UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

“ROBOT MÓVIL DE ALTO TORQUE: DESARROLLO MECÁNICO”

LINEA DE INVESTIGACIÓN: Innovación y transferencia tecnológica / Automatización

AUTOR: Jhoe Andrew Guerreo Cabezas

DIRECTOR: PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi

Ibarra-Ecuador

2025

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento, dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004954242		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Guerrero Cabezas Jhoe Andrew		
DIRECCIÓN:	Imbabura, Otavalo		
EMAIL:	jaguerreroc@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		**TELÉFONO MÓVIL:**	0962693973

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"ROBOT MÓVIL DE ALTO TORQUE: DESARROLLO MECÁNICO"
AUTOR:	Guerrero Cabezas Jhoe Andrew
FECHA:	20/02/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	■ PREGRADO POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
DIRECTOR:	PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Jhoe Andrew Guerrero Cabezas, con cédula de identidad Nro. 1004954242, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 20 días del mes de febrero de 2025.

El AUTOR

Firma: .....

Nombre: Jhoe Andrew Guerrero Cabezas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autoridades de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de febrero de 2025.

El AUTOR

Firma: .....

Nombre: Jhoe Andrew Guerrero Cabezas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 20 de febrero de 2025

PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de titulación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Unidad Académica de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)……

PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Tribunal Examinador del trabajo de titulación "ROBOT MÓVIL DE ALTO TORQUE: DESARROLLO MECÁNICO" elaborado por JHOE ANDREW GUERRERO CABEZAS, previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f)……

PhD. Carlos Xavier Rosero Chandi
C.C.: 1002515821

(f)……

MSc. Fernando Vinicio Valencia Aguirre
C.C.: 100318866-9

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica del Norte, que por medio de mi director PhD. Xavier Rosero me ha brindado una guía para la culminación de este proyecto, transmitiéndome el valor de las iniciativas enfocadas al bienestar de la comunidad universitaria.

A mi Asesor MSc. Fernando Valencia, cuyo respaldo y enseñanzas fueron fundamentales en este proceso, siempre con paciencia y claridad en su orientación.

A mis docentes, quienes con su experiencia y dedicación me han otorgado los recursos necesarios para la ejecución de la investigación.

Jhoe Andrew Guerrero Cabezas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

DEDICATORIA

Este importante logro, que representa un peldaño más en la construcción de mis sueños, quiero dedicarlo a mis padres, Eduardo G. y Rosa C., pilares inquebrantables de mi vida y ejemplos de perseverancia, esfuerzo, humildad, compromiso y dedicación a sus hijos. Mi gratitud por caminar junto a mí en cada etapa de mi vida, por recorrer este viaje con su amor incondicional y ser mi mayor inspiración. He aprendido de cada experiencia, sin importar las dificultades o instantes de alegría, porque cada una de ellas ha dejado una enseñanza valiosa en mí. Pero, sobre todo, gracias por su inquebrantable apoyo en las adversidades. Espero que este paso sea solo el comienzo de un nuevo camino que sigamos recorriendo juntos.

A mi hermano Jimmy G., la persona más cercana en mi vida, cuya presencia y compañía me motiva a continuar sin importar los obstáculos.

Este trabajo está dedicado a quienes han llegado a ser mis amigos, colegas y hermanos: Pedro H., Edwin M. y Julián G., personas excepcionales y valiosas que han dejado una huella profunda en mí, dándome su respaldo, enseñanzas y amistad incondicional. El trabajo en equipo, la dedicación compartida y la confianza recíproca fueron claves para la culminación de esta etapa, enfrentando desafíos y celebrando cada éxito.

Y a ti, mi querida Marisol M., cuya compañía en la recta final de este trayecto fue como un rayo de luz cálida que deshizo la oscuridad en mis días. Te convertiste en mi guía, mi fortaleza y fuente principal de apoyo. A ti, que con tu paciencia, tus palabras de ánimo y tu constante dedicación, me ayudaste a cruzar la línea de meta. Gracias por ser mi refugio, por tu presencia en los momentos duros, y por mostrarme que todo es posible.

Jhoe Andrew Guerrero Cabezas

Resumen

El presente documento considera el problema de diseño para un sistema mecánico funcional y estable para un robot móvil de alto torque, con la capacidad de desplazarse en superficies regulares con contextos variados y responder con estabilidad estructural. El proyecto se ejecuta en colaboración de tres autores, enfocados en el desarrollo mecánico, desarrollo electrónico y desarrollo de visión artificial; cada área es detallada en sus respectivos documentos. Factores importantes en la ejecución del proyecto es afirmar que la estructura sometida a cargas de diseño establecidas se mantenía dentro de las limitaciones de presupuesto y facilidad de adquisición de materiales. Para dar solución al problema, se ejecuta el diseño con la investigación de componentes con disponibilidad dentro del mercado local, seleccionados para responder adecuadamente a su funcionalidad, sin complicar la brecha económica establecida para la ejecución del proyecto. El desarrollo mecánico envolvió una valoración de materiales, arreglos geométricos para el chasis y una configuración óptima de las ruedas, transmisión y movimientos. Junto con ello, se desarrollaron simulaciones estáticas con herramientas de modelado de elementos finitos, de tal manera se evalúa la resistencia del sistema mecánico a fin de obtener el factor de seguridad en condiciones de carga, con una distribución de esfuerzos en los elementos principales del mecanismo. Una vez evaluados los componentes se construye el prototipo con éxito, además de implementar la cinemática para corroborar el desplazamiento adecuado del robot. El dispositivo final es sometido a pruebas de campo bajo condiciones de carga establecidas en el diseño, de las cuales el dispositivo supera todas las evaluaciones.

Palabras clave: Diseño mecánico, robot móvil, análisis estructural, simulaciones.

Abstract

This document addresses the design challenges of creating a functional, stable mechanical system for a high-torque mobile robot capable of operating across diverse regular surfaces while maintaining structural integrity. The project, developed collaboratively across three specialized domains, mechanical engineering, electronic systems, and artificial vision systems, focuses on balancing performance, budget constraints, and material accessibility. Key mechanical considerations included material selection, geometric chassis design, wheel configuration, and transmission optimization to ensure robustness without compromising cost-effective sourcing. Static simulations using finite element modeling were employed to evaluate stress distribution and safety factors under load, guiding iterative refinements to critical components. Following theoretical validation, a prototype was constructed and integrated with kinematic controls to verify mobility performance. Field tests under predefined load conditions confirmed the system's operational stability and durability, exceeding design benchmarks.

Keywords: Mechanical design, mobile robot, structural analysis.

Índice general

Capítulo I Introducción 1

1.1. Planteamiento del problema 1

1.2. Objetivos 3

1.2.1. General 3

1.2.2. Específicos 3

1.3. Alcance 3

1.4. Justificación 3

Capítulo II Revisión literaria 5

2.1. Estado del arte 5

2.2. Tecnologías implicadas 8

2.2.1. Robótica móvil 8

2.2.2. Locomoción en robots móviles 9

2.2.2.1. Empleo de las ruedas en la robótica móvil 10

2.2.2.2. Configuración cinemática según la disposición de las ruedas 11

2.2.3. Cinemática del robot 13

2.2.3.1. Modelado cinemático 13

2.2.3.2. Velocidades angulares y lineales 13

2.2.3.3. Ecuaciones vinculadas 14

2.2.4. Arquitectura del robot móvil 15

2.2.4.1. Sistema mecánico 15

2.2.4.2. Diseño de mecanismos 15

2.2.4.3. Chasis 16

2.2.4.4. Elementos Finitos 16

2.2.5. Materiales 16

2.2.5.1. Compuestos plásticos 16
2.2.5.2. Metales 17
2.2.6. Métodos de manufactura 18
2.2.6.1. Manufactura adictiva 18
2.2.6.2. Soldadura con arco eléctrico 19
2.2.6.3. Centro de maquinado CNC 19
Capítulo III Marco metodológico 21
3.1. Enfoque y tipos de investigación 21
3.2. Diseño de la investigación 21
3.2.1. Fase 1: Selección de componentes mecánicos de robots existentes 22
3.2.2. Fase 2: Diseño de la estructura y sistema mecánico 23
3.2.3. Fase 3: Modelamiento de la cinemática del robot móvil 24
Capítulo IV Desarrollo y análisis 25
4.1. Especificaciones del sistema a diseñar 26
4.1.1. Casa de la calidad – QFD 26
4.1.2. Selección de materiales 32
4.2. Alternativas de solución 33
4.2.1. Primera alternativa de solución 33
4.2.1.1. Chasis y estructura 33
4.2.1.2. Paneles 35
4.2.1.3. Elementos mecánicos 37
4.2.2. Segunda alternativa de solución 38
4.2.2.1. Chasis y estructura 38
4.2.2.2. Paneles 41
4.2.2.3. Elementos mecánicos 43

4.2.3. Selección de la solución 44
4.3. Especificaciones de la solución 47
4.3.1. Modelo del chasis 47
4.3.2. Estructura 48
4.3.3. Sistema de transmisión de potencia 50
4.3.4. Sistema de sincronización para encoder óptico rotativo 51
4.3.5. Carcasa 51
4.4. Análisis estructural 53
4.4.1. Análisis del chasis 54
4.4.2. Análisis de la base del motor 56
4.4.3. Análisis del eje 59
4.4.4. Análisis de los engranajes 61
4.4.4.1. Análisis del engranaje conductor 61
4.4.4.2. Análisis del engranaje conducido 63
4.4.5. Eje plástico del encoder 65
4.5. Construcción y ensamble del dispositivo 68
4.5.1. Construcción del chasis 68
4.5.2. Montaje de elementos mecánicos 69
4.5.3. Montaje de estructura de aluminio 70
4.5.4. Ensamble de paneles 72
4.5.5. Montaje de ruedas 73
4.5.6. Instalación del sistema de sincronización para el encoder 74
4.5.7. Componentes eléctricos y electrónicos 75
4.5.8. Colocación de acrílico y elementos de ventilación. 76
4.5.9. Construcción final 78

4.6. Pruebas y evaluaciones 80
4.6.1. Pruebas de capacidad de carga en superficies planas línea recta 80
4.6.2. Pruebas de carga en superficies planas con rotación en el mismo eje 82
4.7. Cinemática del dispositivo 84
4.7.1. Desplazamiento en línea recta 84
4.7.2. Desplazamiento con giros 85
4.7.3. Rotación en el mismo eje 86
Capítulo V Conclusiones y recomendaciones 88
5.1. Conclusiones 88
5.2. Recomendaciones 89
Bibliografía 90
Anexos 95

Índice de figuras

Fig. 2.1. Configuración diferencial de cuatro ruedas [21]. 12
Fig. 2.2. Procedimiento del método de manufactura aditiva [38]. 18
Fig. 2.3. Soldadura por arco eléctrico [32]. 19
Fig. 2.4. Centro de mecanizado CNC [32]. 20
Fig. 3.1. Diagrama de flujo para el diseño de un robot móvil de alto torque. 22
Fig. 4.1. Diagrama de bloques del diseño del dispositivo. 25
Fig. 4.2. Casa de la calidad. 28
Fig. 4.3. Requerimientos para el análisis. 29
Fig. 4.4. Valores de los parámetros técnicos. 30
Fig. 4.5. Evaluación de criterios de importancia y competitividad. 31
Fig. 4.6. Diagrama de planeación. 31
Fig. 4.7. Ensamble general del chasis del robot móvil de alto torque. 33
Fig. 4.8. Detalle de la disposición estructural del chasis y acople de elementos. 34
Fig. 4.9. Ensamble de paneles sobre la estructura. 35
Fig. 4.10. Detalle de la disposición de los diferentes paneles. 36
Fig. 4.11. Ensamble de componentes mecánicos. 37
Fig. 4.12. Detalle de la disposición de los distintos elementos. 37
Fig. 4.13. Segundo Ensamble general del chasis y estructura. 39
Fig. 4.14. Vista de detalle de la disposición de los elementos dentro del chasis. 39
Fig. 4.15. Disposición de los paneles sobre la estructura. 41
Fig. 4.16. Vista explosionada de los diferentes paneles del ensamble. 41
Fig. 4.17. Configuración elementos mecánicos modelo 2. 43
Fig. 4.18. Detalle de los componentes en el ensamble del modelo 2. 43
Fig. 4.19. Chasis. 48
Fig. 4.20. Ensamble de la estructura. 49
Fig. 4.21. Soporte de esquina. 49
Fig. 4.22. Tuerca T simple. 49
Fig. 4.23. Distribución de los componentes del sistema de transmisión de potencia. 50
Fig. 4.24. Sincronización para el encoder rotativo óptico. 51

Fig. 4.25. Carcasas metálicas del robot. 52
Fig. 4.26. Componentes de acrílico. 52
Fig. 4.27. Rejillas de ventilación impresas en 3D. 53
Fig. 4.28. Factor de seguridad del chasis. 54
Fig. 4.29. Deformación máxima del chasis. 55
Fig. 4.30. Mallado en el chasis. 55
Fig. 4.31. Análisis de convergencia en el chasis. 56
Fig. 4.32. Factor de seguridad en las bases del motor. 57
Fig. 4.33. Tensiones de la base del motor. 57
Fig. 4.34. Mallado base del motor. 58
Fig. 4.35. Análisis de convergencia en la base del motor. 59
Fig. 4.36. Factor de seguridad del eje principal. 59
Fig. 4.37. Distribución de las tensiones en el eje de transmisión. 60
Fig. 4.38. Mallado del eje de transmisión. 60
Fig. 4.39. Análisis de convergencia en el eje principal. 61
Fig. 4.40. Factor de seguridad del engranaje conductor. 62
Fig. 4.41. Deformación máxima del engranaje conductor. 62
Fig. 4.42. Mallado del engranaje conductor. 63
Fig. 4.43. Análisis de convergencia en el engranaje conductor. 63
Fig. 4.44. Factor de seguridad en el engranaje conducido. 64
Fig. 4.45. Tensión máxima en el engranaje conducido. 64
Fig. 4.46. Mallado del engranaje conducido. 65
Fig. 4.47. Análisis de convergencia para el engranaje conducido. 65
Fig. 4.48. Factor de seguridad en el eje del encoder. 66
Fig. 4.49. Tensión máxima en el eje del encoder. 66
Fig. 4.50. Mallado en el eje del encoder. 67
Fig. 4.51. Análisis de convergencia en el eje del encoder. 67
Fig. 4.52. Proceso de pintura del chasis. 68
Fig. 4.53. Vista superior del chasis. 69
Fig. 4.54. Preparación del chasis antes del montaje de paneles y elementos. 70
Fig. 4.55. Integración de elementos mecánicos sobre el chasis. 70

