento del robot humanoide Super Anthony será evaluado mediante un enfoque funcional basado en la ejecución de rutinas predeterminadas de locomoción y combate. Dicho enfoque permite analizar el comportamiento real del sistema en movimiento, valorando la interacción entre los componentes electrónicos, mecánicos y de control en condiciones similares a las de una competencia o uso operativo. Es decir, en lugar de centralizarse a un espacio limitado a pruebas estáticas o individualizadas por componente, se buscará observar cómo el robot responde a tareas dinámicas y coordinadas, brindando fidelidad a su capacidad operativa. Este tipo de evaluación ha sido reconocido como una herramienta válida para el análisis práctico del rendimiento de robots humanoides en entornos educativos y experimentales [46]. A partir de esta metodología, será posible establecer si las modificaciones estructurales implementadas favorecen la funcionalidad global del robot y contribuyen a su recuperación operativa.

##### *V-F4.1 Rutinas de Locomoción Programadas*

Las rutinas de locomoción representan uno de los pilares fundamentales del desempeño funcional del robot humanoide. Por objeto de este caso de estudio, se evaluarán desplazamientos hacia adelante, retrocesos, movimientos laterales y giros, con el objetivo de analizar la eficiencia de marcha, la estabilidad del centro de gravedad y la coordinación entre los grados de libertad de las extremidades inferiores. La fluidez del desplazamiento será un indicador clave, puesto que permitirá identificar posibles desajustes mecánicos o retrasos en la sincronización de los actuadores [47]. Otro factor a ser evaluado corresponde a la capacidad del robot para mantener el balance dinámico durante los giros y para recuperar la postura ante perturbaciones externas.

Estos elementos han sido estudiados previamente en investigaciones sobre locomoción bípeda humanoide, donde se ha demostrado que el análisis del movimiento en acción proporciona información esencial sobre la calidad del diseño estructural y cinemático. El estudio de estas rutinas permitirá determinar si el rediseño aplicado en el chasis y los servomotores ha favorecido la estabilidad y el control de la marcha [48].

##### *V-F4.2 Rutinas de Combate y Defensa*

Las rutinas de combate se utilizarán para evaluar el rendimiento del robot en acciones que demanden la capacidad de reacción rápida, coordinación de múltiples segmentos corporales y tolerancia mecánica al contacto físico. Se incluirán maniobras ofensivas como golpes frontales y embestidas, así como acciones defensivas como esquives, retrocesos y reorientación rápida del torso. Para cada una se analizará la latencia entre el envío del comando y la ejecución del movimiento, la coherencia cinemática entre brazos, piernas y torso, y la capacidad del robot para mantener la postura después de un impacto [49]. Estas pruebas permitirán evaluar si la estructura mecánica adaptada es capaz de soportar esfuerzos reales y si los nuevos actuadores ofrecen la potencia necesaria para generar movimientos firmes y controlados.

Los estudios recientes indican que el análisis funcional durante tareas de combate resulta especialmente útil para validar un rediseño mecánico, ya que pone a prueba la transmisión de fuerza, el control postural y la eficiencia del sistema de control en condiciones de exigencia. De este modo, las rutinas de combate se establecerán como una plataforma experimental efectiva para evaluar la eficacia de la repotenciación aplicada [50].

#### *V-F4.3 Limitaciones Funcionales Observadas*

Finalmente, los datos obtenidos durante la ejecución de las rutinas de locomoción y combate se integrarán en un análisis funcional que permitirá evaluar el rendimiento global del robot humanoide como un sistema mecánico, electrónico y de control unificado. Se registrarán aspectos como tiempos de respuesta, desviaciones posturales, fluidez de movimiento y estabilidad después de un contacto o perturbación. Para ello, se utilizará un formato de observación estructurada que permitirá registrar de forma sistemática los resultados de cada rutina y generar criterios comparativos posteriores a la repotenciación.

Este enfoque ha sido respaldado en estudios que promueven la evaluación del comportamiento emergente en robots humanoides como método de validación mecánica, especialmente en entornos académicos donde no siempre se cuenta con herramientas de medición industrial. Además, de obtener resultados consistentes, esta metodología podría servir como base replicable para futuros procesos de reingeniería y mantenimiento inteligente de robots en clubes universitarios o proyectos educativos, contribuyendo a la prolongación de la vida útil de plataformas robóticas obsoletas [46].

## VI. MARCO METODOLÓGICO

El presente proyecto titulado “Repotenciación del Robot Humanoide Super Anthony mediante el Rediseño Mecánico para la Recuperación de su Operatividad” se llevó a cabo bajo una metodología de tipo aplicada y experimental con un enfoque cuantitativo. Se desarrolló a través del rediseño estructural, usando herramientas de modelado CAD y simulaciones por elementos finitos (FEA) previo a su fabricación. En esta línea, se valida la repotenciación mediante la ejecución de pruebas físicas controladas para la medición de la estabilidad, eficiencia energética, precisión y tolerancia al impacto.

### VI-A. *Enfoque Metodológico del proyecto*

El presente proyecto se desarrolla bajo un marco de carácter metodológico aplicado y experimental, con predominio cuantitativo. Basado en la repotenciación mecánica del robot humanoide Super Anthony, busca rediseñar la estructura del chasis y la adaptación de actuadores comerciales sin alterar los algoritmos de control originales y locomoción.

Se categoriza a la investigación como aplicada debido a que busca la resolución de un problema real relacionado con la pérdida de operatividad del robot, y experimental, dado que se realiza una evaluación previa y posterior a la repotenciación mecánica mediante pruebas controladas basadas en rutinas dinámicas de locomoción y combate.

### VI-B. *Delimitación del proyecto*

El alcance del proyecto se limita a la primera etapa de la repotenciación del robot humanoide Super Anthony con un enfoque basado en el rediseño mecánico y estructural del chasis y los soportes de servomotores. De esta manera, entre las tareas que no se contemplan dentro del alcance se encuentran:

- La modificación de la placa de control original.
- La reprogramación de rutinas de movimiento.
- Cambios en la arquitectura de control.

Este alcance surge como respuesta a la necesidad de preservar la compatibilidad cinemática y funcional del robot dado que su programación proviene de una vinculación directa con la geometría y distribución original de las articulaciones y actuadores.

### VI-C. *Análisis de Procedimiento de Repotenciación*

La metodología de repotenciación mecánica se planteó como una intervención conservadora que busca la recuperación de la operatividad del robot sin alterar su estabilidad, espacio de configuración ni rutinas dinámicas preexistentes. Para ello, se realizó un levantamiento técnico del sistema original, identificando el número total de grados de libertad, la ubicación funcional de cada articulación, la distribución de servomotores, y los canales de control y las limitaciones geométricas del chasis original. Este análisis cementó las bases para la definición de criterios de desempeño que permitieron la toma de decisiones correctas y con ello, la abolición de incompatibilidades mecánicas o dinámicas en el sistema.

#### VI-D. Procedimiento Metodológico

El procedimiento metodológico se estructura en cuatro fases secuenciales, descritas a continuación:

##### VI-D1. Diagnóstico Técnico y Levantamiento Estructural

La primera fase de desarrollo del proyecto dirigido a la repotenciación se concentra en la identificación de los elementos críticos que afectan el rendimiento actual del robot. Para esto, se procedió con una inspección del estado físico referente a deformaciones en las piezas del chasis, holguras en las uniones mecánicas, fallos por fatiga en las intersecciones articulares y deficiencias relacionadas con la distribución de peso.

De manera simultánea, se realizó un análisis de los elementos que componen el robot evaluando la capacidad de respuesta, fuerza de torque y precisión angular, así como el estudio de las ubicaciones para la ejecución del modelado 3D de las nuevas piezas estructurales usando la herramienta de diseño CAD SolidWorks. Las piezas diseñadas fueron impresas en material PLA+ para una previa validación dimensional de ensamblaje al corte láser en plancha de aluminio. El rediseño busca el restablecimiento de la rigidez estructural para una correcta distribución de masa y relación de peso-resistencia.

Tabla II  
DISTRIBUCIÓN DE SERVOMOTORES Y PINES DE CONTROL – EXTREMIDADES SUPERIORES

<b>Servo</b>	<b>Articulación</b>	<b>Canal de la placa</b>
S0	Hombro derecho – Pitch	P00
S1	Hombro derecho – Roll	P01
S2	Codo derecho	P02
S7	Hombro izquierdo – Pitch	P07
S8	Hombro izquierdo – Roll	P08
S9	Codo izquierdo	P09

La Figura 4 muestra la vista frontal del robot humanoide con la ubicación de cada servomotor (S0–S14) sobre la estructura. Esta representación funciona en conjunto con las Tablas II y III que sirve como mapeo de la asignación de servomotores (S0–S14) y su canal de control (P00–P15). Dicha asignación permite asociar cada actuador a su función articular (hombros, codos, caderas, rodillas y tobillos) y validar que el rediseño mecánico mantiene la arquitectura cinemática original.

Tabla III  
DISTRIBUCIÓN DE SERVOMOTORES Y PINES DE CONTROL – EXTREMIDADES  
INFERIORES

<b>Servo</b>	<b>Articulación</b>	<b>Canal de la placa</b>
S3	Cadera derecha – Roll	P03
S4	Cadera derecha – Pitch	P04
S5	Rodilla derecha	P05
S6	Tobillo derecho	P06
S10	Cadera izquierda – Roll	P10
S11	Cadera izquierda – Pitch	P11
S12	Rodilla izquierda	P12
S13	Tobillo izquierdo	P13
S14	Cadera – Yaw	P14
X	No asignado	P15

# Vista Frontal

## Derecha – Izquierda

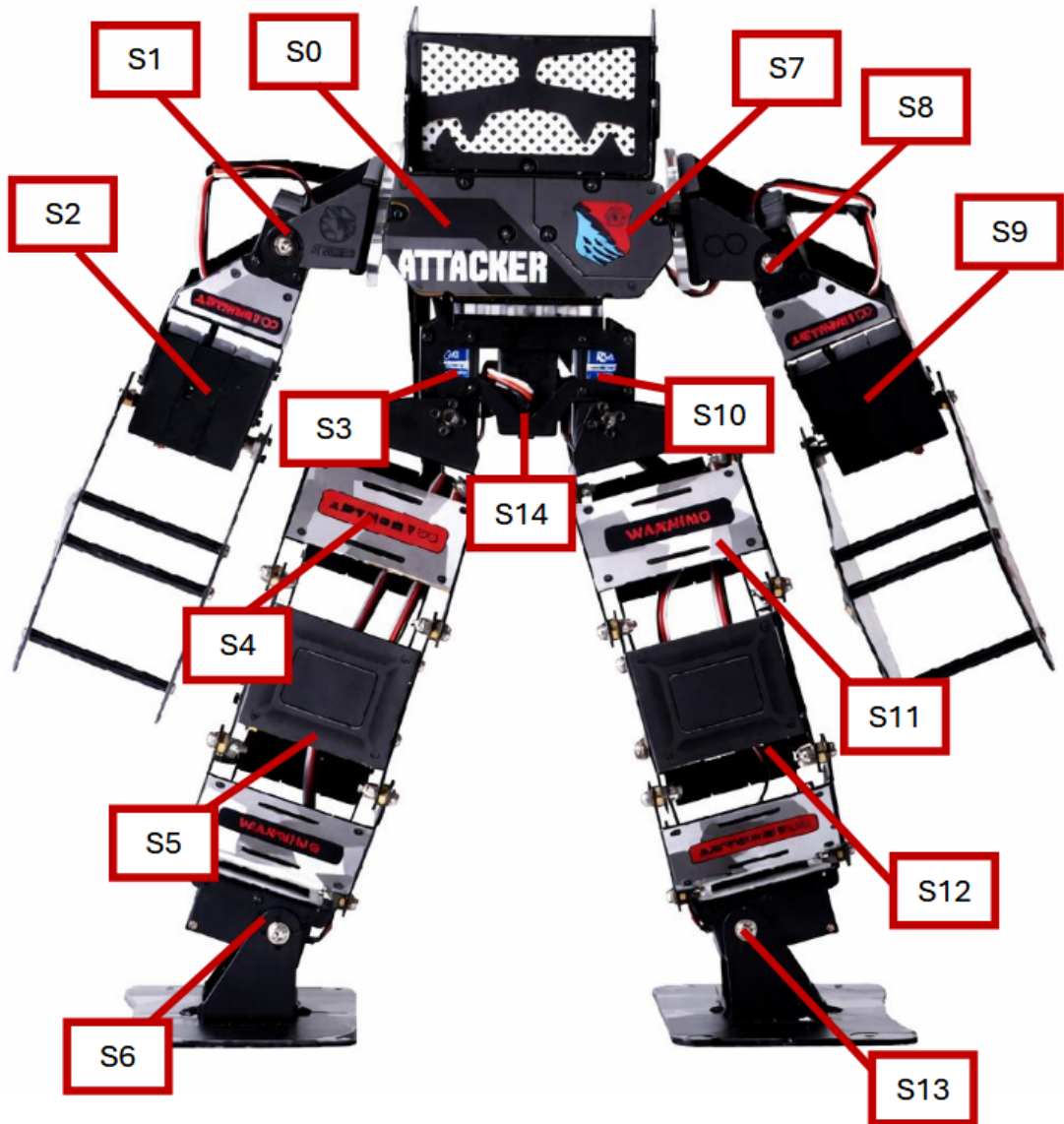


Figura 2. Vista frontal del robot con identificación de servomotores (S0–S14)

## VI-D2. Rediseño Mecánico y Adaptación de Actuadores

### VI-D2.1 Análisis de Incompatibilidad Geométrica y Estructural

Durante la etapa de evaluación técnica se evidenció la necesidad de sustituir los servomotores originales del robot humanoide Super Anthony debido a su crítico desgaste. Sin embargo, tras un estudio más profundo, se reconoció un criterio adicional: la inexistencia de un repuesto comercial disponible. La situación invitó a la selección de un nuevo modelo digital genérico, correspondiente a la variante DS3245 SG Coreless, cuya incorporación exigió una evaluación comparativa detallada de sus características geométricas y constructivas en relación con el servomotor original.

El servomotor original disponía de seis perforaciones roscadas distribuidas a lo largo de su carcasa que permitían realizar fijaciones directas con tornillos incluso cuando existían placas estructurales de 1.5 mm de espesor que se interponían. Esta característica aseguraba una adecuada transmisión de cargas y una sujeción estructural robusta. En contraste, los servomotores genéricos adquiridos presentan una configuración de fijación limitada al carecer de perforaciones roscadas superiores o profundidad de roscado en su única perforación inferior. Esta condición impedía la inserción de tornillos ya que la acción comprometía la rigidez del conjunto o generaba una incompatibilidad mecánica.



Figura 3. Vista superior y lateral comparativa de los servomotores

### VI-D2.2 Diseño del Sistema de Fijación mediante Insertos Metálicos

La incompatibilidad entre servomotores detectada fue resuelta mediante el diseño de una tapa inferior personalizada para el nuevo servomotor. La nueva pieza desarrollada fue concebida bajo el criterio de incorporación de insertos metálicos roscados de 2 mm y 3 mm con el fin de generar nuevos puntos de anclaje compatibles con el diseño del chasis original. Adicionalmente, entre los otros beneficios que esta modificación permitió solucionar se encuentran:

- Incremento de la longitud efectiva de enroscado.
- Mejora de la capacidad de transferencia de carga.
- Reducción del desgaste de la carcasa plástica.
- Facil desmontaje para mantenimiento.

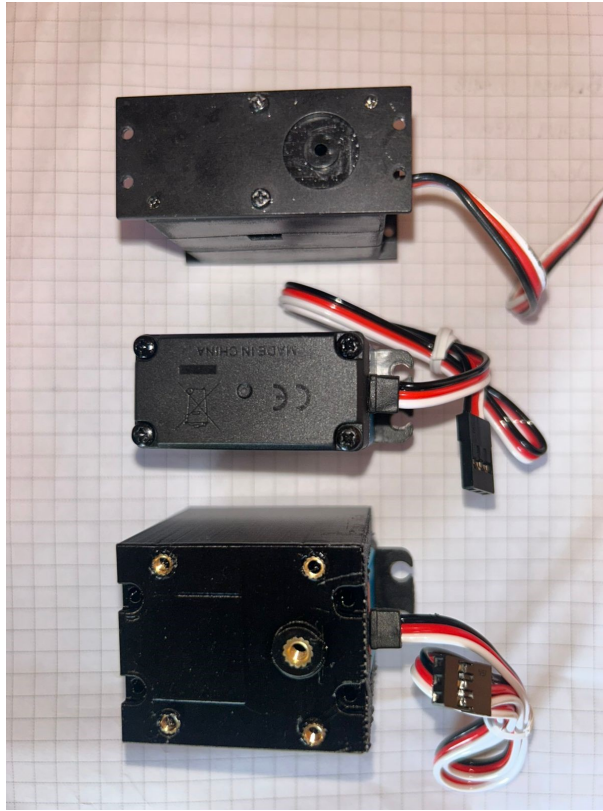


Figura 4. Vista superior y lateral comparativa de los servomotores

### VI-D2.3 Rediseño Estructural del Chasis

La modificación del sistema de fijación del chasis representó una reconsideración del diseño estructural original del robot humanoide Super Anthony. La adaptación del chasis a la nueva geometría de los servomotores y la ubicación de los insertos fue un trabajo que implicó el modelado CAD para garantizar una coherencia entre la alineación axial, distribución uniforme de cargas, compatibilidad con placas estructurales de 1.5 mm y conservación del espacio de configuración original. Desde el punto de vista de ingeniería de diseño, esta decisión mejora la mantenibilidad, escalabilidad y sostenibilidad del sistema, transformando una limitación crítica en una ventaja técnica para la facilidad de reemplazo y reducción del riesgo operativo ante fallas mecánicas.

### VI-D2.4 Modelado CAD de los Nuevos Elementos Estructurales

Como etapa posterior al levantamiento, se toma la información recopilada como base para el desarrollo de nuevos modelos CAD de los elementos estructurales necesarios para alojar servomotores comerciales, respetando:

- Los ejes de rotación originales.

- Los grados de libertad existentes.
- La distribución de masas del sistema.

El rediseño es validado por simulaciones estructurales por elementos finitos (FEA) en el cual, se evalúan esfuerzos, deformaciones y concentraciones de tensión bajo cargas representativas.

### VI-D3. Intervenciones Técnicas y Fabricación

El desarrollo de la repotenciación del robot humanoide Super Anthony ha sido dividido en tres etapas técnicas abarcando tanto el plano mecánico como electrónico.

En primer lugar, el reemplazo de los servomotores deteriorados ha sido realizado por una versión que compita en cuanto a potencia, velocidad de respuesta y precisión, permitiendo otorgarle al androide su original desempeño funcional. Cabe mencionar la compatibilidad obligatoria que debía existir entre la arquitectura del control existente y los actuadores de reemplazo para una gestión eficiente del cableado y las comunicaciones. Para garantizar dicha compatibilidad, se ha empleado como referencia el mapa de distribución de servomotores y pines de control del robot, el cual establece la relación directa entre cada actuador y la articulación correspondiente. La Figura 5 permitió usar este mapeo como un manual, constituyéndose como una herramienta clave durante el proceso de integración mecánica, ya que sirvió de guía en la canalización del cableado de los servomotores sin intervenir en la electrónica original del sistema.

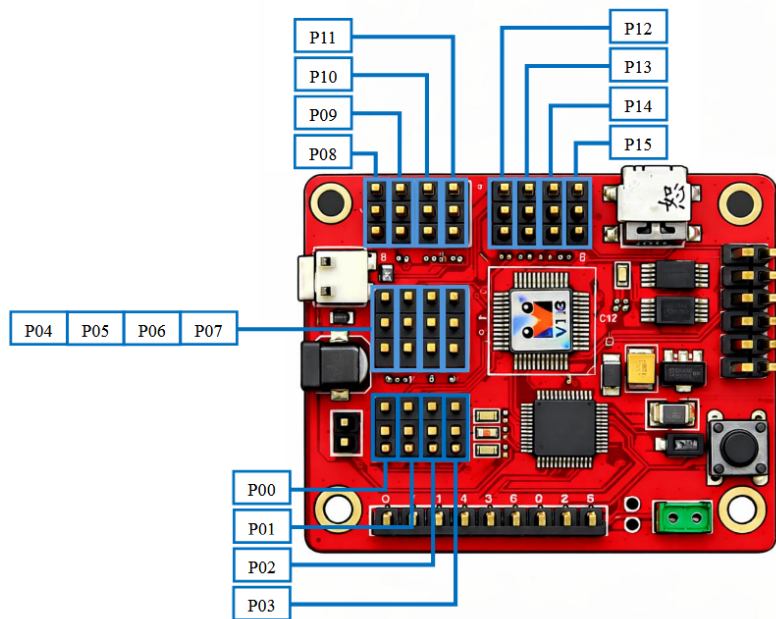


Figura 5. Distribución de pines y placa de control

En segundo lugar, se llevó a cabo el rediseño y fabricación de los elementos estructurales que satisfagan la geometría estructural de los nuevos servomotores en su acoplamiento con el chasis del robot. Estas piezas incluyeron soportes, acoples y componentes auxiliares, cuyo diseño nació del uso de herramientas CAD en el que, al pertenecer a una repotenciación conservadora, se obtuvo como principal condición el respeto de la geometría original de las

articulaciones y los ejes de rotación existentes. Durante esta etapa de validación estructural preliminar se empleó la fabricación aditiva utilizando material PLA, seleccionado por su facilidad de manufactura, bajo costo, rapidez de iteración y basta rigidez en pruebas funcionales controladas. De este modo, el material empleado no representa la versión final del chasis, sino una solución técnica apropiada para la primera etapa de la repotenciación mecánica.

Finalmente, una vez fabricados los componentes estructurales, se procedió a la validación del diseño mediante el ensamblaje, verificando la correcta alineación de las partes, el adecuado par de apriete en las uniones y la integración física de los servomotores en sus respectivas articulaciones. Sumado a esta tercera etapa de desarrollo, se evaluó el sistema a través de la ejecución de rutinas dinámicas de locomoción y combate.

#### *VI-D4. Evaluación Final basada en Rutinas Dinámicas*

El proceso de evaluación culmina con la validación del sistema hacia la funcionalidad móvil a través de la ejecución de las rutinas predeterminadas de locomoción y combate. Se efectuó una verificación de desplazamientos hacia adelante, hacia atrás, laterales, giros sobre eje y golpe tipo uppercut, los cuales fueron ejecutados de forma secuencial. En estos, se buscó comprobar la fluidez, capacidad de equilibrio dinámico, coordinación entre extremidades y recuperación ante perturbaciones menores. El robot humanoide Super Anthony es reconocido por la capacidad de fuerza de sus servomotores de alto torque, por esta razón, se realizó una evaluación de las maniobras ofensivas y defensivas. La ejecución de rutinas de combate permitieron la visualización del tiempo de reacción, potencia y firmeza de los golpes, y la capacidad de resistencia mecánica como comprobación funcional del chasis y actuadores.

Los resultados permitirán determinar si el proceso de repotenciación logró restaurar la operatividad del robot humanoide, y si es capaz de ejecutar sus funciones básicas con eficiencia y fiabilidad.

#### *VI-D5. Diagrama de Flujo*

De esta manera, se estableció el correcto funcionamiento y desempeño del robot humanoide Super Anthony bajo condiciones controladas y decisiones preprogramadas. Para representación de este proceso, se presenta un diagrama de flujo donde se describe la secuencia operativa desde el encendido del sistema hasta la ejecución de respuestas motrices. Cabe recalcar que el dispositivo es plenamente controlado de manera manual o programada por lo que, no es capaz de tomar decisiones de manera autónoma.

1. **Inicio del sistema:** El proceso comienza con el encendido manual del robot en el que se activan los motores, permitiendo que el robot adquiriera una posición rígida inicial.
2. **Ejecución de movimientos:** Los movimientos son ejecutados mediante el mando manual de control por lo que, las decisiones son tomadas por el operador y controladas en tiempo real mediante el joystick direccional, flechas de avance y ejecución de movimientos como protección y defensa mediante los botones lateral superiores “L” y “R”.
3. **Fin del ciclo:** : El robot adopta la posición rígida inicial hasta la recepción de una nueva orden o el apagado manual.

A continuación, en la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al comportamiento funcional del robot humanoide Super Anthony durante sus rutinas de locomoción, ataque y defensa. Este esquema lógico permite visualizar el proceso de decisión que sigue el sistema embebido del robot en condiciones de prueba o competencia:

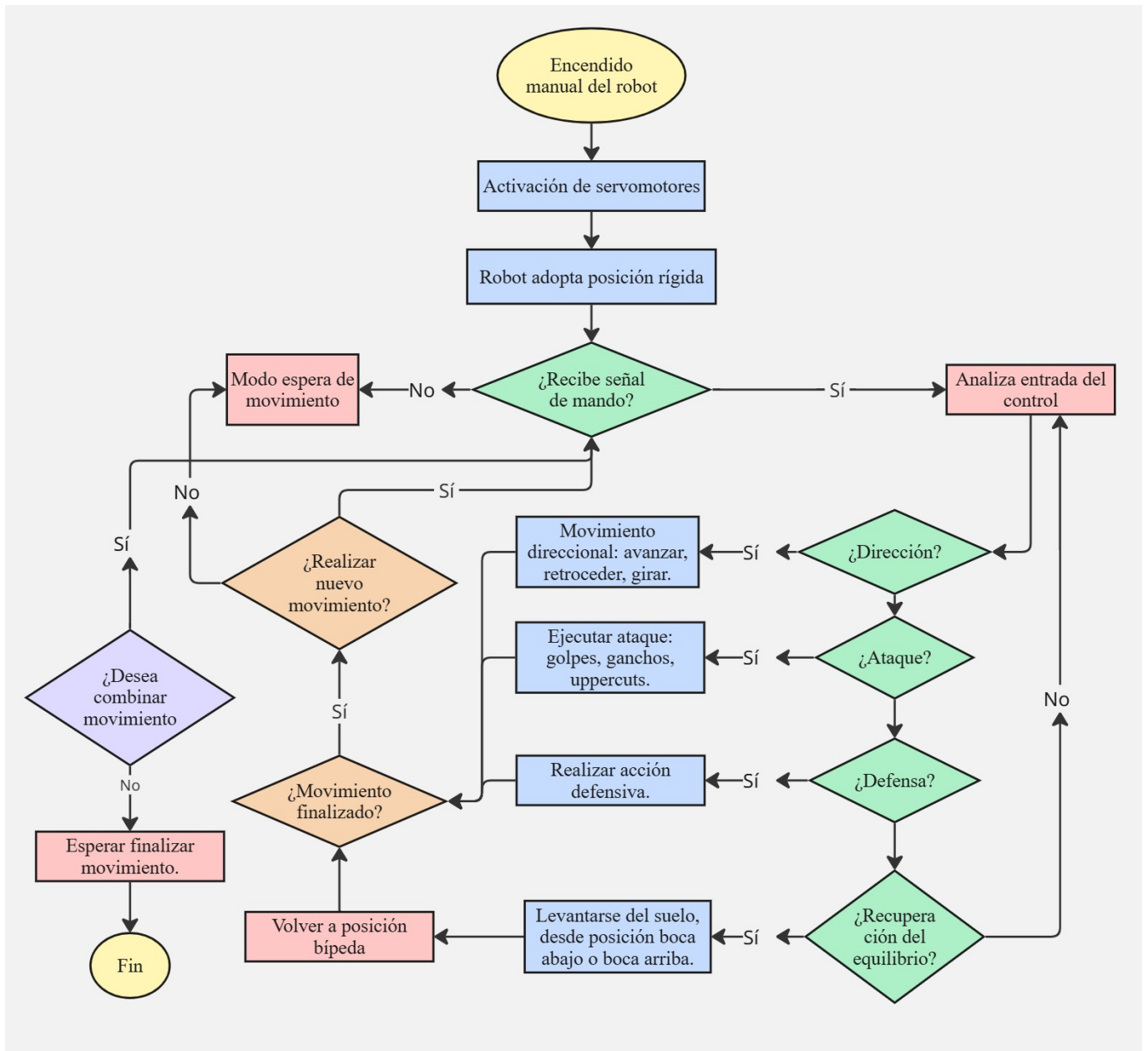


Figura 6. Diagrama de Flujo del robot humanoide Super Anthony elaborado por autores.

## VI-E. Métodos de Evaluación del Desempeño Mecánico

### VI-E1. Metodología de Evaluación de Estabilidad del Robot Humanoide

#### VI-E1.1 Estabilidad Estática

La estabilidad estática de un robot humanoide es dada por su capacidad de mantenerse en equilibrio al conservar una posición de reposo. En la perspectiva mecánica, este criterio se da por satisfecho cuando la proyección vertical del centro de masa del robot no sobresale los límites de su polígono de soporte generado por las superficies de contacto del pie con el suelo.

##### VI-E1.1.1 Definición de Variables para la Evaluación de la Estabilidad Estática

El análisis de la estabilidad estática del robot humanoide se basa en la determinación del centro de Masa global del sistema en relación con el polígono de soporte. Por esto, se definen las siguientes variables:

- $m_i$ : masa del componente  $i$ .
- $x_i, y_i, z_i$ : coordenadas del centro de masa del componente  $i$ .
- $M$ : masa total del sistema.
- $(x_{\text{CoM}}, y_{\text{CoM}}, z_{\text{CoM}})$ : coordenadas del centro de masa global.
- $L$ : longitud total del polígono de soporte en el eje  $X$ .
- $W$ : ancho total del polígono de soporte en el eje  $Y$ .
- $SM$ : margen de estabilidad.
- $M_{\text{norm}}$ : margen de estabilidad normalizado.

##### VI-E1.1.2 Definición de Ecuaciones para la Evaluación de Estabilidad Estática

###### a) Masa total del sistema

La masa total del robot se define como:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

###### b) Centro de masa global

El centro de masa global del sistema se determina mediante el promedio ponderado por masa:

$$x_{\text{CoM}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2)$$

$$y_{\text{CoM}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

$$z_{\text{CoM}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (4)$$

En forma vectorial:

$$\mathbf{r}_{\text{CoM}} = (x_{\text{CoM}}, y_{\text{CoM}}, z_{\text{CoM}}) \quad (5)$$

c) *Proyección del centro de masa*

Se considera la proyección del centro de masa sobre el plano horizontal de apoyo como:

$$\mathbf{p}_{\text{CoM}} = (x_{\text{CoM}}, y_{\text{CoM}}). \quad (6)$$

d) *Condición geométrica de estabilidad*

El polígono de soporte se aproxima como un rectángulo definido por:

$$X_{\text{mín}} = -\frac{L}{2}, \quad X_{\text{máx}} = \frac{L}{2} \quad (7)$$

$$Y_{\text{mín}} = -\frac{W}{2}, \quad Y_{\text{máx}} = \frac{W}{2} \quad (8)$$

La condición de estabilidad estática se cumple si:

$$X_{\text{mín}} \leq x_{\text{CoM}} \leq X_{\text{máx}} \quad (9)$$

$$Y_{\text{mín}} \leq y_{\text{CoM}} \leq Y_{\text{máx}} \quad (10)$$

e) *Distancia radial respecto al centro geométrico*

Se define como la distancia horizontal del centro de masa respecto al origen del sistema.

$$d_{xy} = \sqrt{x_{\text{CoM}}^2 + y_{\text{CoM}}^2} \quad (11)$$

f) *Margen de estabilidad*

Se define como la distancia mínima entre la proyección del centro de masa y el borde más cercano del polígono de soporte. Este valor permite observar el límite crítico previo a la pérdida de equilibrio.

$$SM = \min(|X_{\text{máx}} - x_{\text{CoM}}|, |x_{\text{CoM}} - X_{\text{mín}}|, |Y_{\text{máx}} - y_{\text{CoM}}|, |y_{\text{CoM}} - Y_{\text{mín}}|) \quad (12)$$

g) *Margen normalizado*

En este margen, los valores cercanos a 1 indican una configuración estable y centrada, mientras que valores cercanos a 0 indican proximidad crítica al borde del polígono de soporte.

$$M_{\text{norm}} = \frac{SM}{\min\left(\frac{L}{2}, \frac{W}{2}\right)} \quad (13)$$

### VI-E1.1.3 Procedimiento de Obtención del Centro de Masa mediante Simulación CAD

Dado que el rediseño de las piezas ha sido desarrollado en el entorno de simulación CAD SolidWorks, se hace provecho de esta herramienta para el cálculo del centro de masa mediante el análisis de propiedades de masa integradas en el entorno de diseño. Para esto, se ha empleado el procedimiento descrito a continuación:

1. Modelado completo del ensamblaje estructural y funcional.
2. Asignación de materiales con sus respectivas densidades físicas.
3. Definición del sistema de coordenadas global ubicado en el centro geométrico del polígono de soporte con eje  $Z$  vertical.
4. Configuración de postura bipodal estática como condición base.
5. Extracción de la masa total y del vector posición del centro de masa.

Para la determinación del polígono de soporte en postura bipodal estática, se realizó el registro geométrico mostrado en la Tabla IV.

Tabla IV  
REGISTRO DE GEOMETRÍA DEL SOPORTE EN POSTURA BIPODAL ESTÁTICA

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Largo pie derecho	126.00	mm
Ancho pie derecho	81.54	mm
Largo pie izquierdo	126.00	mm
Ancho pie izquierdo	81.54	mm
Separación entre pies	95.00	mm

Las propiedades de masa y centro de masa global fueron obtenidas mediante la herramienta “Mass Properties” del software SolidWorks, empleando un sistema de referencia ubicado en el centro geométrico del polígono de soporte.

Tabla V  
REGISTRO DEL CENTRO DE MASA GLOBAL OBTENIDO MEDIANTE SOLIDWORKS

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa total $M$	1.487	kg
$x_{CoM}$	5.62	mm
$y_{CoM}$	-0.24	mm
$z_{CoM}$	143.08	mm

#### VI-E1.1.4 Definición del Polígono de Soporte

La geometría de los pies del robot fue el elemento base tomado para la definición del polígono de soporte del robot. De esta manera, se consideró la envolvente convexa generada por los contornos externos de ambos pies en proyección con el plano del suelo. Las coordenadas de los vértices del polígono corresponden a valores extraídos directamente del modelo CAD, de tal manera que exista consistencia y coherencia con el sistema de referencia utilizado para el cálculo del centro de masa.

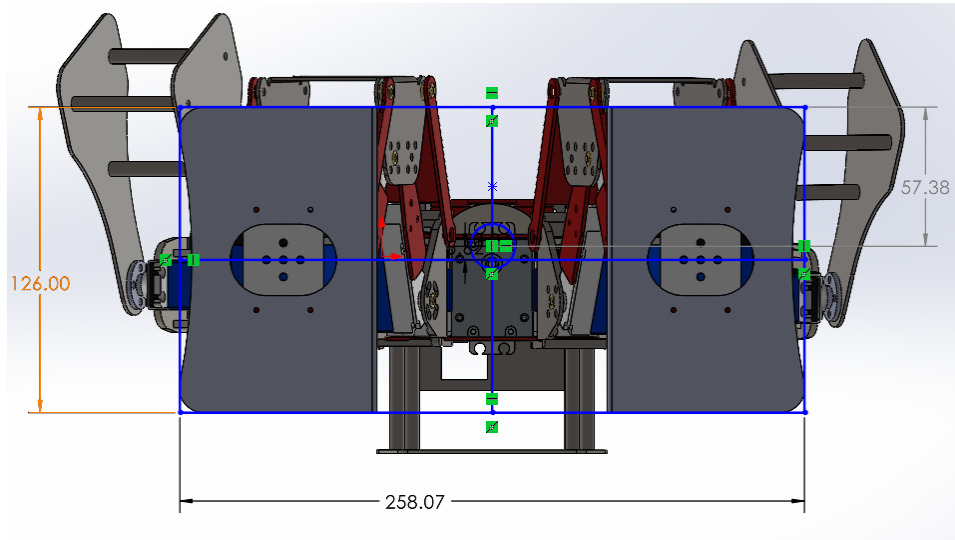


Figura 7. Proyección del centro de masa sobre el plano horizontal y delimitación del polígono de soporte en postura bipodal estática.

#### VI-E1.1.5 Criterio de Evaluación de la Estabilidad

Tras la determinación del centro de masa del robot, se ha proyectado su posición sobre el plano del suelo con el fin de obtener el punto  $\mathbf{r}_{CoM} = (x_{CoM}, y_{CoM})$ . Para esto, se eliminan las componentes verticales del vector posición, variable que permite establecer el siguiente criterio de estabilidad.

- El robot se considera estable cuando la proyección del centro de masa se encuentra dentro de los límites del polígono de soporte establecido.
- El robot se considera inestable cuando la proyección del centro de masa se encuentra fuera de los límites del polígono de soporte establecido, condición que se traduce como la existencia de momentos de desequilibrio alrededor de los bordes del polígono.

Adicionalmente, se evalúa el margen de estabilidad considerando la distancia mínima entre la proyección del centro de masa y el límite o borde más cercano al polígono de soporte, permitiendo evaluar el nivel de robustez del equilibrio ante perturbaciones externas.

Tabla VI  
CRITERIOS DE VALIDACIÓN PARA LA ESTABILIDAD ESTÁTICA

Parámetro	Criterio de aceptación
Proyección del CoM	$\mathbf{p}_{CoM} \in \mathcal{P}$ (dentro del polígono de soporte)
Margen mínimo de estabilidad ( $SM$ )	$SM > 0$
Margen normalizado ( $M_{norm}$ )	$0 < M_{norm} \leq 1$
Centro de masa en eje longitudinal	$ x_{CoM}  < \frac{L}{2}$
Centro de masa en eje transversal	$ y_{CoM}  < \frac{W}{2}$

## VI-E1.2 Evaluación Experimental de la Estabilidad Dinámica

### VI-E1.2.1 Enfoque Dinámico aplicado al Robot Humanoide de Combate

Cuando se trata de la evaluación de robots humanoides, conformarse con un análisis estático no es apuntar a resultados realistas puesto que la estabilidad dinámica no solo depende de la correcta ubicación de su centro de masa, sino también de su capacidad de equilibrio ante perturbaciones externas, movimientos rápidos, cambios de apoyo, rotaciones torso y desplazamientos bruscos generados. A diferencia de la estabilidad estática, cuyo análisis es fundamentado en la ubicación geométrica del centro de masa dentro de las delimitaciones del polígono de soporte, la estabilidad dinámica considera variables cinemáticas y temporales asociadas al desplazamiento del sistema.

Las maniobras de combate exponen al sistema bípedo a transferencias rápidas de peso entre extremidades, movimientos angulares amplios de cadera y torso, aceleraciones repentinas y momentos de inercia en posición de defensa. Dado que el robot no dispone de sensor alguno que permita la medición del Punto de Momento Cero (ZMP), la evaluación se realizó mediante indicadores cinemáticos bajo condiciones experimentales controladas que han sido interpretadas mediante el software aplicativo Kinovea.