Fig. 4.56. Montaje de la estructura interna en aluminio. 71
Fig. 4.57. Perfil de aluminio serie 20. 71
Fig. 4.58. Proceso de pintura en paneles metálicos. 72
Fig. 4.59. Preparación de la estructura previo montaje de paneles. 73
Fig. 4.60. Ensamble de paneles a la estructura y chasis. 73
Fig. 4.61. Instalación de las ruedas en el dispositivo. 74
Fig. 4.62. Sistema de sincronización para el encoder. 75
Fig. 4.63. Componentes eléctricos y electrónicos. 76
Fig. 4.64. Distribución de los componentes electrónicos. 76
Fig. 4.65. Montaje de paneles de ventilación. 77
Fig. 4.66. Montaje de paneles de acrílico. 77
Fig. 4.67. Vista delantera del dispositivo. 78
Fig. 4.68. Vista posterior del dispositivo. 79
Fig. 4.69. Robot móvil de alto torque. 79
Fig. 4.70. Pruebas de carga. 80
Fig. 4.71. Datos de velocidad en pruebas de línea recta 0 kg. 81
Fig. 4.72. Velocidad promedio vs Carga en línea recta. 81
Fig. 4.73. Pruebas de carga en rotaciones. 82
Fig. 4.74. Datos de velocidad en pruebas de rotación en el mismo eje 185 kg. 83
Fig. 4.75. Velocidad del dispositivo en función de la inclinación. 83
Fig. 4.76. Movimiento en línea recta del dispositivo. 85
Fig. 4.77. Trayectoria circular del dispositivo. 85
Fig. 4.78. Rotación del robot en el eje *z*. 86

Índice de tablas

Tabla 1: Robots teleoperados y autónomos en la robótica móvil *[18]*. 9
Tabla 2: Factores importantes en la locomoción de un robot móvil [19]. 10
Tabla 3: Categorías de ruedas más empleadas en la robótica móvil [20]. 11
Tabla 4: Especificaciones del sistema. 26
Tabla 5: Análisis de materiales. 32
Tabla 6: Descripción de los componentes del chasis y estructura. 34
Tabla 7: Descripción de los paneles a emplearse en el dispositivo. 36
Tabla 8: Descripción de los elementos a emplearse en la mecánica. 38
Tabla 9: Descripción de componentes del ensamble, estructura y chasis. 40
Tabla 10: Descripción de los diferentes paneles a emplearse en el modelo 2. 42
Tabla 11: Lista de elementos en el ensamble de componentes mecánicos. 44
Tabla 12: Ponderación de criterios. 45
Tabla 13: Evaluación del criterio “Costo de fabricación”. 46
Tabla 14: Evaluación del criterio “Capacidad de carga estructural”. 46
Tabla 15: Evaluación del criterio “Material del chasis”. 46
Tabla 16: Evaluación del criterio “Rigidez estructural”. 47
Tabla 17: Materiales empleados para la simulación. 53
Tabla 18: Materiales empleados en la construcción del chasis. 69
Tabla 19: Materiales empleados para el ensamble de la estructura. 72
Tabla 20: Resultados en la prueba de capacidad de carga en línea recta. 81
Tabla 21: Resultados de las pruebas de rotación en el mismo eje. 83

Capítulo I

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

En ámbitos académicos y de investigación, tener acceso a tecnología desempeña un papel fundamental en la formación de profesionales competentes y proporciona avances en el conocimiento científico. La Universidad Técnica del Norte destaca por su compromiso con la excelencia académica, por lo cual la falta de entornos de aprendizaje dedicados a la robótica en programas de ingeniería plantea importantes limitaciones en cuanto a los recursos disponibles para la comunidad educativa. Además de ser un impedimento para la adquisición de habilidades, conocimientos, oportunidades de empleo y capacidad de innovación para afrontar los desafíos del mundo tecnológico [1].

A causa del progreso en la tecnología de dispositivos de control, según se menciona en [2], es más común observar nuevos artefactos involucrados directamente en las actividades de las personas. Estas nuevas herramientas están diseñadas para adaptarse a los entornos. Por añadidura, se convierte en un proceso en el que se involucra tanto el individuo como el mecanismo automatizado, tanto a nivel social como físico. En este contexto, el uso de robots se ha instalado y propagado en el ámbito educativo alrededor del mundo, partiendo desde programas en instituciones educativas. Este tipo de recursos ha permitido que alumnos y docentes desarrollen sus capacidades, identifiquen puntos débiles y dejen de ser individuos pasivos en la elaboración de conocimiento, lo que les permite aprender y profundizar en las ciencias aplicadas, convirtiéndose en sujetos activos [3].

La robótica actualmente se ha convertido en una de las rutas más destacadas en el ámbito de tecnologías emergentes, ya que permite desarrollar un ambiente de enseñanza y aprendizaje, donde las matemáticas, informática y física llevadas a la par con la constante práctica se transforman en un vector tecnológico. La robótica converge varios temas académicos de ingeniería, siendo interdisciplinaria, en consecuencia, se tiene avances tecnológicos vistos como instrumentos importantes para afrontar temas sociales de robots e inteligencia artificial en beneficio de las personas [4].

Estos dispositivos representan un campo muy atractivo y multidisciplinar que permite muchas aplicaciones, que van desde la manufactura, la logística, agricultura, educación, hasta la exploración e inspección en temas de investigación y desarrollo en todo el mundo. La carencia de robots móviles apropiados con una buena capacidad de torsión, sólida construcción y bajo costo constituye un obstáculo para el desarrollo de actividades en entornos industriales, pedagógicos y sociales. Además, limita la posibilidad de llevar a cabo investigaciones, lo que tiene un impacto negativo en el avance del conocimiento y desarrollo [5].

Los robots existentes a menudo carecen de la resistencia mecánica necesaria para soportar cargas y funcionar de manera óptima en condiciones desafiantes donde se requieren aplicar ingeniería. Esta limitación no solo obstaculiza la automatización de tareas industriales que requieren la manipulación de objetos, sino que también limita la capacidad de realizar actividades en entornos adversos, como la exploración de terrenos irregulares o la inspección de estructuras en lugares remotos. La comunidad de investigación ha reconocido durante mucho tiempo la importancia de abordar estos desafíos de construcción de sistemas mecánicos resistentes, capaces de responder adecuadamente a las especificaciones requeridas [6].

Un inconveniente de los robots existentes son los elevados costos en el mercado, su fabricación en el extranjero, largos periodos de importaciones además son dispositivos que requieren una gran cantidad de recursos para su diseño, fabricación y mantenimiento; por lo tanto, experimentar físicamente con este tipo de plataformas móviles resulta prohibitivamente caro, lo cual hace inaccesible a la universidad incorporar este tipo de dispositivos en entornos prácticos de ciencias aplicadas. En consecuencia, se destaca la incompatibilidad de los recursos disponibles y la asequibilidad a estas herramientas [7].

Resolver este desafío no solo permite una notable mejora en la calidad de la enseñanza dentro del ámbito de ingeniería, también permite la apertura a nuevas herramientas y genera nuevas perspectivas. Por lo tanto, se requiere el diseño de un sistema mecánico para un robot móvil de alto torque con una estructura mecánica adecuada y componentes de buena resistencia para superar estas limitaciones.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

- Desarrollar el sistema mecánico de un robot móvil de alto torque.

1.2.2. Específicos

- Seleccionar componentes mecánicos de robots existentes.
- Diseñar la estructura y sistema mecánico de un robot móvil.
- Modelar la cinemática del robot móvil.

1.3. Alcance

La finalidad de la investigación es el desarrollo del sistema mecánico de un robot móvil de alto torque. Iniciando con la selección de componentes mecánicos de alta resistencia con un valor bajo y disponibilidad en el mercado. Más adelante, diseñar la estructura y sistema mecánico del robot en software CAD, seguidamente realizar un análisis de elementos finitos del prototipo de robot móvil y obtener su factor de seguridad.

Posteriormente, investigar materiales y métodos de manufactura existentes en nuestro entorno para seleccionar los distintos materiales que conformaran la estructura y chasis del robot. Finalmente, se modelará la cinemática del robot.

1.4. Justificación

En el ámbito de la investigación y avances tecnológicos dentro del país, el diseño mecánico del robot permitirá el desarrollo de nuevas investigaciones en el ámbito de la robótica, con un enfoque en la selección de materiales, procesos de manufactura, mejora de la resistencia de los robots móviles y su capacidad de torque en condiciones desafiantes.

En el aspecto económico, la importación y disponibilidad de robots móviles con características de alta resistencia, repuestos accesibles, buena calidad y alta torsión a precios elevados, se convierte en una opción no viable en el contexto de la economía del Ecuador. Es por este motivo que los entornos de aprendizaje en robótica son difíciles por la limitación de recursos.

En el aspecto técnico, se importan y adquieren robots los cuales no cumplen los requerimientos necesarios del entorno, por lo cual desarrollar un robot con la disponibilidad de materiales y procedimientos de fabricación dentro del territorio y que cumpla con las necesidades específicas del entorno se presenta como una opción viable.

En el ámbito social, el diseño mecánico de un robot plantea soluciones a la ingeniería mecatrónica, aplicando principios científicos para la identificación de materia prima, desarrollo de componentes útiles, mejorando la calidad de futuras investigaciones, que permitan ayudar a solucionar problemas locales. De tal manera se cumple una responsabilidad social, uno de los pilares de la misión de la Universidad Técnica del Norte.

Capítulo II

Revisión literaria

2.1. Estado del arte

El desarrollo de robots con elevadas capacidades de torque y resistencia se abordan de manera meticulosa y objetiva, sustentadas por diversos antecedentes que han explorado tanto la construcción como diseño de estos dispositivos. A continuación, se proporciona un detallado análisis de registros que han contribuido en el desarrollo de esta temática:

El trabajo propone el tema de mecanoestructuras con un diseño mecánico racional, métodos de fabricación adecuados, evaluación de desempeño y aplicación industrial de estructuras avanzadas. Se plantean novedosos armazones mecánicos, tanto estáticos como dinámicos, y se modelan de tal manera que consideran el comportamiento mecánico durante todo el proceso de deformación. Utilizando un campo denominado mecanoestructuras, que permite un enfoque de diseño estructural orientado directamente a la aplicación. El ensayo arroja resultados que incluyen un grupo de sistemas mecánicos con alta funcionalidad acorde a los requerimientos deseados, como el peso del elemento, donde se comprueba que se pueden utilizar materiales livianos con alta capacidad de resistencia a impactos, y finalmente se pueden elaborar cuerpos rígidos. Este método permite desarrollar procedimientos de mejor calidad que involucran un beneficio económico considerable al utilizar materiales adecuados [8].

Este documento presenta los criterios para el diseño de distintos tipos de plataformas robóticas con fines educativos e industriales, con formulaciones utilizadas para el diseño de los principales elementos que conforman al dispositivo, con el propósito de facilitar el aprendizaje mediante la incorporación de estrategias de navegación. Se logra este fin utilizando aspectos y conocimientos sobre resistencia de los materiales y características mecánicas, obteniendo resultados sobre dimensiones como espesores para un óptimo desempeño de los componentes estructurales del robot. Con este trabajo se obtienen pruebas sólidas y viables de fabricación exitosa, donde el uso de espesores adecuados para estructuras permite conseguir elementos livianos con altas capacidades de resistencia ante

cargas, además de ofrecer soluciones efectivas a aplicaciones específicas dentro de la industria robótica [9].

En la aplicación y construcción de robots, se ejecuta la implementación de un robot solar móvil, cuya finalidad es llevar a cabo actividades de exploración. Toda la investigación se lleva a cabo con el diseño de varios prototipos. El ingenioso dispositivo ejecuta todos sus movimientos con la ayuda de un servomotor y tres ruedas, lo que le permite tener un sistema de dirección eficaz capaz de realizar desplazamientos precisos. Además, cuenta con un sistema de control que le permite evitar la colisión con obstáculos. Todos estos elementos realizan sus movimientos de manera sostenible con un sistema de fuente de energía, que le permite la movilidad durante un rango aproximado de diez horas. Las pruebas realizadas en este trabajo permiten al mecanismo desempeñarse en entornos de investigación como exploración, agricultura inteligente, inspecciones, entre otros [10].

El desarrollo de un novedoso marco robótico para la inspección mediante tele manipulación, aplicado a escenarios inseguros y de riesgo estructural es detallado en el proyecto implementado en Madrid, con el objetivo de desarrollar un robot capaz de navegar de manera autónoma para el reconocimiento de espacios desconocidos de forma fiable. El principal desafío de la investigación es lograr un sistema de control viable para este tipo de situaciones. Por lo tanto, se materializa el objetivo mediante la implementación de un sistema de control sofisticado que permite reaccionar a los cambios ambientales, adaptándose de manera inteligente a las condiciones del entorno, incluyendo la identificación de situaciones peligrosas en el sistema. En las pruebas realizadas, el mecanismo demuestra un rendimiento apropiado ante peligros inminentes y cambios en el entorno, lo que resulta en su capacidad para navegar de manera eficiente en situaciones adversas en las que la intervención humana sería altamente riesgosa [11].

En el presente trabajo se lleva a cabo el diseño, prototipado y construcción de un robot móvil autónomo que es teleoperado, con el objetivo de implementarlo en operaciones de exploración en entornos de difícil acceso, como lugares con accidentes, y utilizarlo en rescates, seguridad, entre otras actividades. Para este proyecto, se realiza el modelado con un diseño mecánico, que posee una distribución diferencial de robots móviles; posteriormente, en base en el modelo y estudio para la implementación, se utilizan motores

de alta potencia con la finalidad de tener un mayor torque, lo que le permite al sistema desplazarse con mayor funcionalidad. Además, se desarrolla una interfaz de realidad virtual que permite la transmisión de video al mismo tiempo que se recibe datos con módulos de radiofrecuencia. Una vez finalizada la etapa de diseño y construcción, se fabrica el robot con todos sus elementos, y se le practican pruebas de funcionamiento con un operador que dirige al robot. El robot muestra un buen desempeño ante desafíos de obstáculos y entornos desafiantes con una respuesta adecuada, lo que le permite superar la fase de pruebas [12].