Por esta razón, la validación dinámica del robot humanoide Super Anthony ha sido evaluada mediante cuatro rutinas movimiento:

- Marcha lineal
- Movimiento rotacional
- Desplazamiento lateral
- Uppercut

#### V-E1.2.1.1. Evaluación de la Marcha Lineal

El ensayo de marcha lineal tuvo como finalidad el análisis de la estabilidad dinámica longitudinal del robot durante el desplazamiento rectilíneo, mismo que representa una condición fundamental de locomoción bípeda, permitiendo evaluar la capacidad de dirección, velocidad y equilibrio global. Para esto se realizaron cálculos de la velocidad lineal  $v$  y la tasa de deriva angular  $\dot{\phi}$  a partir de las mediciones de distancia  $d$ , tiempo  $t$  y desviación angular  $\Delta\phi$ .

##### 1. Definición de variables y ecuaciones empleadas

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de estas variables se definen a continuación:

###### a) Velocidad lineal por repetición

La velocidad lineal de una repetición se calcula como:

$$v_i = \frac{d_i}{t_i} \quad (14)$$

###### b) Tasa de deriva angular por repetición

La tasa de deriva angular que corresponde a la velocidad angular de desviación del eje corporal, se calcula como:

$$\dot{\phi}_i = \frac{\Delta\phi_i}{t_i} \quad (15)$$

c) *Promedio global*

Cuando los tiempos por repetición varían, la velocidad global y la deriva global se estiman mejor mediante cocientes de sumas:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (16)$$

$$\bar{\dot{\phi}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta\phi_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (17)$$

d) *Promedio de deriva por magnitud*

En el interés de comparar únicamente el *grado de desviación* sin importar el sentido (izquierda/derecha), se utiliza el promedio de la magnitud:

$$\overline{|\Delta\phi|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta\phi_i| \quad (18)$$

Se adopta la convención: izquierda → signo negativo; derecha → signo positivo.

## 2. *Indicadores derivados de estabilidad direccional*

Adicionalmente, se definieron indicadores derivados de la estabilidad direccional que permiten la cuantificación del control direccional del sistema bajo condiciones de desplazamiento.

a) *Tasa de deriva angular*

El parámetro de tasa de deriva angular permite evaluar la rapidez con la que el sistema pierde alineación direccional.

$$\omega_\phi = \frac{|\Delta\phi|}{t_{\text{prom}}} \quad (19)$$

b) *Índice de asimetría direccional*

Permite el cálculo de la comparación del comportamiento angular del sistema en desplazamientos hacia adelante y hacia atrás. Los sistemas cuyos valores se encuentran cercanos a la unidad indican simetría direccional y un mayor nivel de coherencia inercial.

$$S_\phi = \frac{|\Delta\phi|_{\text{atrás}}}{|\Delta\phi|_{\text{adelante}}} \quad (20)$$

### 3. Registro experimental de la marcha lineal

#### a) Marcha del Robot Original evaluada en tres repeticiones

Para la evaluación experimental de locomoción se registraron, en cada repetición mediciones directas de la distancia recorrida  $d$  y el tiempo de ejecución  $t$ . A partir de estos valores se derivaron la velocidad media  $v = \frac{d}{t}$  y el cambio angular  $\Delta\phi$  para ser interpretado como un indicador de deriva direccional. La Tabla VII registra las mediciones del ensayo de la marcha lineal en sentido de retroceso. Se han realizado tres repeticiones en las cuales, se reporta un promedio simple de para observar tendencia entre repeticiones, y un cálculo global (total/total) para representar el desempeño agregado del robot.

Tabla VII  
ROBOT ORIGINAL: MARCHA HACIA ATRÁS (POR REPETICIÓN)

Rep.	Distancia $d$	Tiempo $t$ (s)	Velocidad $v = d/t$	$\Delta\phi$ (°)	$\dot{\phi} = \Delta\phi/t$ (°/s)
1	27.23	1.33	20.47	-8 (izq)	-6.02
2	23.04	1.33	17.32	+15 (der)	11.28
3	25.45	1.33	19.14	-14 (izq)	-10.53
Promedio simple			18.98	-2.33	-1.75
Global (total/total)			18.98	-1.75	-1.75

La Tabla VIII registra valores que corresponden a las variables de medición antes establecidas. Su ensayo se enfoca en la marcha lineal en sentido de avance, reportando promedios globales de cambio angular y tasa de deriva angular.

Tabla VIII  
ROBOT ORIGINAL: MARCHA HACIA ADELANTE (POR REPETICIÓN)

Rep.	Distancia $d$	Tiempo $t$ (s)	Velocidad $v = d/t$	$\Delta\phi$ (°)	$\dot{\phi} = \Delta\phi/t$ (°/s)
1	24.27	1.36	17.85	+22 (der)	16.18
2	25.43	1.36	18.70	+21 (der)	15.44
3	23.67	1.36	17.40	+24 (der)	17.65
Promedio simple			17.98	+22.33	16.42
Global (total/total)			17.98	+16.42	16.42

En la Figura 8 se observa la trayectoria de desplazamiento del robot original, analizada mediante el software Kinovea. Se evidencia una mayor inclinación respecto al eje longitudinal de referencia, con variaciones angulares más pronunciadas y desviación lateral durante el avance. Las mediciones segmentarias (24.72 cm y 25.43 cm) reflejan una mayor dispersión en la trayectoria, lo que indica un patrón de marcha menos alineado y menor estabilidad dinámica, afectando la orientación frontal y la eficiencia durante la locomoción.

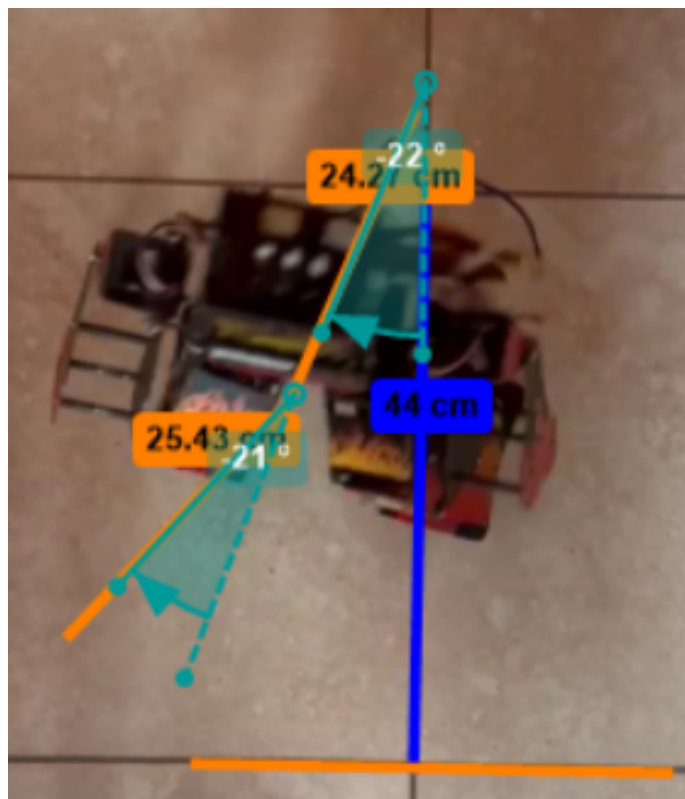


Figura 8. Análisis de marcha del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

*b) Marcha del Robot Repotenciado evaluado en tres y cinco repeticiones*

La evaluación de la marcha lineal en sentido de retroceso de la versión repotenciada del robot humanoide Super Anthony fue construida mediante tres repeticiones del mismo movimiento. La tabla presenta los valores individuales por repetición, así como un promedio simple y un cálculo global.

Tabla IX  
ROBOT REPOTENCIADO: MARCHA HACIA ATRÁS (POR REPETICIÓN)

Rep.	Distancia $d$	Tiempo $t$ (s)	Velocidad $v = d/t$	$\Delta\phi$ (°)	$\dot{\phi} = \Delta\phi/t$ (°/s)
1	17.84	1.30	13.72	+10 (der)	7.69
2	15.24	1.44	10.58	+12 (der)	8.33
3	15.90	1.33	11.95	+13 (der)	9.77
Promedio simple			12.08	+11.67	8.60 <sup>1</sup>
Global (total/total)			12.04	+11.67	8.60

De manera análoga, la marcha hacia adelante se evaluó registrando valores de distancia recorrida, tiempo de ejecución y cambio angular respecto al eje longitudinal. Asimismo, los valores reportados incluyen mediciones por repetición y los parámetros globales derivados.

<sup>1</sup>Para la tasa promedio se usó el cociente global  $\sum \Delta\phi / \sum t$ .

Tabla X  
ROBOT REPOTENCIADO: MARCHA HACIA ADELANTE (POR REPETICIÓN)

Rep.	Distancia $d$	Tiempo $t$ (s)	Velocidad $v = d/t$	$\Delta\phi$ (°)	$\dot{\phi} = \Delta\phi/t$ (°/s)
1	15.85	1.37	11.57	-13 (izq)	-9.49
2	16.00	1.37	11.68	-13 (izq)	-9.49
3	17.00	1.37	12.41	+24 (der)	17.52
4	15.63	1.37	11.41	+19 (der)	13.87
5	16.12	1.37	11.77	—	—
Promedio simple (velocidad)			11.77	—	—
Deriva promedio <sup>2</sup>			—	17.25	12.59

En la Figura 9 podemos observar el análisis de marcha del robot repotenciado mediante el software Kinovea, donde se observa una trayectoria de avance más alineada con el eje longitudinal de referencia en comparación al original, además de menor desviación lateral y distribución segmentaria más simétrica, evidenciando mayor estabilidad dinámica y control direccional.

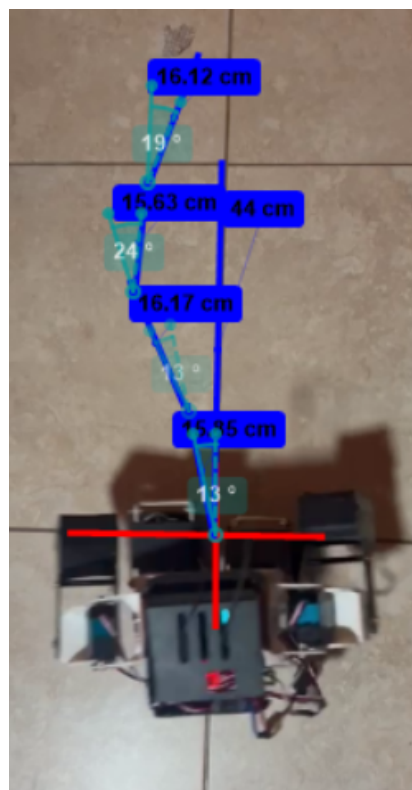


Figura 9. Análisis de marcha del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

#### 4. *Parámetros globales de desempeño dinámico*

A partir de las mediciones registradas por repetición, se calcularon los parámetros globales que representan el comportamiento dinámico del sistema durante la ejecución de la marcha lineal. Dichos parámetros son calculados tras el procesamiento de los datos experimentales y constituyen las variables a analizar durante el estudio comparativo entre el robot humanoide original y su versión repotenciada.

### V-E1.2.1.2. Evaluación del Movimiento Rotacional

El ensayo de movimiento rotacional consistió en la secuencia de giros consecutivos en sentido horario y antihorario con el fin de caracterizar el comportamiento rotacional del robot y su capacidad de reorientación. En cada movimiento  $i$  se registraron el incremento angular  $\Delta\theta_i$  y el tiempo de ejecución  $t_i$  para el cálculo de indicadores globales.

#### 1. Definición de variables y ecuaciones empleadas

Las ecuaciones empleadas durante la evaluación del movimiento rotacional del robot humanoide son las siguientes:

##### a) Rotación total

La rotación total por repetición se calcula como:

$$\Theta_{tot} = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i \quad (21)$$

##### b) Tiempo total

El tiempo total por repetición empleado en completar la secuencia de giro se determinó sumando los tiempos individuales por movimiento:

$$T_{tot} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (22)$$

##### c) Velocidad angular instantánea

La velocidad angular promedio global por repetición se calcula como:

$$\bar{\omega} = \frac{\Theta_{tot}}{T_{tot}} \quad (23)$$

##### d) Promedio entre repeticiones

Finalmente, se calculó el promedio general de rotación alcanzada y de velocidad angular promedio, utilizando el promedio aritmético entre repeticiones.

##### e) Error angular respecto al objetivo nominal

El error angular respecto al objetivo nominal se calcula como:

$$e_{\theta} = |\Theta_{tot} - \Theta_{ref}| \quad (24)$$

#### 2. Registro experimental del movimiento rotacional

La evaluación experimental del movimiento rotacional fue realizado mediante el registro de incrementos angulares consecutivos  $\Delta\theta_i$ . Las tablas correspondientes presentan los datos organizados por repetición y por movimiento. Sin embargo, en cada repetición, el número de movimientos necesarios para completar la rotación puede variar entre versiones.

La Tabla XI corresponde al movimiento rotacional de la versión original del robot humanoide Super Anthony

en sentido antihorario o izquierdo. La cantidad de movimientos por repetición consiste en los movimientos que le toma al robot llegar al ángulo final de 180°.

Tabla XI  
ROBOT ORIGINAL: ROTACIÓN ANTIHORARIA

Repetición	Movimiento	$\Delta\theta_i$ (°)	$t_i$ (s)	$\omega_i$ (°/s)
Rep. 1	1	76	0.30	253.33
	2	56	0.30	186.67
	3	54	0.30	180.00
Rep. 2	1	74	0.29	255.17
	2	58	0.31	187.10
	3	53	0.30	176.67
Rep. 3	1	77	0.30	256.67
	2	55	0.29	189.66
	3	54	0.31	174.19

En la Figura 10 se presenta el análisis de rotación del robot original, donde se evidencian variaciones angulares considerablemente mayores respecto a los ejes de referencia. Los ángulos registrados (76°, 56° y 54°) reflejan una dispersión amplia durante el giro, indicando una rotación menos contenida y con mayor desplazamiento del cuerpo fuera del eje central. Esta condición implica un incremento en la inestabilidad dinámica, mayor exigencia correctiva de los actuadores y una posible pérdida temporal de alineación frontal frente al oponente.



Figura 10. Análisis del movimiento de rotación del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

De manera análoga, la versión original en sentido horario expone una capacidad de incremento de giro en tres pasos para alcanzar el límite angular de 180°. Esta segmentación permite analizar la distribución del desplazamiento angular en pasos discretos.

Tabla XII  
ROBOT ORIGINAL: ROTACIÓN HORARIA

Repetición	Movimiento	$\Delta\theta_i$ (°)	$t_i$ (s)	$\omega_i$ (°/s)
Rep. 1	1	78	0.29	268.97
	2	60	0.31	193.55
	3	52	0.30	173.33
Rep. 2	1	80	0.30	266.67
	2	58	0.29	200.00
	3	52	0.31	167.74
Rep. 3	1	79	0.30	263.33
	2	59	0.31	190.32
	3	54	0.29	186.21

En contraste, el ensayo de evaluación del movimiento rotacional del robot repotenciado en sentido antihorario expone un total de cuatro repeticiones para alcanzar el límite angular de 90°. Los valores registrados en estas tablas constituyen la base para el cálculo de la rotación total  $\Theta_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i$ , el tiempo total  $T_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n t_i$  y la velocidad angular promedio global  $\bar{\omega} = \frac{\Theta_{\text{tot}}}{T_{\text{tot}}}$ .

Tabla XIII  
ROBOT REPOTENCIADO: ROTACIÓN ANTIHORARIA

Repetición	Movimiento	$\Delta\theta_i$ (°)	$t_i$ (s)	$\omega_i$ (°/s)
Rep. 1	1	29	0.32	90.63
	2	24	0.32	75.00
	3	23	0.32	71.88
	4	14	0.32	43.75
Rep. 2	1	28	0.31	90.32
	2	23	0.33	69.70
	3	21	0.32	65.63
	4	16	0.32	50.00
Rep. 3	1	30	0.32	93.75
	2	25	0.31	80.65
	3	22	0.33	66.67
	4	15	0.32	46.88

La Tabla XIV, utilizando el mismo límite angular de 90°, revela 5 incrementos de paso por repetición. Esto confirma la variabilidad en el número de movimientos necesarios para completar la rotación puede variar entre versiones.

Tabla XIV  
ROBOT REPOTENCIADO: ROTACIÓN HORARIA

Repetición	Movimiento	$\Delta\theta_i$ (°)	$t_i$ (s)	$\omega_i$ (°/s)
Rep. 1	1	18	0.31	58.06
	2	17	0.33	51.52
	3	18	0.32	56.25
	4	17	0.32	53.13
	5	18	0.32	56.25
Rep. 2	1	20	0.32	62.50
	2	18	0.31	58.06
	3	17	0.33	51.52
	4	18	0.32	56.25
	5	17	0.32	53.13
Rep. 3	1	19	0.32	59.38
	2	18	0.31	58.06
	3	17	0.33	51.52
	4	19	0.32	59.38
	5	19	0.32	59.38

En la Figura 11 se observa el análisis de rotación del robot repotenciado, evaluado mediante el software Kinovea. La trayectoria angular presenta una dispersión reducida respecto al eje vertical de referencia, evidenciando un control rotacional más contenido. Los ángulos medidos muestran variaciones moderadas, lo que indica que el robot ejecuta el giro con menor desplazamiento lateral del centro de masa. Esta característica sugiere una rotación más estable y mejor controlada, reduciendo el riesgo de desbalance y permitiendo mantener orientación frontal más precisa durante la maniobra.

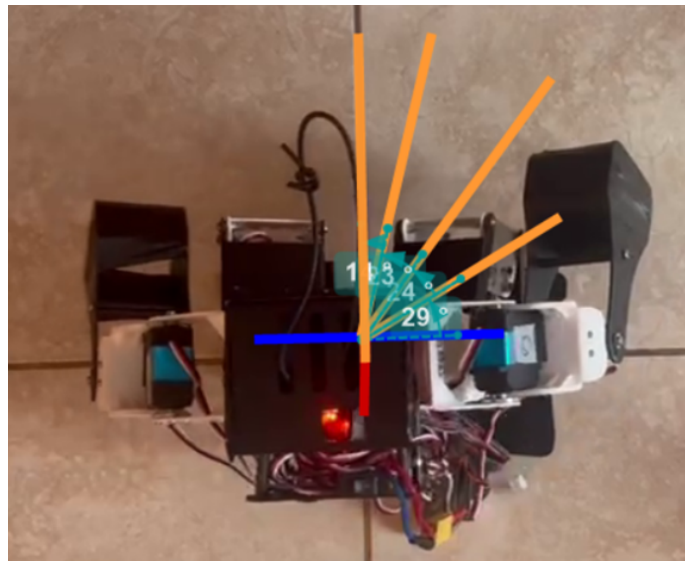


Figura 11. Análisis del movimiento de rotación del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

#### V-E1.2.1.3. Evaluación del Desplazamiento Lateral

El ensayo de desplazamiento lateral constituye una condición relevante dado que implica un cambio en el patrón de apoyo sin modificar el eje de orientación frontal del sistema. En términos dinámicos, el movimiento lateral

exige una redistribución transversal del centro de masa respecto al polígono de soporte, lo que expone al sistema a mayores exigencias de estabilidad estática y dinámica. A continuación, se definen parámetros globales equivalentes a los empleados en la marcha lineal.

### 1. Definición de variables

Permitiendo establecer un criterio comparativo homogéneo entre ambas condiciones de locomoción., los indicadores seleccionados fueron:

- Distancia promedio recorrida ( $d_{prom}$ )
- Tiempo promedio de ejecución ( $t_{prom}$ )
- Velocidad media ( $\bar{v}$ )

### 2. Registro experimental del desplazamiento lateral

La evaluación del desplazamiento lateral consistió en un conjunto de ensayos independientes hacia la derecha e izquierda tanto en la versión repotenciada como original. Cada repetición registra valores de distancia recorrida en centímetros y tiempo total de ejecución en segundos, a partir de los cuales se calculó la velocidad media.

La Tabla XV presenta registros experimentales por lado y por repetición, permitiendo caracterizar la respuesta cinemática del sistema ante movimientos transversales. El margen de distancia evaluado consiste en aproximadamente 40 cm, por lo que las repeticiones por lado observadas corresponden a las medidas independientes que se necesitan para llegar al margen establecido. Es decir, en desplazamiento lateral, la versión original realiza 3 pasos para alcanzar la distancia de 40 cm.

Tabla XV  
ENSAYOS DE DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL ROBOT ORIGINAL.

<b>Lado</b>	<b>Distancia (cm)</b>	<b>Tiempo (s)</b>	<b>Velocidad (cm/s)</b>
Derecha	14.62	0.50	29.24
Derecha	12.31	0.47	26.19
Derecha	13.58	0.48	28.29
Izquierda	16.93	0.48	35.27
Izquierda	10.39	0.47	22.11
Izquierda	14.02	0.50	28.04

En la Figura 12 correspondiente al robot original, analizada mediante el software Kinovea, se observa que el desplazamiento lateral recorrido es mayor en comparación con el robot repotenciado. La proyección del movimiento muestra una inclinación más amplia respecto al eje de referencia, evidenciando una mayor amplitud lateral durante la maniobra.

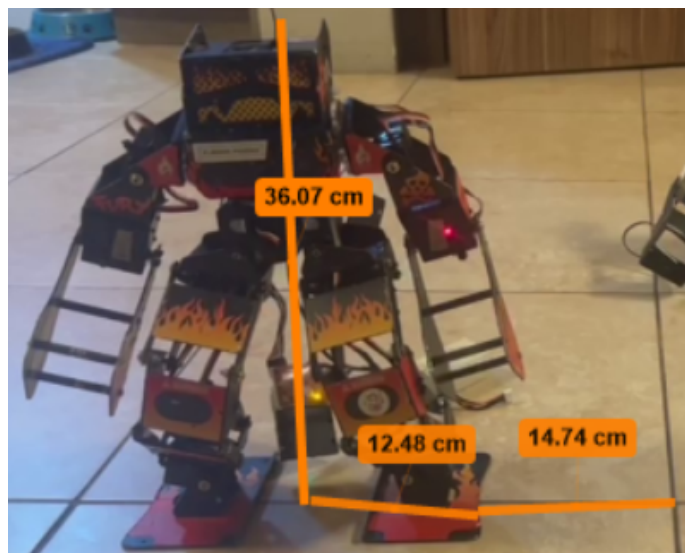


Figura 12. Análisis de desplazamiento lateral del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

Por otra parte, la versión repotenciada del robot humanoide alcanza la distancia deseada de 40 cm en 5 pasos. Este tipo de desplazamiento resulta relevante en la evaluación de estabilidad dinámica, ya que modifica la proyección lateral del centro de masa sin alterar la orientación frontal del robot.

Tabla XVI  
ENSAYOS DE DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL ROBOT REPOTENCIADO.

Lado	Distancia (cm)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
Derecha	5.32	0.46	11.57
Derecha	11.94	0.53	22.53
Derecha	7.33	0.50	14.66
Derecha	13.07	0.47	27.81
Derecha	12.79	0.47	27.21
Izquierda	7.85	0.43	18.26
Izquierda	7.85	0.46	17.07
Izquierda	6.22	0.43	14.47
Izquierda	11.26	0.49	22.98
Izquierda	13.03	0.53	24.58

En la Figura 13, podemos observar el análisis realizado sobre el desplazamiento lateral del robot repotenciado, el cual presenta un desplazamiento más contenido y alineado, reflejando un mejor control del movimiento transversal.

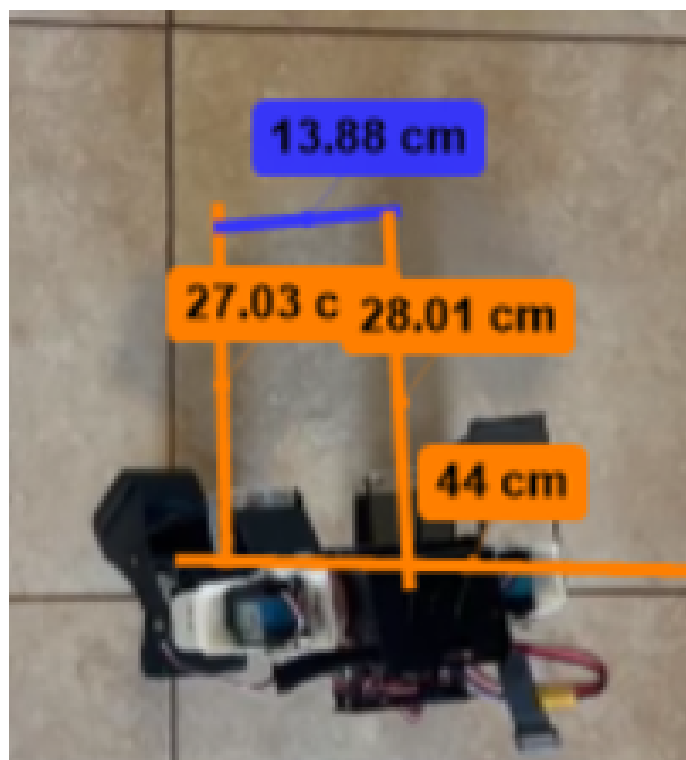


Figura 13. Análisis de desplazamiento lateral del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

#### V-E1.2.1.4. Evaluación del Movimiento Uppercut

El ensayo de evaluación del movimiento *uppercut* del robot humanoide Super Anthony fue desarrollado con el propósito de analizar el desempeño dinámico del robot durante una acción ofensiva vertical. La selección de este movimiento se debe a su alta exigencia dinámica, ya que implica aceleraciones rápidas del brazo, generación de momento angular y posible transferencia de cargas hacia la estructura del torso y la base de apoyo.

##### 1. Definición de variables

Para comparar el desempeño entre el robot original y el robot repotenciado, se evaluaron las siguientes variables cinemáticas del movimiento. *uppercut* donde:

- $t_{m\acute{a}x}$ , corresponde al tiempo transcurrido hasta alcanzar el punto máximo del golpe.
- $t_{total}$ , corresponde al tiempo total para completar el movimiento.
- $h_{m\acute{a}x}$ , se refiere a la altura máxima alcanzada por el puño.

##### 2. Definición de ecuaciones

El movimiento *uppercut* fue evaluado utilizando las mismas variables cinemáticas definidas previamente en la evaluación de movimientos dinámicos, incluyendo el tiempo total de ejecución ( $t_{total}$ ), el tiempo hasta el punto máximo ( $t_{max}$ ), el desplazamiento angular total ( $\Delta\theta$ ) y la velocidad angular promedio ( $\bar{\omega}$ ).

### 3. Registro experimental de mediciones

Para la evaluación del movimiento uppercut, se registraron valores de las variables cinemáticas del tiempo hasta el punto máximo, el tiempo total del movimiento y la altura máxima alcanzada. Las tablas exponen los valores promedio obtenidos para el lado izquierdo y derecho, tanto en la versión original como en la repotenciada.

Las variables seleccionadas en el estudio del movimiento uppercut se deben a que el uppercut constituye una acción dinámica que implica aceleraciones rápidas del miembro superior y transferencia de carga hacia el torso. De esta manera, las Tablas XVII y XVIII permiten evaluar la respuesta estructural del sistema y su coherencia cinemática bajo condiciones propias de combate.

Tabla XVII  
DATOS EXPERIMENTALES DEL ROBOT ORIGINAL PARA EL MOVIMIENTO UPPERCUT.

Variable	Uppercut Izquierdo	Uppercut Derecho
Tiempo hasta punto máximo, $t_{m\acute{a}x}$ (s)	0.52	0.47
Tiempo total del movimiento, $t_{total}$ (s)	0.83	0.90
Altura máxima, $h_{m\acute{a}x}$ (cm)	41.31	40.85

En la Figura 14 correspondiente al movimiento de uppercut del robot original, analizada mediante el software Kinovea, se observa una amplitud angular de 113°. Este valor refleja el rango máximo de elevación del brazo durante la ejecución del golpe. Aunque el movimiento alcanza un ángulo considerable, se aprecia una ligera variación en la trayectoria del eje corporal, lo que puede implicar una menor estabilidad durante la fase final del impacto.

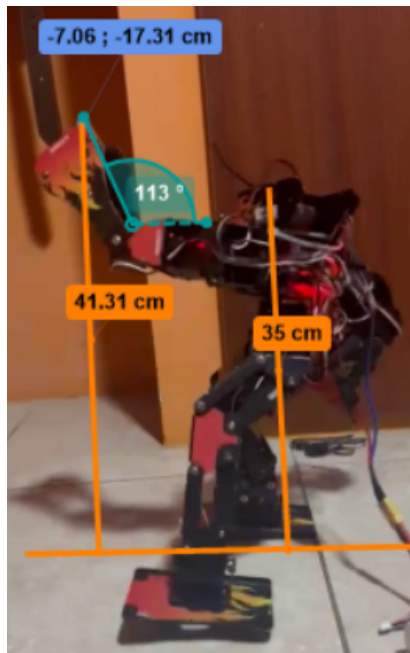


Figura 14. Análisis del uppercut del robot original mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

Tabla XVIII  
 DATOS EXPERIMENTALES DEL ROBOT REPOTENCIADO PARA EL MOVIMIENTO UPPERCUT.

Variable	Uppercut Izquierdo	Uppercut Derecho
Tiempo hasta punto máximo, $t_{m\acute{a}x}$ (s)	0.53	0.47
Tiempo total del movimiento, $t_{total}$ (s)	0.83	0.83
Altura máxima, $h_{m\acute{a}x}$ (cm)	40.08	40.84

En la Figura 15 correspondiente al movimiento de uppercut del robot repotenciado, evaluada mediante el software Kinovea, se registra una amplitud angular de  $117^\circ$ , superando ligeramente al modelo original. Este incremento en el rango de movimiento indica una mayor extensión del brazo durante el golpe, manteniendo una trayectoria más alineada del eje corporal. La ejecución del movimiento evidencia un mejor control estructural y estabilidad durante la maniobra.

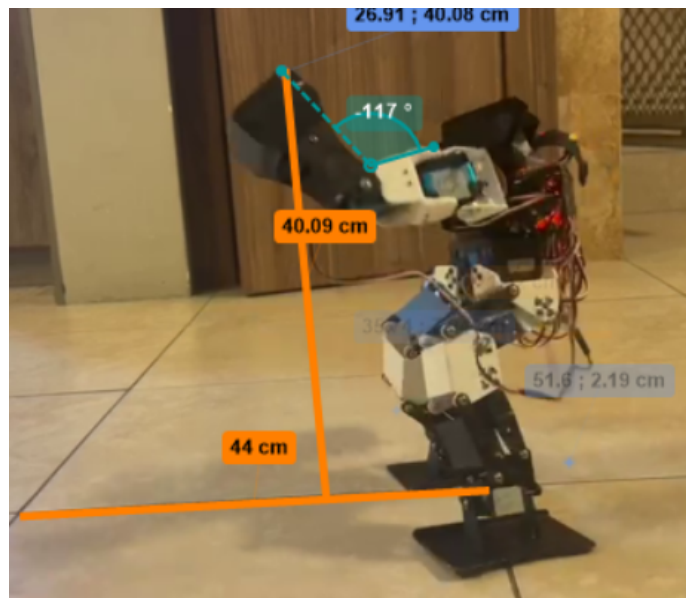


Figura 15. Análisis del uppercut del robot repotenciado mediante el software Kinovea. Elaborado por autores.

#### VI-E1.2.2 Criterios de Evaluación para Rutinas de Combate

Dado el carácter ofensivo del robot, se establecieron criterios adaptados a movimientos dinámicos intensos. Estos valores fueron definidos para la evaluación de la estabilidad dinámica del robot humanoide Super Anthony, basándose en los indicadores cinemáticos obtenidos experimentalmente en cada rutina de movimiento. A diferencia de la estabilidad estática donde el análisis se fundamenta en la proyección geométrica del centro de masa dentro del polígono de soporte, la estabilidad dinámica es evaluada mediante el comportamiento del sistema en condiciones reales de desplazamiento, rotación y ejecución de maniobras de combate. Bajo este criterio, la evaluación de la estabilidad dinámica no se centra en la confirmación de la existencia de caída o pérdida de contacto, sino que a través de métricas cuantitativas, analiza la coherencia direccional, la precisión angular y la simetría bilateral del sistema. Estas métricas son derivadas de las ecuaciones cinemáticas empleadas en el análisis experimental.

En primer lugar, la tasa de deriva angular en marcha lineal ( $\omega_\phi$ ) se adopta como indicador de estabilidad

direccional, ya que mide la desviación del eje corporal durante la marcha lineal. La reducción de este parámetro es un indicador de un sistema más controlado dinámicamente y con menor compensación lateral. En segundo lugar, el índice de asimetría direccional ( $S_\phi$ ) permite evaluar la coherencia del comportamiento en desplazamientos de avance y retroceso donde valores cercanos a la unidad evidencian simetría cinemática y balance estructural adecuado. En tercer lugar, el error angular ( $e_\theta$ ) respecto al ángulo objetivo constituye un indicador directo de la precisión dinámica, encargado de evidenciar la capacidad del sistema para ejecutar giros controlados. Por último, la diferencia bilateral garantiza que las extremidades ejecuten movimientos con desempeño comparable sin comprometer la estabilidad global del robot.

Tabla XIX  
CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DINÁMICA

Parámetro	Criterio de aceptación
Pérdida de contacto no programada	No permitida
Caída o vuelco	No permitido
Tasa de deriva angular en marcha lineal ( $\omega_\phi$ )	Versión repotenciada $\leq$ versión original
Índice de asimetría direccional ( $S_\phi$ )	Más cercano a 1 en la versión repotenciada
Error angular en movimiento rotacional ( $e_\theta$ )	Versión repotenciada $\leq$ versión original
Diferencia bilateral en rutinas de combate	$\leq 10\%$ entre lado izquierdo y derecho

## VI-E2. Evaluación del Consumo Energético

### VI-E2.1 Enfoque Metodológico de la Evaluación del Consumo Energético

La dirección tomada para la evaluación del consumo energético del robot humanoide Super Anthony adopta un enfoque de carácter analítico funcional indirecto del rendimiento energético bajo carga dinámica real. La razón de esta decisión es dada por el fundamento en el que se basan los sistemas mecatrónicos, el cual relaciona el consumo energético con influyentes como la eficiencia mecánica de la transmisión, fricción estructural, alineación geométrica de los actuadores, distribución de masas y la estabilidad dinámica. En robots de combate bípedos, el consumo energético se manifiesta funcionalmente en la reducción progresiva de precisión, la disminución de la fuerza activa, el incremento térmico en actuadores y la pérdida de estabilidad dinámica.

Por esta razón, la evaluación energética se abordó desde un enfoque doble:

1. Caracterización eléctrica nominal
2. Evaluación funcional progresiva bajo descarga real

El planteamiento permite determinar si la repotenciación mecánica optimiza la eficiencia global del sistema o introduce pérdidas energéticas adicionales.

### VI-E2.1.1 Indicadores del Consumo Energético

- Autonomía operativa continua: Un sistema mecánicamente optimizado presenta una menor demanda energética puesto que requiere un menor esfuerzo compensatorio por parte de sus actuadores. Por esta razón, la autonomía operativa continua corresponde al indicador del tiempo total del funcionamiento continuo del robot desde su encendido hasta el momento en el que presenta inestabilidad o pérdida de un buen desempeño.
- Número de rutinas ejecutadas por ciclo de carga: Un sistema con un diseño reducido de fricciones internas y óptimos alineados es capaz de ejecutar un cantidad más amplia de ciclos por carga. En este sentido, el criterio planteado busca analizar la cantidad de secuencias completas de locomoción y combate que el robot puede ejecutar antes de presentar pérdida funcional.
- Estabilidad del desempeño dinámico progresivo: La estabilidad de desempeño dinámico se trata de un criterio de evaluación de la degradación del rendimiento durante el uso continuo dado que el aumento de consumo energético suele manifestarse en caídas de rendimiento progresivas.
- Comportamiento térmico cualitativo: Un mayor esfuerzo mecánico genera mayor disipación térmica por lo que, este indicador permite el reconocimiento de la presencia de cambios abruptos del comportamiento tras ciclos repetidos.

### VI-E2.2 Definición de las Variables Energéticas para la Evaluación del Consumo Energético

- $V_{nom}$ , corresponde al voltaje nominal.
- $C_{Ah}$ , conocido como capacidad nominal.
- $C$ , corresponde a tasa de descarga.
- $E_{Wh}$ , corresponde a energía nominal.
- $I_{máx}$ , variable de la corriente máxima teórica.

### VI-E2.3 Definición de las Ecuaciones para la Evaluación del Consumo Energético

#### a) Energía nominal disponible

$$E_{Wh} = V_{nom} \cdot C_{Ah} \quad (25)$$

#### b) Corriente máxima teórica

$$I_{máx} = C \cdot C_{Ah} \quad (26)$$

#### c) Suma total de puntajes por versión

$$\sum P = \sum_{j=1}^m P_j \quad (27)$$

d) *Promedio general por versión*

$$\bar{P} = \frac{\sum P}{m} \quad (28)$$

donde:

- $P_j$ : puntaje total obtenido en cada nivel de batería.
- $m$ : número de niveles evaluados.

e) *Índice de Desempeño Energético (IDE)*

$$IDE = \left( \frac{\bar{P}_{\text{repotenciado}}}{\bar{P}_{\text{original}}} \right) \times 100 \quad (29)$$

$$IDE > 110 \% \Rightarrow \text{Mejora significativa} \quad (30)$$

$$95 \% \leq IDE \leq 110 \% \Rightarrow \text{Desempeño equivalente} \quad (31)$$

$$IDE < 95 \% \Rightarrow \text{Disminución del desempeño} \quad (32)$$

#### VI-E2.4 *Protocolo Experimental*

Las condiciones controladas establecidas previo al desarrollo de la evaluación consisten en:

- Batería cargada al 100 % antes de cada ensayo.
- Tres ensayos por versión.
- Única superficie de ensayo.
- Rutinas de movimiento predefinidas.
- Intervalos de descanso estandarizados entre pruebas.
- La evaluación se realiza a niveles de carga de 70 % a 100 %.

#### VI-E2.5 *Registro Experimental de la Evaluación del Consumo Energético*

Los ensayos de evaluación del consumo energético en la versión original del robot humanoide Super Anthony correspondientes a la Tabla XX muestran alta repetibilidad en los niveles de 100 % y 90 % con valores idénticos. No obstante, en el nivel del 80 % se observa una variación mínima de 1.5 puntos y en el estado de carga del 70 %, se evidencia una degradación funcional.

Tabla XX  
 RESULTADOS INDIVIDUALES DEL CONSUMO ENERGÉTICO – VERSIÓN ORIGINAL

Nivel	Ensayo	Autonomía	Rutinas	Estabilidad	Térmico	Total
100 %	E1	5	5	5	5	20.0
100 %	E2	5	5	5	5	20.0
100 %	E3	5	5	5	5	20.0
90 %	E1	4	5	5	4	18.0
90 %	E2	4	5	5	4	18.0
90 %	E3	4	5	5	4	18.0
80 %	E1	4	4	5	3.5	16.5
80 %	E2	3.5	4	4	3.5	15.0
80 %	E3	4	4	4	3.5	15.5
70 %	E1	3	4	3	3.5	13.5
70 %	E2	3	3.5	3	3	12.5
70 %	E3	3	3.5	3	3	12.5

De igual manera que la versión original, la versión repotenciada del robot humanoide registra estabilidad en los estados de carga de 100 % y 90 %. A partir del 80 % de carga, se registra una variación puntual en el Ensayo 2 donde el puntaje total desciende a 15 debido a una desviación angular significativa en movimientos rotacionales. Aquel comportamiento se da como respuesta a una reducción momentánea del torque bajo menor tensión disponible. Sin embargo, el error no se repite en el Ensayo 3, lo que confirma que el evento se debe a una condición transitoria y no a una falla estructural persistente. Por último, el nivel del 70 % mantiene valores promedio superiores a la versión original.