Existe el control de modo de deslizamiento mejorado para aproximación-torque en la estabilidad lateral de un robot móvil. Donde el principal objetivo del estudio es el seguimiento preciso de la trayectoria y la estabilidad en condiciones complejas de carretera. Para lograr la operación, implementan un esquema de control lateral flexible en las ruedas y un controlador de modelo deslizante que garantiza precisión y robustez ante los movimientos a efectuarse. Además, el método se evalúa mediante simulaciones que permiten recrear desplazamientos en los que se implica la estabilidad del dispositivo. En la fase de ensayos, se desarrollan demostraciones experimentales utilizando un robot de cuatro ruedas al cual se le aplican pruebas de seguimiento de trayectoria y control de equilibrio, dando resultados satisfactorios [13].

Un diseño y análisis para un prototipo de vehículo de cuadro ruedas es ejecutado en con la finalidad de ser implementado en el sector agrícola para la identificación y eliminación de papas en mal estado. El propósito central del proyecto se basa en el diseño de un chasis que cumpla con las demandas desafiantes y exigentes de los terrenos donde será utilizado, cumpliendo con la optimización de tamaño y material. En el proceso se realiza una descripción detallada del análisis de fuerza y tensión a las cuales estará sometido el vehículo. Los resultados logrados son satisfactorios, ya que le permiten tener una buena movilidad en terrenos con irregularidades como surcos de riego e imperfecciones en las áreas de cultivo [14].

La reingeniería de un robot cartesiano en una investigación inicia con una inspección minuciosa del estado actual del robot, abarcando su estructura mecánica, transmisores, reductores, actuadores, sensores y elementos terminales. El foco principal radica en la optimización del diseño mecánico del robot, que implica la identificación y evaluación de

componentes defectuosos y desgastados, así como la propuesta de posibles alternativas para abordar estas deficiencias. A través de una matriz de ponderación, se selecciona la alternativa que mejor se adapta a las necesidades de los usuarios, considerando tanto aspectos mecánicos como económicos. El punto culminante del trabajo es la implementación de protocolos de pruebas que se centran en la validación del diseño mecánico del robot cartesiano, especialmente en lo que respecta a la clasificación de objetos ferromagnéticos por peso. Los resultados obtenidos no solo mejoran significativamente el diseño mecánico de robots, sino que también aportan avances en la eficiencia y precisión en tareas de manipulación y automatización industrial [15].

Se desarrolla el diseño mecánico de un prototipo robótico multi terreno con un sistema robusto. Con el objetivo central de avanzar en el área de robótica móvil, particularmente en lo que respecta al sistema de locomoción. Este enfoque no solo representa un avance tecnológico significativo, contribuye a una reducción de costos en las operaciones de reconocimiento. Se desarrolla un modelo que se distingue por su diseño principal basado en un sistema de suspensión Rocker-Bogie de cuatro ruedas. Además, cuenta con un sistema electrónico confiable que garantiza el funcionamiento óptimo del prototipo. Este proyecto incluye pruebas exhaustivas del mecanismo, que abarcan diversos ángulos de inclinación de terreno y obstáculos de distintas alturas. Estas pruebas demuestran la eficacia del diseño mecánico y sientan las bases para la escalabilidad del prototipo hacia una nueva generación de robots con aplicaciones más específicas en el campo de la robótica móvil [16].

2.2. Tecnologías implicadas

Las bases teóricas para un proyecto son de gran relevancia, se establece los conceptos y principios los cuales sustentan el desarrollo de una investigación. En los siguientes tópicos implicados se abordan temas relacionados con robótica móvil, se abarcan fundamentos teóricos, aplicaciones y tecnologías actuales.

2.2.1. Robótica móvil

Los robots móviles surgen ante el requerimiento de contar con vehículos con la capacidad de desenvolverse en entornos diversos. En consecuencia, estos sistemas automatizados tienen la capacidad de desplazarse de forma autónoma y recopilar

información mediante sensores. Su diseño son el resultado de avances en mecánica, electrónica y sistemas de control [17].

Dentro del ámbito industrial y educativo se registra un aumento en el uso de robots. En el sector industrial, a los robots móviles se les atribuye la facultad de facilitar actividades de carga, procesos de manufactura que implican largos períodos, incremento en la producción, entre diversas más. En la esfera educativa, permiten la educación didáctica, estimulan el desarrollo creativo, ofrecen una visión tecnológica y fomentan interés en el ámbito de conocimiento [18].

Los robots pueden ser clasificados según su grado de autonomía, dividiéndolos en teleoperados, con tareas pre programadas o repetitivas, y autónomos [18]. En la

Tabla 1 se presenta un resumen de las generalidades de un robot móvil según su nivel de autonomía.

Tabla 1: Robots teleoperados y autónomos en la robótica móvil *[18]*.

Clasificación	Robot teleoperado	Robot autónomo
Generalidades	Permite al operador humano controlar el robot en tareas con entornos dinámicos.	Control automático empleado en tareas de ubicación móviles, repetitivas, predecibles y constantes.
Ventajas	Facilita operaciones en entornos peligros e inaccesibles.	Automatización eficiente, mejora de la precisión y reducción de riesgos.
Desventajas	Pérdida de la sensación táctil directa.	Elevados costos, mantenimiento regular y necesita de personal especializado.
Aplicaciones	Exploración, operaciones de rescate, manipulación de materiales peligrosos, entre otros.	Líneas de ensamblaje, transporte de materiales, tareas precisas en entornos industriales, entre otras.

2.2.2. Locomoción en robots móviles

Al abordar el diseño en un robot móvil, se deben considerar los actuadores y mecanismos los cuales posibilitan el desplazamiento del dispositivo. Los elementos deben

adaptarse al entorno en el cual el robot se desempeñará [19]. Por tal motivo la locomoción se desglosa en tres aspectos de relevancia, como se muestra en la

Tabla 2.

Tabla 2: Factores importantes en la locomoción de un robot móvil [19].

Estabilidad	Entorno	Tipo de contacto
Geometría y puntos de apoyo o contacto	Estructura	Forma y tamaño del contacto
Centro de gravedad	Medio	Ángulo de contacto
Estabilidad estática y dinámica		Fricción

2.2.2.1. Empleo de las ruedas en la robótica móvil

El uso de las ruedas como medio locomotor en una plataforma robótica aporta una ventaja por la facilidad de construcción. Para que el mecanismo pueda desplazarse solo se requiere proveer de energía al eje de las ruedas impulsoras; por consiguiente, permite al robot trasportar cargas robustas [20].

La **Tabla 3** ilustra las cuatro categorías de ruedas más empleadas en la robótica móvil. En consecuencia, la elección del tipo de rueda impacta de forma directa en la cinemática del dispositivo.

Tabla 3: Categorías de ruedas más empleadas en la robótica móvil [20].

Estándar	Giratoria	Omnidireccional	Esférica
Eje principal	Eje principal y secundario	Eje primario articulación activa	Utilizada de forma pasiva como punto de apoyo.
Altamente direccional	Altamente direccional	Los ejes alrededor de la circunferencia son pasivos.	Puede activarse para moverse en cualquier dirección.
Alta capacidad de carga	Giro alrededor de un eje desplazado. Provoca una fuerza que se transmite directamente al chasis.	Cinemáticamente, puede moverse con poca fricción a lo largo de muchas trayectorias posibles.	Útil en espacios reducidos, ideal para aplicaciones de alta maniobrabilidad.

2.2.2.2. Configuración cinemática según la disposición de las ruedas

El ajuste de la cinemática alude a la disposición de las ruedas motrices dentro de un robot móvil. La elección de la configuración y cantidad de ruedas a emplearse en el mecanismo influye en su capacidad de desplazarse y agrega condiciones restrictivas a su funcionamiento. Existen variadas configuraciones, con distintas aplicaciones específicas. Ejemplos claros son el sistema Ackerman, similar a la dirección empleada en los automóviles; disposición triciclo, basada en una rueda directriz vinculada a dos ruedas motrices; la disposición omnidireccional, con la capacidad de desplazarse en cualquier dirección gracias a la geometría de sus ruedas; y la configuración skid-steer, la cual funciona con un control diferencial a cada rueda, muy usada en plataformas para todo terreno, debido a sus giros vinculados a la alta fricción [21].

El estudio emplea el ajuste diferencial, este tipo de disposición no contiene ruedas directrices, lo cual significa que la dirección se basa en la variación de la velocidad de una rueda con respecto a otra [21]. La **Fig. 2.1** muestra la configuración diferencial con cuatro ruedas, se puede identificar que cada rueda posee su ajuste de velocidad.

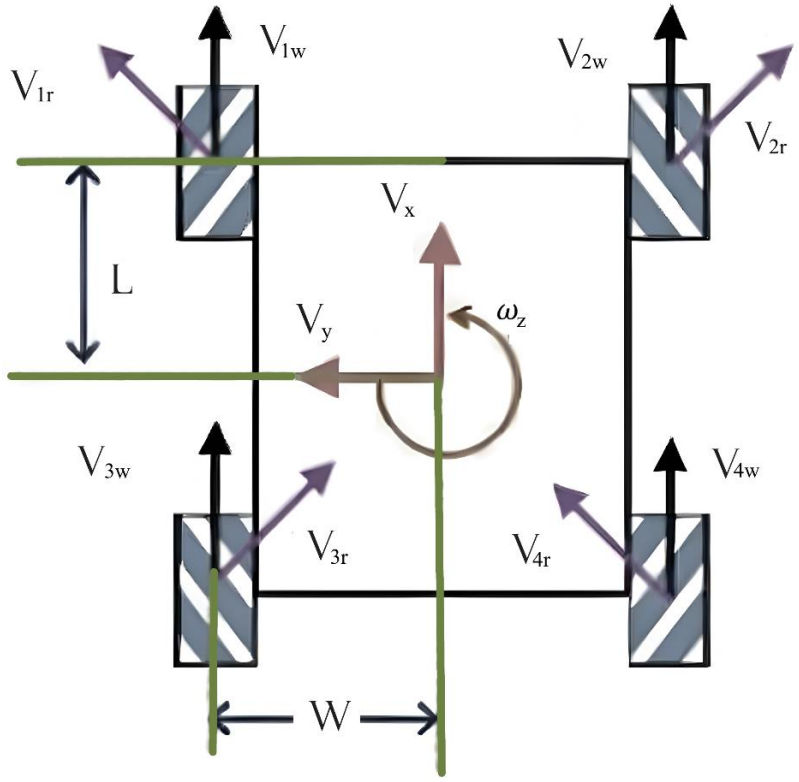

Fig. 2.1. Configuración diferencial de cuatro ruedas [21].

$\boldsymbol{V_{1r}}, \boldsymbol{V_{1w}}, \boldsymbol{V_{2r}}, \boldsymbol{V_{2w}}, \boldsymbol{V_{3r}}, \boldsymbol{V_{3w}}, \boldsymbol{V_{4r}}, \boldsymbol{V_{4w}}$: representan las componentes de velocidad de cada rueda, donde

- $\boldsymbol{V_{ir}}$: Componente radial o tangencial de la velocidad en la rueda i,
- $\boldsymbol{V_{iw}}$: Componente angular o lateral de la velocidad en la rueda i.

$\boldsymbol{V_x}$: componente de velocidad del centro del robot en el eje horizontal (dirección x).

$\boldsymbol{V_y}$: componente de velocidad del centro del robot en el eje vertical (dirección y).

$\boldsymbol{\omega_z}$: velocidad angular del robot respecto al eje z, indica la rotación del robot en el plano.

$\boldsymbol{L}$: distancia entre las ruedas delanteras y traseras (longitud del robot).

$\boldsymbol{W}$: ancho del robot, correspondiente a la distancia entre las ruedas del lado izquierdo y derecho.

2.2.3. Cinemática del robot

La cinemática explora las matemáticas vinculadas con el movimiento, sin considerar el impacto de las fuerzas sobre este; es importante dejar claro que su atención se centra en las relaciones geométricas que dirigen al sistema además de la conexión entre las variables de control y la conducta de los sistemas en el espacio de estados [22].

2.2.3.1. Modelado cinemático

El modelado cinemático consiente en establecer la posición y orientación del extremo operativo de un dispositivo, gracias a las posiciones y las características geométricas del robot. El tema es relevante para la comprensión de los movimientos individuales de las articulaciones, las cuales se expresan en desplazamientos en el espacio tridimensional [23].

La correcta ejecución del tema es de vital importancia en el diseño, control y simulación dentro de la robótica, propone un pilar en la matemática para predecir la conducta del dispositivo ante otras configuraciones [23].

2.2.3.2. Velocidades angulares y lineales

Las relaciones de velocidades angulares y lineales permiten examinar y vigilar el movimiento en robots. La velocidad lineal se vincula con un lugar específico de ubicación del robot y representa la rapidez con la que desplaza su posición en una determinada área. Por otro lado, la velocidad angular se la toma como la rotación de un elemento rígido alrededor de un eje y mide la rapidez con la que se efectúa el giro [24].

Se modela las ecuaciones tomando como referencia velocidades angulares y radio de los neumáticos del robot. La velocidad lineal para el eje *y* viene dada por

$$V_y = \frac{r}{4}(w_1 + w_2 + w_3 + w_4), \quad (1)$$

donde,

r = corresponde al radio de los neumáticos,

$\boldsymbol{V_y}$**=** representa la velocidad lineal,

***w*=** define velocidades angulares de cada rueda medidas en rad/s,

***L*=** indica la distancia del ancho entre las ruedas

La velocidad angular del robot, en una rotación en su propio eje, es

$$w = \frac{r}{4L}(-w_1 + w_2 - w_3 + w_4), \quad (2)$$

2.2.3.3. Ecuaciones vinculadas

A partir de las velocidades lineales y angulares, se obtiene el movimiento resultante, el cual está ubicado en el plano *x*, y mientras que la orientación θ se describe a través de

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V_y \sin(\theta), \\ \dot{y} &= V_y \cos(\theta), \\ \dot{\theta} &= w, \end{aligned} \quad (3)$$

donde,

$\dot{x}$= equivale a la velocidad en el eje *x*,

$\dot{y}$= denota la velocidad en el eje *y*,

$\dot{\theta}$= refleja la orientación del dispositivo.