Tabla XXI  
 RESULTADOS INDIVIDUALES DEL CONSUMO ENERGÉTICO – VERSIÓN REPOTENCIADA

Nivel	Ensayo	Autonomía	Rutinas	Estabilidad	Térmico	Total
100 %	E1	5	5	5	5	20.0
100 %	E2	5	5	5	5	20.0
100 %	E3	5	5	5	5	20.0
90 %	E1	5	5	5	5	20.0
90 %	E2	5	5	5	5	20.0
90 %	E3	5	5	5	5	20.0
80 %	E1	5	5	5	5	20.0
80 %	E2	4	3	3	5	15.0
80 %	E3	4	4	5	5	18.0
70 %	E1	4	4	5	5	18.0
70 %	E2	4	3	3	5	15.0
70 %	E3	4	4	5	5	18.0

### VI-E2.6 Sistema de Evaluación Funcional

El sistema observado en la Tabla XXII integra variables que reflejan la eficiencia energética global del sistema mecánico-eléctrico, tales como la autonomía operativa, la cantidad de rutinas completadas, la estabilidad progresiva del movimiento y el comportamiento térmico de los actuadores. De esta manera, cada criterio ha sido valorado en una escala del 1 al 5, mediante una plantilla de evaluación para cuantificar la degradación funcional conforme disminuye el estado de carga de la batería.

Tabla XXII  
TABLA DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

<b>Criterio</b>	<b>Indicador medible</b>	<b>Método de evaluación</b>	<b>Escala</b>
Autonomía operativa	Tiempo total de funcionamiento (min)	Cronometraje continuo	1-5
Rutinas por carga	Número de ciclos completos	Conteo estructurado	1-5
Estabilidad progresiva	Variación perceptible en velocidad/fuerza	Observación estructurada	1-5
Comportamiento térmico	Nivel de calentamiento tras ciclos repetidos	Evaluación cualitativa controlada	1-5
<b>Puntaje total máximo</b>			<b>20</b>

### VI-E2.7 Tabla de Validación Energética

La validación del consumo energético se fundamenta tanto en el índice cuantitativo IDE como en el comportamiento progresivo observado durante los ensayos experimentales. A continuación, la Tabla XXIII resume las condiciones establecidas para validar la repotenciación mecánica como favorable.

Tabla XXIII  
CRITERIOS DE VALIDACIÓN DEL DESEMPEÑO ENERGÉTICO

<b>Parámetro</b>	<b>Criterio de Validación</b>
Autonomía operativa	No disminuye respecto a la versión original
Rutinas por carga	Se mantiene o incrementa
Degradación progresiva	Disminuye
Comportamiento térmico	No aumenta significativamente
IDE	> 100 %

La intervención mecánica se considerará energéticamente favorable si la autonomía aumenta, incrementa el número de rutinas por carga, la degradación progresiva disminuye y no se evidencia aumento de comportamiento térmico. Siguiendo este criterio, se valida que el rediseño estructural en PLA no introduce pérdidas energéticas adicionales, mantiene coherencia cinemática y no incrementa el esfuerzo de los actuadores.

### VI-E3. Evaluación de la Resistencia al Impacto de la Versión Repotenciada del Robot Super Anthony

#### VI-E3.1 Enfoque de la Evaluación de la Resistencia al Impacto

La evaluación de la resistencia al impacto del robot humanoide Super Anthony será realizado mediante el método de análisis por elementos finitos (FEA) de SolidWorks con la finalidad de validar la capacidad del rediseño mecánico frente a la exposición de cargas equivalente a escenarios reales de combate. Este proceso consiste en un análisis cuasiestático con carga equivalente, en el cual el impacto dinámico es representado mediante una fuerza concentrada derivada del torque máximo nominal del actuador. Este ensayo contribuye en la identificación de concentraciones de esfuerzo, deformaciones máximas y factores de seguridad en zonas críticas del diseño permitiendo la comprobación estructural de la primera etapa de repotenciación en material híbrido: PLA y Acero Inoxidable.

#### VI-E3.2 Determinación de Cargas Equivalentes

El servomotor empleado posee un torque nominal máximo de 45 kg·cm, equivalente a:

$$T = 4,41 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (33)$$

Para el brazo, considerando una distancia entre el eje del servomotor y el punto de contacto de:

$$r = 0,1653 \text{ m} \quad (34)$$

La fuerza equivalente se determinó mediante:

$$F = \frac{T}{r} \quad (35)$$

Obteniéndose una fuerza estática equivalente aproximada de:

$$F \approx 26,7 \text{ N} \quad (36)$$

Esta fuerza representa el impacto máximo transmitido por el servomotor al ejecutar un golpe. En los análisis del torso y la cintura, esta carga se interpretó como el impacto que recibirían estas partes del chasis si el golpe fuese ejercido por un robot con capacidad equivalente de 45 kg·cm.

Para el análisis del soporte vertical, aunque el peso real del robot es aproximadamente:

$$W = 1,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 14,7 \text{ N} \quad (37)$$

Se aplicó una carga vertical de 40 N, valor superior al real, con el objetivo de evaluar el comportamiento bajo una condición más alta.

#### VI-E3.3 Selección de Subensambles Críticos

Los casos explicados anteriormente corresponden a cuatro subensambles, necesarios para la identificación del punto responsable de fallas previo al impacto y que se describen a continuación:

- Subensamble 1A: Mano, conformado: por placas laterales, separadores y zona de contacto frontal.

- Subensamble 1B: Brazo completo, conformado por: mano, soporte del servo y unión al antebrazo.
- Subensamble 2: Torso, conformado por: pecho y unión superior a hombros.
- Subensamble 3: Cintura, conformado por: soporte estructural inferior del torso.
- Subensamble 4: Estructura de apoyo inferior, conformado por: pie y talón.

Es importante especificar que los subensamblajes descritos fueron modelados considerando los materiales reales de fabricación del robot repotenciado. La totalidad de los componentes estructurales correspondientes a mano, brazo, torso y cintura se encuentran fabricados en PLA. En el caso del subensamblaje 4: estructura de apoyo inferior, se presenta una configuración híbrida de materiales: el talón está fabricado en PLA, mientras que la base principal del pie está construida en acero inoxidable de 2 mm de espesor, ya que estas piezas fueron reutilizadas del robot Super Anthony que se encontraba obsoleto. Esta combinación responde a la necesidad de incrementar la rigidez estructural y la resistencia al desgaste en la zona de contacto directo con la superficie de combate, garantizando mayor estabilidad y durabilidad ante cargas repetitivas e impactos.

#### VI-E3.4 Configuración del estudio en SolidWorks

En cada simulación se siguió el siguiente procedimiento:

1. Definición del material (PLA para placas estructurales y acero/aluminio para componentes metálicos).
2. Aplicación de restricciones tipo *Fixed Geometry* en las zonas de apoyo estructural.
3. Definición de contactos globales tipo *Bonded*, asumiendo uniones rígidas ideales sin deslizamiento ni separación.
4. Aplicación de cargas equivalentes según el caso de análisis.
5. Generación de malla y resolución mediante el método de elementos finitos (FEA).

El uso de contactos tipo *Bonded* implica que las uniones atornilladas y las interfaces entre el metal y PLA se consideran perfectamente rígidas, representando una condición ideal de ensamblaje estructural.

#### VI-E3.5 Definición de Casos de Análisis Estructural

Tras el estudio del diseño mecánico del robot humanoide *Super Anthony Repotenciado*, se definieron cuatro escenarios principales de análisis estructural, enfocados en las zonas más solicitadas mecánicamente durante condiciones de combate y soporte estático.

##### 1. Impacto Activo del Brazo

Este escenario evalúa el comportamiento estructural del sistema de golpe. El análisis se realizó de forma jerárquica en dos niveles:

- Nivel 1: Subensamblaje de la mano (placas laterales, separadores cilíndricos y zona de contacto).
- Nivel 2: Ensamblaje completo del brazo (mano, soporte del servomotor y unión al antebrazo).

La selección de este caso se debe a que el brazo constituye el elemento que genera el impacto, estando sometido a esfuerzos combinados de flexión y transmisión de torque provenientes del servomotor.

##### 2. Impacto recibido en el Torso

El torso, específicamente el pecho, se identifica como una zona altamente susceptible a impactos externos provenientes de otro robot.

En este caso se simuló una carga distribuida sobre el pecho, evaluando la concentración de esfuerzos alrededor de los agujeros de fijación, la transmisión de carga hacia la unión hombro y torso y el comportamiento estructural de la interfaz torso y cintura.

### 3. *Impacto recibido en la Cintura*

La cintura se establece como el punto más crítico dada a su función de transmisión de cargas entre el tren inferior y el cuerpo superior del robot.

Por esta razón, se simula una carga aplicada directamente sobre la estructura de la cintura, fijando la base inferior, con el objetivo de evaluar la transmisión de esfuerzos hacia la base, la concentración de tensiones en zonas atornilladas y el comportamiento de los soportes laterales fabricados en PLA de 1.5 mm.

### 4. *Soporte de Carga Vertical*

Se realizó un análisis adicional para evaluar la resistencia estructural del sistema de apoyo inferior..

Debido a limitaciones computacionales, se analizó únicamente el subensamblaje del pie y talón, aplicando una carga vertical superior al peso real del robot con el fin de evaluar el comportamiento bajo condición conservadora.

## VI-E3.6 *Variables de Análisis y Criterios de Evaluación*

Los criterios de evaluación consideraron la comparación del esfuerzo equivalente con el esfuerzo máximo admisible del PLA, la identificación de zonas críticas alrededor de agujeros y cambios de sección, la verificación de factores de seguridad mayores a 1 y la evaluación de desplazamientos compatibles con la funcionalidad mecánica del robot.

En cada simulación se evaluaron las siguientes variables estructurales:

- Esfuerzo equivalente máximo ( $\sigma_{vm}$ ).
- Desplazamiento máximo ( $\delta_{max}$ ).
- Factor de seguridad mínimo (FOS).

Con base en estos resultados, se establece la siguiente tabla de criterios de evaluación:

Tabla XXIV  
CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL AL IMPACTO

<b>Parámetro evaluado</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Criterio matemático</b>	<b>Condición de aceptación</b>	<b>de Interpretación</b>
Esfuerzo equivalente de Von Mises	$\sigma_{vm}$	$\sigma_{vm} < \sigma_{adm}$	Menor al esfuerzo admisible del material	No ocurre falla por fluencia
Factor de seguridad mínimo	FOS	$FOS = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{vm}}$	$FOS \geq 2$	Configuración estructural segura
Desplazamiento máximo	$\delta_{max}$	$\delta_{max}$ dentro del rango funcional	No compromete alineación mecánica	Integridad geométrica conservada
Zona crítica de concentración	—	Sin concentraciones severas en uniones	No se observan picos locales extremos	Diseño estructural coherente

## VII. CRONOGRAMA

El cronograma de actividades para la realización de esta tesis ha sido dividido en 8 fases de desarrollo. A continuación, se detalla de manera gráfica el contenido y duración de cada fase.

Tabla XXV

CRONOGRAMA DETALLADO DEL PROYECTO DE REPOTENCIACIÓN DEL ROBOT HUMANOIDE SUPER ANTHONY

CRONOGRAMA TAREA	JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		ENERO	
	S01	S02	S03	S04	S01	S02	S03	S04	S01	S02	S03	S04	S01	S02	S03	S04
<b>FASE 1: Diagnóstico y planificación</b>																
Inspección del estado estructural y electrónico del robot.																
Identificación de piezas deterioradas y obsoletas.																
Planificación técnica del rediseño y validación en campo.																
<b>FASE 2: Diseño mecánico y selección de componentes</b>																
Evaluación y elección de nuevos servomotores compatibles.																
Diseño 3D adaptado del chasis con simulación estructural.																
Selección de fuente de poder y definición de acomodos internos.																
<b>FASE 3: Rediseño y construcción estructural</b>																
Fabricación o corte de partes mecánicas rediseñadas.																
Ensamble del nuevo chasis con los componentes actuales.																
Reubicación y montaje físico de la electrónica interna.																
<b>FASE 4: Configuración y ajustes electrónicos</b>																
Sustitución e integración de nuevos servomotores.																
Verificación de conexiones al cerebro original del robot.																
Calibración y pruebas básicas de funcionamiento.																
<b>FASE 5: Análisis funcional basado en rutinas</b>																
Evaluación del desplazamiento: fluidez y balance dinámico.																
Observación de rutinas de combate: respuesta y coordinación.																
Registro audiovisual y notas cualitativas de comportamiento.																
<b>FASE 6: Validación experimental y documentación</b>																
Comparación de desempeño antes y después del rediseño.																
Documentación técnica del proceso y resultados.																
Elaboración del informe final y conclusiones aplicadas.																

## VIII. PRESUPUESTO

El presupuesto presentado detalla los componentes, materiales y servicios necesarios para la repotenciación del robot humanoide Super Anthony. Su propósito es establecer de manera transparente los costos asociados a la adquisición de servomotores, elementos estructurales, accesorios electrónicos y servicios tercerizados indispensables para la modificación y mejora del sistema.

Tabla XXVI  
PRESUPUESTO DETALLADO DE COMPONENTES Y SERVICIOS

Cant.	UM	Elemento	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
15	UN	Servomotores de dirección RC sin núcleo, 99.2 lbs, 8.4 V	33,99	509,85
50	FT	Cable de extensión servo 22 AWG	0,42	20,80
1	JGO	Juego de 55 conectores servo con herramienta de crimpado	23,99	23,99
1	SVC	Corte láser y doblado de lámina de acero inoxidable 1,5 mm	170,00	170,00
1	SVC	Impresión de piezas en PLA	100,00	100,00
3	JGO	Set universal servo cuerno aluminio 25T (5 piezas)	7,50	22,50
1	JGO	10 Uds servo cuerno aluminio 25T	11,50	11,50
1	UN	Batería 2200 mAh 7,4 V 50C con XT60	39,50	39,50
1	JGO	Puntas de inserción térmica para insertos M2-M8	7,50	7,50
1	UN	Kit surtido 400 insertos roscados métricos M2-M6	16,50	16,50
<b>TOTAL GENERAL</b>				<b>931,94</b>

## IX. RESULTADOS

### IX-A. Estado Inicial del Robot Humanoide Super Anthony

El trabajo de recuperación realizado sobre el chasis del robot humanoide Super Anthony constituye un proceso basado en el análisis previo en el que se identificaron múltiples fallas mecánicas y eléctricas. Pues, tras un prolongado historial de participaciones en competencias de combate, la acumulación de impactos, esfuerzos mecánicos y eléctricos y reparaciones temporales fueron factores que se iban sumando a la progresiva pérdida de confiabilidad operativa. Desde una perspectiva estructural, los signos de deterioro del chasis se hacían presentes en varias zonas del conjunto mediante rayaduras profundas y fracturas. Las afectaciones observadas se reflejaban en el desempeño rutinario del androide comprometiendo la rigidez del sistema y la capacidad de distribución de esfuerzos generados durante la locomoción y maniobras dinámicas. La fatiga estructural causada se encontraba extendida a sus componentes internos, pues, la presencia de rodamientos quebrados generaron holguras excesivas en las articulaciones, factor que se traducía como una acción fuera del alcance de la función del servomotor.

No obstante, la consecuencia más crítica se hizo presente. La articulación de la cintura del robot se encontraba en estado de fractura, lesión que impedía la correcta transmisión de cargas entre el torso y las extremidades inferiores. Dada la situación, el robot se enfrentaba a un gran reto al ejecutar el desplazamiento: la rotura de cintura. De forma alineada, se realizó un estudio del sistema eléctrico en búsqueda de elementos en estado de deterioro. Por una parte, el aislamiento de varios conductores presentaba alertas de compromiso de varios cables en riesgo de cortocircuito e incluso, comprometiendo a la placa electrónica del sistema. La condición mencionada representaba un comportamiento inestable que aumentaba el riesgo de fallas eléctricas permanentes. Por otra parte, los servomotores presentaban los signos de un elemento que ha llegado al fin de su vida útil; pérdida de torque y rigidez. Puesto que sometidos a condiciones normales se evidenciaba la incapacidad de mantener la firmeza de sus articulaciones tras pocos segundos de funcionamiento, fue evidente que el fenómeno correspondía al desgaste interno de los actuadores. Bajo dicho umbral de falencias descritas, se confirmó inviabilidad de la realización de una reparación correctiva convencional, manifestando la necesidad de una intervención basada en el rediseño mecánico y la sustitución de componentes críticos con el fin de recuperar el nivel de funcionalidad del robot humanoide Super Anthony.

### IX-B. Cálculo de la Estabilidad Estática y Dinámica del Robot Humanoide Super Anthony

#### IX-B1. Resultados del Cálculo de la Estabilidad Estática

##### IX-B1.1 Determinación del Centro de Masa Global

Con el fin de analizar y verificar la condición de estabilidad del robot humanoide Super Anthony en su posición bípeda erguida o de reposo, se realizó el cálculo de la masa total del sistema y la ubicación del centro de masa global del ensamblaje mediante la herramienta *Mass Properties* del software SolidWorks.

$$M = 1,487 \text{ kg} \quad (38)$$

$$\mathbf{r}_{\text{CoM}} = (5,62, -0,24, 143,08) \text{ mm} \quad (39)$$

La proyección del centro de masa sobre el plano del suelo ( $z = 0$ ) se obtiene eliminando la componente vertical:

$$\mathbf{p}_{\text{CoM}} = (5,62, -0,24) \text{ mm} \quad (40)$$

El resultado indica que el centro de masa se encuentra dentro de los límites del área de apoyo e incluso centrado.

### *IX-B1.2 Verificación Geométrica de la Estabilidad Estática*

Continuando con el análisis de la postura determinada, el polígono de soporte fue aproximado como un rectángulo equivalente a las siguientes dimensiones  $XY$ :

$$L = 126 \text{ mm} \quad W = 258,07 \text{ mm} \quad (41)$$

Los límites geométricos del soporte fueron definidos como:

$$X_{\text{mín}} = -63 \text{ mm}, \quad X_{\text{máx}} = 63 \text{ mm} \quad (42)$$

$$Y_{\text{mín}} = -129,035 \text{ mm}, \quad Y_{\text{máx}} = 129,035 \text{ mm} \quad (43)$$

Posteriormente, se procedió a verificar que la proyección del centro de masa satisface las siguientes condiciones:

$$-63 \leq 5,62 \leq 63 \quad (44)$$

$$-129,035 \leq -0,24 \leq 129,035 \quad (45)$$

Es decir, la proyección del centro de masa se encuentra en su totalidad, dentro de los límites del polígono de soporte, confirmando la condición de estabilidad estática bajo criterios geométricos.

### *IX-B1.3 Margen Cuantitativo de la Estabilidad Estática*

El establecimiento de la métrica cuantitativa de la estabilidad fue determinada tomando el margen mínimo como la distancia más corta entre la proyección del centro de masa y los bordes del polígono de soporte.

Las distancias obtenidas fueron:

- Distancia frontal: 57.38 mm
- Distancia posterior: 68.62 mm
- Distancia lateral derecha: 129.275 mm
- Distancia lateral izquierda: 128.795 mm

Entre las distancias obtenidas, se identifica el valor de la distancia frontal y se denomina a este como margen mínimo o el borde crítico frontal en dirección positiva al eje  $X$ . Adicionalmente, se calculó el margen normalizado:

$$M_{\text{norm}} = 0,91 \quad (46)$$

Este valor indica que el centro de masa se posiciona al 91 % del límite geométrico longitudinal antes de encontrarse en condición de inestabilidad por vuelco frontal, es decir, indica una configuración altamente centrada dentro del polígono de soporte.

#### *IX-B1.4 Resultado Técnico*

En conjunto con los resultados obtenidos tras el análisis de la estabilidad estática del robot humanoide Super Anthony, se concluye que el sistema presenta una configuración de alta estabilidad estática en postura bípeda erguida. El centro de masa se encuentra centrado respecto a los límites del polígono de soporte y mantiene un margen geométrico significativo cercano a la unidad antes de encontrarse al límite de una caída. Entonces, desde el criterio estructural, el rediseño mecánico no compromete la estabilidad estática del sistema, cumpliendo el criterio establecido en el marco metodológico.

#### *IX-B2. Resultados del Cálculo de la Estabilidad Dinámica*

La evaluación dinámica del robot humanoide Super Anthony se realizó mediante análisis cinemático utilizando el software Kinovea. Las rutinas fueron registradas desde vista superior y lateral, con una distancia de cámara de 0.50 m, resolución 1080p y frecuencia de 30 FPS.

La calibración espacial se efectuó utilizando una referencia física donde cada recuadro del plano correspondía a 440 mm  $\times$  440 mm, permitiendo convertir mediciones en píxeles a magnitudes reales en milímetros. Las pruebas se ejecutaron sobre superficie plana, con apoyo bipodal, iluminación controlada y sin perturbaciones externas.

Se evaluaron las siguientes rutinas:

- Marcha lineal
- Movimiento rotacional
- Desplazamiento lateral
- Uppercut

#### *IX-B2.1 Evaluación de la Marcha Lineal: Robot Original vs Robot Repotenciado*

De acuerdo con los criterios establecidos en la sección V-E1.2, la evaluación realizadas considera indicadores de estabilidad dinámica tales como la distancia promedio recorrida ( $d_{\text{prom}}$ ), el tiempo promedio de ejecución ( $t_{\text{prom}}$ ), la velocidad media ( $\bar{v}$ ), y la desviación angular promedio respecto al eje ideal de desplazamiento ( $|\overline{\Delta\phi}|$ ).

##### *IX-B2.1.1 Parámetros globales obtenidos*

Los parámetros globales obtenidos durante la marcha lineal se presentan en las Tablas XXVIII y XXVII, donde se comparan los valores promedio de tres ensayos consecutivos.

En la marcha hacia atrás, la versión repotenciada posee una reducción del 35.30 % de la distancia promedio recorrida, acompañada de una disminución del 36.56 % en la velocidad media. Sin embargo, el tiempo promedio de ejecución presenta una mínima variación de +2.26 % , lo que sugiere que el patrón temporal del movimiento permanece inalterado. Desde la perspectiva de la estabilidad direccional, la desviación angular promedio presenta una mejora del 5.35 %, indicando una ligera reducción en la tendencia del robot a apartarse de su eje ideal en la marcha hacia atrás.

Tabla XXVII  
MARCHA HACIA ATRÁS: PARÁMETROS GLOBALES Y VARIACIÓN PORCENTUAL

Parámetro	Original	Repotenciado	Variación (%)
$d_{prom}$	25.24	16.33	-35.30
$t_{prom}$ (s)	1.33	1.36	+2.26
$\bar{v}$	18.98	12.04	-36.56
$ \Delta\phi $ (°)	12.33	11.67	-5.35

Analizando los resultados obtenidos de la marcha hacia adelante, la versión repotenciada continúa presentando una una disminución en la distancia promedio recorrida (-34.10 %) y en la velocidad media (-34.55 %), mientras que por su parte, el tiempo de ejecución promedio permanece inalterado (+0.74 %). No obstante, el resultado más relevante se observa en la desviación angular promedio, la cual disminuye en un 22.75 % respecto a la versión original y que se traduce como una reducción en la generación de momentos de yaw no deseados durante la fase de apoyo.

Tabla XXVIII  
MARCHA HACIA ADELANTE: PARÁMETROS GLOBALES Y VARIACIÓN PORCENTUAL

Parámetro	Original	Repotenciado	Variación (%)
$d_{prom}$	24.46	16.12	-34.10
$t_{prom}$ (s)	1.36	1.37	+0.74
$\bar{v}$	17.98	11.77	-34.55
$ \Delta\phi $ (°)	22.33	17.25	-22.75

La tasa de deriva angular obtenida indica una disminución del 7.4 % en la versión repotenciada, evidenciando una ligera mejora en el control direccional por unidad de tiempo. Sin embargo, la variable significativa se refleja en la marcha hacia adelante en la versión repotenciada con una reducción de 23.3 % que representa una trayectoria más estable y coherente durante el desplazamiento lineal.

De manera complementaria, el índice de simetría direccional presentado por la versión original corresponde a 1.81, lo que indica una diferencia considerable en el comportamiento angular entre ambas direcciones de marcha. Este índice es reducido a 1.48 por la versión repotenciada, evidenciando una disminución aproximada del 18 % en la asimetría direccional.

Tabla XXIX  
TASA DE DERIVA ANGULAR DURANTE LA MARCHA LINEAL

Caso	$\omega_{\phi,orig}$ (°/s)	$\omega_{\phi,rep}$ (°/s)	Variación (%)
Marcha atrás	9.27	8.58	-7.4
Marcha adelante	16.41	12.59	-23.3

Tabla XXX  
ÍNDICE DE ASIMETRÍA DIRECCIONAL BASADO EN DERIVA ANGULAR (ADELANTE/ATRÁS)

Versión	$S_{\phi}$	Interpretación	Mejora
Original	1.81	Alta asimetría	–
Repotenciado	1.48	Menor asimetría	18.2 %

### IX-B2.1.2 Análisis del Comportamiento Dinámico del Sistema

Aunque el robot repotenciado muestra un desempeño de marcha menor respecto al original en distancia y velocidad, esta diferencia no implica una disminución en el comportamiento funcional en un escenario de combate. En el contexto práctico, la marcha durante una pelea se utiliza para el reposicionamiento corto y ajuste del encuadre hacia el oponente, más que para maximizar desplazamiento por ciclo.

Un indicador crítico para combate es la estabilidad direccional, evaluada mediante la deriva angular  $|\Delta\phi|$  durante la marcha. En retroceso, el repotenciado presenta una deriva promedio ligeramente menor ( $11.67^\circ$  vs  $12.33^\circ$ ). En avance, el repotenciado también tiende a desviarse menos que el original ( $17.25^\circ$  vs  $22.33^\circ$ ), lo cual reduce la necesidad de correcciones grandes y disminuye el riesgo de perder la orientación respecto al oponente. Además, la reducción en la deriva angular corresponde un indicador de que el centro de masa proyectado se encuentra con mayor proximidad al eje ideal de desplazamiento, disminuyendo la probabilidad de que la resultante dinámica se acerque a los límites del polígono de soporte.

En conjunto, el compromiso evaluado entre la velocidad y la estabilidad sugiere que la repotenciación favoreció el control de direccional por encima de la amplitud del paso, priorizando coherencia inercial frente a rapidez de desplazamiento.

### IX-B2.1.3 Consideración del tamaño del área de combate

En competencias tipo sumo/combate, el área de enfrentamiento suele ser un dohyo circular. De acuerdo con reglamentos ampliamente utilizados, el diámetro del ring es típicamente de 77 cm en la categoría *Mini Sumo* y de 154 cm en categorías internacionales 3 kg, lo cual establece un rango práctico de referencia para maniobras de giro y reposicionamiento. Una reducción del 22.75 % en la desviación angular implica una trayectoria más predecible, permitiendo un incremento de la eficiencia estratégica del sistema durante aproximaciones lineales.

## IX-B2.2 Evaluación del Movimiento Rotacional: Robot Original vs Robot Repotenciado

### IX-B2.2.1 Evaluación del Movimiento Rotacional en Sentido Antihorario

La evaluación del movimiento rotacional en sentido antihorario se realizó mediante el análisis de los incrementos angulares consecutivos registrados durante la rotación en sentido antihorario. A partir de los valores individuales de  $\Delta\theta_i$  y  $t_i$ , se calcularon la rotación total  $\Theta_{tot}$ , el tiempo total  $T_{tot}$  y la velocidad angular promedio  $\bar{\omega}$ .

Los resultados obtenidos indican estabilidad en la respuesta de los actuadores. Pues, el robot original alcanza un promedio de  $90^\circ$  por repetición en un tiempo constante de 1.28 s, obteniendo una velocidad angular promedio de  $70.31^\circ/\text{s}$ . Además, la mínima variación angular sugiere que el sistema genera un momento angular suficiente para completar la rotación en un intervalo reducido de tiempo.

Tabla XXXI  
RESULTADOS GLOBALES – ROBOT ORIGINAL, ROTACIÓN ANTIHORARIA

Repetición	$\Theta_{tot}$ ( $^\circ$ )	$T_{tot}$ (s)	$\bar{\omega}$ ( $^\circ/\text{s}$ )
1	90	1.28	70.31
2	88	1.28	68.75
3	92	1.28	71.88
Promedio	90	1.28	70.31

Por otra parte, la versión repotenciada alcanza igualmente un promedio de  $90^\circ$ , en un intervalo de tiempo mayor lo que produce una velocidad angular promedio de  $56.25^\circ/\text{s}$  que se traduce como una reducción aproximada del 20 % en la velocidad angular promedio respecto a la versión original. Esta disminución de velocidad en el movimiento rotacional sugiere una redistribución del esfuerzo rotacional y una dinámica menos abrupta.

Tabla XXXII  
RESULTADOS GLOBALES – ROBOT REPOTENCIADO, ROTACIÓN ANTIHORARIA

Repetición	$\Theta_{tot}$ ( $^\circ$ )	$T_{tot}$ (s)	$\bar{\omega}$ ( $^\circ/\text{s}$ )
1	88	1.60	55.00
2	90	1.60	56.25
3	92	1.60	57.50
Promedio	90	1.60	56.25

En el estudio realizado, se observa que ambas versiones de robot alcanzan una rotación nominal de  $90^\circ$ , lo que la repotenciación no compromete la precisión angular final del giro. No obstante, mientras que el tiempo total incrementa en un 25 %, la velocidad angular promedio disminuye en un 20 %. Este hecho se da por la redistribución del giro en pasos más pequeños puesto que en comparación con la versión original (4 pasos), la versión repotenciada requiere 5 pasos para alcanzar la rotación nominal de  $90^\circ$ . Este cambio reduce la exigencia instantánea sobre el sistema y contribuye a un control direccional más estable durante la maniobra.

Tabla XXXIII  
 VARIACIÓN PORCENTUAL DEL MOVIMIENTO ROTACIONAL – SENTIDO ANTIHORARIO

Parámetro	Original	Repotenciado	Variación (%)
$\Theta$ (°)	90	90	0
$T_{tot}$ (s)	1.28	1.60	+25.0
$\bar{\omega}$ (°/s)	70.31	56.25	-20.0
$\Delta\theta_{prom}$ por paso (°)	22.50	18.00	-20.0
N° de pasos	4	5	+25.0

### IX-B2.2.2 Evaluación del Movimiento Rotacional en Sentido Horario

En el sentido horario, el robot original alcanza una rotación promedio de 190.67° en un tiempo total constante de 0.90 s, obteniendo una velocidad angular promedio de 211.85°/s y evidencia una maniobra rotacional rápida. Por otra parte, la mínima diferencia de variaciones entre repeticiones evidencia consistencia en la respuesta de los actuadores y estabilidad en la ejecución del giro.

Tabla XXXIV  
 RESULTADOS GLOBALES – ROBOT ORIGINAL, ROTACIÓN HORARIA

Repetición	$\Theta_{tot}$ (°)	$T_{tot}$ (s)	$\bar{\omega}$ (°/s)
1	190	0.90	211.11
2	190	0.90	211.11
3	192	0.90	213.33
Promedio	190.67	0.90	211.85

La versión repotenciada alcanza un promedio de 90° en 1.60 s, con una velocidad angular promedio de 56.25°/s reflejando un incremento en el tiempo total y una reducción sustancial de la velocidad angular, favoreciendo a una transición más controlada durante la maniobra.

Tabla XXXV  
 RESULTADOS GLOBALES – ROBOT REPOTENCIADO, ROTACIÓN HORARIA

Repetición	$\Theta_{tot}$ (°)	$T_{tot}$ (s)	$\bar{\omega}$ (°/s)
1	88	1.60	55.00
2	90	1.60	56.25
3	92	1.60	57.50
Promedio	90	1.60	56.25

En contraste, el análisis del movimiento rotacional en sentido horario no presenta variaciones destacables. la rotación total alcanza el objetivo nominal de 90° sin variación, mientras que el tiempo total aumenta y la velocidad angular promedio disminuye. La casi homogeneidad entre los resultados sugiere que la diferencia entre versiones no se debe a una asimetría direccional aislada, sino a una modificación estructural y dinámica del sistema. El incremento de número de pasos reflejan una estrategia de rotación menos abrupta y más controlada.

Tabla XXXVI  
 VARIACIÓN PORCENTUAL DEL MOVIMIENTO ROTACIONAL – SENTIDO HORARIO

Parámetro	Original	Repotenciado	Variación (%)
$\Theta$ (°)	90	90	0
$T_{tot}$ (s)	1.28	1.60	+25.0
$\bar{\omega}$ (°/s)	70.31	56.25	-20.0
$\Delta\theta_{prom}$ por paso (°)	22.50	18.00	-20.0
N° de pasos	4	5	+25.0

### IX-B2.2.3 Análisis Comparativo Global del Movimiento Rotacional

Globalizando los resultados de la evaluación del movimiento rotacional de ambas versiones del robot humanoide Super Anthony, se indica que el robot repotenciado realiza la rotación en incrementos menores ( $90^\circ$  en 5 movimientos), lo cual favorece el control fino. Pues, esta configuración permite la realización de micro-correcciones para mantener al rival dentro del campo visual y evitar el sobre-giro. La versión repotenciada resulta más adecuado para mantener seguimiento del oponente y sostener una orientación controlada durante el combate, priorizando precisión y correcciones pequeñas sobre amplitud máxima por comando.

Bajo este contexto, aunque el robot repotenciado presenta incrementos de rotación más pequeños por comando, esta condición no constituye una limitación crítica dentro del ring. En escalas espaciales, las competencias se desarrollan en decenas de centímetros a poco más de un metro por lo que, el reposicionamiento y la reorientación se ejecutan en intervalos de pocos segundos. En este sentido, la adopción de rotaciones discretas de menor amplitud favorece al movimiento más controlado durante el combate, permitiendo mantener al oponente dentro del campo visual.

### IX-B2.3 Evaluación del Desplazamiento Lateral: Robot Original vs Robot Repotenciado

La presente sección revela los resultados obtenidos en la evaluación del desplazamiento lateral del robot humanoide Super Anthony, comparando la configuración original con la versión repotenciada. A diferencia de la marcha lineal, el desplazamiento lateral pone a prueba la estabilidad bilateral y la coherencia cinemática entre ambos lados del robot, condición esencial en maniobras de reposicionamiento.

#### IX-B2.3.1 Parámetros Globales Obtenidos

En la Tabla XXXVII, se evidencia una reducción del 29.1 % en la distancia promedio recorrida y del 28.7 % en la velocidad media respecto a la configuración original. No obstante, el tiempo promedio de ejecución muestra una variación mínima del 1.3 %. La disminución observada permite a la versión repotenciada responder a una estrategia de paso más contenido en amplitud. Desde la perspectiva de estabilidad, la reducción del índice de simetría tanto en distancia (26.7 %) como en velocidad (48.0 %) sugiere una mejora en la uniformidad del comportamiento lateral entre ambos lados del robot, reflejando un patrón de desplazamiento más controlado y homogéneo.

En la versión original se observa una ligera asimetría, tanto en la distancia recorrida como en la velocidad desarrollada, reflejando un índice de asimetría menos favorable. En contraste, la versión repotenciada presenta

Tabla XXXVII  
DESPLAZAMIENTO LATERAL: PARÁMETROS GLOBALES Y VARIACIÓN PORCENTUAL

Parámetro	Original	Repotenciado	Variación (%)
$d_{prom}$ (cm)	13.64	9.67	-29,1
$t_{prom}$ (s)	0.483	0.477	-1,3
$\bar{v}$ (cm/s)	28.19	20.11	-28,7
$IS_d$ (%)	12.0	8.8	-26,7
$IS_v$ (%)	12.3	6.4	-48,0

valores de asimetría favorables, mejorando la coherencia cinemática transversal del sistema. Esta configuración es una demostración de una redistribución más equilibrada de esfuerzos y una alineación mecánica más consistente entre los segmentos estructurales.

Tabla XXXVIII  
DESPLAZAMIENTO LATERAL: PROMEDIOS POR LADO (DERECHA VS IZQUIERDA)

Robot	$\bar{d}_R$ (cm)	$\bar{d}_L$ (cm)	$\bar{v}_R$ (cm/s)	$\bar{v}_L$ (cm/s)
Original	13.50	13.78	27.91	28.47
Repotenciado	10.09	9.24	20.76	19.47

### IX-B2.3.2 Análisis Dinámico y Estabilidad Lateral

El análisis comparativo del movimiento lateral evidencia que el robot repotenciado presenta una reducción significativa tanto en desplazamiento promedio como en velocidad lateral respecto al robot original. Mientras el sistema original exhibe mayores traslaciones del centro de masa, el repotenciado mantiene una ejecución más contenida y controlada. Se destaca que el repotenciado mantiene desempeño del golpe pero reduce desplazamiento del cuerpo, lo cual constituye una optimización estructural del sistema.

Desde el punto de vista dinámico, la estabilidad está directamente relacionada con el momento lineal  $p = mv$  donde  $m$  representa la masa del robot y  $v$  su velocidad lateral. Al reducir la velocidad lateral en aproximadamente 29%, el robot repotenciado disminuye proporcionalmente el momento lineal transmitido a la base de soporte. Esto implica una menor tendencia al desplazamiento excesivo y una mejor conservación del equilibrio.

Asimismo, la energía cinética lateral se define como  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  debido a que, la energía depende del cuadrado de la velocidad, una reducción del 29% en  $v$  genera una disminución cercana al 50% en la energía cinética lateral. Esta reducción implica menor transferencia de energía horizontal al sistema estructural y, por ende, menor riesgo de desestabilización.

### IX-B2.3.3 Interpretación Biomecánica Comparativa

Desde una perspectiva biomecánica, el comportamiento del robot repotenciado se asemeja a estrategias reales de combate profesional. En artes marciales mixtas (MMA), un peleador profesional no ejecuta desplazamientos exagerados para esquivar un golpe recto; en cambio, realiza movimientos cortos y precisos, inclinándose ligeramente

la cabeza o el torso para evitar el impacto sin comprometer el equilibrio.

El robot repotenciado reproduce este principio dinámico, efectuando ajustes controlados del cuerpo. Por el contrario, el robot original presenta desplazamientos laterales más amplios, lo que incrementa la vulnerabilidad estructural posterior al movimiento, al desplazar excesivamente su centro de masa fuera del eje de estabilidad.

#### *IX-B2.3.4 Relación entre Velocidad y Estabilidad*

Desde el análisis dinámico, a menor velocidad lateral menor es el momento lineal inducido  $p \propto v$  y menor es la energía cinética lateral  $E_k \propto v^2$ . Por lo tanto, una reducción en la velocidad lateral mejora directamente la estabilidad del sistema, ya que disminuye el torque compensatorio requerido en la base de soporte para mantener el equilibrio.

#### *IX-B2.3.5 Conclusión del Análisis Comparativo del Desplazamiento Lateral del Robot Original vs Robot Repotenciado*

Los resultados demuestran que el robot repotenciado no sacrifica rendimiento cinemático del golpe, pero sí optimiza su comportamiento estructural global. Es decir, la reducción significativa en desplazamiento y velocidad lateral disminuye el momento lineal y la energía cinética transferida al cuerpo, mejorando la estabilidad dinámica del sistema.

El robot humanoide repotenciado adopta un patrón de movimiento más eficiente, basado en desplazamientos cortos y controlados, coherentes con estrategias de combate profesional. Por el contrario, el robot original presenta movimientos laterales más amplios que incrementan su vulnerabilidad estructural. En consecuencia, la repotenciación no solo mantiene el desempeño del sistema, sino que lo mejora desde el punto de vista de estabilidad, control dinámico y eficiencia estructural.

#### *IX-B2.4 Evaluación del Movimiento Uppercut: Robot Original vs Robot Repotenciado*

##### *IX-B2.4.1 Parámetros Globales Obtenidos*

La Tabla XXXIX resume la comparación entre el robot original y el repotenciado, utilizando variación porcentual que presentan variaciones mínimas. En el lado izquierdo, el tiempo aumenta en 1.92 %, mientras que el tiempo total se mantiene constante y la altura máxima disminuye en un 2.97 %. Respectivamente, en el lado derecho, el tiempo hasta el punto máximo no presenta variación, pero se observa una reducción del 7.78 % en el tiempo total de ejecución en la versión repotenciada. Adicionalmente, la amplitud del golpe se mantiene constante, interpretación respaldada por la interpretación de altura máxima de 0.02 %.

##### *IX-B2.4.2 Análisis Comparativo del Movimiento Uppercut*

Los resultados muestran que la repotenciación mantiene el desempeño cinemático del robot original en términos de  $t_{\text{máx}}$  y  $h_{\text{máx}}$  (variaciones generalmente menores al 3 %). Además, se observa una mejora en el tiempo total del uppercut derecho, con una reducción aproximada del 7,78 %.

Tabla XXXIX  
COMPARACIÓN CUANTITATIVA ENTRE ROBOT ORIGINAL Y ROBOT REPOTENCIADO PARA EL MOVIMIENTO UPPERCUT

<b>Movimiento/Variable</b>	<b>Original</b>	<b>Repotenciado</b>	<b>Variación %</b>
Uppercut Izq: $t_{m\acute{a}x}$ (s)	0.52	0.53	+1.92 %
Uppercut Izq: $t_{total}$ (s)	0.83	0.83	0.00 %
Uppercut Izq: $h_{m\acute{a}x}$ (cm)	41.31	40.08	-2.97 %
Uppercut Der: $t_{m\acute{a}x}$ (s)	0.47	0.47	0.00 %
Uppercut Der: $t_{total}$ (s)	0.90	0.83	-7.78 %
Uppercut Der: $h_{m\acute{a}x}$ (cm)	40.85	40.84	-0.02 %

Desde el análisis bilateral del robot repotenciado, el índice de simetría para  $t_{m\acute{a}x}$  fue de 12 %, mientras que el tiempo total de ejecución se mantuvo idéntico entre ambos lados (0 % de diferencia), lo cual sugiere una ejecución global equilibrada.

Finalmente, el registro de rotación del eje y traslación de la base durante golpes tipo gancho evidencia efectos dinámicos relevantes: el gancho izquierdo presenta rotación promedio de 13°, mientras que el gancho derecho alcanza aproximadamente 14° y, en ciertas configuraciones, se manifiesta como traslación lateral con promedio de 9,5 cm, lo que sugiere fenómenos de transferencia de momento y/o rigidez estructural diferencial.

### *IX-B3. Síntesis Global del Comportamiento Dinámico*

El análisis integral de la estabilidad dinámica del robot humanoide Super Anthony, desarrollado en la sección IX-B2, permitió comparar cuantitativamente la versión original y la versión repotenciada bajo criterios de marcha lineal, movimiento rotacional, desplazamiento lateral y ejecución del uppercut. Los resultados evidencian que la repotenciación no buscó replicar exactamente el comportamiento cinemático original, sino optimizarlo bajo principios de estabilidad estructural y coherencia inercial.

En la marcha hacia atrás, la versión repotenciada presenta una reducción del 35.30 % en la distancia promedio recorrida y una disminución del 36.56 % en la velocidad media, mientras que el tiempo promedio de ejecución apenas varía en +2.26 %. Este comportamiento indica que el patrón temporal del movimiento se mantiene prácticamente inalterado, pero con una estrategia de paso más contenida. Desde el punto de vista direccional, la desviación angular promedio mejora en 5.35 %, reflejando una ligera reducción en la tendencia del robot a apartarse del eje ideal de desplazamiento.

En la marcha hacia adelante se observan reducciones similares en distancia promedio (-34.10 %) y velocidad media (-34.55 %), mientras que el tiempo de ejecución permanece prácticamente constante (+0.74 %). No obstante, el resultado más relevante corresponde a la disminución del 22.75 % en la desviación angular promedio, acompañada de una reducción del 7.4 % en la tasa de deriva angular por unidad de tiempo. Este comportamiento indica una mejora significativa en el control de yaw durante la fase de apoyo, favoreciendo una trayectoria más estable y coherente. Asimismo, el índice de simetría direccional se reduce de 1.81 a 1.48, lo que representa una mejora aproximada del 18 % en la uniformidad angular entre avance y retroceso.

Considerando el tamaño típico del área de combate (77 cm en Mini Sumo y 154 cm en categorías de 3 kg), la

reducción del 22.75 % en desviación angular implica trayectorias más predecibles y menor necesidad de correcciones bruscas durante aproximaciones lineales, mejorando la eficiencia estratégica del sistema en espacios reducidos.

En el movimiento rotacional, ambas versiones alcanzan una rotación nominal de 90°, lo que confirma que la repotenciación no compromete la precisión angular final del giro. Sin embargo, el tiempo total de ejecución aumenta en 25 % y la velocidad angular promedio disminuye en aproximadamente 20 %, alcanzando un valor cercano a 56.25°/s. Esta redistribución del giro hace que el robot repotenciado rote 90° de manera más controlada y precisa, evitando realizar movimientos exagerados y permitiendo al robot realizar pequeñas correcciones de ángulo durante el combate para permanecer siempre de frente al oponente.

En el análisis del desplazamiento lateral se evidencia una reducción del 29.1 % en la distancia promedio y del 28.7 % en la velocidad media, con una variación mínima del 1.3 % en el tiempo de ejecución. Además, el índice de simetría mejora en 26.7 % en distancia y 48.0 % en velocidad, reflejando mayor uniformidad transversal. Esta disminución reduce la transferencia de energía horizontal hacia la base de soporte y disminuye el riesgo de desestabilización. En términos biomecánicos, el robot repotenciado adopta un patrón similar al de estrategias reales de combate profesional, privilegiando desplazamientos cortos y precisos en lugar de movimientos amplios que comprometan el equilibrio.

Finalmente, en la evaluación del movimiento uppercut, los parámetros cinemáticos presentan variaciones mínimas. En el lado izquierdo, el tiempo aumenta 1.92 % y la altura máxima disminuye 2.97 %, mientras que en el lado derecho se observa una reducción del 7.78 % en el tiempo total de ejecución. La amplitud del golpe se mantiene prácticamente constante (variación cercana al 0.02 %), indicando una similitud funcional superior al 97 % en términos de desempeño del impacto. El índice de simetría bilateral para  $t_{max}$  es del 12 %, mientras que el tiempo total de ejecución presenta 0 % de diferencia entre ambos lados, lo que sugiere una ejecución equilibrada. No obstante, se registran efectos dinámicos asociados a rotación del eje y traslación de la base durante golpes tipo gancho, con rotaciones promedio de 13° y 14°, y traslaciones laterales cercanas a 9.5 cm, evidenciando fenómenos de transferencia de momento y rigidez estructural diferencial.

En conjunto, los resultados demuestran que la repotenciación mecánica mantiene el desempeño cinemático esencial del sistema —especialmente en rotación nominal y capacidad de impacto— mientras introduce reducciones controladas del 34–36 % en amplitud de paso lineal y aproximadamente 29 % en desplazamiento lateral, acompañadas de mejoras del 18–48 % en índices de simetría y reducciones superiores al 22 % en desviación angular.

Es importante destacar que estas reducciones en rapidez y distancia de movimiento no representan una desventaja en un contexto real de combate. En enfrentamientos tipo sumo o combate humanoide, la precisión del movimiento es un factor mucho más determinante que la cantidad o exageración del desplazamiento. Movimientos amplios y ejecutados sin control incrementan la transferencia de momento lineal y angular, desplazando el centro de masa fuera del eje ideal y generando vulnerabilidad estructural posterior a la maniobra.

En contraste, un patrón de desplazamiento más contenido permite conservar la orientación frontal hacia el oponente en todo momento, evitando exposiciones laterales innecesarias. Asimismo, una rotación exagerada compromete

la referencia visual directa del adversario y dificulta la reacción inmediata ante contraataques. Por lo tanto, la redistribución del movimiento implementada en la versión repotenciada no reduce competitividad, sino que optimiza la estrategia dinámica del sistema, privilegiando coherencia inercial, control direccional y estabilidad global por encima de la amplitud del gesto cinemático. En consecuencia, la repotenciación no solo preserva la efectividad ofensiva del robot, sino que la fortalece mediante un comportamiento más preciso, estable y tácticamente eficiente.

### IX-C. Resultados de la Evaluación del Consumo Energético

#### IX-C1. Caracterización de las Baterías Evaluadas

Con la finalidad de realizar una comparación objetiva, ambas configuraciones del robot humanoide Super Anthony, se caracterizaron eléctricamente las baterías empleadas. La versión original utiliza una batería de 1550 mAh, 11.1 V y 40C (3 celdas), mientras que la versión repotenciada emplea una batería de 2200 mAh, 7.4 V y 50C (2 celdas).

Tabla XL  
PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LAS BATERÍAS

Parámetro	Versión original	Versión repotenciada
Capacidad (mAh)	1550	2200
Capacidad (Ah)	1.55	2.2
Voltaje nominal (V)	11.1	7.4
Tasa de descarga	40C	50C
Número de celdas	3S	2S
Energía (Wh)	17.21	16.28

#### a) Energía nominal disponible

Para la versión original:

$$E_{\text{original}} = 17,21 \text{ Wh} \quad (47)$$

Para la versión repotenciada:

$$E_{\text{rep}} = 16,28 \text{ Wh} \quad (48)$$

Se observa que la versión repotenciada dispone de 5.4 % menos energía total almacenada, lo que implica que cualquier mejora funcional observada no puede deberse a la mayor disponibilidad energética global.

#### b) Energía total disponible

Para la configuración original:

$$I_{\text{original}} = 62 \text{ A} \quad (49)$$

Para la configuración repotenciada:

$$I_{\text{rep}} = 110 \text{ A} \quad (50)$$

Respecto a lo evaluado, se observa que la batería repotenciada puede suministrar aproximadamente 77 % más corriente máxima instantánea que la original. Este parámetro es de relevancia en esta rama de aplicación puesto que, los actuadores demandan picos de corriente durante cambios bruscos de dirección, impactos o aceleraciones rápidas.

#### IX-C2. Evaluación del Consumo Energético de la Versión Original del Robot Humanoide

La evaluación del consumo energético fue consolidada bajo el formato de niveles de batería. Para esto se realizaron tres ensayos independientes bajo protocolo uniforme (10 minutos de operación + 5 minutos de reposo), simulando condiciones reales de combate. La tabla XLI detalla los promedios obtenidos por nivel de batería desde un enfoque funcional indirecto, en el cual el rendimiento energético se infiere a partir del desempeño mecánico observado durante rutinas de locomoción y combate.

Tabla XLI  
PROMEDIO DE LOS TRES ENSAYOS – VERSIÓN ORIGINAL

Nivel de batería	Promedio total (/20)
100 %	20.00
90 %	18.00
80 %	15.67
70 %	12.83
$\sum P_{\text{original}}$	<b>66.50</b>
$\bar{P}_{\text{original}}$	<b>16.63</b>

La evaluación funcional del consumo energético de la versión original evidencia un comportamiento energético sensible a la disminución progresiva de la carga. Pues, a niveles 100 % y 90 % , el sistema mantiene una estabilidad dinámica adecuada, completando las rutinas sin alteración alguna. No obstante, a partir del 80 % de carga, se manifiesta una degradación del desempeño. Por una parte, se registra un incremento progresivo térmico de los actuadores y aparición de esfuerzo audible en los servomotores, lo cual sugiere mayor demanda de corriente bajo condiciones dinámicas. A partir del 70 % se evidencian balanceos laterales y reducción de precisión en la ejecución de los movimientos de combate. El promedio funcional global indica una degradación funcional relativamente acelerada a menudo disminuye el estado de carga, lo que indica limitada tolerancia a condiciones prolongadas de combate.

#### IX-C3. Evaluación del Consumo Energético de la Versión Repotenciada del Robot Humanoide

Siguiendo el mismo protocolo experimental, se realizaron tres ensayos con la versión repotenciada.

La evaluación del consumo energético de la versión repotenciada, presenta un comportamiento con una tendencia más estable frente a la disminución progresiva del estado de carga. Se expone que el funcionamiento permanece

Tabla XLII  
 PROMEDIO DE LOS TRES ENSAYOS – VERSIÓN  
 REPOTENCIADA

Nivel de batería	Promedio total (/20)
100 %	20.00
90 %	20.00
80 %	17.67
70 %	17.00
$\sum P_{\text{repotenciada}}$	<b>74.67</b>
$\bar{P}_{\text{repotenciada}}$	<b>18.67</b>

estable desde el 100 % hasta el 70 % de batería puesto que mantiene coherencia cinemática, conservación del torque efectivo y estabilidad dinámica sin incremento.

En contraste con la versión original, el cual presentaba degradación funcional a partir de 80 %, la versión repotenciada se degrada funcionalmente de manera controlada. Los servomotores no evidencian esfuerzos audibles y no hay presencia de incremento térmico significativo. Además, el promedio funcional (18.67) indica mayor consistencia operativa bajo descarga progresiva que se traduce como una optimización.

#### *IX-C4. Índice de Desempeño Energético (IDE)*

Para cuantificar la mejora relativa se calculó el Índice de Desempeño Energético:

$$IDE = \left( \frac{18,67}{16,63} \right) \quad (51)$$

$$IDE = 12,27\% \quad (52)$$

Este valor indica una mejora funcional del 12.27 % con respecto a la versión original.

#### *IX-C5. Resultado Técnico de la Evaluación del Consumo Energético*

Tras un análisis de los resultados obtenidos, se establece que la versión repotenciada opera con menor energía total almacenada con una diferencia del 5,4 % mientras que, la capacidad de descarga instantánea es mayor 77 %. Este comportamiento no se asocia a mayor capacidad energética global, sino a una mejora en la capacidad de entrega de corriente instantánea.

Desde el criterio electromecánico, esta diferencia genera una mayor capacidad de corriente bajo carga y reduce las caídas de tensión en picos de demanda. Como resultado, el sistema recibe una mejor respuesta dinámica de los actuadores, , minimizando pérdidas por saturación o debilitamiento transitorio.

La medición obtenida mediante el IDE confirma la recuperación de la operatividad del sistema y su optimización de interacción con fuente de energía, actuadores y estructura mecánica. Dicho esto, el umbral operativo recomendado se ha definido en 70 % por lo que, por debajo de este valor aumenta la probabilidad de pérdida de precisión angular y reducción de torque efectivo. En conclusión, el promedio funcional aumenta de 16.63 a 18.67 y la estabilidad operativa se mantiene hasta el 70 % de batería.

#### *IX-D. Resultados de la Evaluación de la Resistencia al Impacto*

Previo a la presentación de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos (FEA), es importante recordar que los subensamblajes estructurales evaluados fueron modelados considerando sus materiales reales de fabricación. Los componentes correspondientes a mano, brazo, torso y cintura se encuentran fabricados en PLA, mientras que el sistema de apoyo inferior presenta una configuración híbrida: talón en PLA y base del pie en acero inoxidable de 2 mm de espesor. Esta condición material constituye el marco de referencia bajo el cual se interpretan los esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad obtenidos en cada simulación.

##### *IX-D1. Aplicación de la carga equivalente*

De acuerdo con la metodología definida en la sección V-E3, se aplicó una carga equivalente de  $F = 26,7 \text{ N}$  derivada del torque máximo nominal del actuador. Bajo este contexto, las simulaciones fueron realizadas on contactos tipo *Bonded* para la evaluación de cada subensamblaje crítico de forma independiente.

##### *IX-D2. Resultados de la Evaluación de la Resistencia al Impacto por Subensamble*

Un mayor detalle gráfico del comportamiento de las piezas durante la evaluación realizada en SolidWorks se puede encontrar en el Anexo B.

##### *IX-D2.1 Evaluación del Subensamble 1A: Mano*

###### *IX-D2.1.1 Análisis del Esfuerzo equivalente de Von Mises*

El análisis del esfuerzo equivalente de von Mises del subensamblaje de la mano, sometido a una carga estática equivalente al impacto ofensivo, arrojó un valor máximo de 1.75 MPa. Este esfuerzo se localizó principalmente en el contorno de los agujeros de fijación de los tornillos, zonas donde existe una reducción de sección y, por tanto, una mayor concentración de tensiones. La distribución del esfuerzo mostró un comportamiento coherente con un estado de flexión del brazo, incrementándose progresivamente desde la base restringida hasta la región de aplicación de la carga.

###### *IX-D2.1.2 Análisis del Desplazamiento (URES)*

El análisis de desplazamiento resultante (URES) presentó un valor máximo de 0.0265 mm, ubicado en el extremo distal del brazo, coincidiendo con la zona donde se aplicó la fuerza contraria al sentido del golpe. La magnitud obtenida indica que la deformación del conjunto bajo la carga evaluada es mínima, evidenciando un comportamiento estructural rígido. El patrón de desplazamiento refleja una respuesta global de flexión sin deformaciones localizadas relevantes en las uniones o interfaces del sistema híbrido.

### IX-D2.1.3 Análisis del Factor de Seguridad

El análisis del factor de seguridad (FOS), calculado con el criterio automático basado en el esfuerzo equivalente de von Mises, mostró un valor mínimo de 34 en las zonas críticas del subensamblaje del brazo. La distribución del FOS evidenció valores elevados y homogéneos en toda la estructura, sin regiones que se aproximen al límite de fluencia del material. El mínimo se localizó en las inmediaciones de los agujeros de fijación, coincidiendo con las áreas de mayor concentración de esfuerzos previamente identificadas.

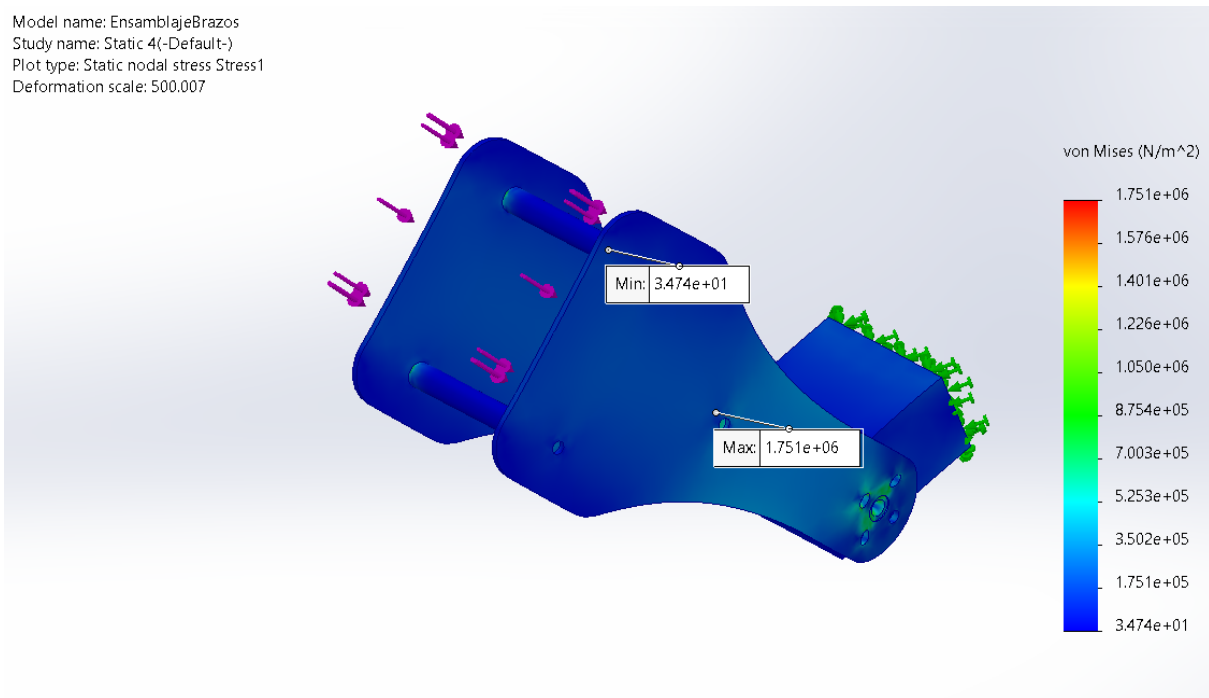


Figura 16. Análisis de Von Mises del subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores.

### IX-D2.2 Evaluación del Subensamblaje 1B: Brazo Completo

#### IX-D2.2.1 Esfuerzo equivalente de Von Mises

El análisis de esfuerzo equivalente (von Mises) del ensamblaje completo del brazo, bajo la aplicación de una carga estática equivalente de 26.7 N en la dirección contraria al golpe, mostró una tensión máxima aproximada de 2.32 MPa, localizada principalmente en la región próxima a las uniones atornilladas del soporte del antebrazo y en las zonas de transición geométrica cercanas al eje de articulación. La distribución de esfuerzos indica que las mayores concentraciones se generan en áreas donde existen discontinuidades geométricas, como perforaciones y cambios de sección. No obstante, los valores obtenidos se encuentran considerablemente por debajo del límite de fluencia típico del PLA y de los componentes metálicos del conjunto, lo que sugiere que, bajo esta condición de carga, el sistema trabaja dentro del rango elástico y no presenta riesgo estructural inmediato.

### IX-D2.2.2 Desplazamiento (URES)

El análisis de desplazamiento total (URES) evidenció un desplazamiento máximo aproximado de 0.084 mm en la zona más alejada del punto de fijación, correspondiente al extremo superior del antebrazo donde se aplica la carga. La distribución del desplazamiento presenta un comportamiento coherente con un sistema tipo voladizo, donde la máxima deflexión ocurre en el extremo libre y disminuye progresivamente hacia la región de fijación en el hombro. El valor obtenido es reducido en comparación con las dimensiones globales del brazo, lo que indica una adecuada rigidez estructural del conjunto híbrido PLA con metal bajo la carga considerada. Este resultado concuerda con la observación experimental del prototipo físico, donde no se evidencian deformaciones perceptibles durante el impacto.

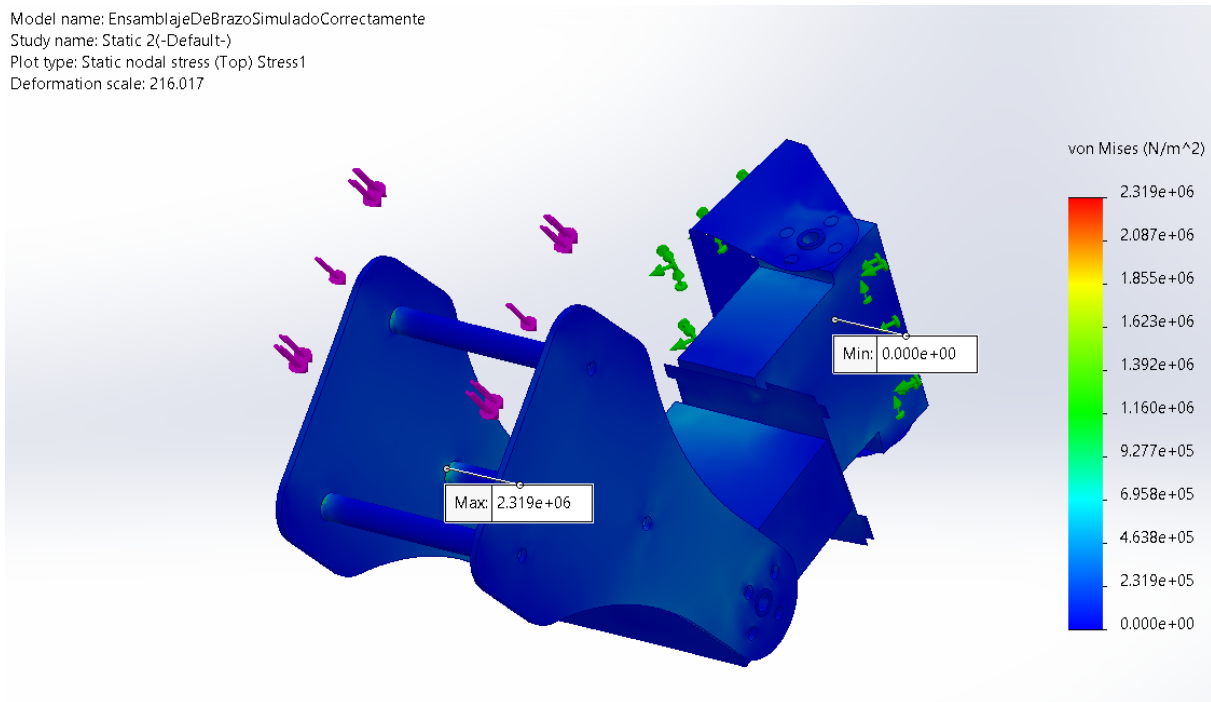


Figura 17. Análisis de Von Mises del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores.

### IX-D2.2.3 Factor de seguridad

El análisis del factor de seguridad mostró un valor mínimo aproximado de 89, distribuido principalmente en las zonas de mayor concentración de esfuerzo identificadas en el análisis de von Mises. Este valor elevado indica que la estructura opera con un amplio margen respecto a su límite de resistencia bajo la carga estática equivalente aplicada. La uniformidad del mapa de seguridad sugiere que no existen regiones críticas comprometidas dentro del modelo idealizado utilizado. En consecuencia, el ensamblaje completo del brazo presenta una capacidad estructural considerable frente a la carga simulada, validando su diseño para condiciones normales de operación asociadas al golpe generado por el servomotor.

### IX-D2.3 Evaluación del Subensamblaje 2: Torso

#### IX-D2.3.1 Esfuerzo equivalente de Von Mises

El análisis de esfuerzo equivalente de von Mises, con carga distribuida aplicada sobre el pecho y la base inferior de la cintura restringida, arrojó un valor máximo de 16.70 MPa, localizado en la zona de transición entre el pecho y el disco de unión torso–cintura. La distribución del esfuerzo muestra un comportamiento predominante de flexión, con concentración en el cambio de sección y alrededor de perforaciones. Considerando un límite de fluencia del PLA de 50–60 MPa, el esfuerzo obtenido representa aproximadamente el 30–33 % de su capacidad resistente, indicando que la estructura opera dentro del régimen elástico y mantiene un margen de seguridad adecuado bajo la carga analizada.

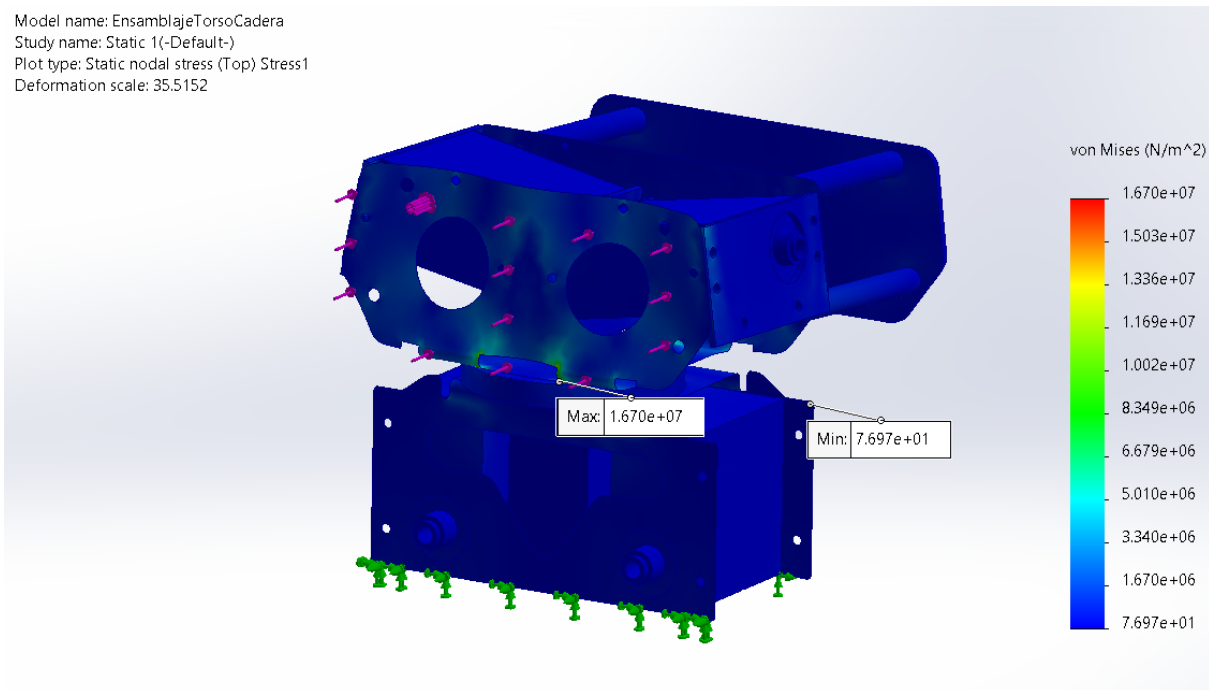


Figura 18. Análisis de Von Mises del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores.

#### IX-D2.3.2 Desplazamiento (URES)

El análisis de desplazamiento total arrojó un valor máximo de 0.287 mm, localizado en la zona superior del pecho donde se aplicó la carga. La distribución muestra un gradiente desde la base restringida de la cintura hacia la parte superior del torso, evidenciando un comportamiento dominante de flexión. El desplazamiento obtenido es pequeño respecto a las dimensiones del conjunto, lo que indica una rigidez adecuada del sistema híbrido de PLA y chapa metálica de 1.5 mm y refuerzos metálicos, manteniéndose dentro de un rango compatible con operación estructural estable.

#### IX-D2.3.3 Factor de Seguridad

El análisis del factor de seguridad arrojó un valor mínimo de 3.6, ubicado en la zona de mayor concentración de esfuerzo identificada en el estudio de von Mises. Este valor indica que la estructura mantiene un margen adecuado

frente al límite resistente del material y opera dentro del rango elástico. Aunque es menor que en otros subensambles, confirma que el torso es una zona más exigida ante impactos frontales, coherente con su función estructural.

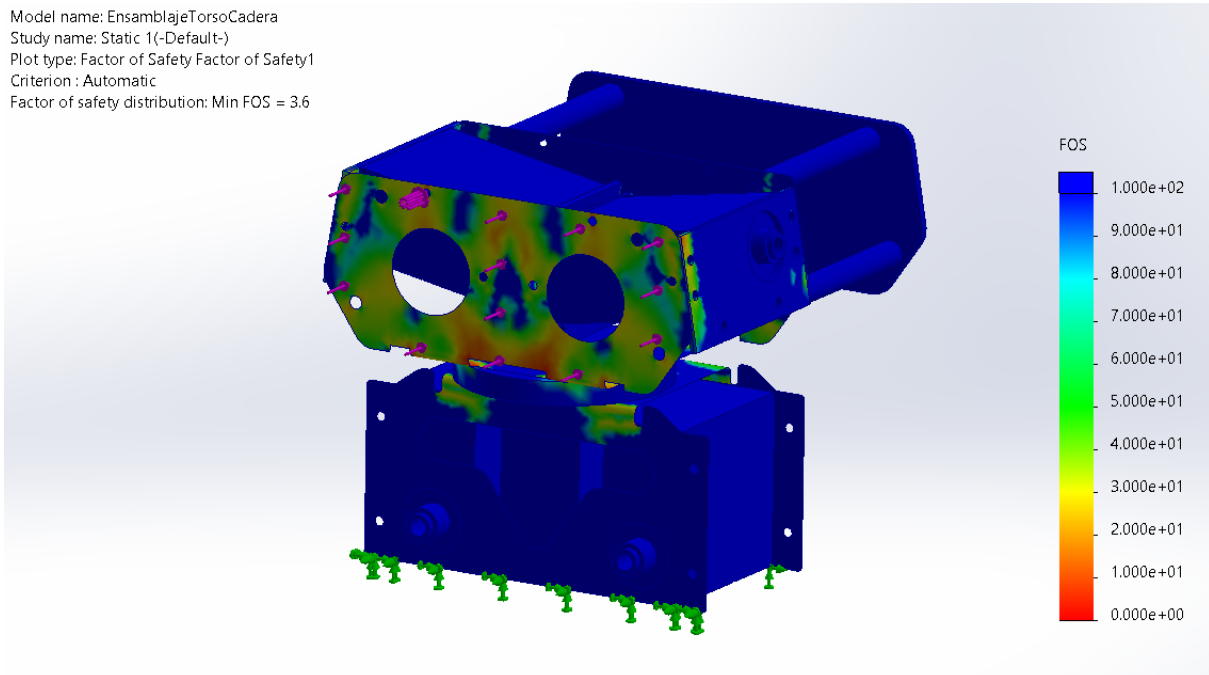


Figura 19. Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores.

#### IX-D2.4 Evaluación del Subensamble 3: Cintura

##### IX-D2.4.1 Esfuerzo equivalente de Von Mises

Bajo la aplicación de una carga distribuida sobre la cintura y con la base inferior restringida, el análisis de esfuerzo equivalente de von Mises arrojó un valor máximo de 1.30 MPa ( $1,287 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>), localizado principalmente en las zonas de fijación y discontinuidades geométricas. Considerando un límite de fluencia del PLA entre 50 y 60 MPa, este valor representa aproximadamente el 2–3 % de la capacidad resistente del material, indicando un amplio margen de seguridad y ausencia de sollicitación crítica.

##### IX-D2.4.2 Desplazamiento (URES)

El análisis de desplazamiento total mostró un valor máximo aproximado de 0.012 mm, localizado en la región frontal de la cintura correspondiente al área de aplicación de la carga. La distribución del desplazamiento presenta valores decrecientes hacia la base restringida, evidenciando una respuesta rígida del conjunto inferior frente a la carga aplicada. El orden de magnitud del desplazamiento obtenido confirma que la cintura presenta una elevada rigidez estructural en comparación con otros subensambles, manteniendo deformaciones pequeñas bajo la condición de impacto simulada.

### IX-D2.4.3 Factor de seguridad

El análisis del factor de seguridad arrojó un valor mínimo de 47, localizado en las regiones de mayor concentración de esfuerzo. Este resultado indica que la estructura inferior mantiene un margen amplio frente al límite resistente del material, confirmando que la cintura no constituye un punto crítico bajo la carga aplicada.

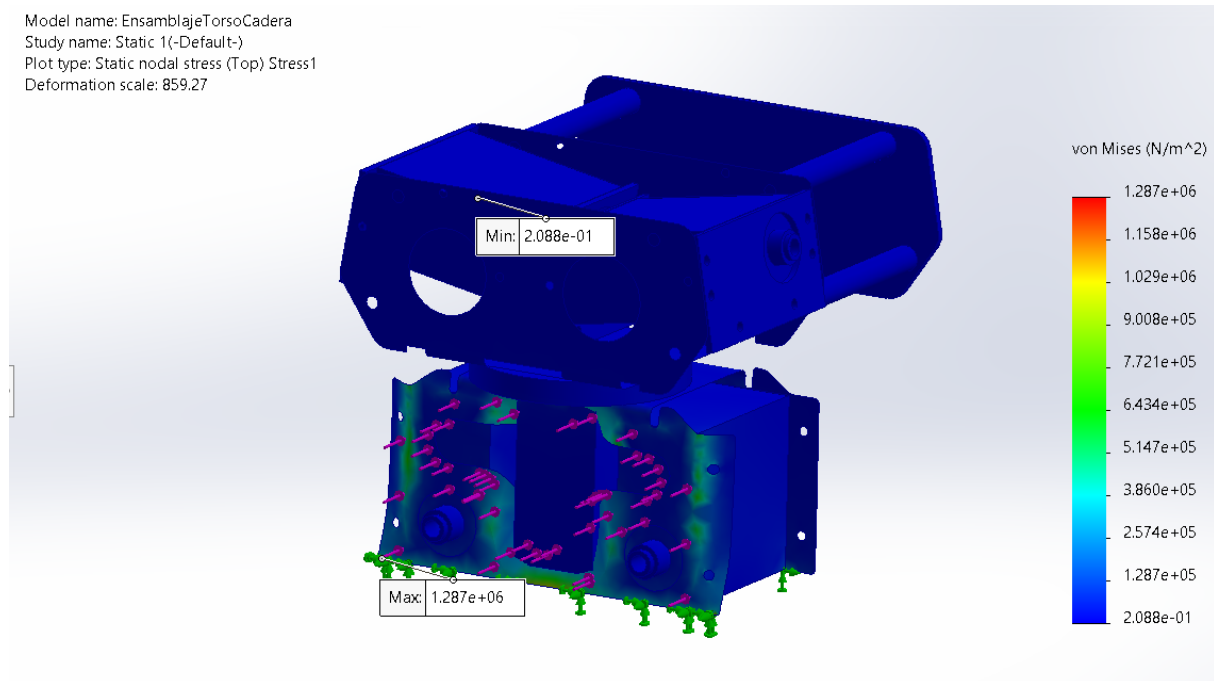


Figura 20. Análisis de Von Mises del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores.

### IX-D2.5 Evaluación del Subensamble 4: Estructura de Apoyo Inferior

#### IX-D2.5.1 Esfuerzo equivalente de Von Mises

El análisis de esfuerzo equivalente de von Mises en el subensamblaje de las piernas, bajo una carga vertical de 40 N aplicada en el talón y el pie, arrojó un valor máximo de 5.0 MPa, localizado en el soporte intermedio y alrededor de los orificios de fijación de la articulación. Considerando un límite de fluencia del PLA entre 50 y 60 MPa, este valor representa aproximadamente el 8–10% de su capacidad resistente, indicando que la estructura trabaja ampliamente dentro del régimen elástico incluso bajo una carga sobredimensionada.

#### IX-D2.5.2 Desplazamiento (URES)

El análisis de desplazamiento total (URES) arrojó un valor máximo de 0.21 mm en la parte superior del soporte de la pierna, evidenciando una ligera flexión por la carga vertical aplicada. La suela presenta desplazamientos mínimos debido a la fijación en la base, confirmando una adecuada rigidez estructural. Incluso bajo una carga de 40 N, superior al peso real del robot (14.7 N), la deformación se mantiene dentro de un rango estructuralmente aceptable.

### IX-D2.5.3 Factor de seguridad

El análisis del factor de seguridad arrojó un valor mínimo de  $FOS = 12$  en la zona de mayor concentración de esfuerzo. Esto indica que la estructura puede soportar aproximadamente doce veces la carga aplicada. Dado que los 40 N utilizados superan ampliamente el peso real del robot (14.7 N), el sistema de piernas presenta un margen estructural adecuado bajo carga vertical estática.