El modelado discreto permite la simulación de sistemas dinámicos, ejecutando su comportamiento en intervalos de tiempo finitos (*dt*). En la cinemática de robots móviles con ruedas, es empleada para cálculos de posición, orientación y varios parámetros en intervalos de tiempo, las cuales están basadas en ecuaciones diferenciales [25].

Para sistemas continuos, el cambio en una variable en este caso la posición (*x*) se representa por su derivada temporal ($\dot{x}$) o tasa de cambio con respecto al tiempo. Por otro lado, para sistemas discretos, el cambio es en intervalos finitos de tiempo (*dt*). Como resultado, permite su modelamiento, además de simulaciones del movimiento de la plataforma en un entorno virtual [25]. Para describir lo mencionado, las ecuaciones son

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \dot{x}\, dt, \\ y_{k+1} &= y_k + \dot{y}\, dt, \\ \theta_{k+1} &= \theta_k + \dot{\theta}\, dt, \end{aligned} \quad (4)$$

donde,

x_k, y_k, θ_k= caracterizan la orientación y posiciones del dispositivo en el paso *k*,

$\boldsymbol{x_{k+1}, y_{k+1}, \theta_{k+1}}$ = expresan la orientación y posiciones del dispositivo en el siguiente paso (k+1),

$\boldsymbol{dt}$= indica los intervalos de tiempo trascurridos entre los pasos.

2.2.4. Arquitectura del robot móvil

Es de gran relevancia la disposición y organización de los componentes en un dispositivo móvil, estos incluyen el sistema mecánico, tracción, sensores, actuadores, entre otros. La arquitectura debe ser adecuada con el fin de garantizar el acople e integración de los elementos para un correcto funcionamiento en el entorno en el cual debe cumplir sus aplicaciones [26].

2.2.4.1. Sistema mecánico

Al sistema mecánico también se lo denomina estructura física de un robot móvil, el cual desempeña un papel importante al resguardar los diferentes sistemas en su interior y proporcionar los implementos que permiten la generación del movimiento mecánico; los cuales incluyen al sistema de tracción y soporte del dispositivo. El mecanismo de tracción se ejecuta con la intervención de actuadores, los cuales pueden ser: neumáticos, hidráulicos o eléctricos; dentro de ellos se encuentran varios elementos como las ruedas que permiten generar la tracción [27].

La apariencia externa del robot está vinculada directamente con el sistema de soporte, el cual se desglosa en el chasis y carrocería. El diseño debe adaptarse al tipo de cargas, las cuales pueden tener un peso considerable o ser livianas y que el dispositivo debe enfrentar dependiendo del entorno del trabajo al cual será sometido [27].

2.2.4.2. Diseño de mecanismos

Existe una perspectiva esclarecedora sobre cuando se planea el diseño de un mecanismo destinado a ser utilizado en un dispositivo, es relevante una definición precisa de los requerimientos esenciales para lograr un movimiento deseado. En consecuencia, implica llevar a cabo análisis de diversos parámetros del sistema, los cuales permiten una evaluación de su desempeño y aptitud para ejecutar una tarea asignada [28].

2.2.4.3. Chasis

La vitalidad del chasis se centra en el peso y rigidez, la última vinculada con la estabilidad. Prevenir la deformación no deseada en este elemento es relevante para salvaguardar la integridad del vehículo. De igual modo, es importante considerar factores como la fiabilidad, precios y variabilidad de consideraciones. Se debe agregar que no existe una normativa específica que facilite uniformizar el diseño [29].

Para que el diseño del chasis sea considerando eficaz, es esencial que tenga la capacidad de albergar todos los elementos requeridos para su operación eficiente. Esto implica la inclusión de sensores, actuadores y fases de potencia; conjuntos claves para asegurar que el robot lleve a cabo sus operaciones [28].

2.2.4.4. Elementos Finitos

Al examinar mecanismos, la herramienta de Análisis de Elementos Finitos (FEA) emerge como una técnica eficaz, capaz de facilitar distintas tareas en la evaluación de propiedades de una pieza con respecto al material planteado. El efecto de este procedimiento resulta beneficioso en la reducción de gastos en la producción, perfeccionar el diseño y cálculos de fatiga y vida útil del elemento en ciclos de fallo [30].

Los resultados derivados de la simulación del FEA proporcionan al sujeto la información necesaria y le permite tomar decisiones como la selección de materiales a emplearse, teniendo en cuenta las diversas cargas a las cuales el elemento estará sujeta.

2.2.5. Materiales

Seleccionar adecuadamente un material en el diseño de un robot es crucial, ya que a partir de esta decisión se determina la resistencia estructural, el peso y comportamiento del dispositivo en condiciones operativas [31].

2.2.5.1. Compuestos plásticos

Los plásticos están compuestos internamente por polímeros en su gran mayoría, caracterizados por poseer moléculas orgánicas de peso molecular elevado, basadas en un eje principal de carbono, compartiendo la característica de baja densidad. Los plásticos avanzados de ingeniería son capaces de soportar cargas, logrando competir con eficacia con los metales gracias a sus aplicaciones y facilidad de adquirir una forma compleja [32].

Se puede detallar a continuación los compuestos plásticos comúnmente empleados para el desarrollo de robots:

- **PETG:** este material se lleva a cabo mediante la polimerización del PET, mediante el proceso da lugar a una cadena de átomos más larga, lo que se traduce a mayor resistencia cuando las piezas son sometidas a esfuerzos. Tiene características de fácil extrusión y buena estabilidad térmica, ganando cada vez más terreno en la impresión 3D [33].
- **ABS:** se destaca como un material amorfo, lo que indica que carece de un rango de temperatura de fusión precisa, rondando los 220° a 240°. El compuesto presenta buenas cualidades mecánicas, posicionándolo como un elemento muy empleado en FMD. Catalogado como plástico de ingeniería por la complejidad de su fabricación y procesamiento respecto a otros materiales habituales [34].

2.2.5.2. Metales

Las aleaciones metálicas se constituyen principalmente mediante combinaciones de elementos metálicos, y gran parte de sus características provienen de la presencia de electrones deslocalizados. Los metales exhiben una conductividad térmica y eléctrica muy buena; y son opacos a la luz. Asimismo, estos compuestos se caracterizan por ser robustos, pero deformables, por lo tanto, son opciones viables para usos estructurales [35].

- ***Aleaciones de aluminio:*** presentan cerca de un tercio de la densidad del acero, con características favorables con respecto a su peso, siendo ligeros, proyectándose de tal forma que son empleados para estructuras en la construcción de robots. Se debe tener en cuenta la aleación adecuada si se desea obtener mayor o menor resistencia, lo cual limita el uso para ciertas aplicaciones.
- ***Acero negro:*** aleación muy empleada en aplicaciones de estructuras metálicas gracias a sus propiedades tales como alta rigidez, resistencia a la tracción, buena ductilidad, manufactura y resistencia mecánica.
- ***Acero galvanizado:*** su recubrimiento de zinc lo hace resaltar, con su elevada resistencia a la corrosión en ambientes controlados. Además, la combinación de buena rigidez y costo accesible es una opción viable en la fabricación de componentes.

2.2.6. Métodos de manufactura

Un método de manufactura adecuado garantiza la funcionalidad del robot, todo depende de las características que se requiera; pueden ir desde la creación de piezas complejas, unión de elementos, ensamblaje, costos, disponibilidad, además de otras [36].

2.2.6.1. Manufactura adictiva

Impresión 3D, o también denominada manufactura aditiva FDM, constituye un método el cual permite la creación de una pieza física desde un modelo digital tridimensional elaborado a través del diseño asistido por computadora CAD. Por consiguiente, este método implica la deposición de sucesivas capas delgadas de material [37].

En la **Fig. 2.2** se puede apreciar claramente el procedimiento del método de manufactura aditiva, el cual va desde el CAD, convertir el archivo a STL, transferir los archivos a la máquina, configuración del dispositivo, construcción, retirar, postprocesamiento y la aplicación [38].

Fig. 2.2. Procedimiento del método de manufactura aditiva [38].

2.2.6.2. Soldadura con arco eléctrico

En situaciones donde las estructuras requieren de una buena resistencia, la soldadura se plantea como una alternativa sólida. La soldadura por arco es empleada para unir piezas metálicas, brindando una integridad estructural firme y perdurable. El resultado de este proceso es importante en la fabricación de chasis y elementos sujetos a cargas [32].

Se puede apreciar en la **Fig. 2.3** la soldadura por arco eléctrico, donde se genera un arco sostenido que proporciona calor, el cual funde al material del elemento de trabajo.

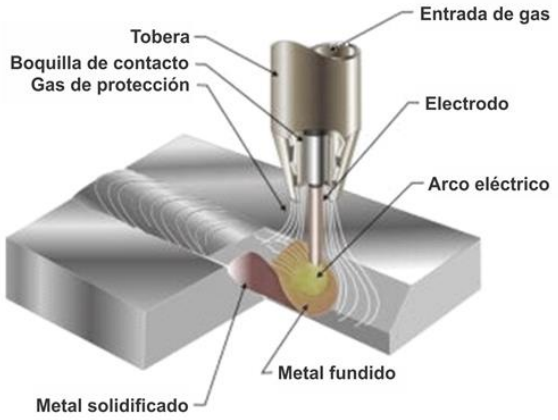

Fig. 2.3. Soldadura por arco eléctrico [32].

2.2.6.3. Centro de maquinado CNC

Este procedimiento permite el maquinado de varias caras pertenecientes a una pieza, los cuales involucren alta complejidad y precisión, mediante diferentes técnicas como fresado, taladrado, planeado, entre otras. Las características que presenta son el cambio de herramientas con paletas intercambiables, mesas con la capacidad de girar, desplazarse e incluso inclinarse; capacidad de trabajar con piezas a partir de materiales como metales, maderas y plásticos de alta resistencia; capacidad de ejecutar componentes críticos que requieren tolerancias ajustadas. Con una alta utilidad permitiendo la realización de pequeños y medianos lotes [32]. En la **Fig. 2.4** se aprecia un centro de maquinado CNC.

Fig. 2.4. Centro de mecanizado CNC [32].

Capítulo III

Marco metodológico

3.1. Enfoque y tipos de investigación

En el marco de este trabajo de titulación se emplea una investigación aplicada la cual a partir de conocimiento existente en un área tiene como finalidad brindar una solución al problema presentado [39], el cual implica el diseño de un sistema mecánico destinado a un robot móvil de alto torque, que cuente con una estructura idónea y componentes resistentes.

Se recurre al tipo de investigación documental con la cual, se recopila información en fuentes secundarias como libros, revistas, artículos científicos, entre otras fuentes. Mediante esta metodología se puede distinguir, elegir y ordenar información adecuada para el desarrollo del documento y la investigación [40]. De la misma forma se utiliza una investigación descriptiva por lo cual se precisan las características de las variables para el estudio y se valoran las dimensiones del contexto [39], el uso de [39] y [40] permite avanzar en el proyecto permitiendo recolectar la información necesaria para dar forma el dispositivo con bases adecuadas y fundamentadas.

Finalmente, se implementa la investigación experimental donde mediante experimentos se regulan las influencias de variables independientes, posibilitando la observación de sus consecuencias en otras variables dependientes en una condición controlada por medio de análisis de funcionamiento [41].

3.2. Diseño de la investigación

Para el desarrollo mecánico del robot móvil de alto torque se implementa un registro de actividades, las cuales habilitan el diseño y desarrollo del dispositivo de acuerdo con los objetivos planteados, además se representa un diagrama de flujo en la **Fig. 3.1**, aquí se ilustran etapas importantes para el proceso de diseño del robot, se incluye la definición de requerimientos, investigación preliminar, diseño conceptual, modelado, simulación, fabricación de prototipos y pruebas. Al final, se representa una resolución estratégica sobre la ratificación del diseño conceptual y se ilustra los pasos necesarios en caso de ajustes.

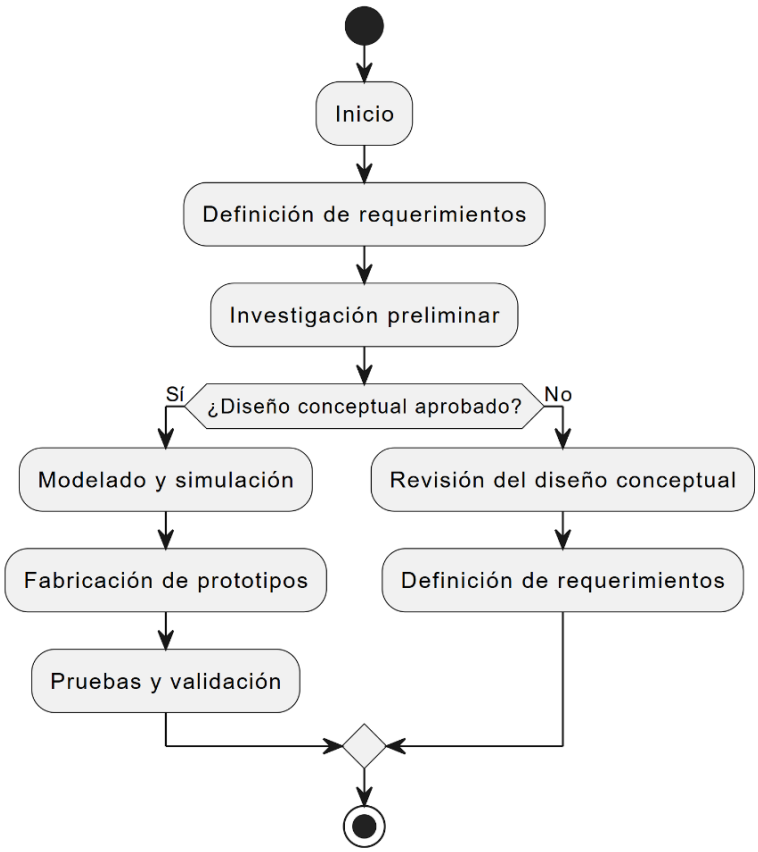

Fig. 3.1. Diagrama de flujo para el diseño de un robot móvil de alto torque.