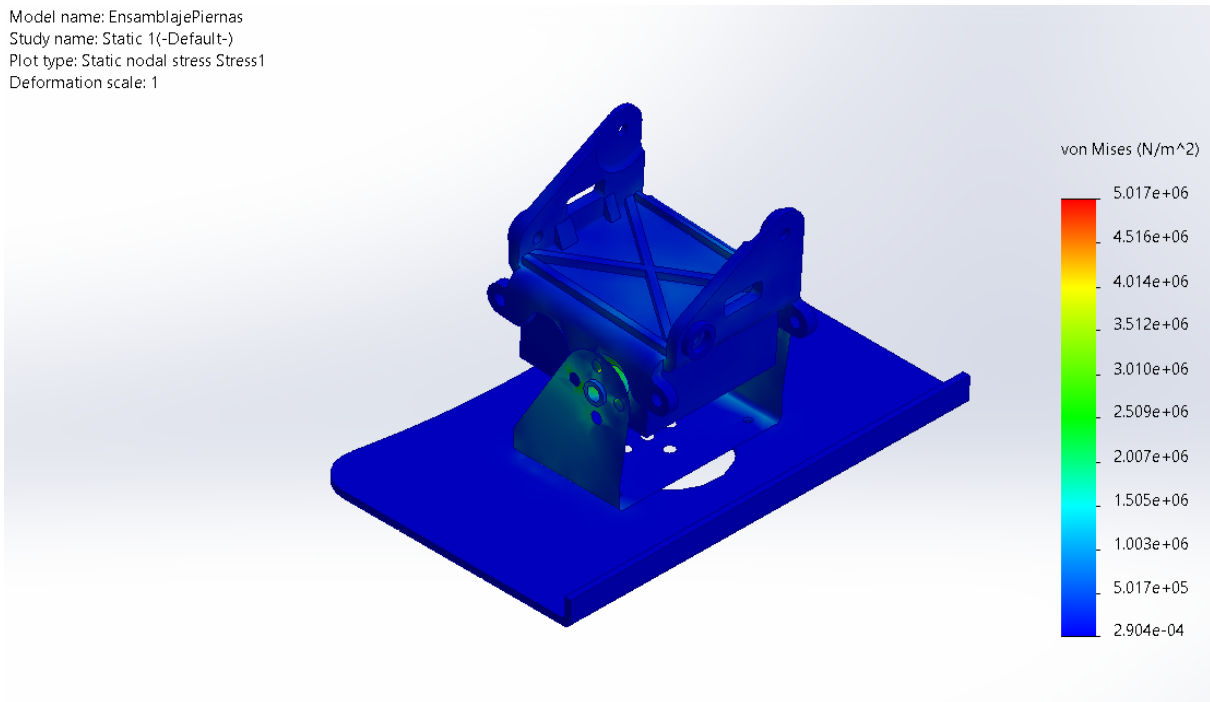


Figura 21. Análisis de Von Mises del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores.

### IX-D2.6 Síntesis Global de la Resistencia al Impacto

En términos comparativos, tras el análisis desarrollado de la resistencia al impacto del sistema, el subensamble que gobierna el diseño bajo impacto frontal corresponde al torso, el cual presenta el mayor esfuerzo equivalente y el menor factor de seguridad ( $FOS = 3,6$ ), concentrado en la transición torso–cintura. No obstante, cabe mencionar que ningún subensamble sobrepasa el régimen elástico, con desplazamientos inferiores a 0,3 mm en los escenarios más exigentes. Además, el sistema de apoyo inferior conserva su margen estructural incluso tras ser sometido a una carga vertical sobredimensionada (40 N), evento que respalda la viabilidad del prototipo en material PLA para ensayos controlados y validación funcional del desempeño mecánico.

Tabla XLIII  
RESULTADOS DE SIMULACIÓN FEA POR SUBENSAMBLE

<b>Subensamble</b>	<b>Carga (N)</b>	$\sigma_{vm}^{m\acute{a}x}$ <b>(MPa)</b>	$\delta_{m\acute{a}x}$ <b>(mm)</b>	<b>FOS mín</b>	<b>Lectura clave</b>
1A Mano	26.7	1.75	0.0265	34	Alta seguridad; concentraciones por orificios
1B Brazo	26.7	2.32	0.084	89	Condición de voladizo; rigidez adecuada
2 Torso	26.7	16.70	0.287	3.6	Caso gobernante ante impacto frontal
3 Cintura	26.7	1.30	0.012	47	Conjunto rígido; comportamiento no crítico
4 Apoyo inferior	40.0	5.00	0.21	12	Caso vertical sobredimensionado

## X. CONCLUSIONES

La repotenciación mecánica permitió recuperar la operatividad del robot humanoide Super Anthony, solucionando las limitaciones estructurales ocasionadas por el desgaste del chasis y la obsolescencia de los servomotores originales, sin modificar la arquitectura de control existente.

A pesar de emplear servomotores de torque equivalente, el rediseño estructural mejoró significativamente la estabilidad dinámica del sistema, reduciendo el desplazamiento lateral no deseado y optimizando el control rotacional durante las rutinas de combate.

El análisis de estabilidad estática, basado en el cálculo del centro de masa y la verificación del polígono de soporte, demostró un mayor margen de estabilidad respecto al modelo original, evidenciando una distribución de masas más eficiente.

Los estudios de resistencia estructural mediante el análisis del esfuerzo equivalente de Von Mises y el desplazamiento total (URES) confirmaron que los subensamblajes críticos operan con factores de seguridad elevados, garantizando integridad estructural ante cargas simuladas de impacto.

En comparación con la versión original, el robot repotenciado presenta un comportamiento dinámico más controlado y estable, mejor desempeño energético y mayor confiabilidad estructural, consolidándose como una versión optimizada bajo criterios de ingeniería mecánica aplicada.

## XI. RECOMENDACIONES

Estandarizar la metodología de repotenciación desarrollada en este proyecto como protocolo técnico del Club de Robótica, facilitando futuras intervenciones en plataformas humanoides sin disponibilidad de repuestos originales.

Implementar un sistema de monitoreo energético en tiempo real para evaluar el consumo durante secuencias prolongadas de combate y optimizar la autonomía del sistema.

Desarrollar una etapa adicional de validación experimental comparativa en condiciones reales de competencia, que permita cuantificar el desempeño del robot repotenciado frente a oponentes de distintas características dinámicas.

Implementar un sistema de registro y análisis de datos de movimiento, como la posición y la velocidad para generar métricas objetivas que optimicen futuras mejoras mecánicas y de control.

Evaluar la integración progresiva de materiales de mayor resistencia específica, como el acero inoxidable o la aleación de aluminio, en componentes estratégicos del chasis, con el fin de mejorar la relación de rigidez y peso del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] L. V. Garcia, «Gestión de la Obsolescencia de Componentes Electrónicos: Perspectivas Prácticas para Gerentes de Ingeniería,» *Altium Resources*, 2024. dirección: <https://resources.altium.com/es/p/managing-electronic-component-obsolescence-practical-insights-engineering-managers>.
- [2] F. Spark, «¿Qué causa las fallas de los robots en la manufactura? Descúbrelo,» *IEE-Business Knowledge Base*, 2025. dirección: [https://www.iee-business.com/knowledge/industrial-robot-failure-and-maintenance-4441-es\\_ES](https://www.iee-business.com/knowledge/industrial-robot-failure-and-maintenance-4441-es_ES).
- [3] I. Zaabar, R. Arango-Miranda, Y. Beauregard y M. Paquet, «A Sustainable Multicriteria Decision Framework for Obsolescence Resolution Strategy Selection,» *Sustainability*, vol. 13, n.º 15, 2021, Consultado el 18 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/15/8601>.
- [4] Fundación Scientia, *OpenScientia: Competiciones de robótica educativa*, <https://www.openscientia.com/>, Plataforma dedicada a promover vocaciones STEAM mediante competiciones como SPARK, INSPIRE y QUANTA, 2025.
- [5] Tracxn Technologies Pvt Ltd., *Super Anthony – Limitless IQ*, Perfil en Tracxn, Recuperado el 24 de junio de 2025, 2025. dirección: [https://tracxn.com/d/companies/super-anthony/\\_yzc416xY4cOEQpkDqZK2NQJcp7\\_cYVmRdCgRmHzzGOU#about-the-company](https://tracxn.com/d/companies/super-anthony/_yzc416xY4cOEQpkDqZK2NQJcp7_cYVmRdCgRmHzzGOU#about-the-company).
- [6] P. Dua, L. Bhadana, A. Bhardwaj, R. Diwakar y A. Saxena, «A Review of Combat Robotics and Research of Optimising Drum-Spinner Battle-bot for competitive level,» mayo de 2024, págs. 1-2.
- [7] J. Zhao, B. Yin, Z. Zeng, P. Yuan e Y. Li, «Application and exploration of competitive combat robot technology in engineering education,» en *2023 IEEE 12th International Conference on Engineering Education (ICEED)*, 2023, págs. 148-152.
- [8] Accu Robotics Society / Accu, *How to Make a Combat Robot - Antweight (150 g)*, Guía publicada en el sitio web de Accu, Recuperado el 24 de junio de 2025, abr. de 2025. dirección: <https://www.accu.co.uk/p/483-how-to-make-a-combat-robot-antweight-150g>.
- [9] L. Silva, «Control visual de robots paralelos: Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma Robotenis,» Disponible en [https://oa.upm.es/378/1/LUIS\\_ANGEL\\_SILVA.pdf](https://oa.upm.es/378/1/LUIS_ANGEL_SILVA.pdf), Tesis Doctoral en Ingeniería Eléctrica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, España, 2005.
- [10] G. Tuna, A. Tuna, E. ahmetoğlu y H. Kuscü, «A survey on the use of humanoid robots in primary education: Prospects, research challenges and future research directions,» *Cypriot Journal of Educational Sciences*, vol. 14, págs. 361-373, sep. de 2019. DOI: 10.18844/cjes.v14i3.3291.
- [11] L. V. Garcia, *Gestión de la obsolescencia de componentes electrónicos: Perspectivas prácticas para gerentes de ingeniería*, <https://resources.altium.com/es/p/managing-electronic-component-obsolescence-practical-insights-engineering-managers>, Consultado el 18 de noviembre de 2025, 2024.
- [12] M. Lapeyre et al., «Poppy: Open source 3D printed robot for experiments in developmental robotics,» en *2014 IEEE International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-Epirob)*, Consultado el 18 de noviembre de 2025, 2014, pp. 1-6. dirección: <https://doi.org/10.1109/DEVLRN.2014.6982977>.
- [13] K. J. Cali Cando y J. P. F. Torres Sarmiento, *Desarrollo de un robot de batalla de 12 libras radiocontrolado*, Trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero en Mecatrónica, Dirigido por Ing. Jorge Bladimir Fariño Cedeño, Mgtr., Guayaquil, Ecuador, 2024. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29065>.

- [14] «What are the key ingredients for a competitive combat robot?» Dirección: <https://engineerdog.com/2018/06/03/what-are-the-key-ingredients-for-a-competitive-combat-robot/>.
- [15] D. García, M. López y R. Silva, «Educational Robotics for Skill Development in Engineering Students: A Practical Review,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2024, Consultado el 26 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889024003156>.
- [16] H. Niu, Z. Zhang y X. Chen, «Humanoid Locomotion and Manipulation: Current Progress,» *arXiv preprint arXiv:2501.02116*, 2025, Consultado el 25 de noviembre de 2025. dirección: <https://arxiv.org/html/2501.02116v1>.
- [17] L. Wang, J. Huang y M. Silva, «Advancements in Humanoid Robot Dynamics and Learning,» *Intelligent Robotics (OAEPublish)*, vol. 9, n.º 6, 2025, Disponible en línea. Consultado el 25 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.oaepublish.com/articles/ir.2025.32>.
- [18] Y. Du, M. Torres y S. Liu, «Efficient Co-Adaptation of Humanoid Robot Design and Locomotion Control Using Surrogate-Guided Optimization,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2025, Consultado el 25 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667379725000464>.
- [19] Y. Tong, X. Li y H. Zhou, «Advancements in Humanoid Robots: A Comprehensive Review and Future Prospects,» *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 11, n.º 2, 2024, Consultado el 25 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.ieee-jas.net/article/doi/10.1109/JAS.2023.124140>.
- [20] R. Tsuji e Y. Matsuura, «Humanoid Robots — Technological Advancements Driven by Generative AI and the Launch of Pilot Programs,» Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute (MGSSI), inf. téc. Biz Tech Focus 2025, 2025, Accessed: 2025-11-13. dirección: [https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2025/03/27/2501btf\\_tsuji\\_matsuura\\_e.pdf](https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2025/03/27/2501btf_tsuji_matsuura_e.pdf).
- [21] M. Arbulu, «Stable locomotion of humanoid robots based on mass concentrated model,» Tesis doct., Universidad Carlos III de Madrid, abr. de 2009.
- [22] R. W. Lebling, «Robots of Ages Past,» *AramcoWorld*, 2019, Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.aramcoworld.com/articles/2019/robots-of-ages-past>.
- [23] K. Robotics. «What is a humanoid robot? Explore their history and milestones of their development.» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://kawasakirobotics.com/asia-oceania/blog/2101-01/>.
- [24] Qviro. «Humanoid Robots 2025: Guide to All Models.» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: [https://qviro.com/blog/humanoid-robots-all-models/?utm\\_source=chatgpt.com](https://qviro.com/blog/humanoid-robots-all-models/?utm_source=chatgpt.com).
- [25] E. Yoshida, «Robots that look like humans: A brief look into humanoid robotics,» *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc)*, vol. 5117, n.º 677-3023, 2019, Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.redalyc.org/journal/5117/511766773023/html/>.
- [26] V. Lippi, C. Maurer y T. Mergner, «Evaluación del control de postura y equilibrio de robots comparado con sujetos humanos usando medidas de semejanza humana,» en *Proceedings of the 2nd International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems – Volume 1: ROBOVIS*, Consultado el 13 de noviembre de 2025, SciTePress, 2021, págs. 77-85. DOI: 10.5220/0010646900003061. dirección: <https://www.scitepress.org/Papers/2021/106469/106469.pdf>.
- [27] G. Morales, «Acercamiento a la robótica: Robot humanoide,» *Revista de Robots*, vol. 12, n.º 4, 2020, Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: [https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/01/4\\_5\\_acercamiento-a-la-robotica-robot-humanoide\\_v.pdf](https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/01/4_5_acercamiento-a-la-robotica-robot-humanoide_v.pdf).

- [28] M. X. Pérez. «Se presentó un nuevo robot humanoide: ¿Se viene la revolución de las máquinas?» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://agencia.unq.edu.ar/?p=7756>.
- [29] H. R. Technology. «What sensors do humanoid robots have?» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://humanoidroboticstechnology.com/articles/what-sensors-do-humanoid-robots-have/>.
- [30] J. Koon. «Sensor Fusion in Humanoids – How Humanlike Robots Energize Automation.» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.embedded.com/sensor-fusion-in-humanoids-how-humanlike-robots-energize-automation/>.
- [31] A. Kelkar et al. «Humanoid robots: Crossing the chasm from concept to commercial reality.» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: [https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/humanoid-robots-crossing-the-chasm-from-concept-to-commercial-reality?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/humanoid-robots-crossing-the-chasm-from-concept-to-commercial-reality?utm_source=chatgpt.com).
- [32] C. Semasinghe, D. Taylor, S. Rezazadeh y otros, «Design of actuators for a humanoid robot with anthropomorphic leg architecture,» *Actuators*, vol. 14, n.º 5, 2025, Consultado el 13 de noviembre de 2025. DOI: 10.3390/act14050243. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-0825/14/5/243>.
- [33] R. Articles. «Joint actuators: The fundamental component for humanoid robots’ power and dexterity.» Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: [https://robotics.ee/2025/06/20/joint-actuators-the-fundamental-component-for-humanoid-robots-power-and-dexterity/?utm\\_source=chatgpt.com](https://robotics.ee/2025/06/20/joint-actuators-the-fundamental-component-for-humanoid-robots-power-and-dexterity/?utm_source=chatgpt.com).
- [34] K. M. Lynch y F. C. Park, *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. 2017, Preprint disponible en línea. dirección: <https://hades.mech.northwestern.edu/images/7/7f/MR.pdf>.
- [35] J. L. Ackerman, W. R. Proffit, D. M. Sarver, M. B. Ackerman y M. R. Kean, «Pitch, roll, and yaw: Describing the spatial orientation of dentofacial traits,» *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 131, n.º 3, págs. 305-310, 2007. DOI: 10.1016/j.ajodo.2006.05.032.
- [36] S. M. LaValle, «The Configuration Space,» en *Planning Algorithms*, Capítulo disponible en línea, Cambridge University Press, 2004. dirección: <https://robotics.caltech.edu/~jwb/courses/ME132/LaValleBook/Cspace-CH4.pdf>.
- [37] X. Xinjilefu, S. Feng y C. G. Atkeson, «Center of Mass Estimator for Humanoids and Its Application in Modelling Error Compensation, Fall Detection and Prevention,» en *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, Disponible en línea, 2015. dirección: [https://www.cs.cmu.edu/~cgal/drc/ICHR15\\_0101\\_FI.pdf](https://www.cs.cmu.edu/~cgal/drc/ICHR15_0101_FI.pdf).
- [38] A. Manni, A. D. Noi y G. Indiveri, «A Control Architecture for Dynamically Stable Gaits of Small Size Humanoid Robots,» en *IFAC Proceedings Volumes*, Disponible en línea, IFAC, vol. 39, 2006, págs. 683-688. dirección: [https://www.researchgate.net/publication/244954368\\_A\\_control\\_architecture\\_for\\_dynamically\\_stable\\_gaits\\_of\\_small\\_size\\_humanoid\\_robots](https://www.researchgate.net/publication/244954368_A_control_architecture_for_dynamically_stable_gaits_of_small_size_humanoid_robots).
- [39] A. Goswami y P. Vadakkepat, «Kinematic and Dynamic Modeling of Humanoid Robots,» en *Humanoid Robotics: A Reference*, Springer Nature, 2020, cap. 2. DOI: 10.1007/978-94-007-7194-9.
- [40] F. H. Sarmiento, E. J. Gómez y D. A. Z. Díaz, «Concepto de robot humanoide antropométrico para investigación en control,» *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc)*, vol. 19, 2015, Consultado el 13 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257059815004.pdf>.
- [41] M. F. Ashby, «Introduction,» en *Materials Selection in Mechanical Design*, Elsevier Ltd, 2011, págs. 1-13. DOI: 10.1016/B978-1-85617-663-7.00001-1.

- [42] Protolabs, *Materials That Command the Robotics Industry*, <https://www.protolabs.com/en-gb/resources/blog/materials-that-command-the-robotics-industry/>, Blog sobre materiales clave en la ingeniería robótica, 2025.
- [43] Covestro, *Polycarbonate solutions that elevate the performance of next-generation humanoid robots*, <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2026/humanoid-robotics-material-solutions>, Artículo sobre soluciones de materiales para robots humanoides, 2026.
- [44] D. Chowdhury, Y.-E. Park, I. Jung y S. Lee, «Characterization of Exterior Parts for 3D-Printed Humanoid Robot Arm with Various Patterns and Thicknesses,» *Polymers*, vol. 16, n.º 7, pág. 988, 2024. DOI: 10.3390/polym16070988. dirección: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/7/988>.
- [45] F. García-Córdova, A. Guerrero-González y F. Hidalgo-Castelo, «Bioinspired Control Architecture for Adaptive and Resilient Navigation of Unmanned Underwater Vehicle in Monitoring Missions of Submerged Aquatic Vegetation Meadows,» *Biomimetics*, vol. 9, n.º 6, pág. 329, 2024, Consultado el 13 de noviembre de 2025. DOI: 10.3390/biomimetics9060329. dirección: <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/6/329>.
- [46] M. Basiri et al., «Functionalities, Benchmarking System and Performance Evaluation for a Domestic Service Robot: People Perception, People Following, and Pick and Placing,» *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 10, pág. 4819, 2022, Consultado el 26 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/10/4819>.
- [47] R. Jánoš et al., «Stability and Dynamic Walk Control of Humanoid Robot for Robot Soccer Player,» *Machines*, vol. 10, n.º 6, pág. 463, 2022, Consultado el 26 de noviembre de 2025. dirección: <https://www.mdpi.com/2075-1702/10/6/463>.
- [48] N. Memar Kocheh Bagh y others, «Control and Gait Generation of Biped Robots: A Review,» *Journal preprint / White Rose Research*, 2023, Consultado el 26 de noviembre de 2025. dirección: [https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/201249/1/BIPED\\_ROBOTS\\_REVIEW\\_PAPER.pdf](https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/201249/1/BIPED_ROBOTS_REVIEW_PAPER.pdf).
- [49] M. S. Khan y R. Mandava, «Design of Dynamically Balanced Gait for the Biped Robot While Crossing the Ditch,» *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 20, n.º 7, 2023, Consultado el 26 de noviembre de 2025. dirección: [https://acta.uni-obuda.hu/Khan\\_Mandava\\_136.pdf](https://acta.uni-obuda.hu/Khan_Mandava_136.pdf).
- [50] K. Okada, M. Kojima, Y. Sagawa, T. Ichino, K. Sato y M. Inaba, «Vision based behavior verification system of humanoid robot for daily environment tasks,» en *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2006, págs. 7-12. DOI: 10.1109/ICHR.2006.321356.

ANEXO A

PLANOS DE LA VERSIÓN REPOTENCIADA DEL ROBOT HUMANOIDE SUPER ANTHONY

Planos de las piezas acotadas en Solidworks 2024:

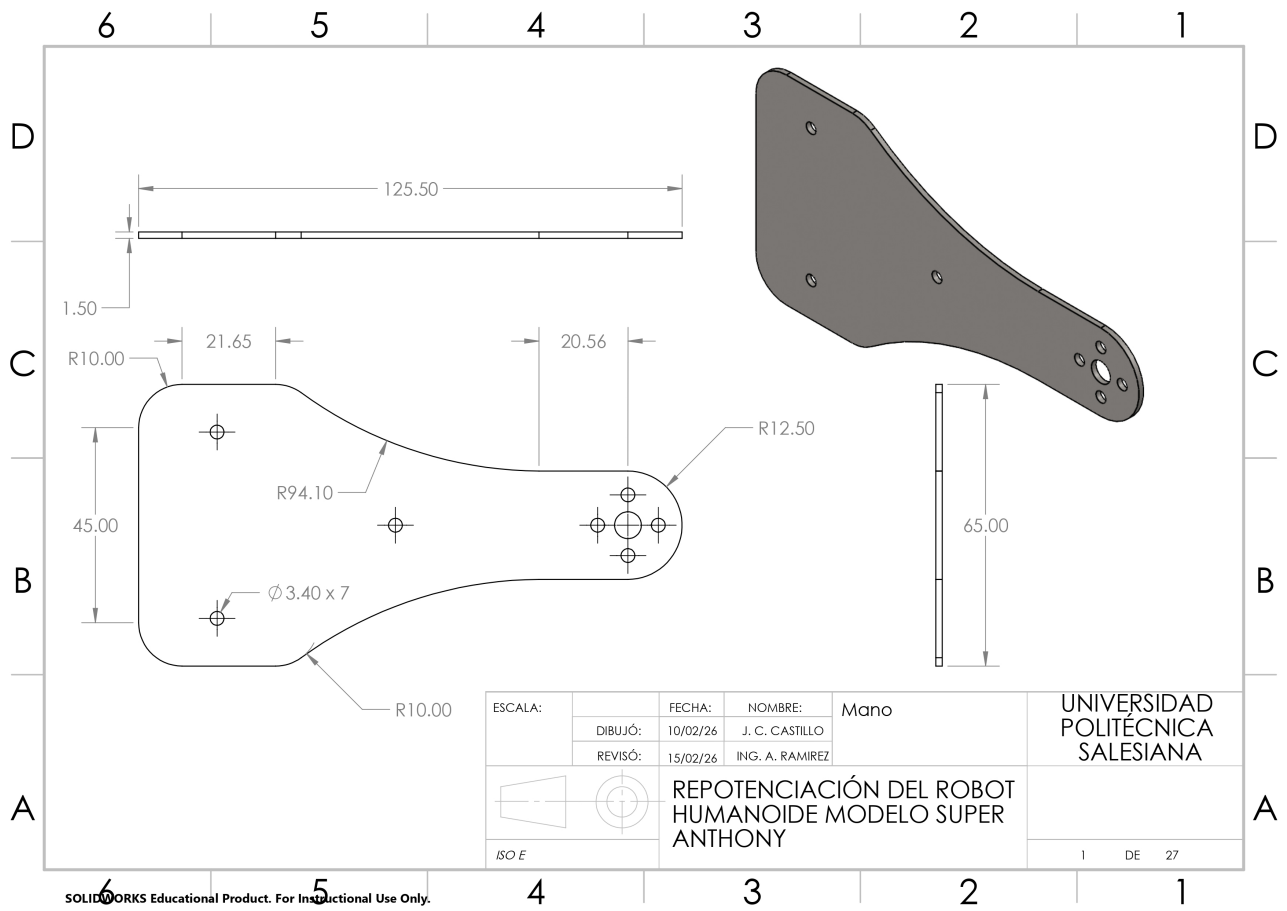


Figura 22. Lámina acotada de la mano del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

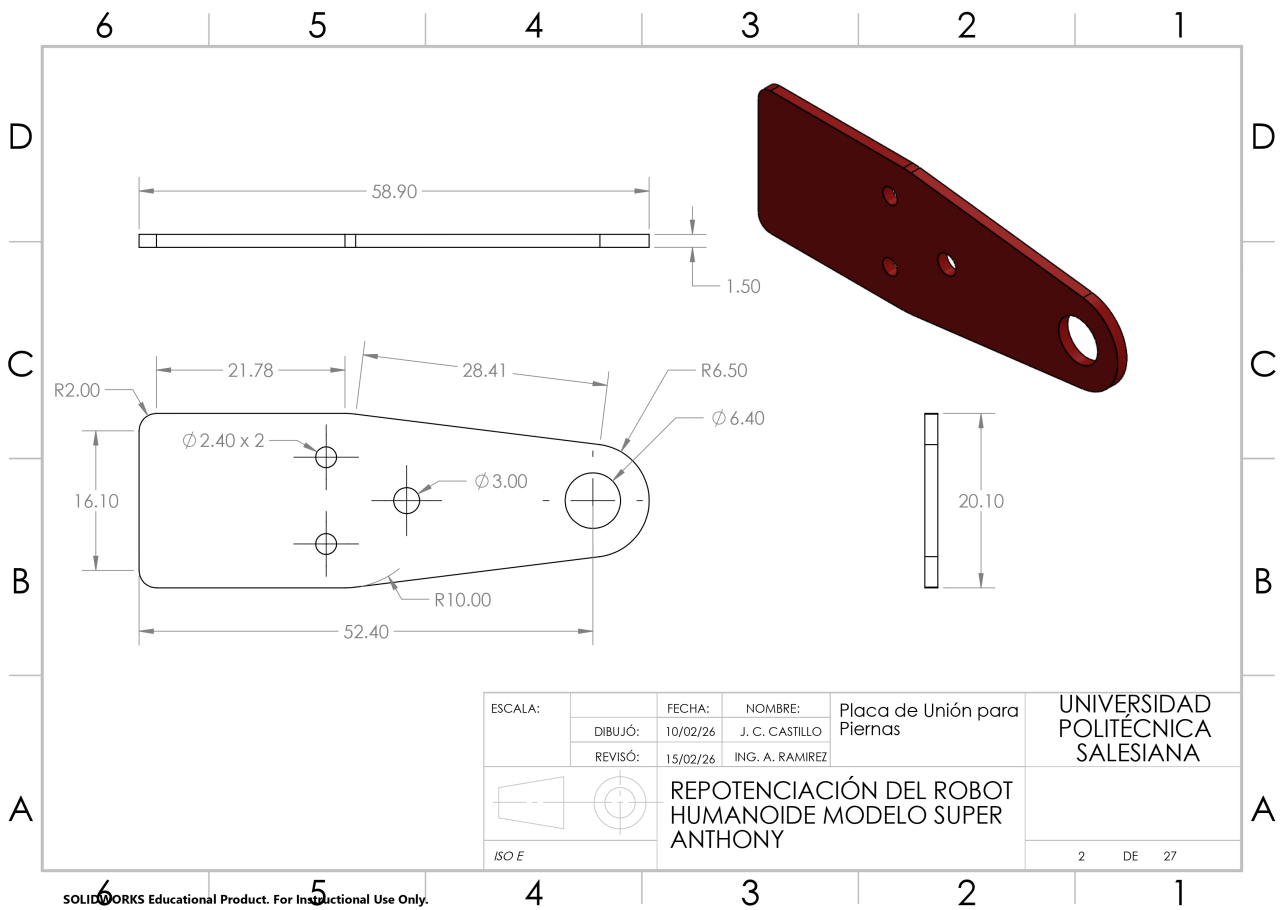


Figura 23. Lámina acotada de la placa de unión para piernas del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

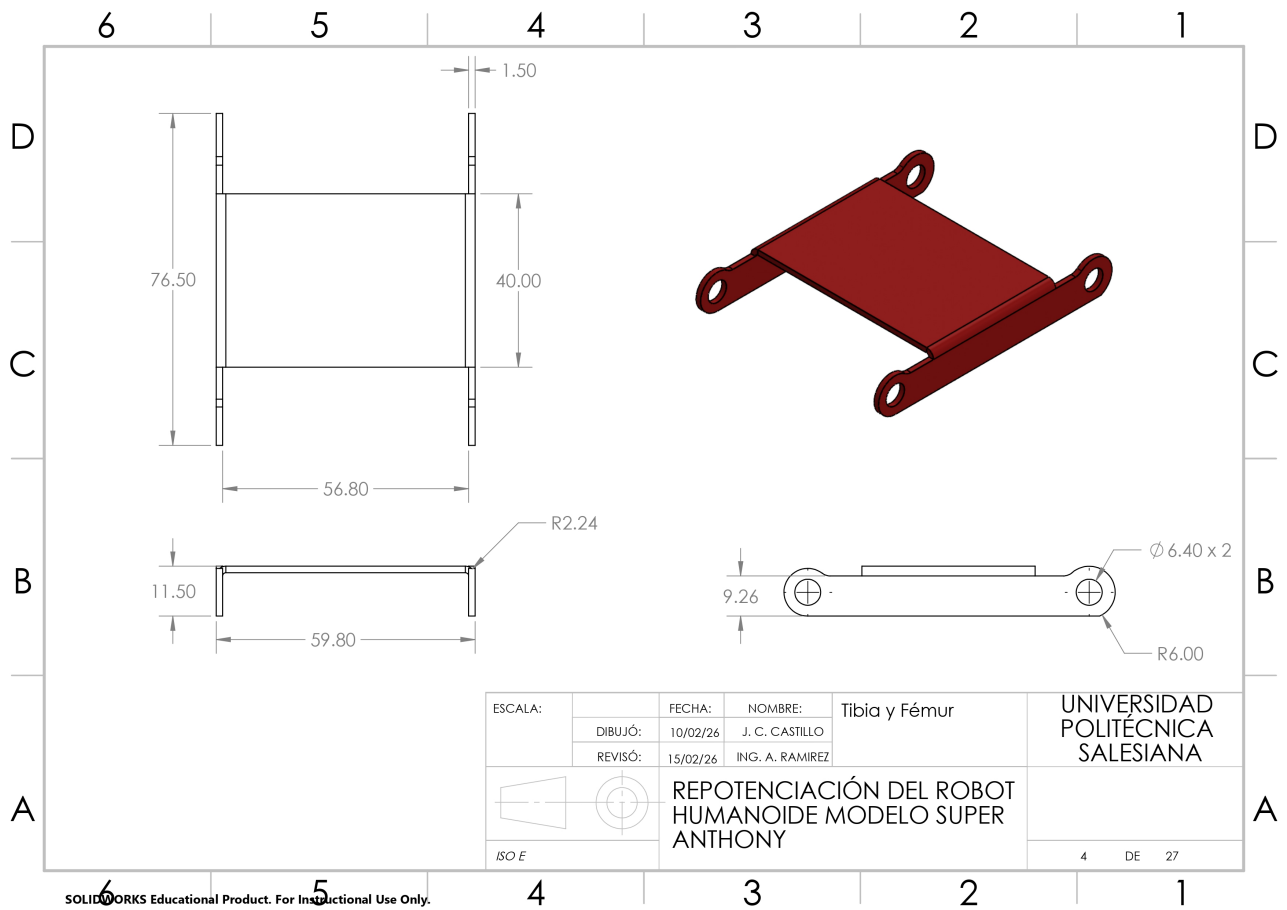


Figura 24. Lámina acotada de la tibia y fémur del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

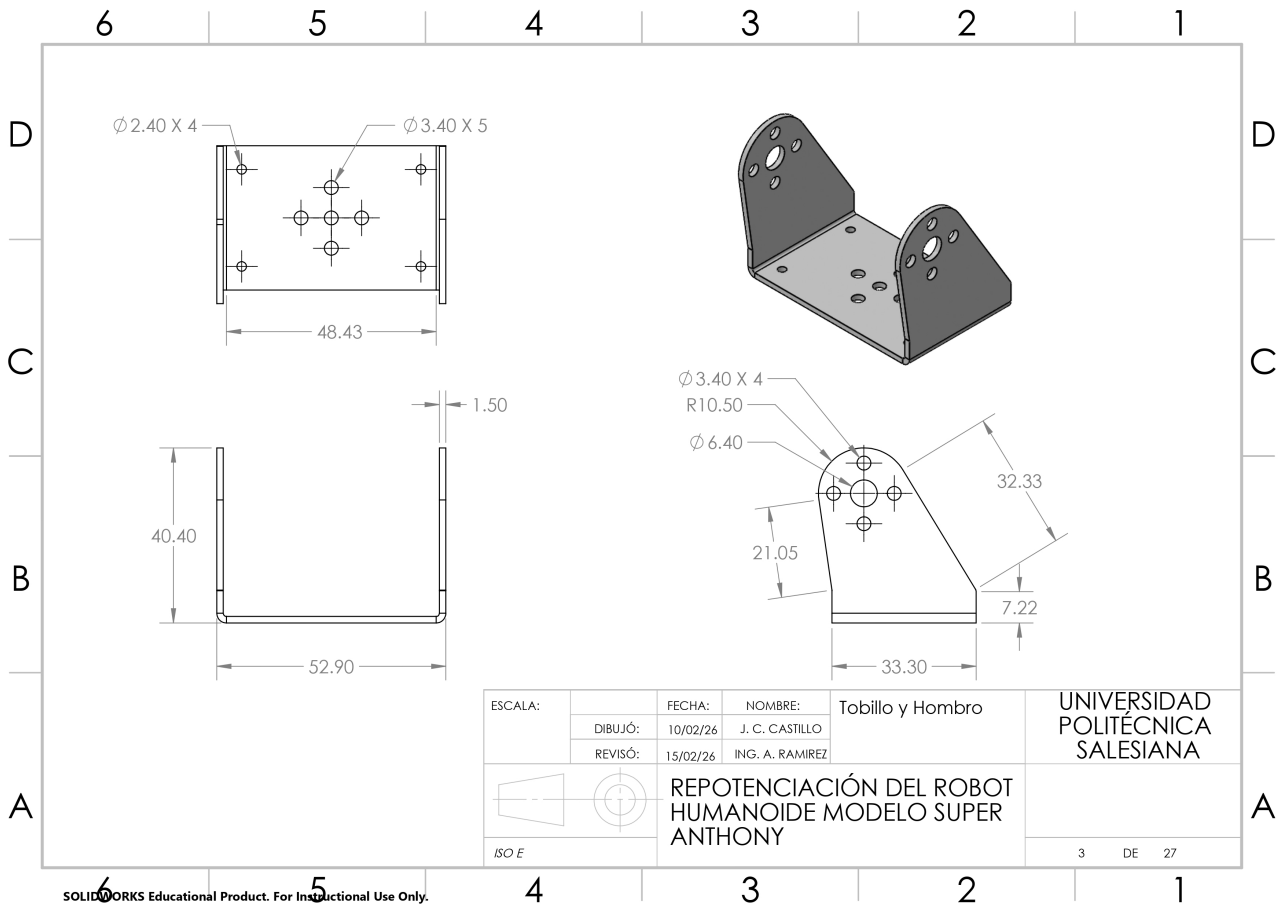


Figura 25. Lámina acotada del tobillo y hombro del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

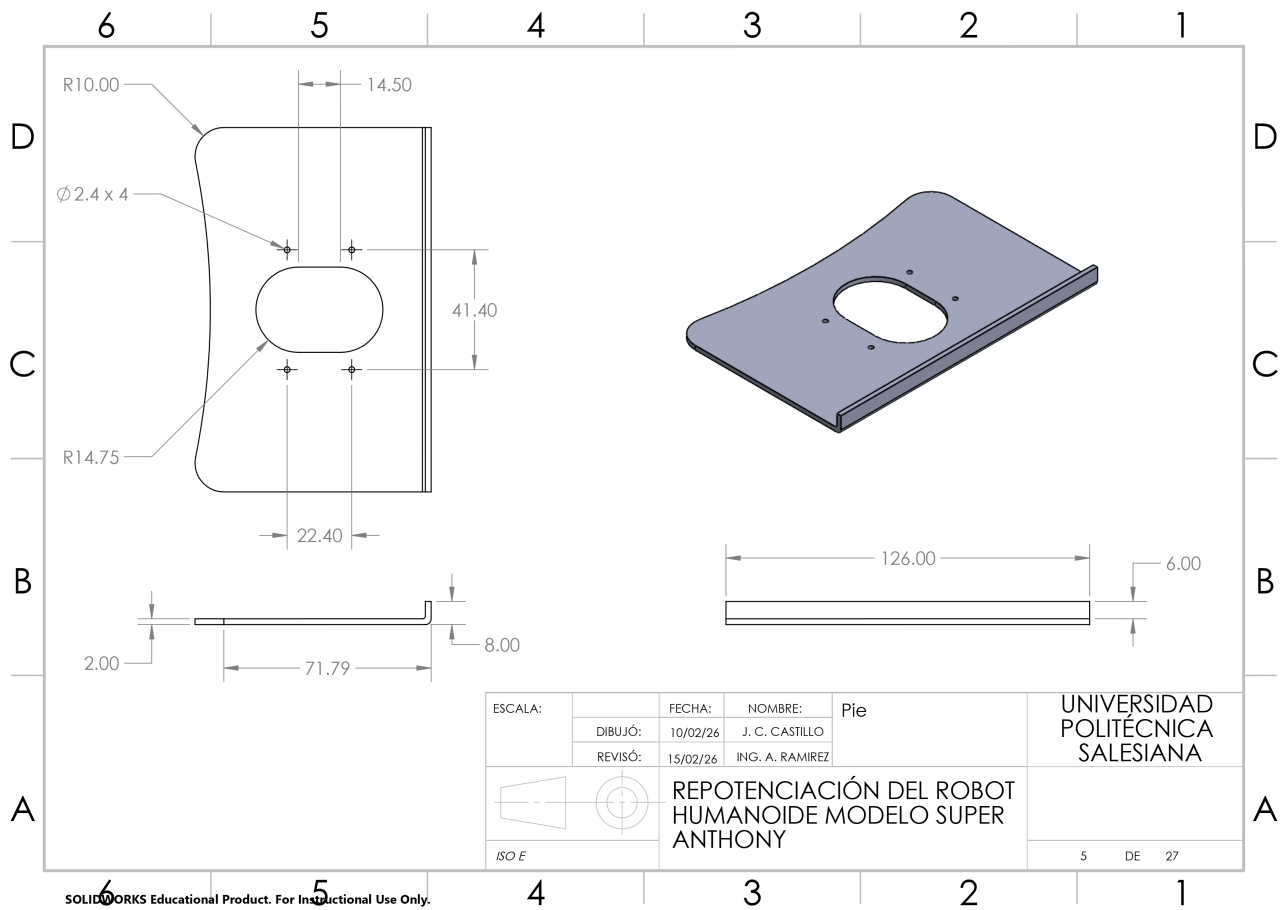


Figura 26. Lámina acotada del pie del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