3.2.1. Fase 1: Selección de componentes mecánicos de robots existentes

En la primera fase se investigan y determinan las respectivas características de los elementos a emplearse en el caso de estudio.

Actividad 1.1: "Búsqueda de información acerca de los componentes mecánicos de un robot móvil"; en la presente actividad se realiza una investigación de tipo documental, que permita seleccionar los elementos adecuados a partir de bases teóricas.

Actividad 1.2: "Investigación de los componentes mecánicos disponibles en el mercado"; a partir de la actividad, tener la disponibilidad de elementos necesarios para implementarse en nuestro trabajo.

Actividad 1.3: "Indagación de materiales para el chasis y estructura"; esta tarea posibilita la mejor alternativa de selección de materiales que cumplan los requerimientos del sistema.

Actividad 1.4: "Selección de los elementos y materiales"; la ejecución de esta actividad permite identificar y escoger aquellos componentes de alta resistencia, costos adecuados y disponibilidad.

Actividad 1.5: "Evaluación de los elementos mecánicos para garantizar su capacidad de carga y resistencia"; la tarea posibilita comprobar que la selección en la actividad anterior es adecuada y se adapta a los requerimientos del sistema.

3.2.2. Fase 2: Diseño de la estructura y sistema mecánico

En la siguiente etapa, a partir de la información y selección de la fase anterior, se especifican las condiciones que permiten realizar el respectivo diseño del sistema mecánico.

Actividad 2.1: "Determinación de especificaciones a diseñar"; se emplean habilidades y normativas de diseño adaptadas a la formación académica y normas adecuadas.

Actividad 2.2: "Recopilación de datos métricos de los componentes a incorporar en la estructura"; el procedimiento permite la correcta y eficiente disposición de los elementos dentro del área del dispositivo.

Actividad 2.3: "Planificación de estrategias de diseño"; la implementación de esta actividad posibilita establecer un adecuado desarrollo del diseño considerando principios de flexibilidad de manufactura. Facilita la ejecución coherente de la investigación.

Actividad 2.4: "Diseño de la estructura del chasis"; se implementa esta actividad con base en los parámetros de dimensiones, elementos seleccionados, materiales, cargas, entre otros.

Actividad 2.5: "Planteamiento de propuestas para los mecanismos"; con esta acción se proponen mecanismos viables para el sistema que se adapten a la estructura y chasis del robot.

Actividad 2.6: "Desarrollo de los mecanismos"; ejecutar esta tarea permite un desarrollo en el modelo del robot, adquiriendo funcionalidad y permite la implementación de todos los elementos.

Actividad 2.7: "Selección de la mejor solución"; ejercerla permite la consecución de una opción óptima que satisfaga las condiciones de medidas, elementos adecuados, funcionalidad, entre algunas otras.

Actividad 2.8: "Selección de los materiales del chasis"; a través de ella se garantiza la integridad del diseño, ya que se relaciona directamente con la capacidad de carga y resistencia del robot, brindando robustez.

3.2.3. Fase 3: Modelamiento de la cinemática del robot móvil

En esta etapa del proceso se modela la cinemática, con la cual se asegura el desarrollo del sistema mecánico que permite la integración de mecanismos y estructura para su posterior simulación.

Actividad 3.1: "Modelamiento de cinemática"; a través de esta acción, se establecen las ecuaciones matemáticas, las cuales exponen el movimiento y posición del robot. Se sientan las bases para una simulación de su comportamiento dinámico.

Actividad 3.2: "Ensamble de elementos en software CAD"; por medio de esta tarea se integran el chasis, mecanismos y elementos. Permite visualizar y analizar la integración entre los componentes, a partir de este paso se pueden hacer correcciones para verificar una correcta conexión de las piezas.

Actividad 3.3: "Análisis de esfuerzos del dispositivo empleando software"; en el contexto se examinan la resistencia de los materiales empleados y se identifican áreas de mejora en el diseño para optimizar durabilidad.

Actividad 3.4: "Pruebas de funcionamiento mecánico en software CAD"; la ejecución de esta acción permite la validación del desempeño de los sistemas mecánicos, además de evaluar la respuesta de los componentes.

Actividad 3.5: "Desarrollo del documento correspondiente al trabajo de integración curricular"; llevar a cabo esta tarea permite consolidar los aspectos esenciales del trabajo de investigación, proporciona un contexto claro y estructurado de los procesos claves. Contribuye a la comprensión del proyecto, facilita la comunicación de los resultados y finalmente ofrece una referencia para futuros trabajos.

Capítulo IV

Desarrollo y análisis

El siguiente capítulo determina y analiza las condiciones clave para el diseño y correcto funcionamiento del dispositivo. En la **Fig. 4.1** se representa un diagrama de bloques funcional, el cual resume las interacciones de todas las fases involucradas en el diseño. En él se organiza el flujo de trabajo desde las especificaciones iniciales, diferentes propuestas de diseño, descripción de configuraciones mecánicas, materiales empleados, simulaciones, validaciones y el análisis cinemático que representan el óptimo funcionamiento del robot. Además, se presentan procesos iterativos con retroalimentación entre las etapas de mayor relevancia, lo cual permite reajustar y garantizar la acción antes de avanzar de fase.

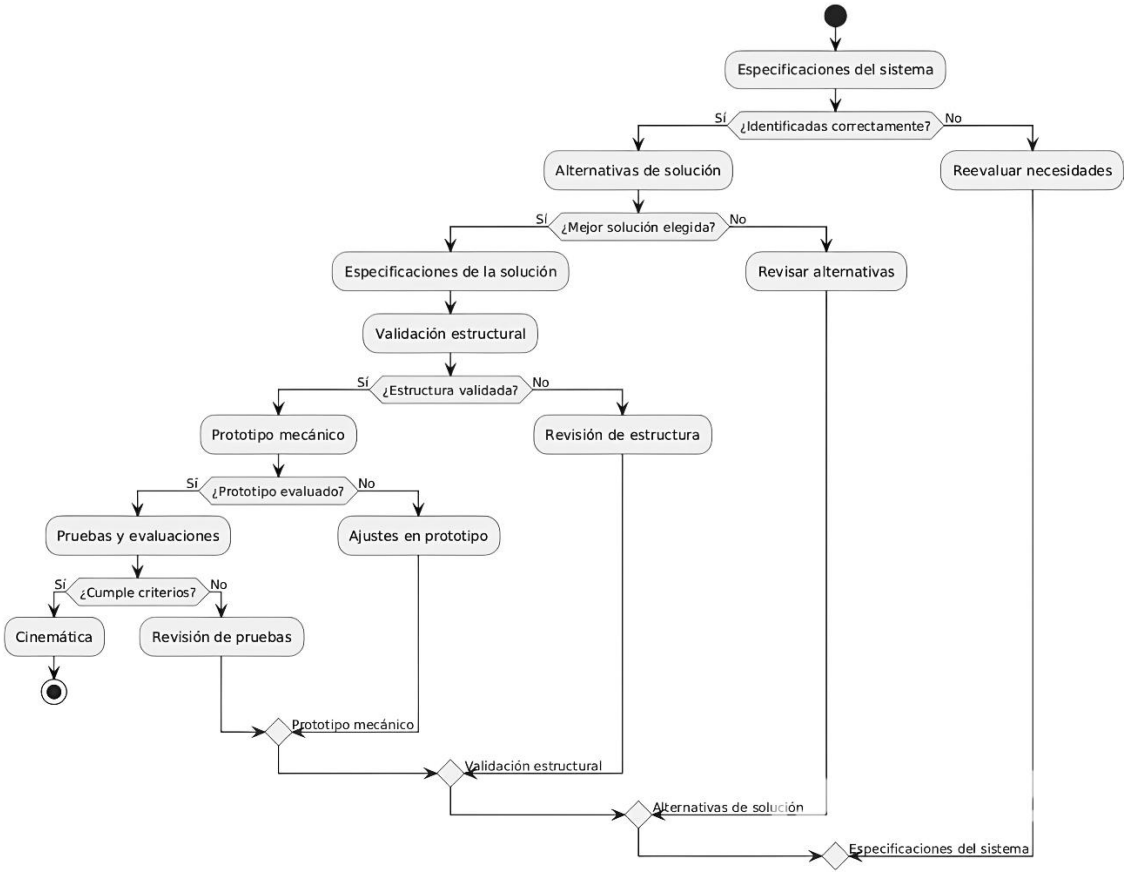

Fig. 4.1. Diagrama de bloques del diseño del dispositivo.

4.1. Especificaciones del sistema a diseñar

Una implementación adecuada para el sistema mecánico del robot móvil de alto torque, debe seguir las teorías de diseño mecánico y principios de robótica móvil, para ello, las características del diseño deben ir orientadas a los objetivos de tal manera, obtener como resultado la eficiencia del dispositivo móvil. En concordancia con las fases de diseño detalladas en el apartado anterior, marco metodológico; y con el propósito de obtener un prototipo funcional y optimizado, se consideran las siguientes especificaciones detalladas en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Especificaciones del sistema.

Especificaciones	Detalle
Diseño del chasis con capacidad de carga adecuada.	Capacidad de carga de 100 kg. Carga con distribución uniforme a las 4 ruedas.
Dimensiones del chasis	Dimensiones acordes a componentes electrónicos y mecánicos. No mayor a 90 cm.
Modelo de estructura acoplada al chasis.	La estructura del robot debe ser integrada al chasis, además el acople de elementos debe ser sencillo.
Selección de materiales	Materiales livianos y resistentes. Factores importantes son la rigidez, resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación.
Costo	Margen aproximado de 550 dólares americanos.
Funcionalidad	Garantizar estabilidad y desplazamiento en condiciones de carga. Diseño modular para la integración de nuevos elementos.

4.1.1. Casa de la calidad – QFD

QFD por sus siglas en inglés (*Quality Function Deployment*), es un procedimiento que tiene como finalidad garantizar la calidad de productos y servicios ofrecidos por una

determinada compañía. Su objetivo es satisfacer las expectativas del usuario con la ejecución de ideas transformadoras y soluciones efectivas [42].

La casa de la calidad se presenta como una metodología que emplea un conjunto de matrices, capaces de estructurar ideas y conocimiento de una empresa respecto a sus usuarios. Asegura una comprensión clara de las necesidades de los clientes y es abordada con criterios técnicos de diseño durante el desarrollo del producto [42].

En la **Fig. 4.2.** se representa la casa de la calidad correspondiente al diseño para el robot móvil, con el objetivo de identificar las características técnicas más importantes para las necesidades del proyecto a realizarse. El análisis busca fijar cuáles son las prioridades principales al momento de realizar el diseño.

Fig. 4.2. Casa de la calidad.

Acto seguido, se describe el proceso para desarrollar la casa de la calidad en el diseño de un robot móvil de alto torque:

En primer lugar, se identifica una lista que contiene los requerimientos, considerando necesidades técnicas y la operabilidad del sistema, tales como capacidad de carga, estabilidad estructural, y la incorporación modular de elementos, todo se ilustra de forma detallada en la **Fig. 4.3.**

Inmediatamente, a cada requerimiento se coloca un valor de ponderación en porcentaje, fundamentado en su relevancia dentro de las aplicaciones del robot, prevaleciendo aquellos factores importantes para avalar su funcionalidad y eficiencia.

Requisitos de Calidad Nivel 1	No	Requisitos del Calidad Nivel 2	Peso Ponderado
Dimensiones	1	Diseño compacto	5,71
	2	Estabilidad	7,14
Estructura acoplada	3	Reducción de vibraciones	8,57
	4	Ligeros	8,57
Materiales y Costo	5	Resistente	10,00
	6	Bajo Costo	10,00
Funcionalidad	7	Diseño Modular	11,43
	8	Desplazamiento eficiente	11,43
Capacidad de carga	9	Resistencia estructural	12,86
	10	Capacidad 100 Kg	14,29
			100%

Fig. 4.3. Requerimientos para el análisis.

En la Figura **Fig. 4.4** se presenta una evaluación comparativa donde se muestran los parámetros técnicos de diseño del robot móvil de alto torque. Esta evaluación integra la relación de importancia técnica absoluta y relativa de cada parámetro, tales como dimensiones, el material, rigidez estructural, ensamblaje modular, y otra serie de medidas clave que influyen en el desempeño del modelo.

El análisis se basa en una escala de calificación donde se identifica las correlaciones más relevantes entre los parámetros. Por ejemplo, los elementos con una relación fuerte

(representan un valor de "9"), mientras que las relaciones menores y moderadas se representan con valores de "3" y "1", respectivamente.

El propósito es priorizar los aspectos que tienen mayor impacto en el desempeño general del robot y guiar a la toma de decisiones al momento del diseño, para cumplir requisitos técnicos y expectativas. Con base a la siguiente matriz, se determina que las medidas relacionadas con la resistencia y el material del chasis tienen un valor característico en el éxito del diseño, mientras que aspectos como el ensamblaje modular presentan una correlación moderada.

Dimensiones del chasis	Material del chasis	Rigidez estructural	Tipo de ruedas	Sistema de ensamblaje modular	Costo de fabricación	Capacidad de carga estructural	Torque del motor	Eficiencia energética	Refuerzos estructurales
9	3			3	3			3	
3	9	9	9			9	3	3	3
	3	9	9			3	3	3	9
3	9			3	3			9	
	9	9	3			9		3	9
3	3				9			3	
	3	3		9				3	
3	3	3	9	3		3	9	9	3
	9	9	3			9		3	9
	9	9	3			9			9
Dimensiones del chasis	Material del chasis	Rigidez estructural	Tipo de ruedas	Sistema de ensamblaje modular	Costo de fabricación	Capacidad de carga estructural	Torque del motor	Eficiencia energética	Refuerzos estructurales

Fig. 4.4. Valores de los parámetros técnicos.

En la Figura **Fig. 4.5** se muestra la importancia técnica relativa, que detalla el porcentaje asignado a cada parámetro técnico en balance con su valor absoluto. Este porcentaje se lo obtiene dividiendo el valor técnico absoluto, entre la suma total de los valores, multiplicándolo por 100, el resultado un porcentaje.