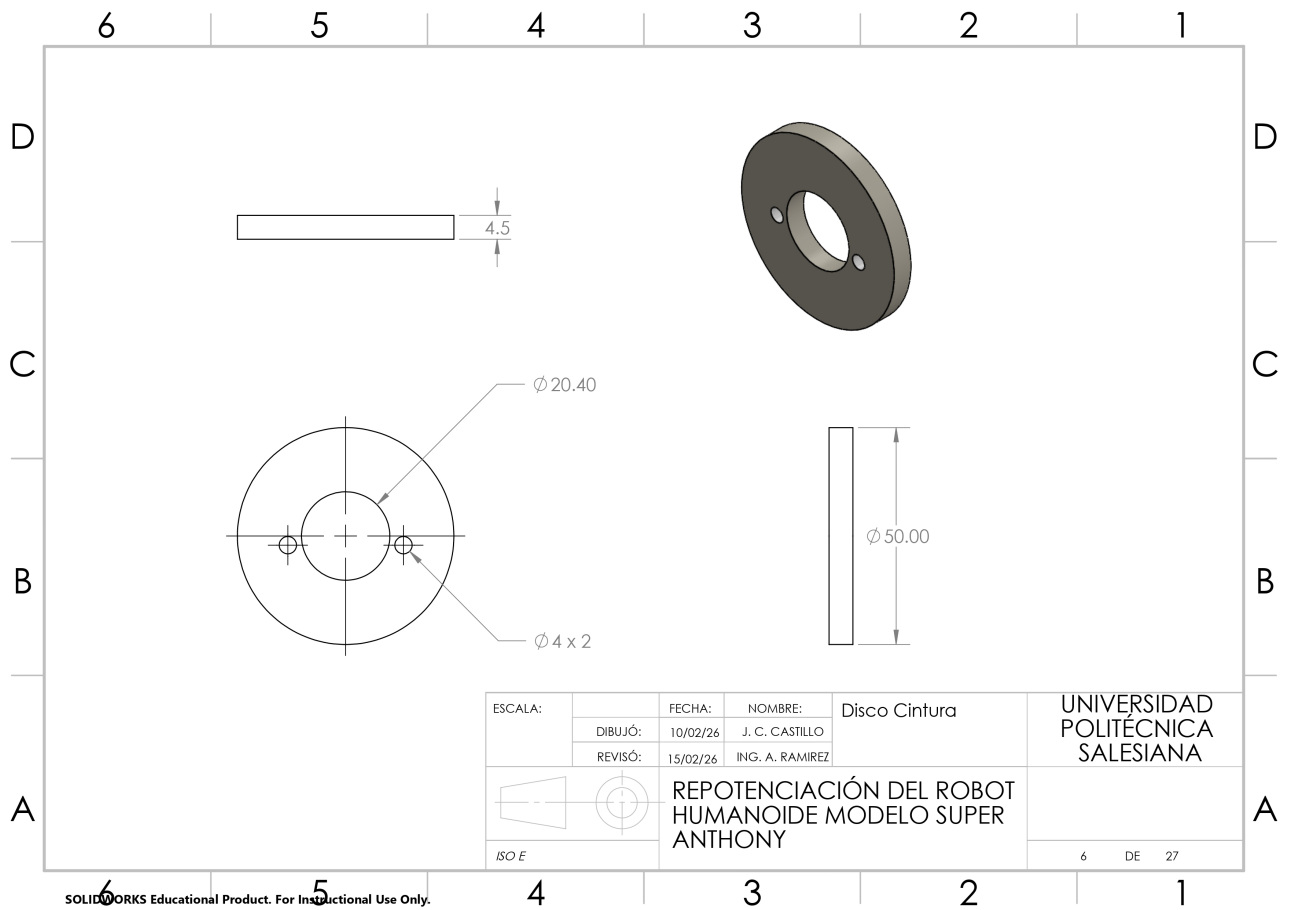


Figura 27. Lámina acotada del disco de la cintura del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

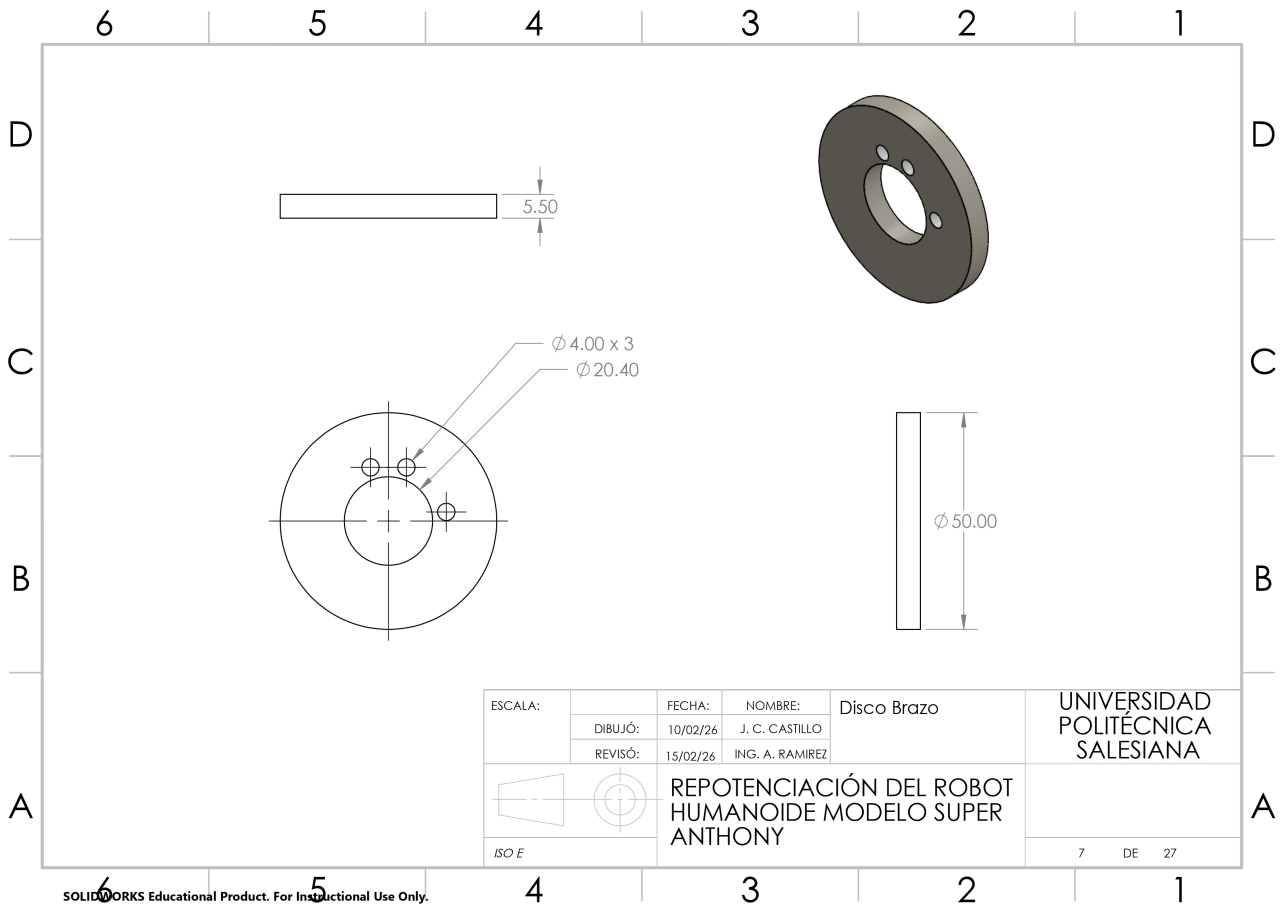


Figura 28. Lámina acotada del disco de los brazos del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

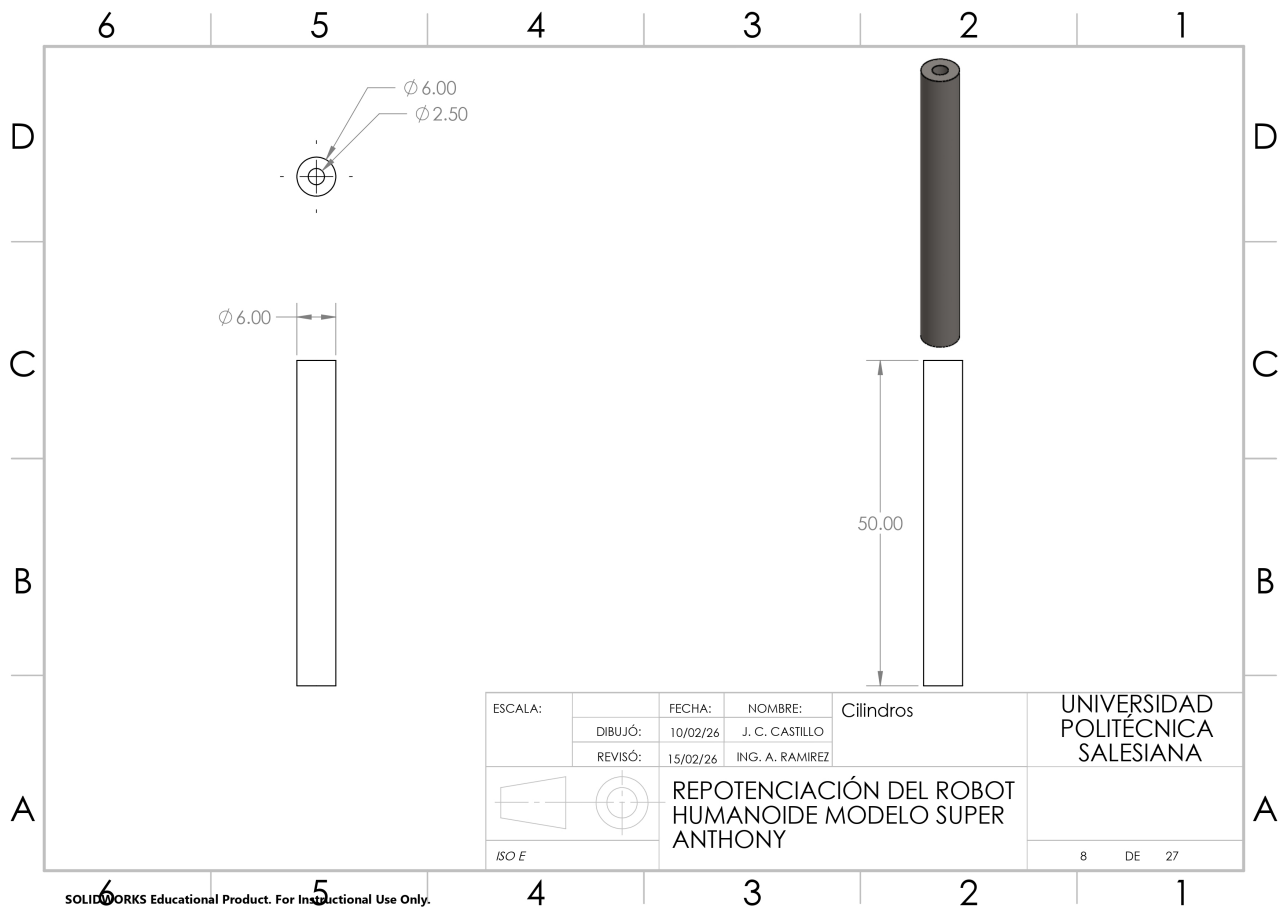


Figura 29. Lámina acotada de los cilindros del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

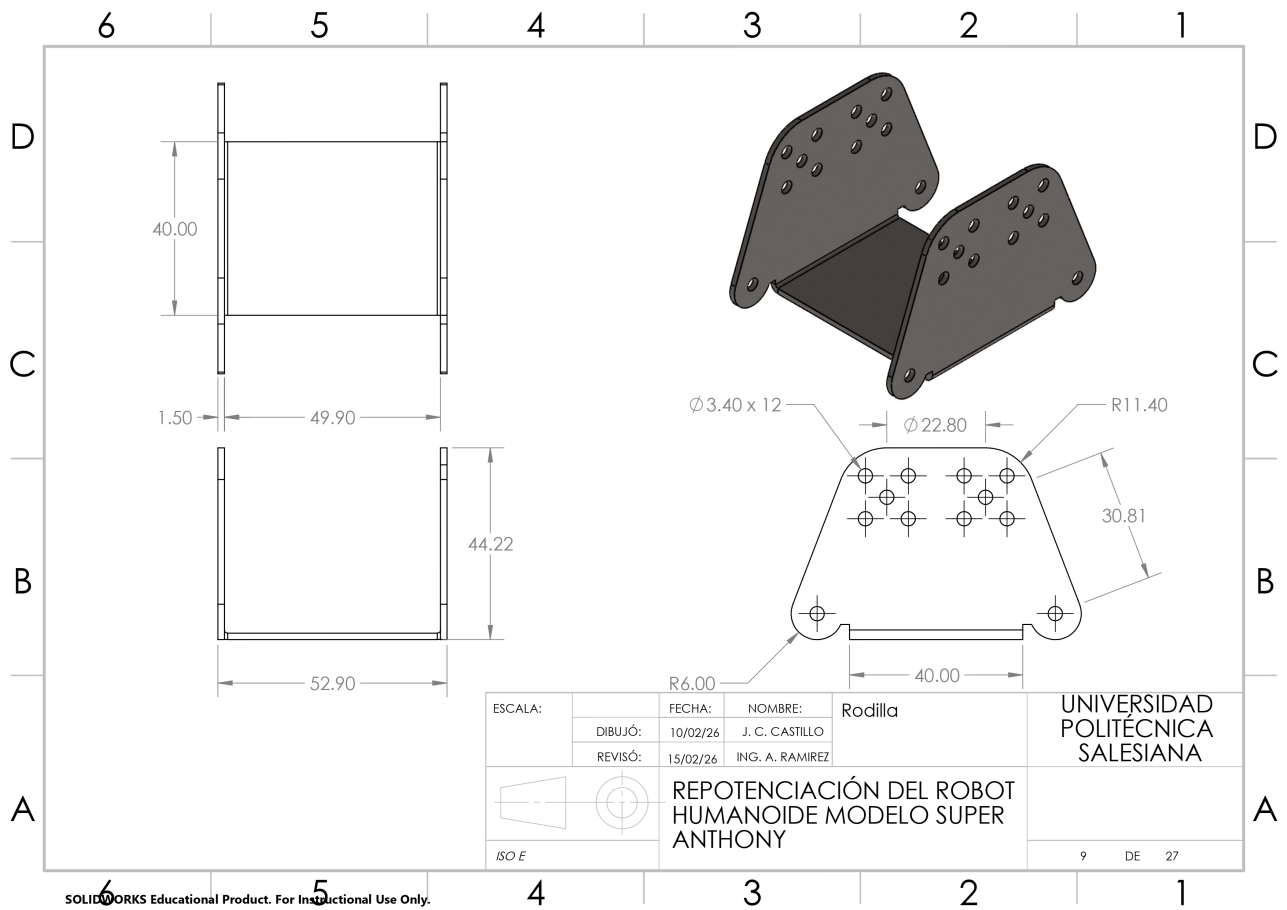


Figura 30. Lámina acotada de la rodilla del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

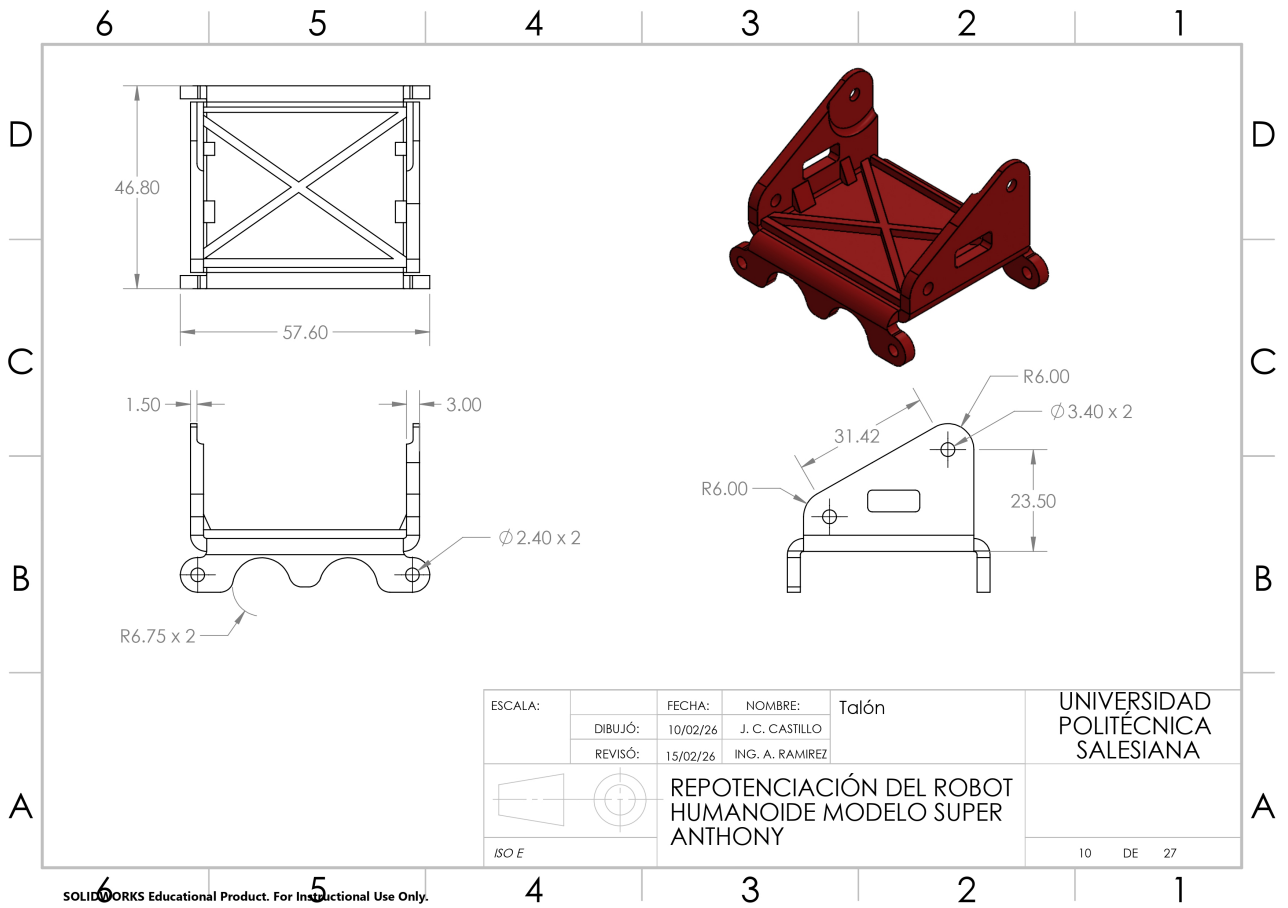


Figura 31. Lámina acotada del talón del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

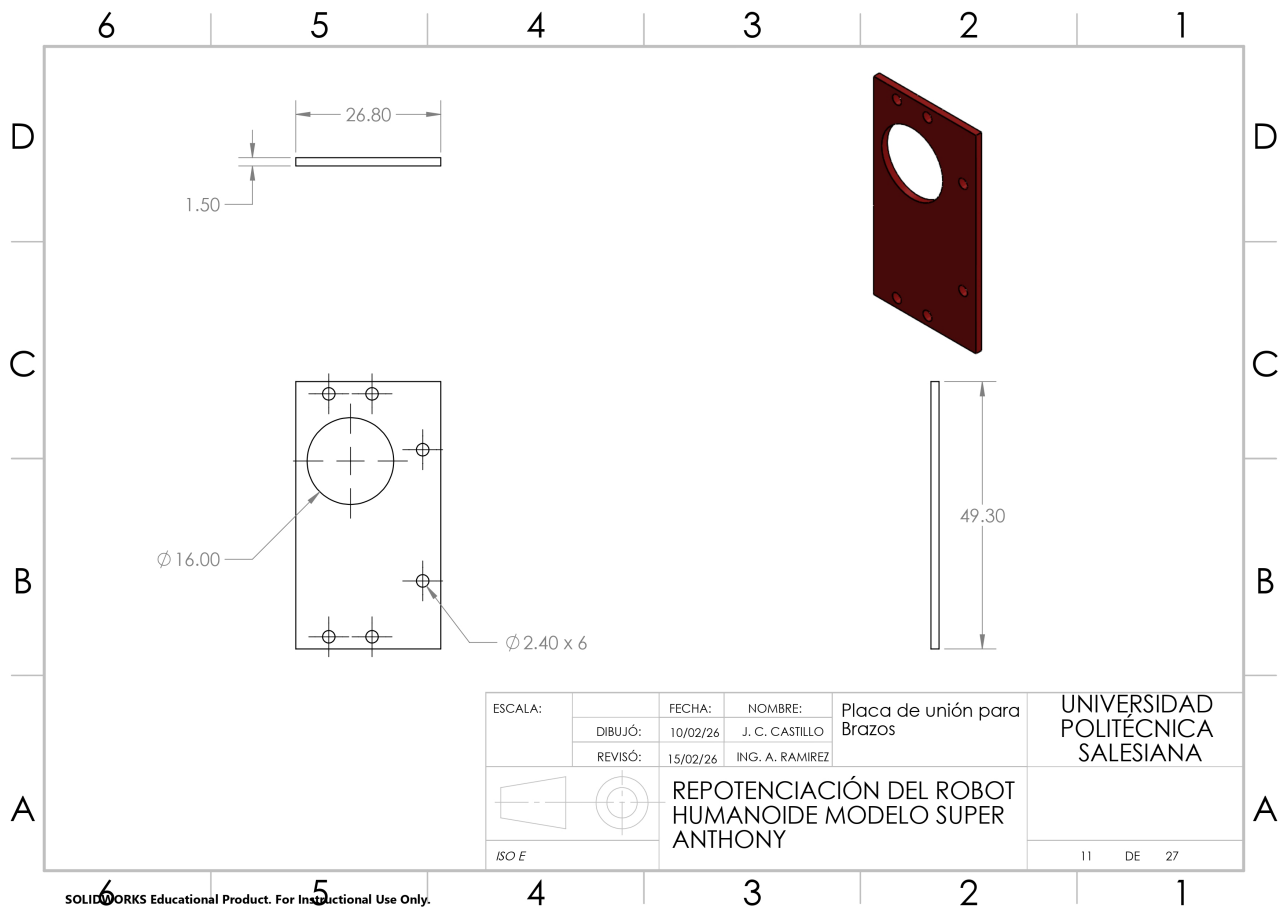


Figura 32. Lámina acotada de la placa de unión para brazos del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

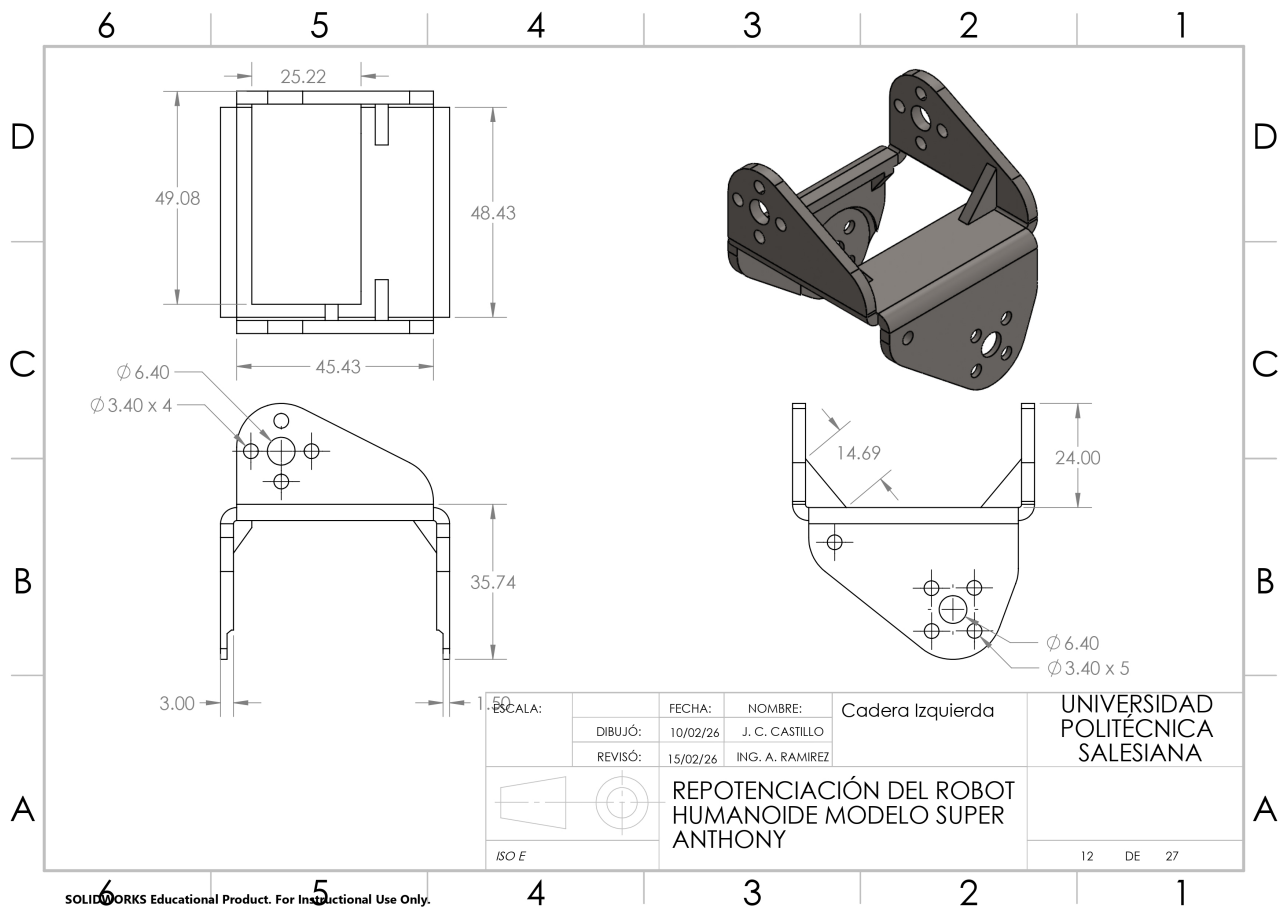


Figura 33. Lámina acotada de la cadera izquierda del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

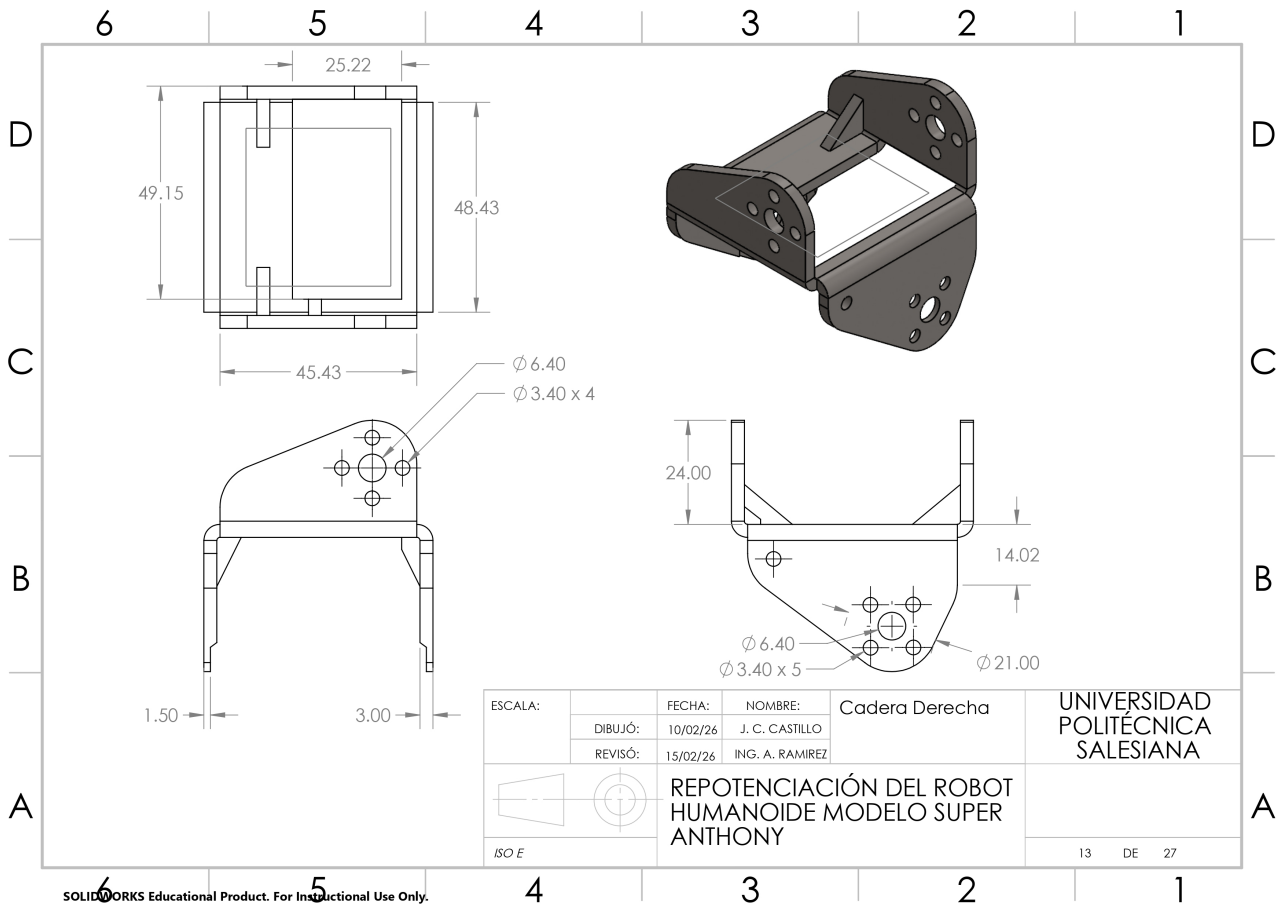


Figura 34. Lámina acotada de la cadera derecha del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

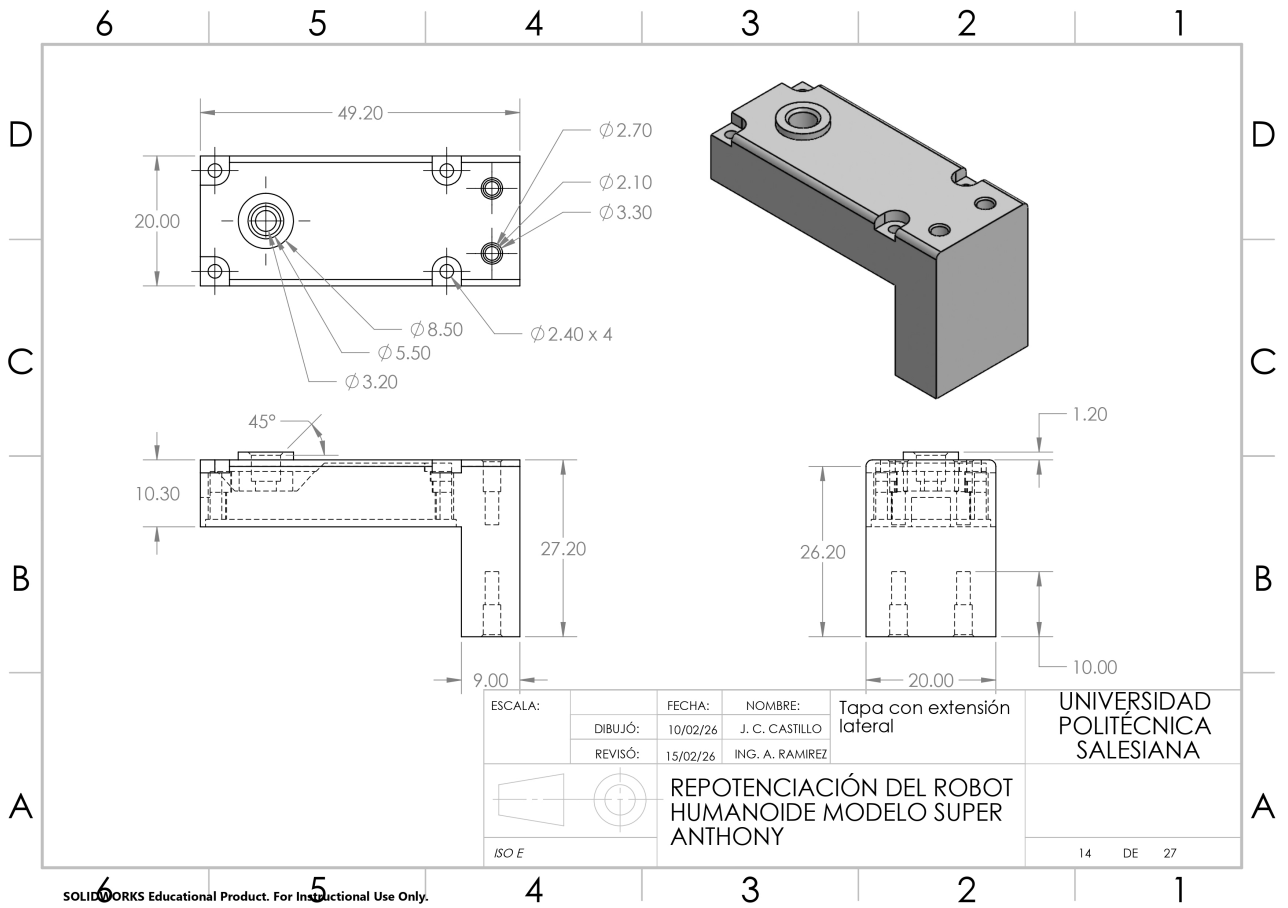


Figura 35. Lámina acotada de la tapa con extensión lateral del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

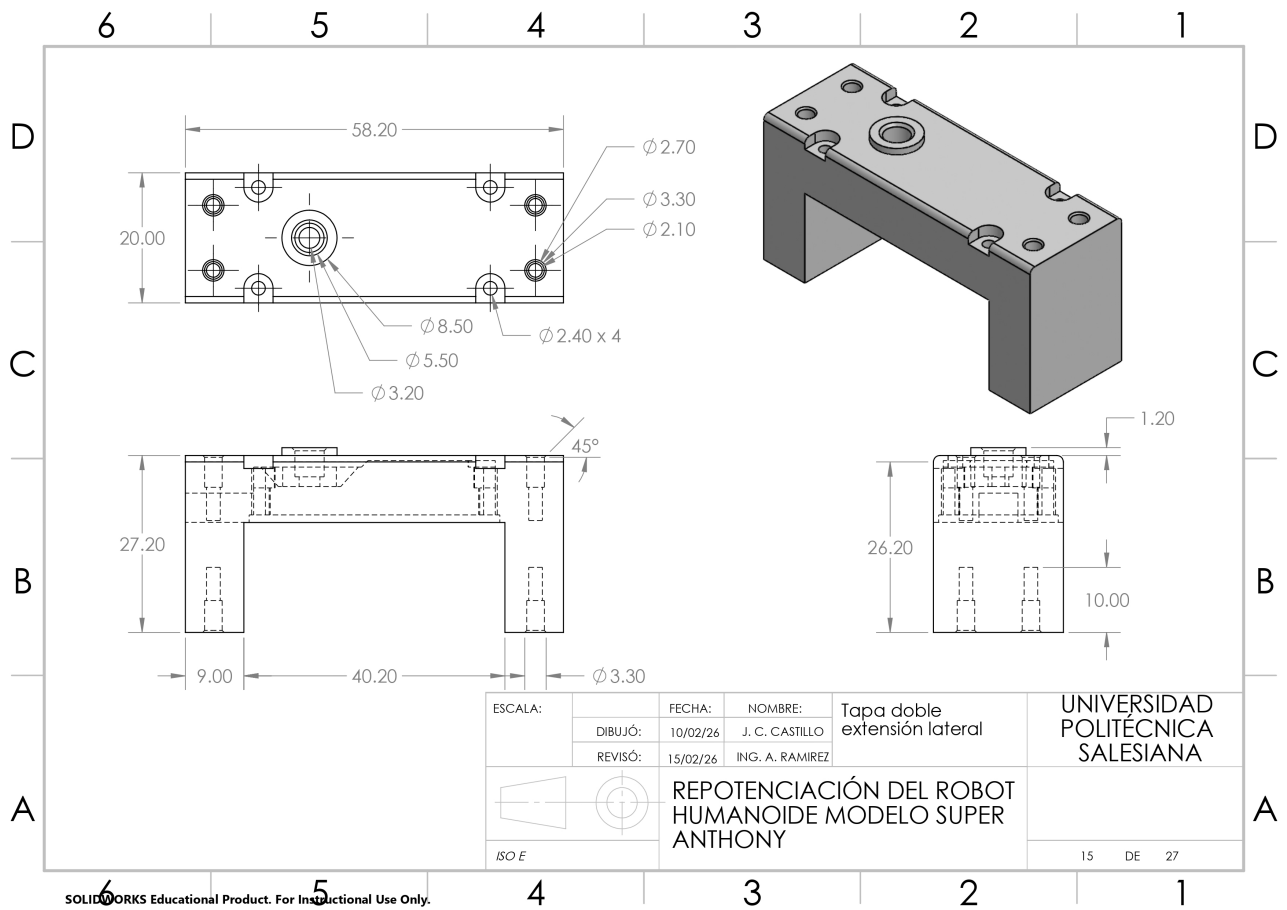


Figura 36. Lámina acotada de la tapa con doble extensión lateral del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