Adicionalmente, se realiza una valoración de competitividad para los parámetros técnicos en relación con dispositivos en el mercado. Para ello, se asignan calificaciones del 1 al 5 a cada criterio, permitiendo una comparación de sus características. Esta metodología facilita nivelar los puntos fuertes y las áreas de mejora del diseño.

	Importancia técnica absoluta y relativa	162,8 4,7%	617,2 17,9%	544,3 15,8%	355,7 10,3%	180,0 5,2%	132,8 3,9%	458,6 13,3%	150,0 4,4%	377,1 10,9%	467,2 13,6%
EVALUACIÓN COMPETITIVA PT	Nuestro nivel	3	4	2	5	3	4	2	5	4	3
	TurtleBot 4	4	5	3	4	3	4	3	4	5	4
	ROSbot 2.0	5	4	2	3	3	5	4	5	4	3
	ROMR	3	3	2	5	4	3	2	5	4	3
	Objetivo de PTs	4	5	3	4	3	4	4	5	5	4
	Dificultad	70%	50%	40%	30%	20%	40%	30%	20%	50%	60%

Fig. 4.5. Evaluación de criterios de importancia y competitividad.

Como cierre del análisis, la **Fig. 4.6** presenta una evaluación comparativa que considera los criterios técnicos más relevantes según las necesidades de usuarios, utilizando una escala de ponderación de 0 a 5 basadas en las características específicas de cada dispositivo.

Los resultados muestran un gráfico de líneas que permite visualizar las diferencias y similitudes entre el diseño desarrollado y las opciones del mercado.

Robusto	TurtleBot 4	ROSbot 2,0	ROMR
4,00	3,00	5,00	4,00
5,00	4,00	4,00	4,00
3,00	4,00	5,00	3,00
5,00	3,00	4,00	3,00
4,00	3,00	4,00	3,00
5,00	4,00	3,00	3,00
4,00	3,00	4,00	4,00
4,00	3,00	5,00	4,00
5,00	4,00	4,00	3,00
5,00	4,00	4,00	4,00
444,29	352,86	415,71	350,00

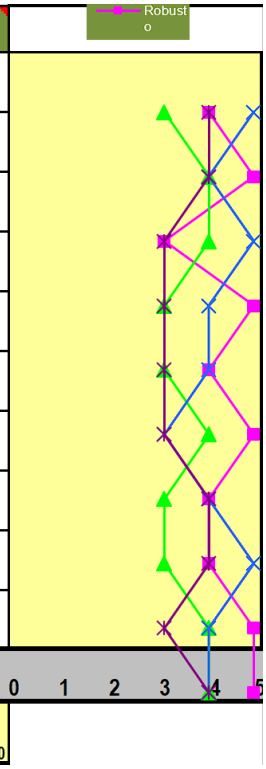

Fig. 4.6. Diagrama de planeación.

4.1.2. Selección de materiales

Tabla 5: Análisis de materiales.

Material	Peso	Acabados	Resistencia	Desventajas
Acero Negro SAE J 403 1008	Pesado, pero más ligero que el acero inoxidable.	Requiere tratamientos para evitar corrosión.	Buena resistencia mecánica, pero susceptible a la oxidación.	Requiere protección (pintura) para evitar corrosión. Más pesado que el aluminio.
Acero Inoxidable	Pesado en comparación con el aluminio	Alta resistencia a la corrosión	Alta resistencia mecánica y a la corrosión, buena durabilidad.	Es significativamente más pesado que el aluminio. Costo elevado.
Aluminio	Mucho más ligero que los aceros.	Fácil de maquinar y pulir, buena estética, pero menos durable sin tratamientos.	Buena resistencia a la corrosión, menor resistencia mecánica que los aceros.	-Menos resistente a fuerzas y golpes que los aceros. -Puede requerir refuerzos estructurales en aplicaciones de alta carga.

Con base en el análisis de la **Tabla 5**, el chasis debe soportar las cargas principales y los esfuerzos mecánicos generados por los motores de alto torque, se ha decidido emplear acero negro como materia prima para su fabricación. Este material es seleccionado debido a su resistencia, facilidad de manufactura y costo accesible, en comparación con otros aceros.

Por otro lado, la estructura de soporte para elementos electrónicos y carcasas, donde la prioridad es reducir el peso sin comprometer la rigidez en el dispositivo, se utilizará aluminio; que ofrece un peso mucho menor que los aceros, buena resistencia a la corrosión y es cómoda de trabajar, lo cual es ideal para reducir el peso y mejorar su maniobrabilidad.

4.2. Alternativas de solución

4.2.1. Primera alternativa de solución

4.2.1.1. Chasis y estructura

El sistema base diseñado para el robot móvil de alto torque incluye un chasis de tubo estructural soldado y una estructura acoplada de forma modular, los cuales son fundamentales para soportar los componentes mecánicos y electrónicos. Las distribuciones específicas del chasis y del acople de la estructura se ilustran en las **Fig. 4.7** y **Fig. 4.8**, la primera muestra el ensamble y la segunda detalles sobre la disposición de los elementos. En la **Tabla 6**, se detalla la descripción de cada componente, cantidad y número de elementos.

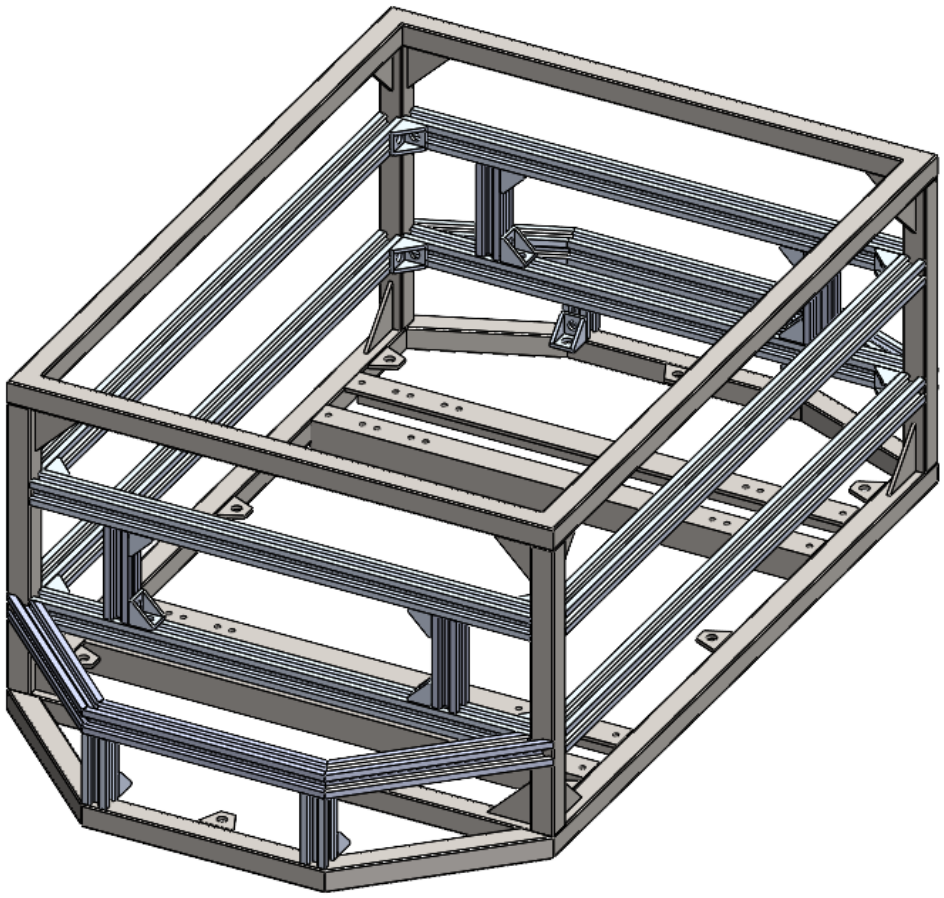

Fig. 4.7. Ensamble general del chasis del robot móvil de alto torque.

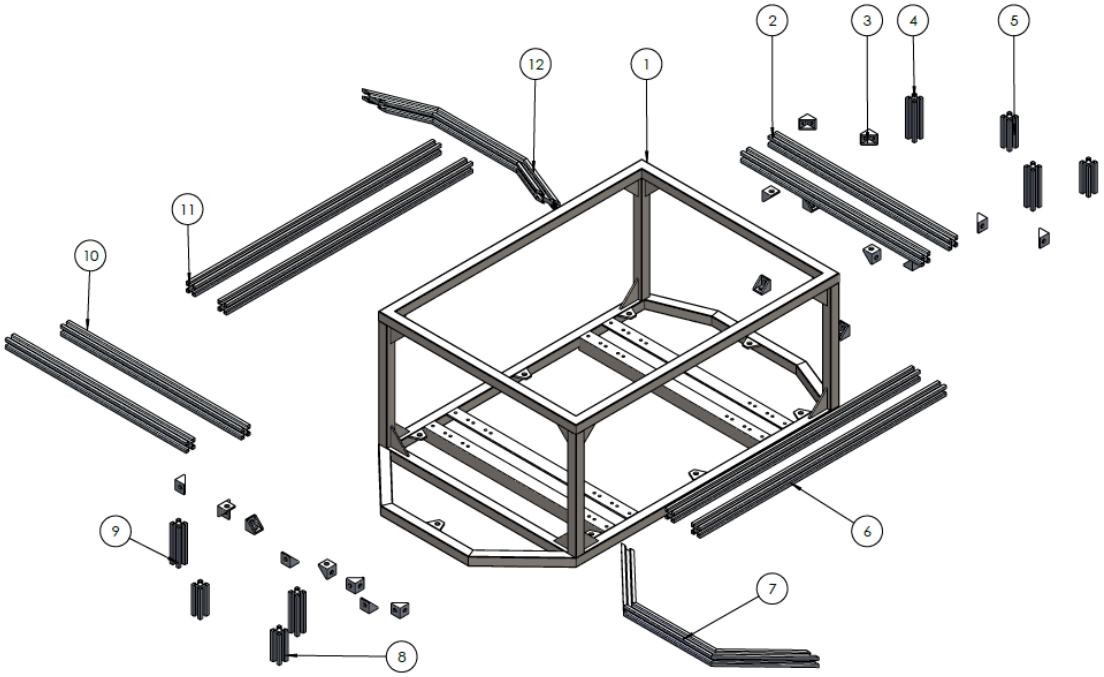

Fig. 4.8. Detalle de la disposición estructural del chasis y acople de elementos.

Tabla 6: Descripción de los componentes del chasis y estructura.

N.° de elemento	Descripción	Cantidad
1	Chasis	1
2	Base superior	2
3	Acople en L	16
4	Parante posterior superior	2
5	Parante posterior inferior	2
6	Base lateral superior	2
7	Frontal	1
8	Parante delantero inferior	2
9	Parante delantero superior	2
10	Base inferior	2
11	Base lateral inferior	2
12	Resguardo posterior	1

La solución propuesta se fundamenta en un chasis (1) de acero negro compuesto por diversos perfiles, incluyendo un tubo estructural cuadrado de 3/4" con un espesor de 1.5

mm, y placas de sujeción de 1/8”. Además, se incluyen refuerzos del mismo material en las esquinas principales, que están expuestas a cargas y contribuyen a la estabilidad del sistema estructural. También se utilizan ángulos de 1 1/8” con perforaciones para fijar las bases de las chumaceras y los motores. Sobre este chasis se instala una estructura de aluminio con perfiles cuadrados, que facilita el anclaje y la sujeción mediante acoples en L (3). La estructura se divide en tres módulos, permitiendo la incorporación de componentes electrónicos.

4.2.1.2. Paneles

Sobre el chasis y estructura se colocan las diferentes planchas de acero galvanizado, las cuales tienen la finalidad de ser la carcasa y protección del dispositivo. En la **Fig. 4.9** se aprecia el ensamble, seguido de una vista en explosión de los elementos en la **Fig. 4.10**

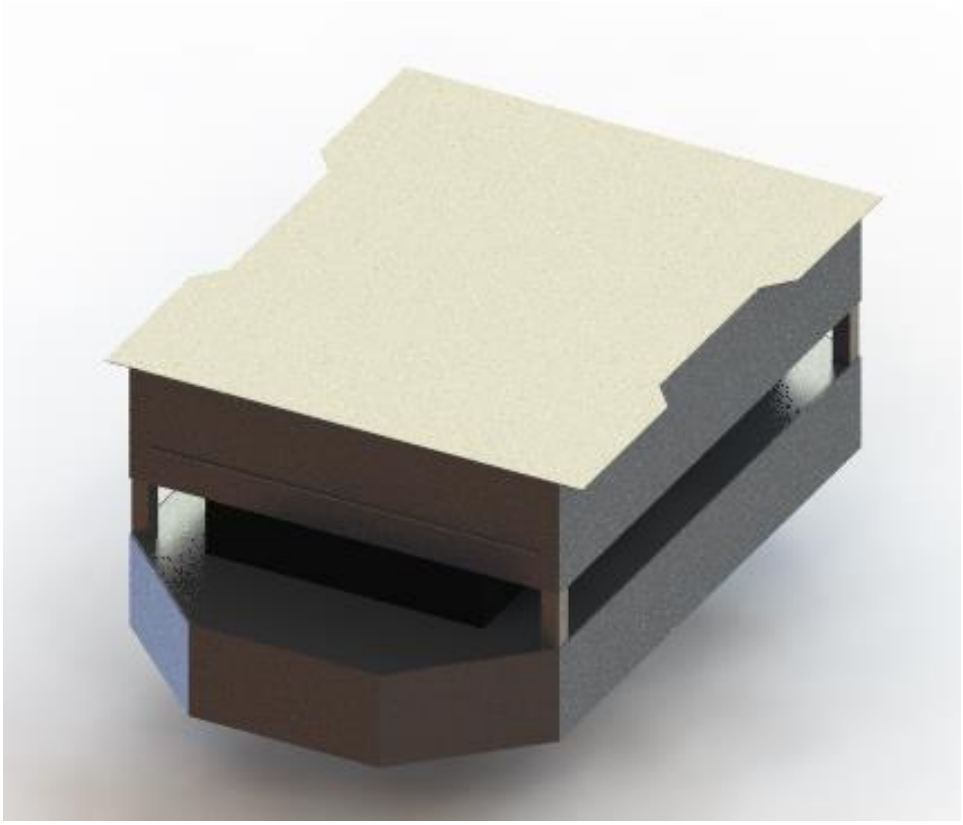

Fig. 4.9. Ensamble de paneles sobre la estructura.

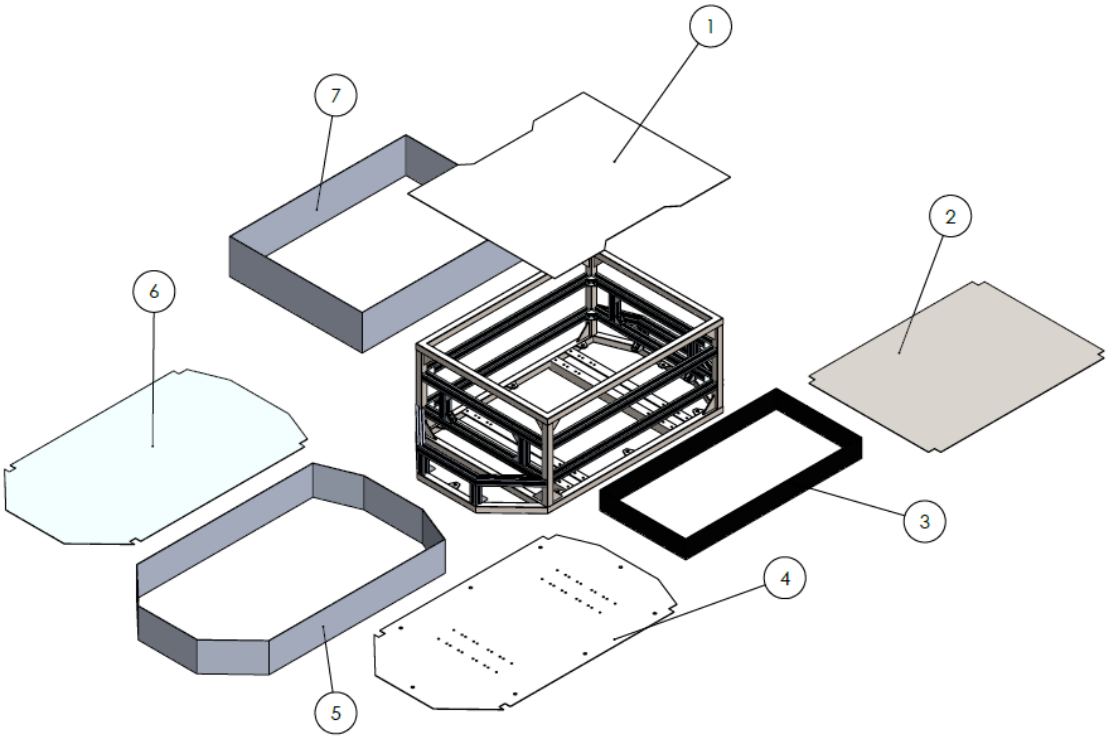

Fig. 4.10. Detalle de la disposición de los diferentes paneles.

Tabla 7: Descripción de los paneles a emplearse en el dispositivo.

N.° de elemento	Descripción	Cantidad
1	Base de carga	1
2	Base 1	1
3	Carcasa 1	1
4	Base de Motores	1
5	Carcaza 2	1
6	Base 2	1
7	Carcaza 3	1

La **Tabla 7** detalla los diferentes elementos a colocarse sobre la estructura y chasis del modelo, se tiene diferentes bases, donde la base de carga (1) y base de motores (4) sirven de soporte principal para los componentes mecánicos, de tal manera que permiten colocar elementos de peso considerable sobre ellos; sobre el resto de bases se colocan los componentes electrónicos.

4.2.1.3. Elementos mecánicos

Con base en la selección de motores se tiene una disposición y serie de elementos a emplearse para el movimiento del robot. En la **Fig. 4.11** se aprecia el arreglo de los elementos dentro de la base de los motores. Dentro de la **Fig. 4.12** se visualiza cada componente.

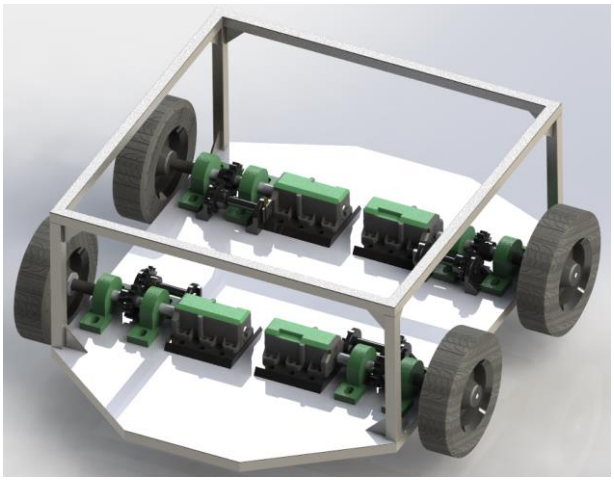

Fig. 4.11. Ensamble de componentes mecánicos.

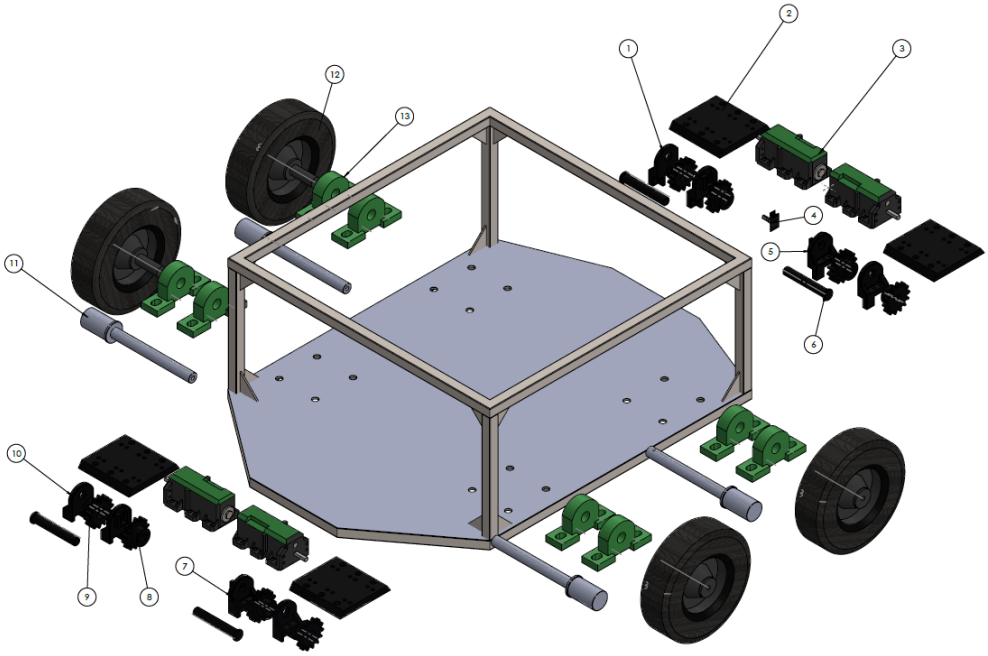

Fig. 4.12. Detalle de la disposición de los distintos elementos.

Tabla 8: Descripción de los elementos a emplearse en la mecánica.

N.° de elemento	Descripción	Cantidad
1	Soporte de eje izquierdo 1	2
2	Soporte plástico de motor	4
3	Motor	4
4	Encoder	4
5	Soporte de eje derecho 2	2
6	Eje secundario	4
7	Soporte de eje izquierdo 2	2
8	Engranaje conducido	4
9	Engranaje conductor	4
10	Soporte de eje derecho 1	2
11	Eje de transmisión	4
12	Rueda	4
13	Chumacera	8

En la **Tabla 8**, se presentan los elementos seleccionados para asegurar la movilidad y estabilidad del robot. La configuración incluye motores (3) acoplados a las ruedas mediante un eje de transmisión (11), estabilizado por dos chumaceras (13) que permiten absorber cargas laterales, evitando así la deflexión o "fleje" del eje bajo carga.

Adicionalmente, se incorpora un sistema de medición mediante un encoder rotativo para monitorear la velocidad de rotación de las ruedas. Este encoder se conecta a un eje secundario (6), al cual se transmite el movimiento del eje principal mediante un sistema de engranajes (8) (9). Dicho sistema consta de un engranaje conductor (9) y uno conducido (8), garantizando una transmisión sincronizada de las revoluciones del eje hacia el encoder.

4.2.2. Segunda alternativa de solución

4.2.2.1. Chasis y estructura

En esta versión, se realiza un cambio en la estructura para incrementar el espacio destinado a la colocación de elementos, se elimina un nivel, pero se gana mayor altura en los dos niveles restantes, logrando al mismo tiempo una reducción en la altura final. Los cambios generan un impacto significativo tanto en el peso como en la geometría del sistema.

Las configuraciones específicas del chasis y del acople de la estructura se ilustran en las **Fig. 4.13** y **Fig. 4.14**, la primera muestra el ensamble y la segunda detalles de la disposición de elementos. En la **Tabla 9**, se detalla cada elemento con su descripción y la cantidad.

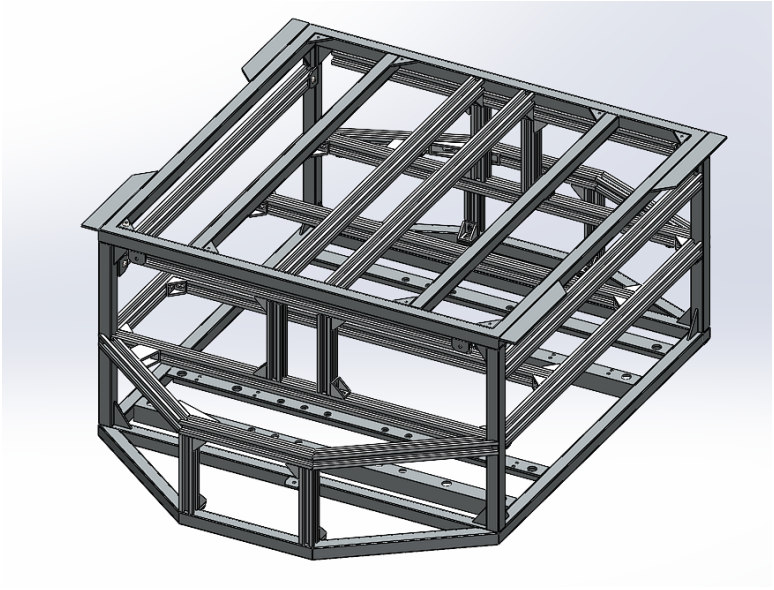

Fig. 4.13. Segundo Ensamble general del chasis y estructura.

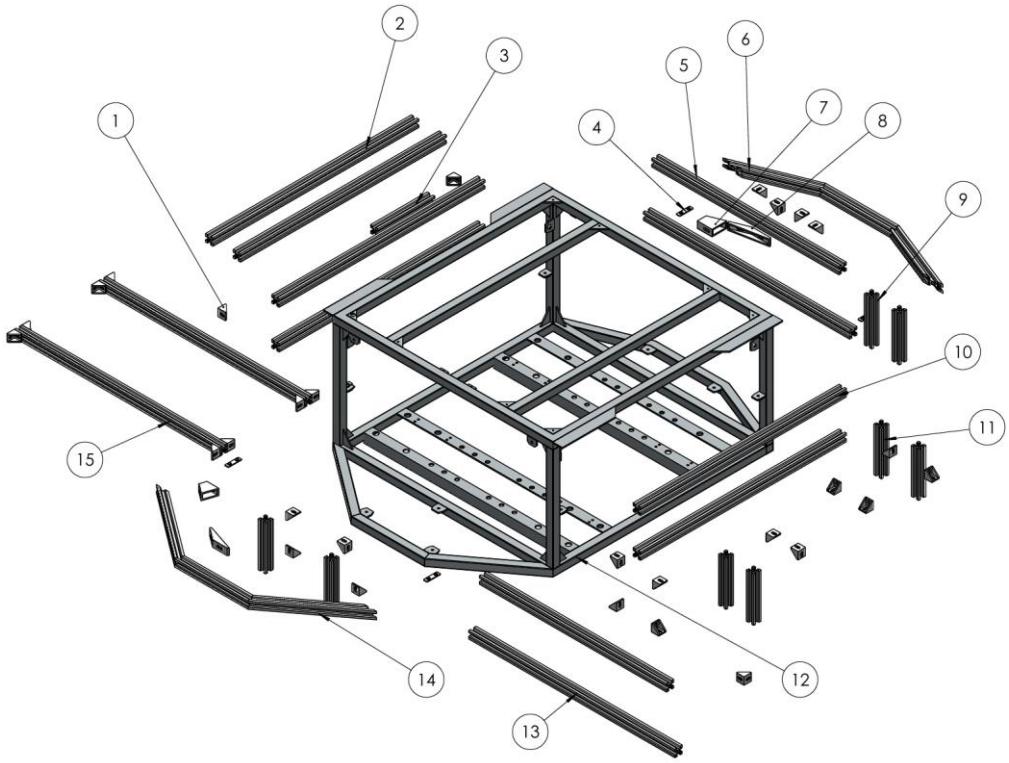

Fig. 4.14. Vista de detalle de la disposición de los elementos dentro del chasis.

Tabla 9: Descripción de componentes del ensamble, estructura y chasis.

N.° de elemento	Descripción	Cantidad
1	Acople en L	28
2	Perfil L 1	2
3	Perfil L 2	1
4	Acople Doble de Aluminio	4
5	Perfil L 3	2
6	Perfil Posterior	1
7	Acople de Aluminio 1	2
8	Acople de Aluminio 2	2
9	Perfil L 4	2
10	Perfil L 5	2
11	Perfil L 6	2
12	Chasis	1
13	Perfil L 7	2
14	Perfil Delantero	1
15	Perfil L 8	2

La solución propuesta se basa en un chasis fabricado con acero estructural negro. Este chasis está compuesto por diversos perfiles, incluyendo un tubo estructural cuadrado de 3/4" con un espesor de 1.5 mm, pequeñas placas de sujeción de 1/8” y ángulo de 1 1/8”, con respecto al primer modelo, posee nuevas dimensiones de altura y dos barras en la parte superior para soportar mayor carga. Para garantizar la resistencia estructural, se incorporan refuerzos del mismo material en las esquinas principales, las cuales están expuestas a las mayores cargas.