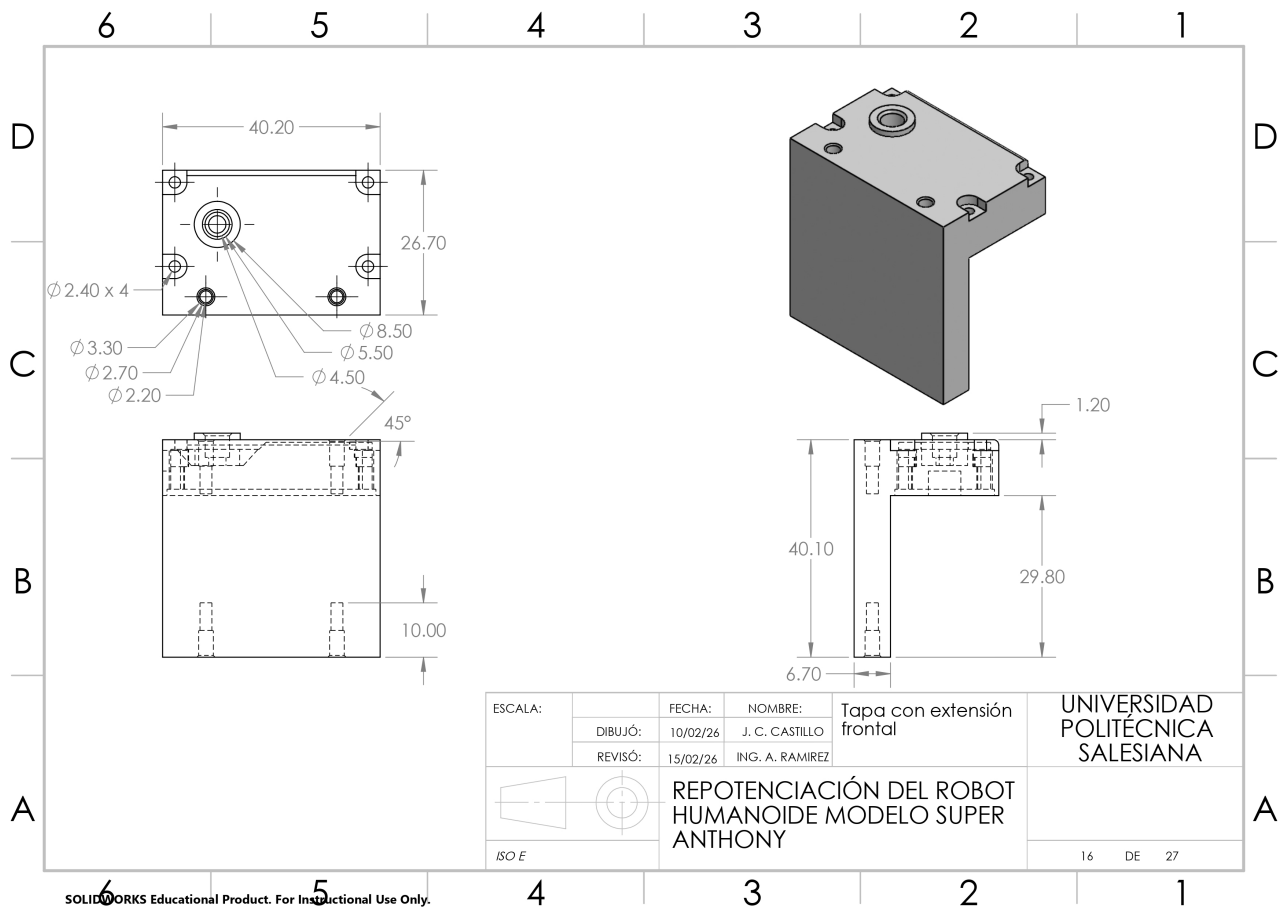


Figura 37. Lámina acotada de la tapa con extensión frontal del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

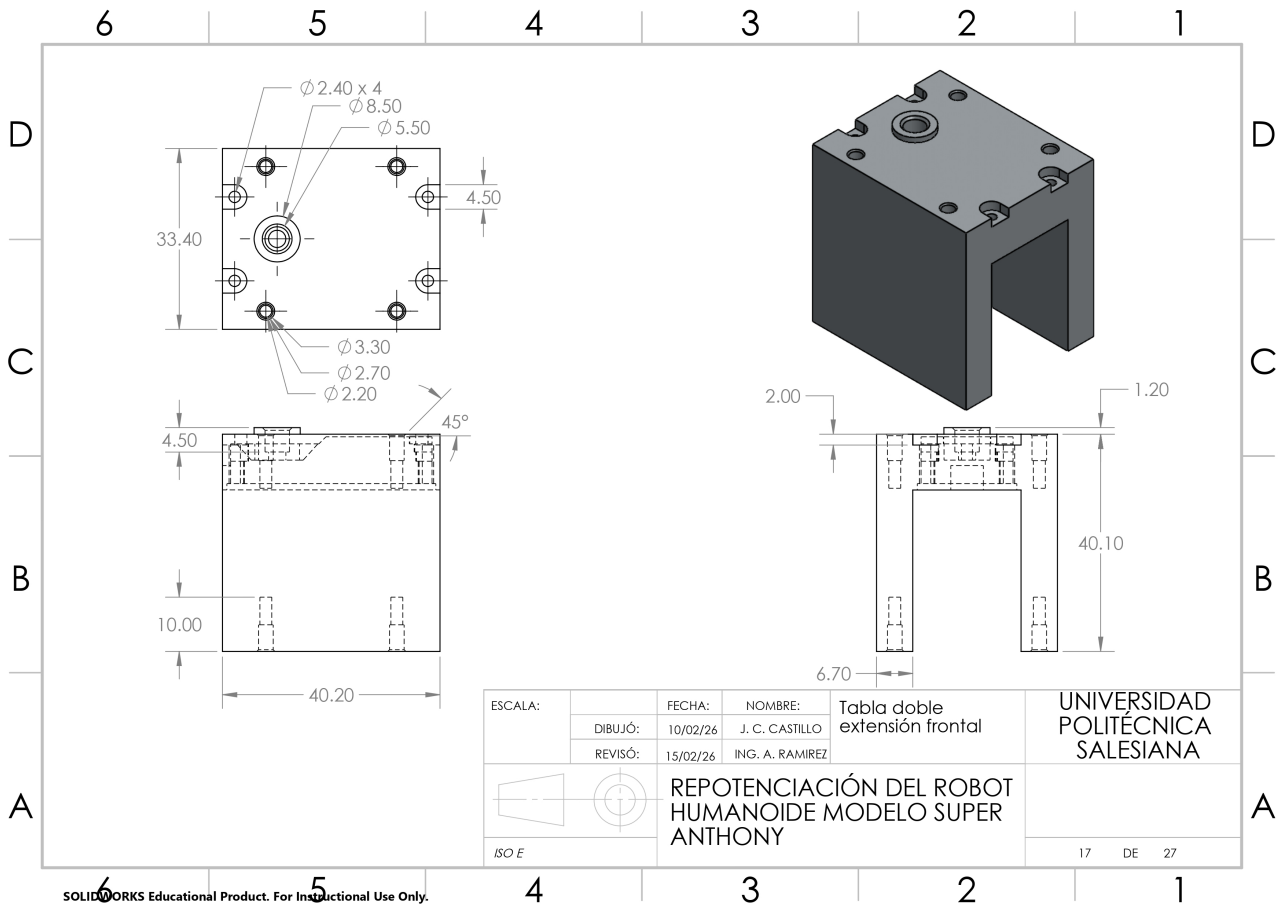


Figura 38. Lámina acotada de la tapa con doble extensión frontal del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

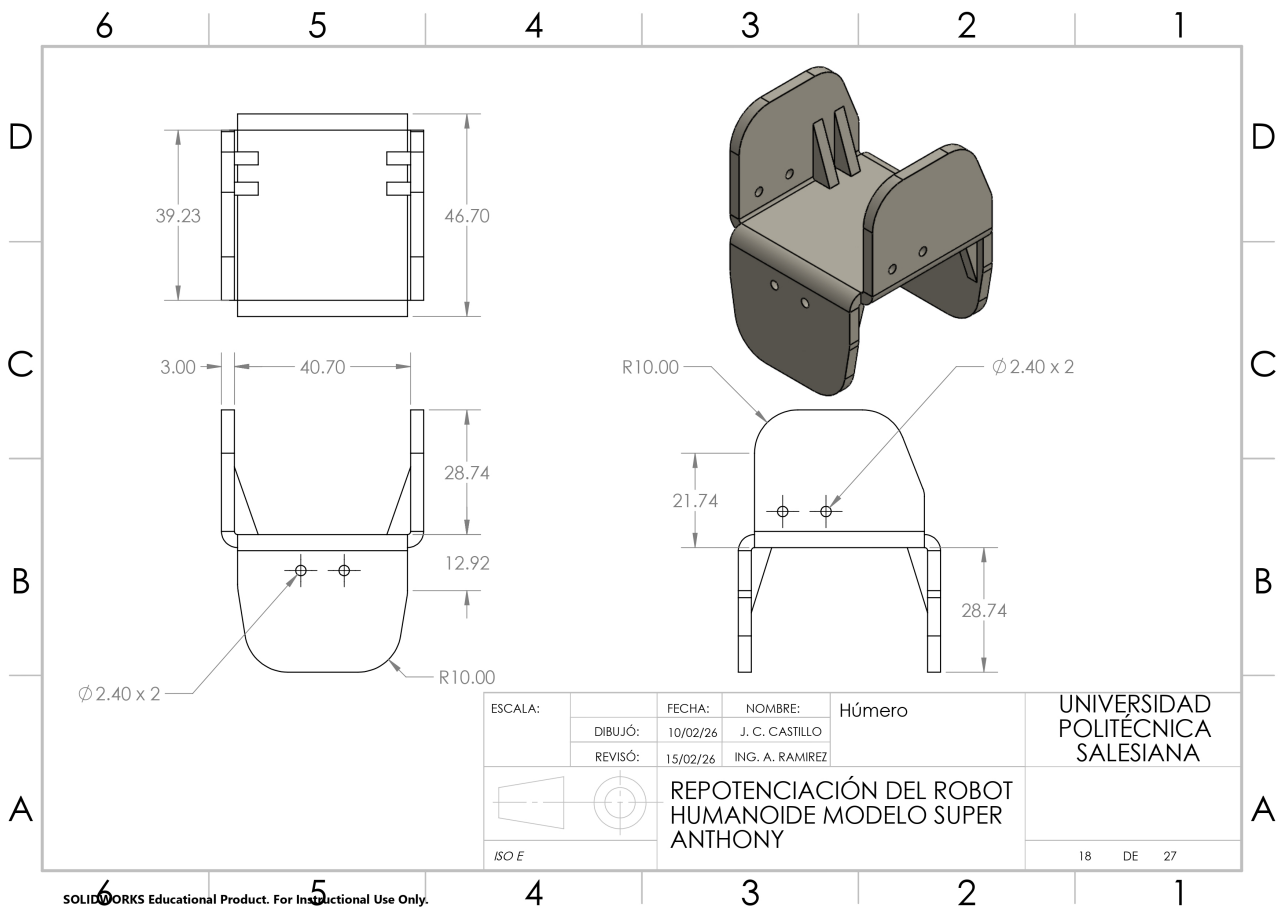


Figura 39. Lámina acotada del húmero del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

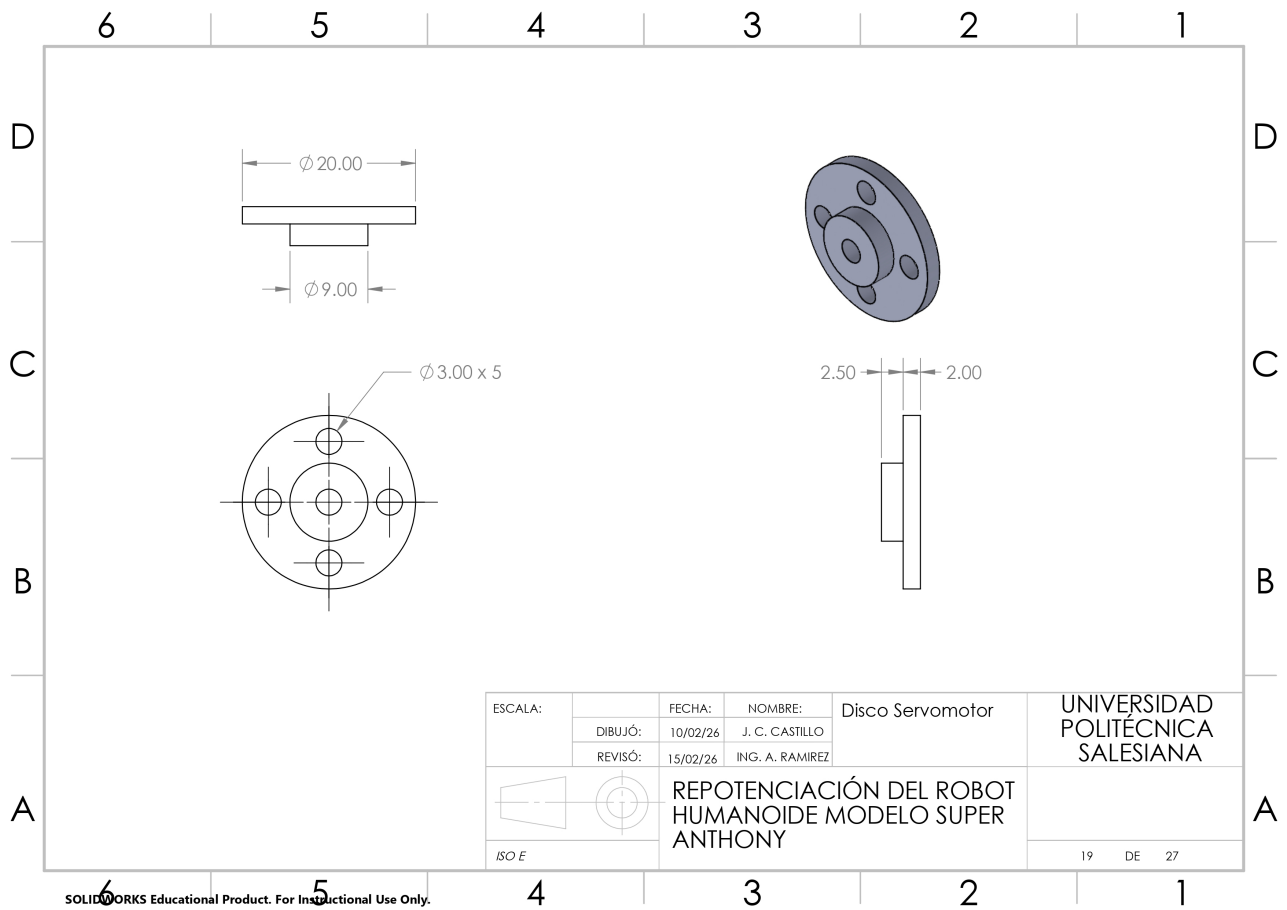


Figura 40. Lámina acotada del disco de los servomotores del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

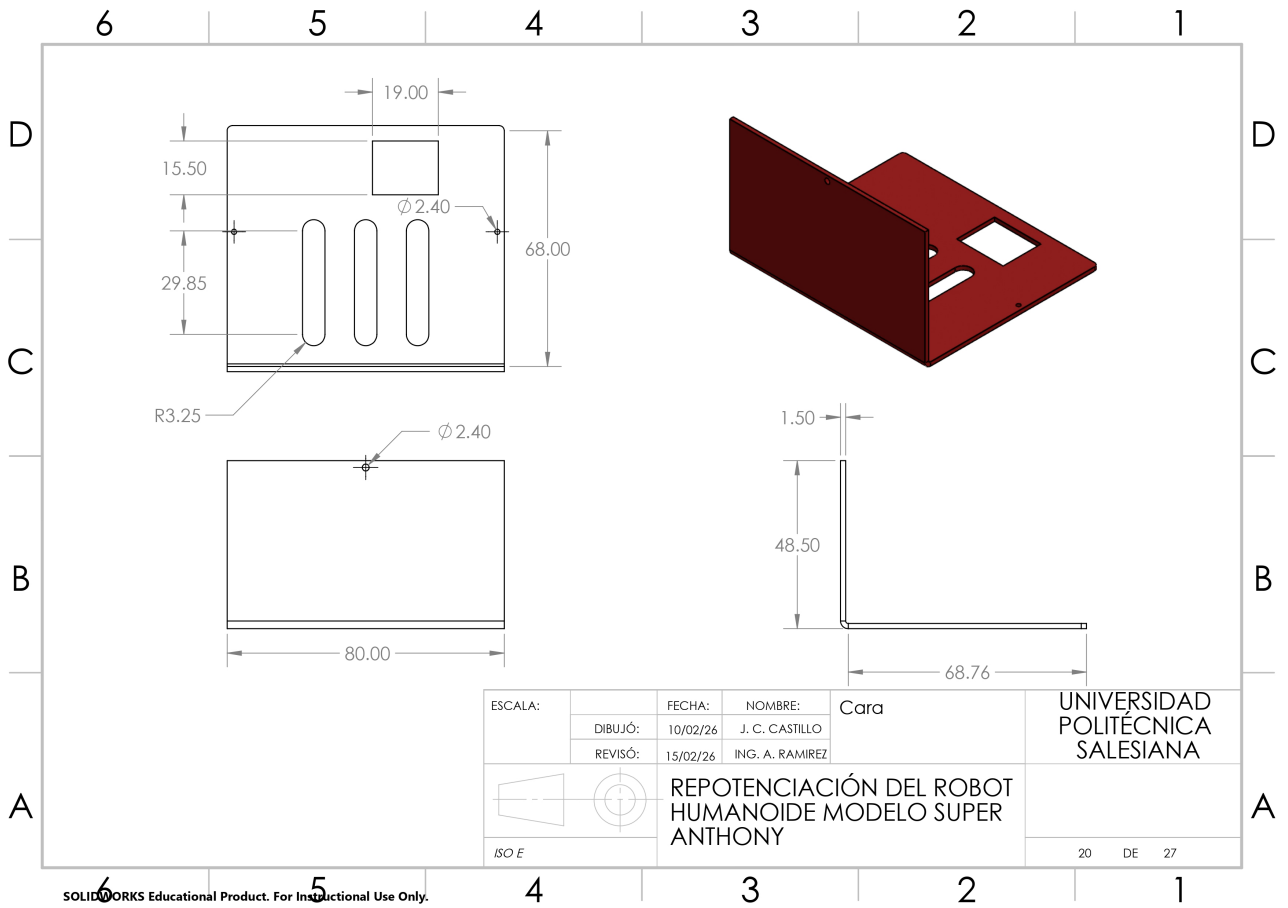


Figura 41. Lámina acotada de la cara del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

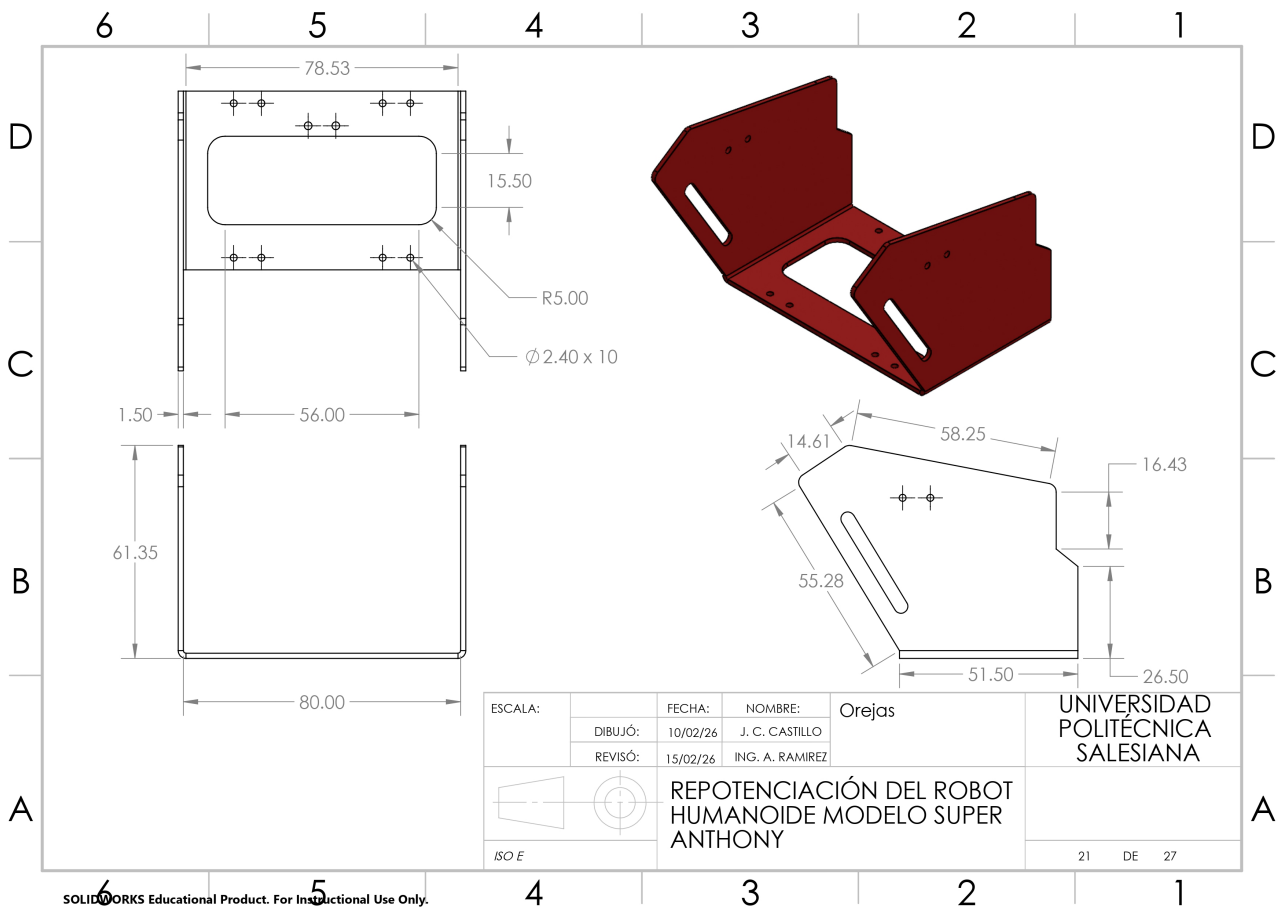


Figura 42. Lámina acotada de las orejas del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

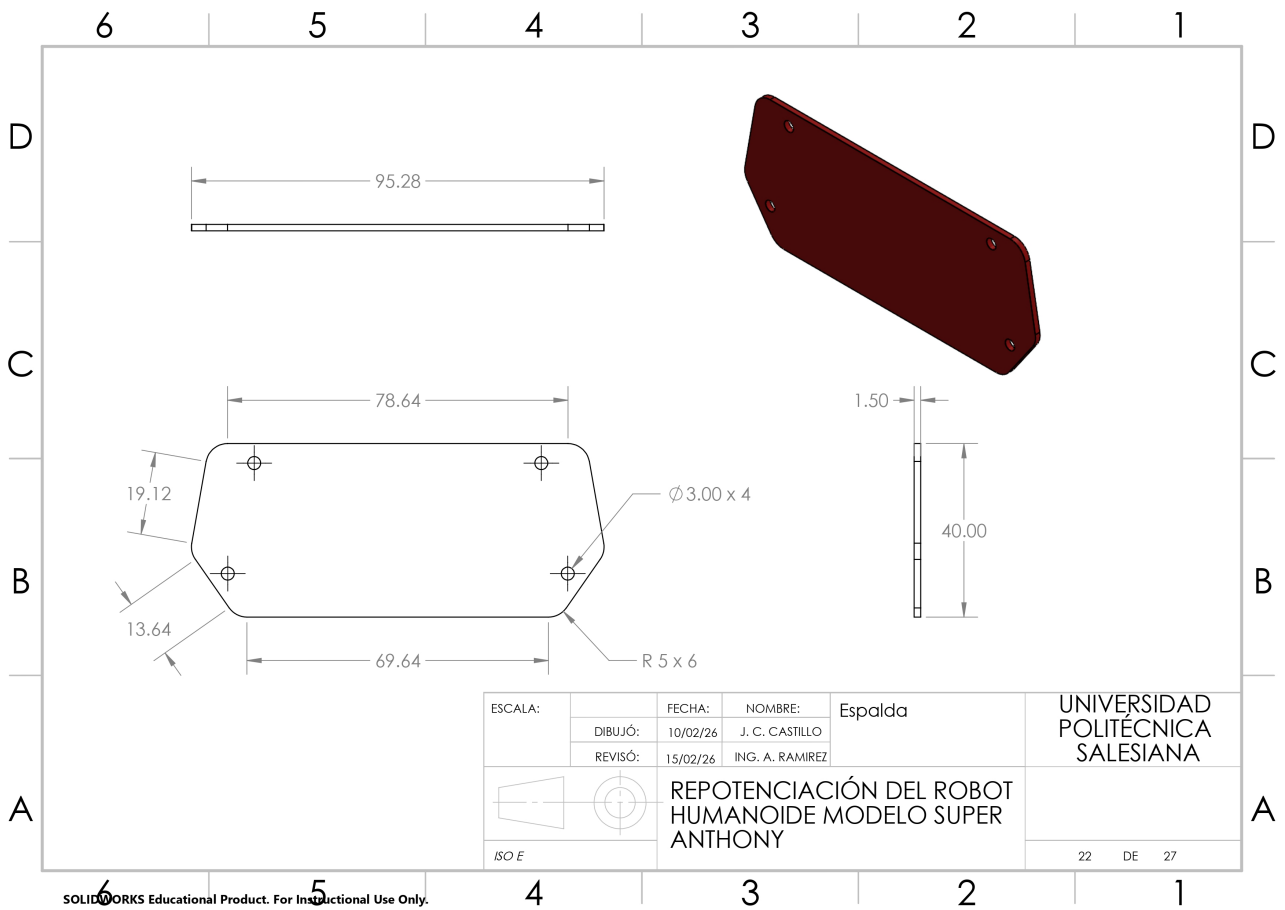


Figura 43. Lámina acotada de la espalda del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

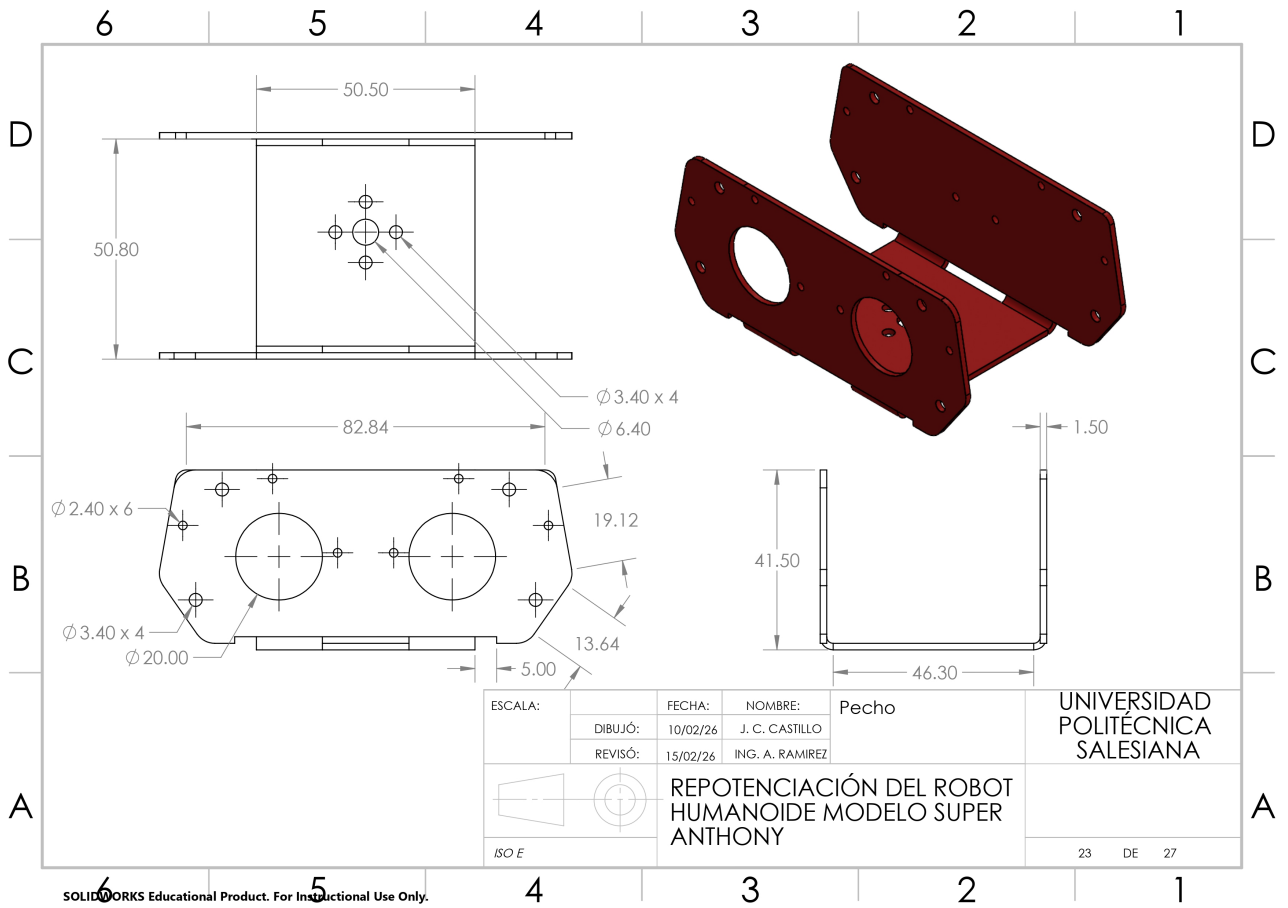


Figura 44. Lámina acotada del pecho del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

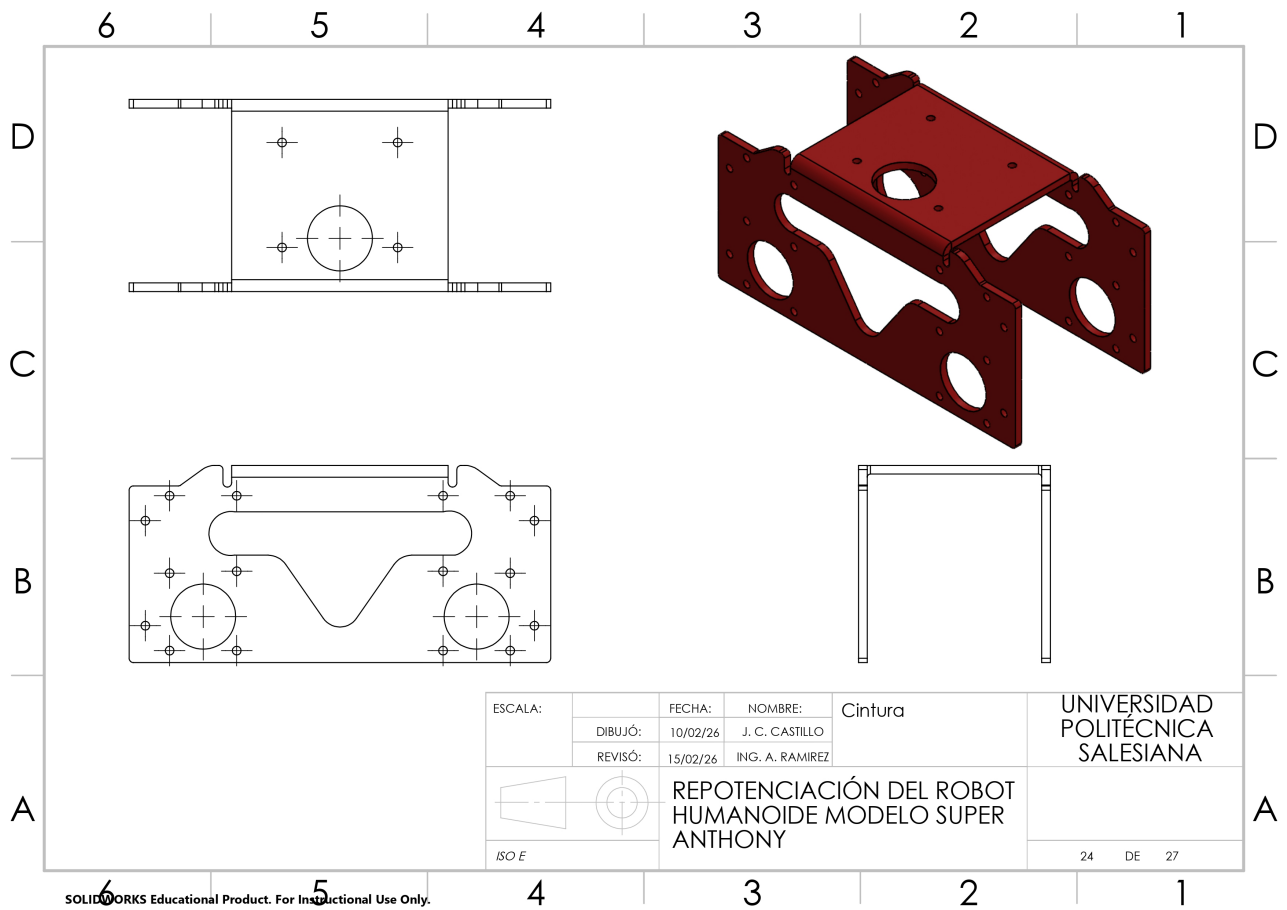


Figura 45. Lámina acotada de la cintura del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

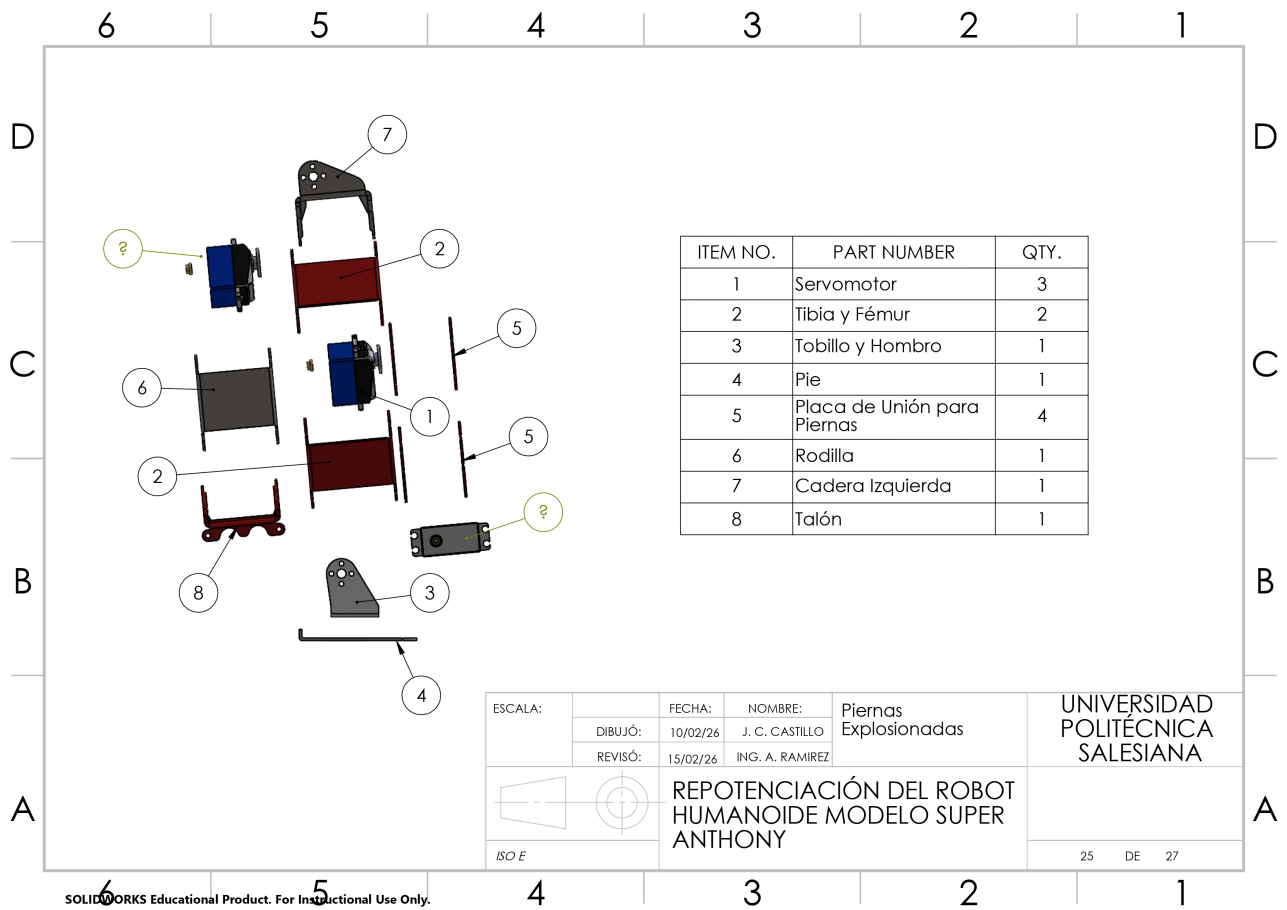


Figura 46. Lámina acotada de la vista explosionada del ensamblaje de las piernas del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

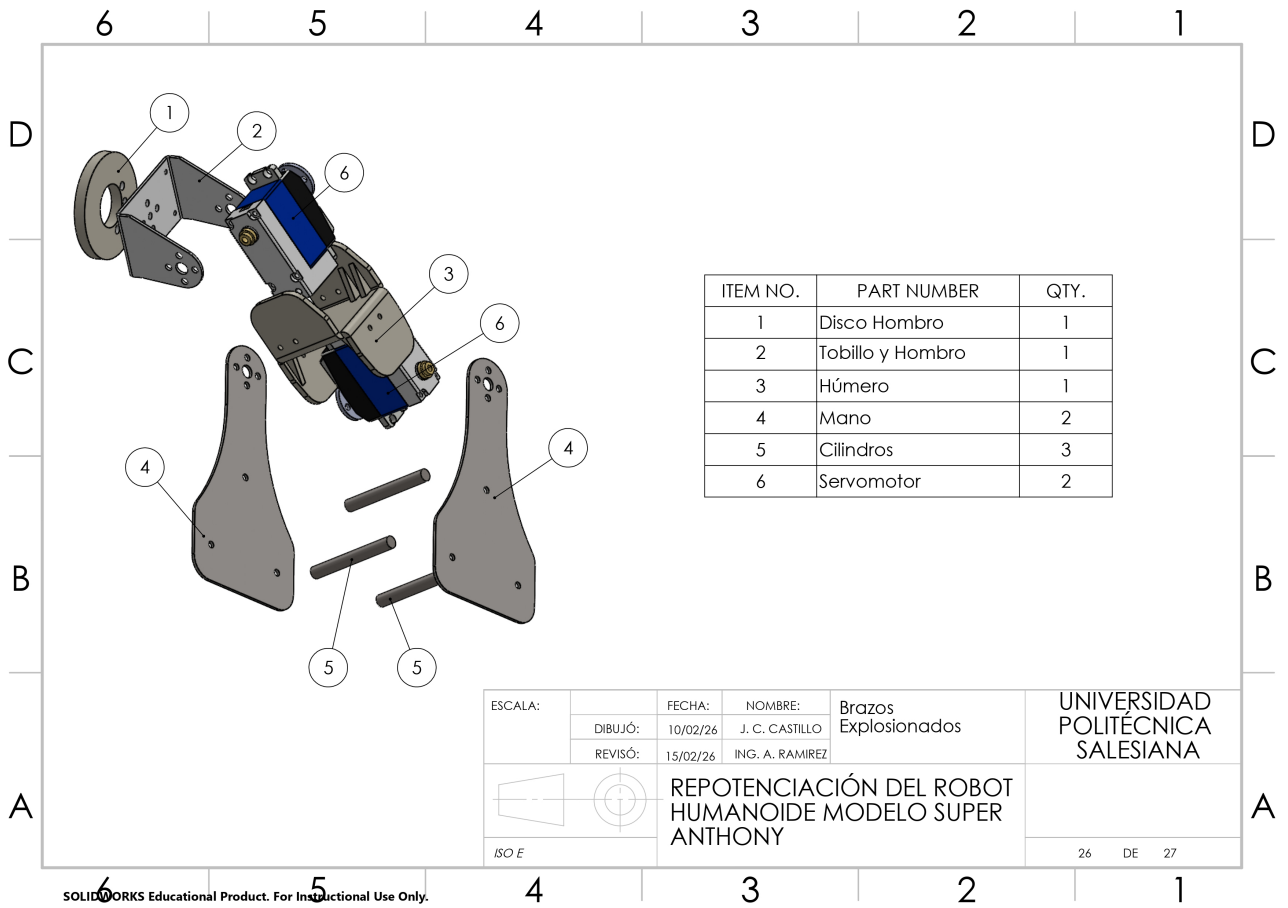


Figura 47. Lámina acotada de la vista explosionada del ensamble de los brazos del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

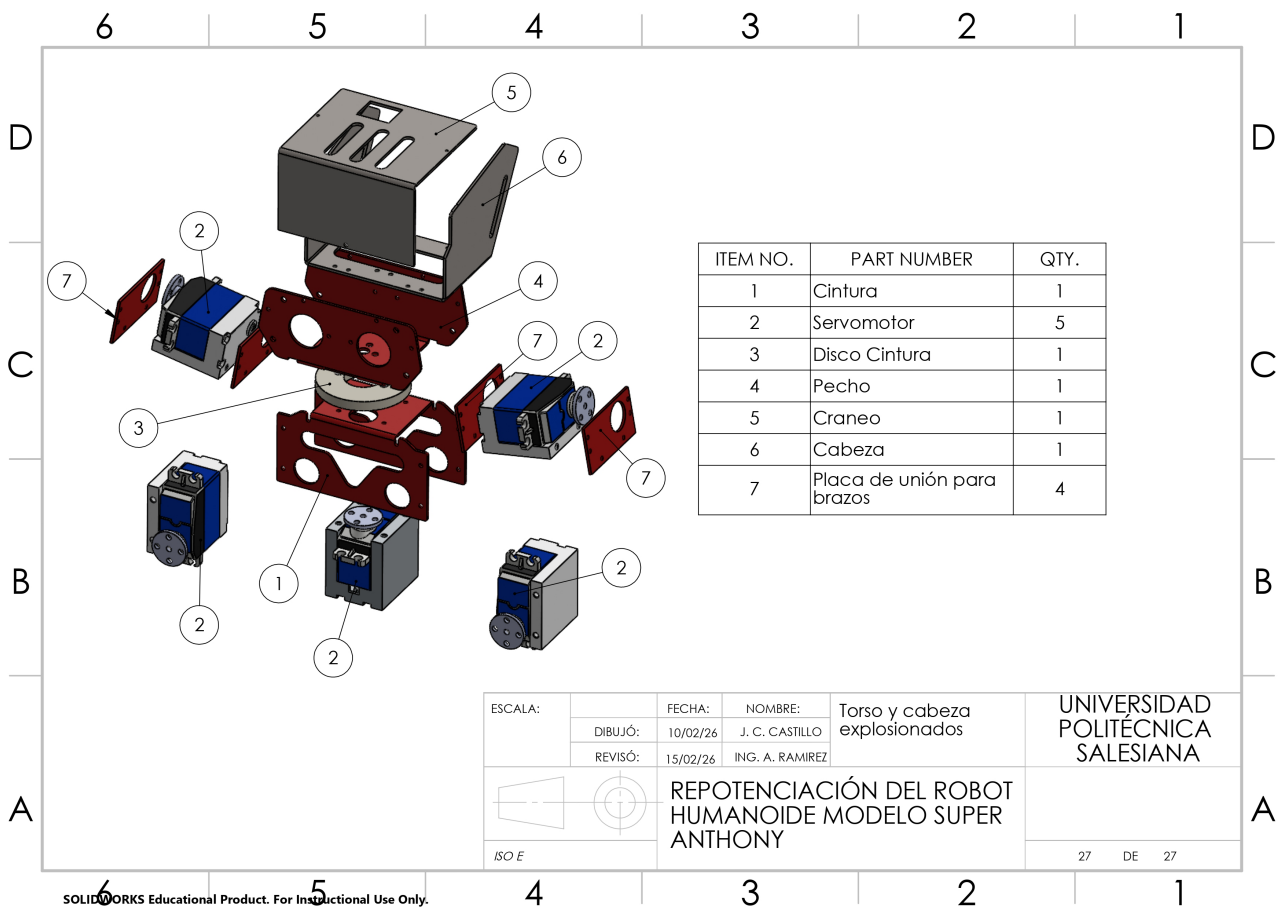


Figura 48. Lámina acotada de la vista explosionada del ensamblaje del torso y la cabeza del robot humanoide, por J. Castillo y B. Gualle, Solidworks

## ANEXO B

### ESTUDIOS DE SIMULACIÓN ESTRUCTURAL EN SOLIDWORKS DE CARGAS DE IMPACTO

#### B-A. Subensamble 1A – Mano

Model name: EnsamblajeBrazos  
Study name: Static 4(-Default-)  
Plot type: Static nodal stress Stress1  
Deformation scale: 500.007

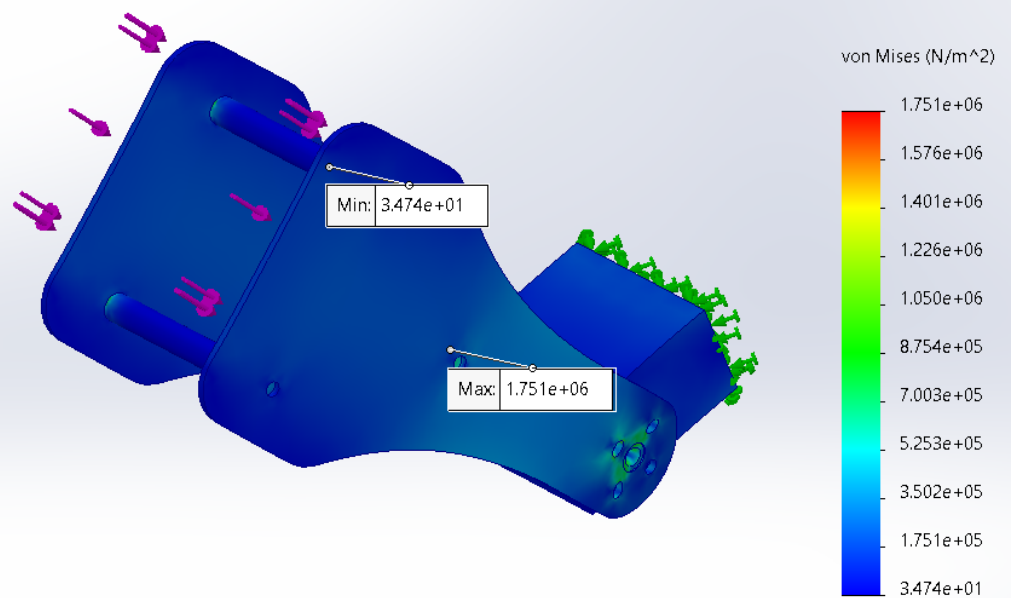


Figura 49. Análisis de Von Mises del subensamble 1A: mano. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeBrazos  
Study name: Static 4(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 500.007

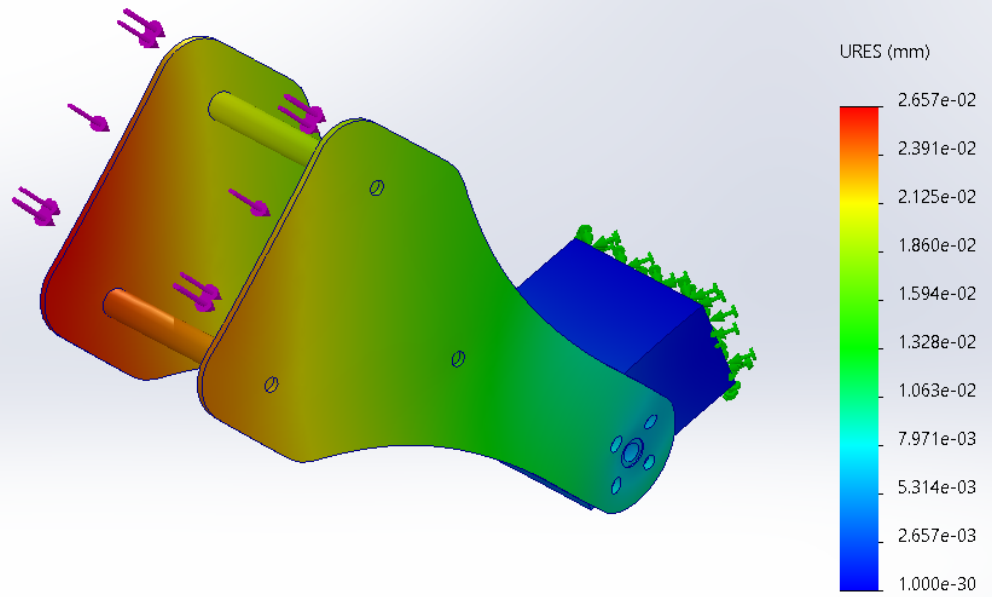


Figura 50. Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeBrazos  
Study name: Static 4(-Default-)  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 34

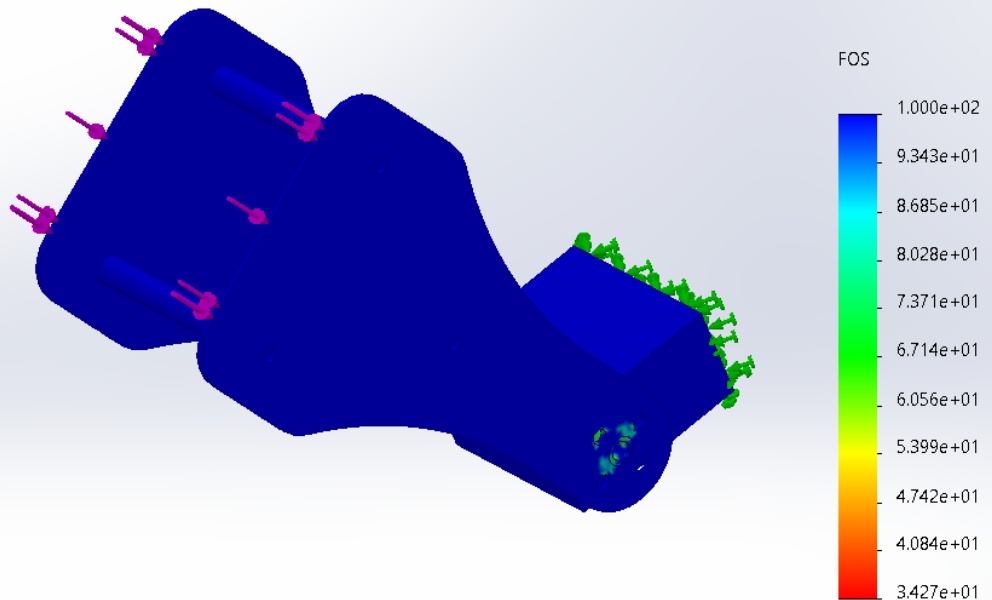


Figura 51. Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 1A: mano. Elaborado por autores.

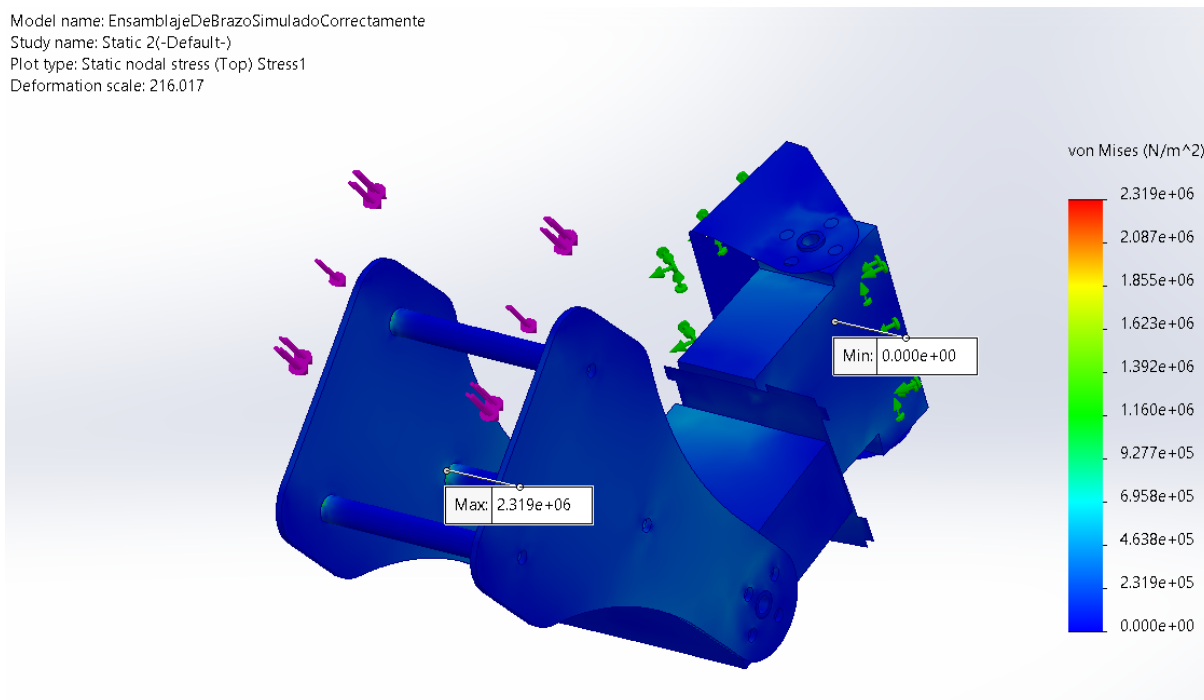


Figura 52. Análisis de Von Mises del Subensamble 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeDeBrazoSimuladoCorrectamente  
Study name: Static 2(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 216.017

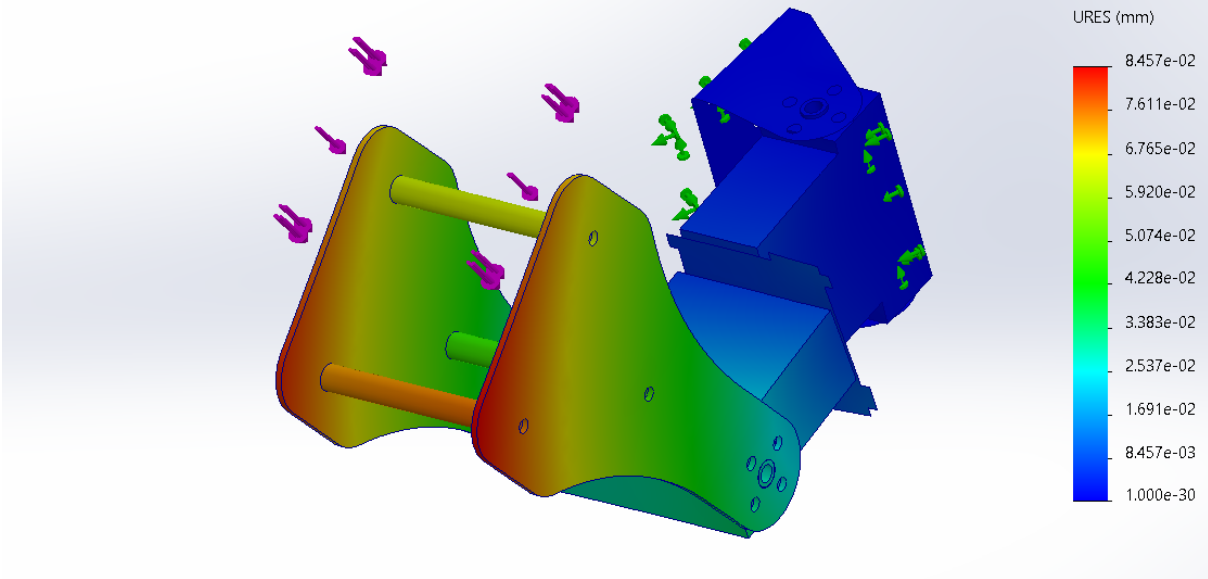


Figura 53. Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeDeBrazoSimuladoCorrectamente  
Study name: Static 2(-Default-)  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 89

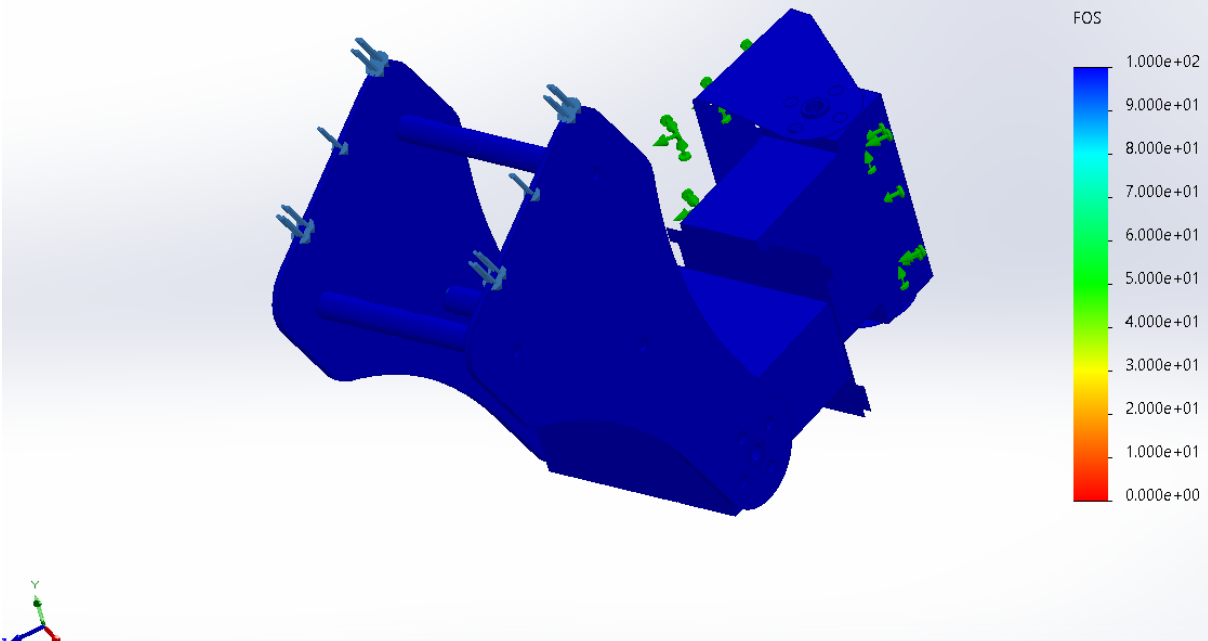


Figura 54. Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 1B: Brazo Completo. Elaborado por autores.

B-C. Subensamblaje 2 - Torso

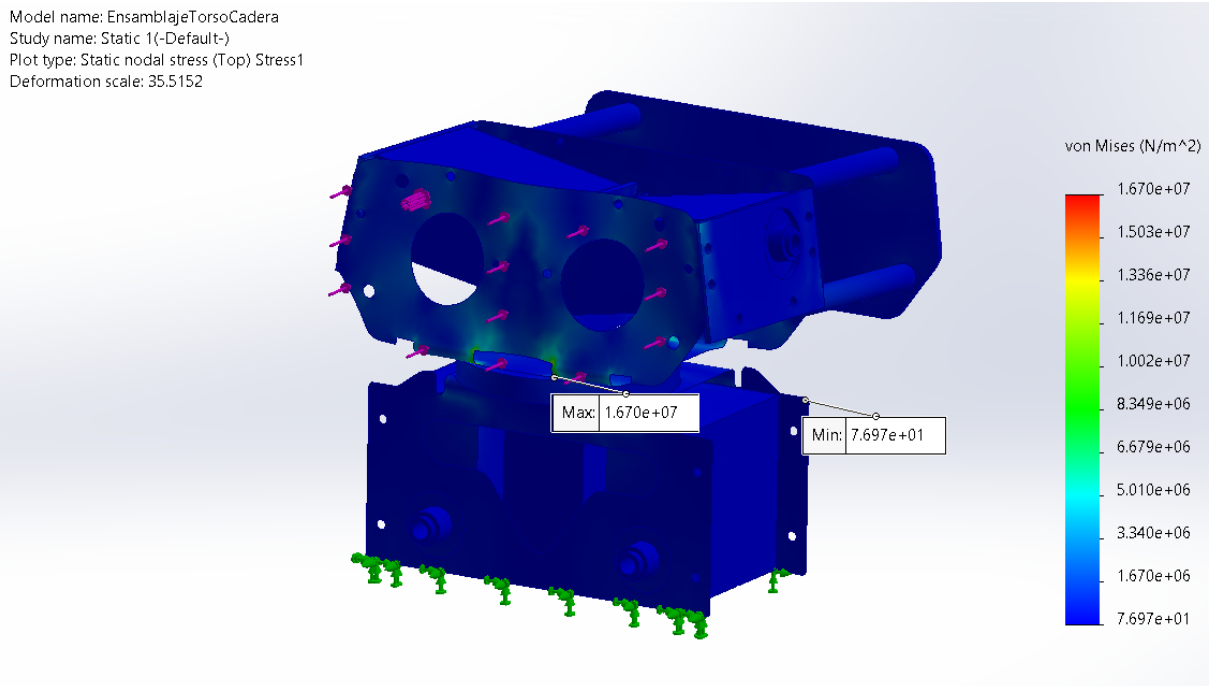


Figura 55. Análisis de Von Mises del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeTorsoCadera  
Study name: Static 1(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 35.5152

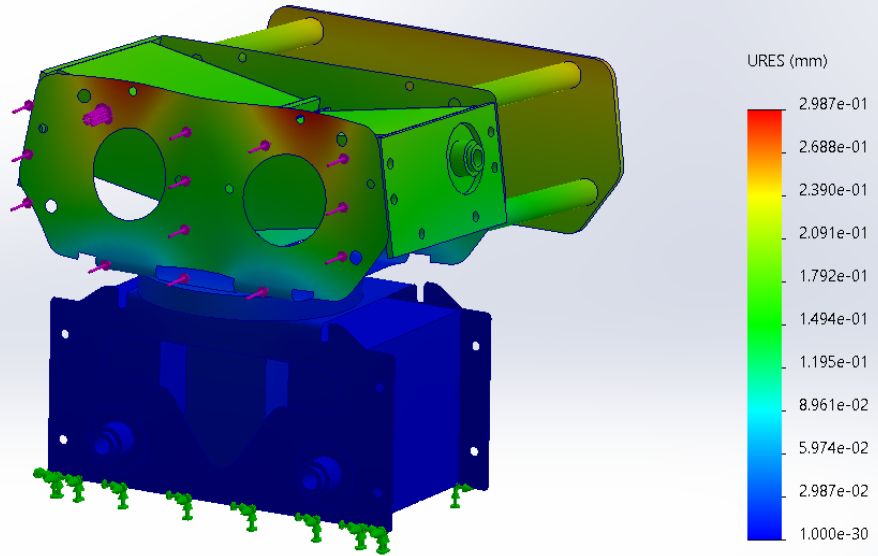


Figura 56. Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeTorsoCadera  
Study name: Static 1(-Default-)  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 3.6

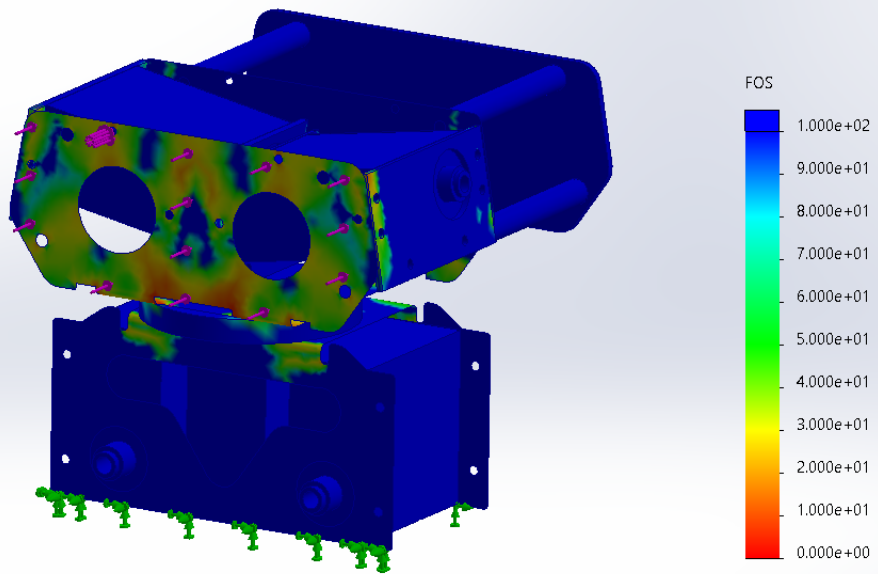


Figura 57. Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 2: Torso. Elaborado por autores.

B-D. Subensamble 3 - Cintura

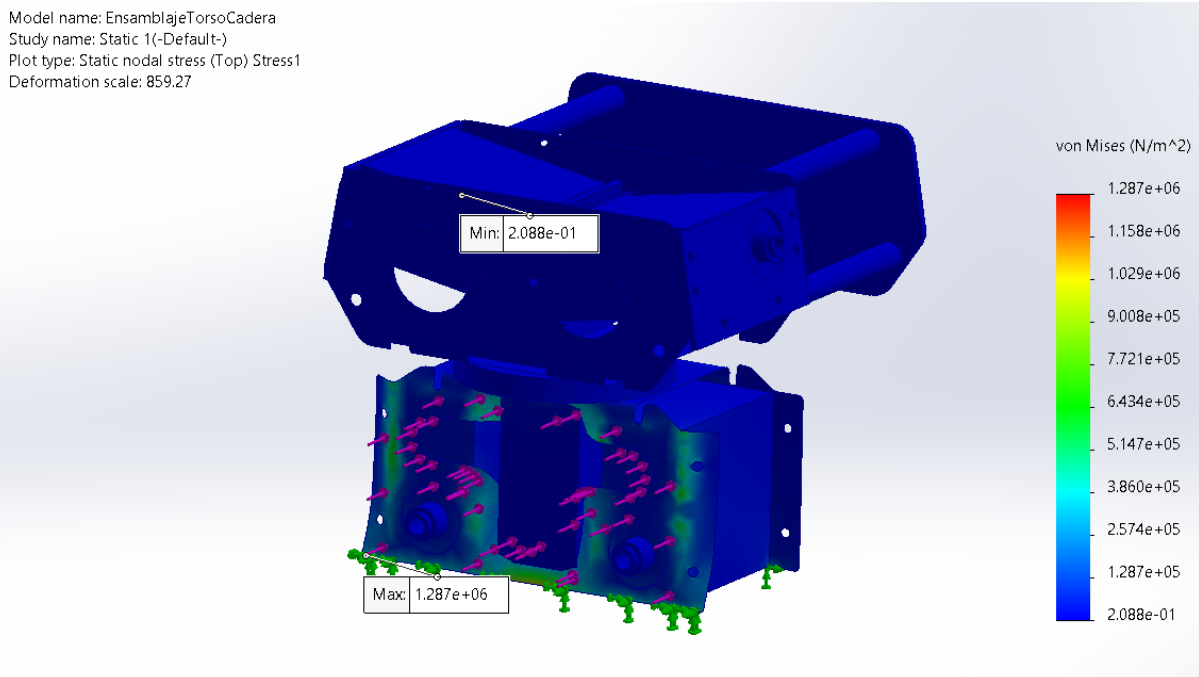


Figura 58. Análisis de Von Mises del Subensamble 3: Cintura. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeTorsoCadera  
Study name: Static 1(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 859.27

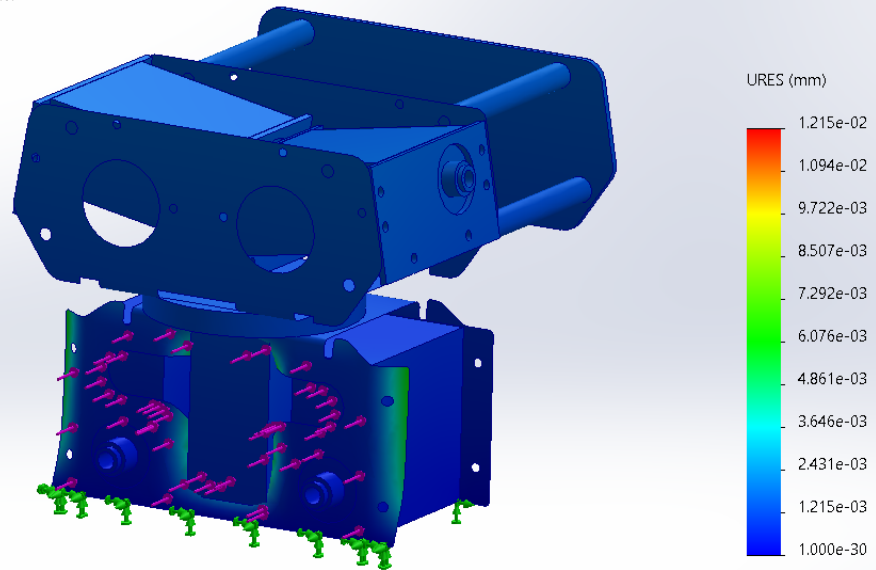


Figura 59. Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajeTorsoCadera  
Study name: Static 1(-Default-)  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 47

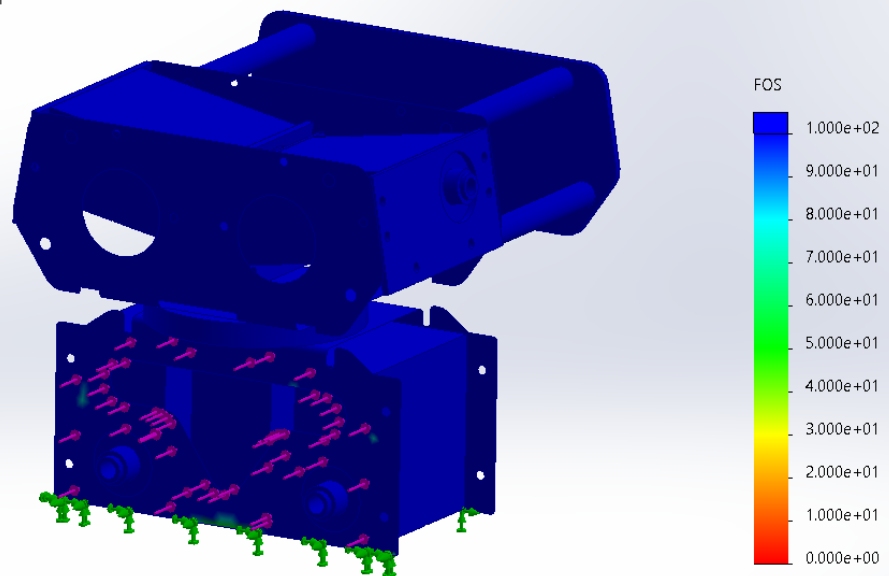


Figura 60. Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 3: Cintura. Elaborado por autores.

*B-E. Subensamble 4 - Estructura de Apoyo Inferior*

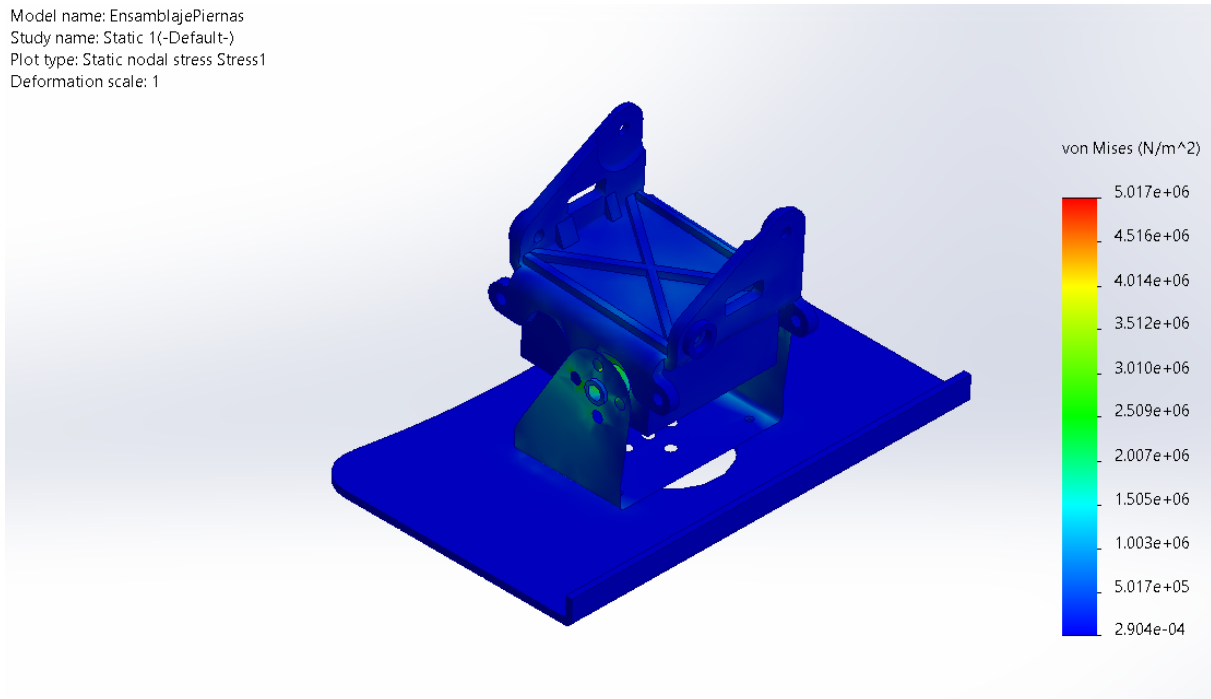


Figura 61. Análisis de Von Mises del Subensamble 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajePiernas  
Study name: Static 1(-Default-)  
Plot type: Static displacement Displacement1  
Deformation scale: 1

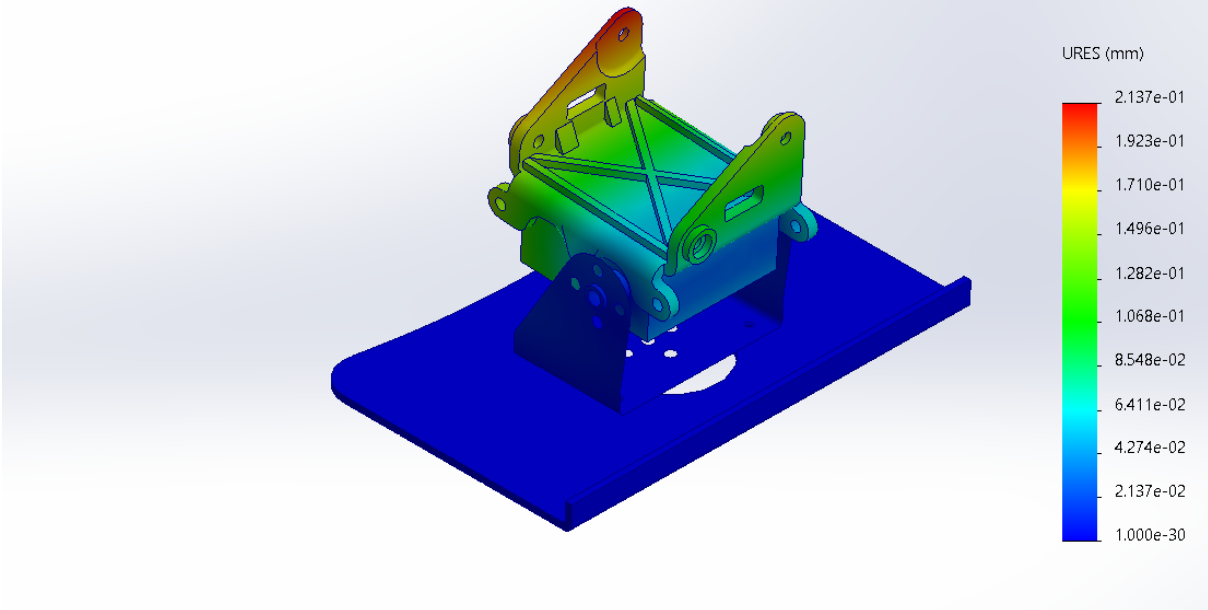


Figura 62. Análisis de Desplazamiento del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores.

Model name: EnsamblajePiernas  
Study name: Static 1(-Default-)  
Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
Criterion : Automatic  
Factor of safety distribution: Min FOS = 12

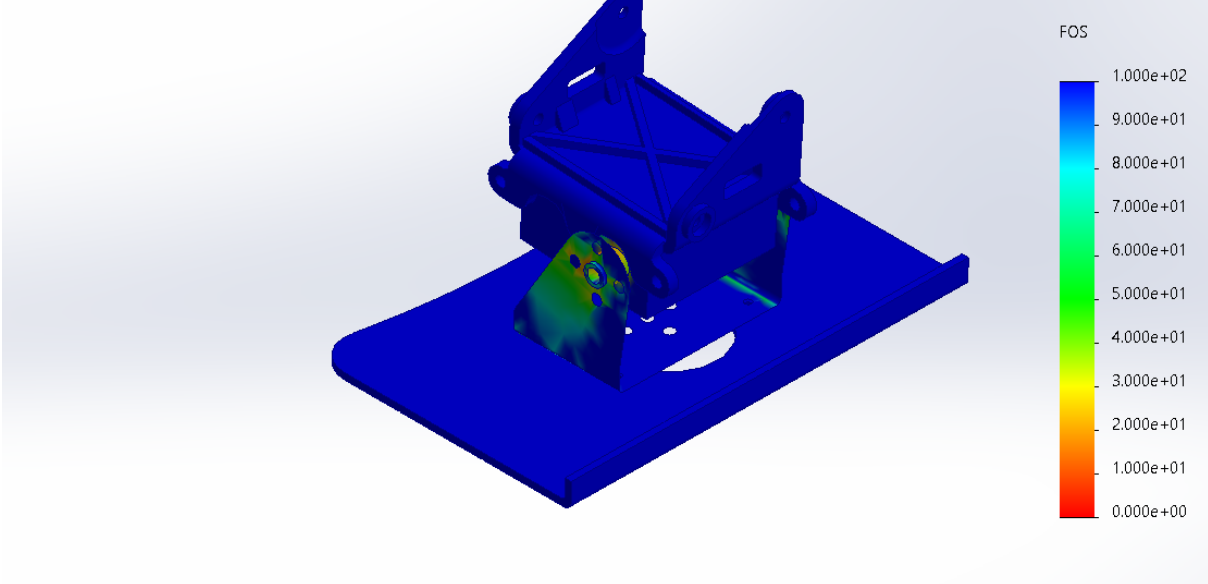


Figura 63. Análisis del Factor de Seguridad del Subensamblaje 4: Estructura de Apoyo Inferior. Elaborado por autores.