La estructura, por su parte, está fabricada en aluminio, lo que no solo reduce el peso total, sino que también mejora la manipulación y el ensamblaje de los elementos internos. Al reducir un nivel en la estructura, se logran espacios más eficientes, lo que facilita tanto la manufactura como la instalación y organización de los componentes mecánicos y electrónicos en el interior.

4.2.2.2. Paneles

Sobre el chasis y estructura se colocan los diferentes paneles de acero galvanizado, paneles de acrílico, además de tomas de aire realizadas en impresión 3D. En la **Fig. 4.15** se aprecia el ensamble, mientras que la **Fig. 4.16** posee la disposición de los diferentes elementos del ensamblaje.

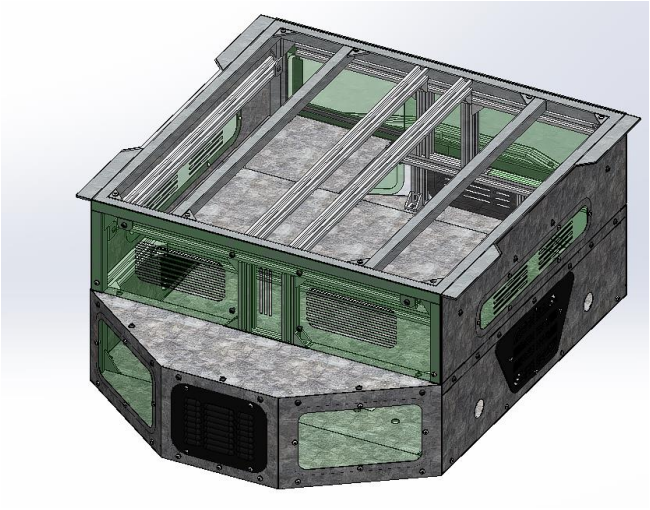

Fig. 4.15. Disposición de los paneles sobre la estructura.

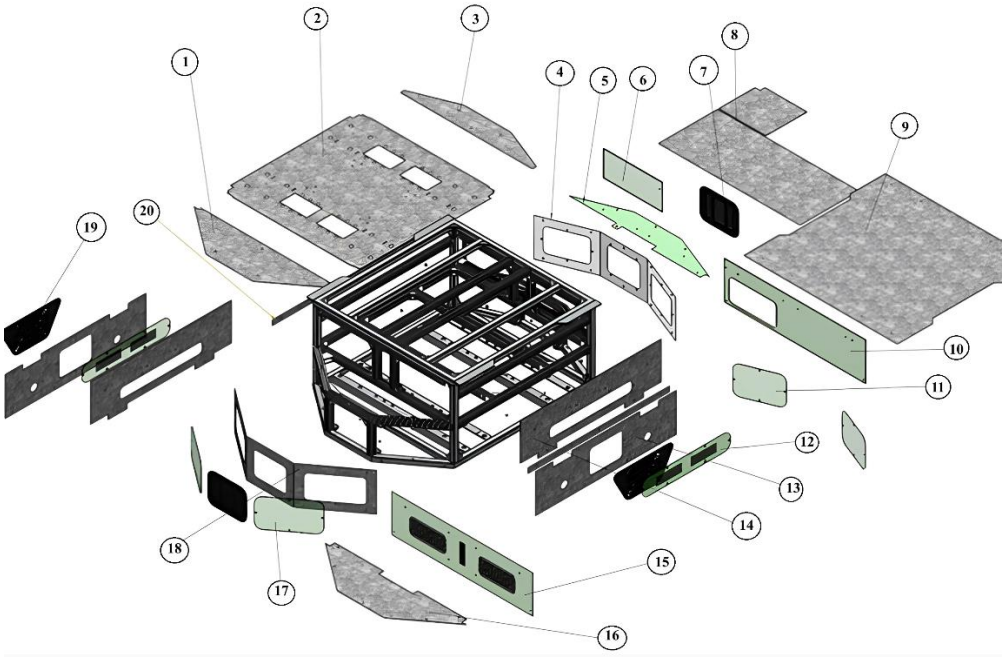

Fig. 4.16. Vista explosionada de los diferentes paneles del ensamble.

Tabla 10: Descripción de los diferentes paneles a emplearse en el modelo 2.

N.° de elemento	Descripción	Cantidad
1	Panel base 1	1
2	Panel base 2	1
3	Panel base 3	1
4	Chapa posterior	1
5	Panel acrílico 1	1
6	Panel acrílico 2	1
7	Respiradero	2
8	Panel medio 1	1
9	Panel superior	1
10	Panel acrílico 3	1
11	Panel acrílico 4	2
12	Panel acrílico 5	2
13	Panel lateral 1	2
14	Panel lateral 2	2
15	Panel acrílico 6	1
16	Panel medio 2	1
17	Panel acrílico 7	2
18	Chapa delantera	1
19	Respiradero lateral	2
20	Tira de sujeción	2

El diseño del dispositivo incluye varios paneles con funciones determinadas **Tabla 10**. Los paneles (1), (2) y (3) de acero galvanizado constituyen la base principal para la instalación de la mayoría de los componentes mecánicos. En el centro se encuentra la base (8) de acero, diseñada específicamente para albergar los elementos electrónicos de manera segura. El panel (9), siendo el más grande, está destinado a soportar la carga que transportará el robot. Por otro lado, los paneles laterales, fabricados en, acero galvanizado, acrílico y mediante impresión 3D, están distribuidos estratégicamente a lo largo del robot y cuentan con sistemas de ventilación, cumpliendo la función de carcasa protectora y favoreciendo el flujo de aire.

4.2.2.3. Elementos mecánicos

El segundo modelo presenta la misma distribución de los motores, el cambio reflejado es en el tipo de encoder, lo cual lleva a un nuevo diseño de la mecánica para transmitir los datos. En la **Fig. 4.17** se aprecia el arreglo de los elementos dentro del chasis, la **Fig. 4.18** detalla una vista en explosión de los diferentes componentes.

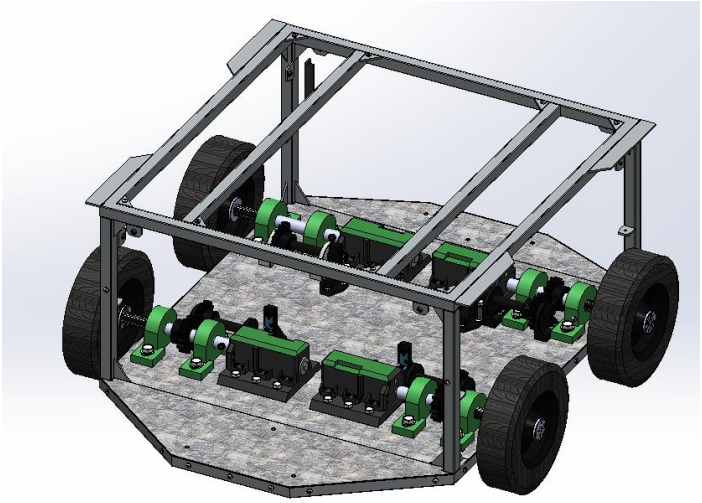

Fig. 4.17. Configuración elementos mecánicos modelo 2.

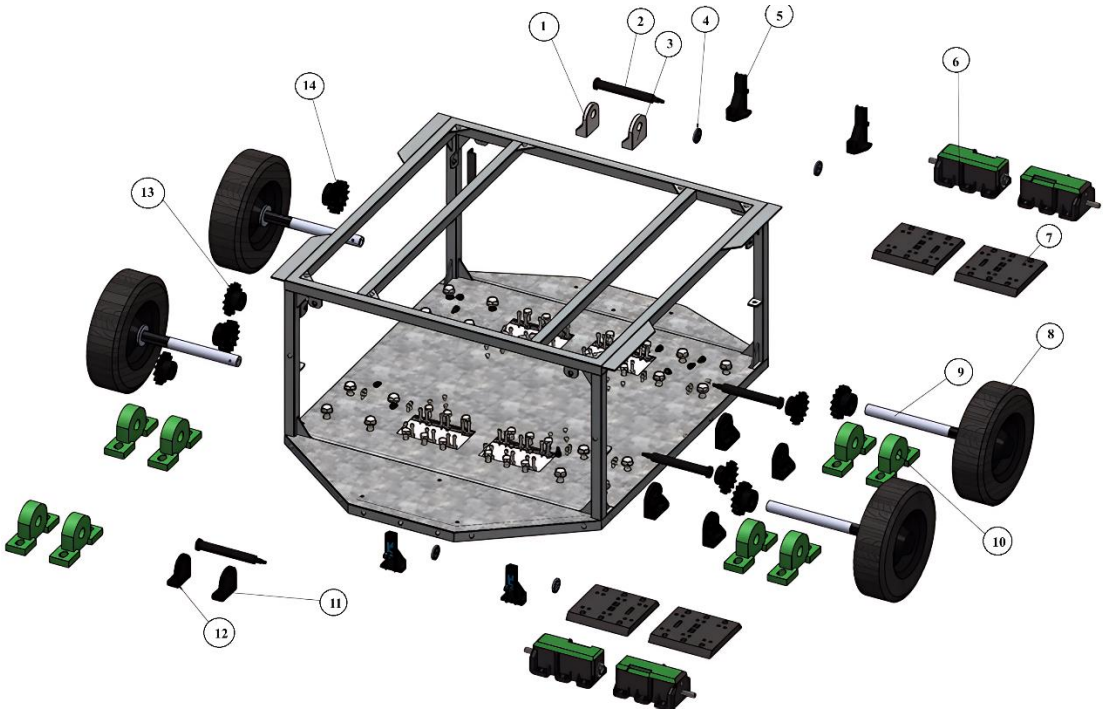

Fig. 4.18. Detalle de los componentes en el ensamble del modelo 2.

Tabla 11: Lista de elementos en el ensamble de componentes mecánicos.

N.° de elemento	Descripción	Cantidad
1	Soporte izquierdo 1	2
2	Eje encoder	4
3	Soporte izquierdo 2	2
4	Rueda encoder	4
5	Soporte encoder principal	4
6	Motor	4
7	Base Motor	4
8	Llanta	4
9	Eje de llanta	4
10	Chumacera	8
11	Soporte derecho 1	2
12	Soporte derecho 2	2
13	Engranaje conducido	4
14	Engranaje conductor	4

La **Tabla 11** presenta un listado detallado de los componentes a emplearse en la sección mecánica del robot, destacando una mejora significativa: la incorporación de un encoder óptico rotativo, montado sobre la base (5). Este encoder recibe señales de una rueda (4), que es accionada mediante un tren de engranajes (13) y (14) conectados al eje principal (9). Este eje transmite la fuerza generada por los motores (6) y está soportado por chumaceras (10), las cuales garantizan el movimiento. Finalmente, el sistema está diseñado para operar con una configuración de cuatro ruedas (8), distribuidas para maximizar la estabilidad del robot.

4.2.3. Selección de la solución

Para establecer una solución adecuada en el diseño mecánico del robot móvil de alto torque, se extrae un análisis integral utilizando la Casa de la Calidad como herramienta. Este sistema vincula de manera viable los requerimientos técnicos con las necesidades del proyecto. Del estudio se obtienen los parámetros más críticos, tales como rigidez estructural, capacidad de carga, costo, facilidad de ensamblaje y modularidad.

Para la evaluación se emplea una escala, donde se asigna el valor de 1 si el criterio de la columna es más importante que el de la fila, 0.5 para criterios de igual importancia y finalmente 0 si el criterio de la columna es de menor importancia que el de la fila. La **Tabla 12** muestra los resultados del análisis de ponderación de criterios.

Tabla 12: Ponderación de criterios.

Criterios	Material del chasis	Rigidez estructural	Costo de fabricación	Capacidad de carga estructural	Sumatoria	Ponderación (%)
Material del chasis	0.5	0.5	0	0	1.0	12.50
Rigidez estructural	0.5	0.5	0	0	1.0	12.50
Costo de fabricación	1	1	0.5	1	3.5	43.75
Capacidad de carga estructural	1	1	0	0.5	2.5	31.25
			Suma		8	100

De la **Tabla 12** se obtiene que el criterio con mayor ponderación es el costo de fabricación, seguido de la capacidad de carga estructural, y de menor relevancia el material del chasis a emplearse y la rigidez estructural. A partir de los datos, se evalúa cada criterio con las alternativas de solución planteadas, de tal manera se obtiene la mayor ponderación de las soluciones.

Se ejecuta una evaluación de las alternativas de solución de cada uno de los criterios. El primero se observa en la **Tabla 13** con el costo de fabricación y la alternativa dos con un mayor peso.

Tabla 13: Evaluación del criterio "Costo de fabricación".

Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Sumatoria	Ponderación (%)
Alternativa 1	0.5	0	1.5	37.50
Alternativa 2	1	0.5	2.5	62.50
		Suma	4	100
Alternativa 2 > Alternativa 1				

El siguiente criterio a evaluar es la capacidad de carga estructural, presentada en la **Tabla 14**, la alternativa dos obtiene mayor ponderación.

Tabla 14: Evaluación del criterio "Capacidad de carga estructural".

Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Sumatoria	Ponderación (%)
Alternativa 1	0	0	1	28.57
Alternativa 2	1	0.5	2.5	71.43
		Suma	3.5	100
Alternativa 2 > Alternativa 1				

Al considerar el criterio "Material del chasis" la alternativa 1, obtiene una mayor ponderación, como se observa en la **Tabla 15**.

Tabla 15: Evaluación del criterio "Material del chasis".

Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Sumatoria	Ponderación (%)
Alternativa 1	0.5	1	1.5	62.50
Alternativa 2	0	0.5	0,5	37.50
		Suma	2	100
Alternativa 1 > Alternativa 2				

Finalmente, la **Tabla 16** señala el último criterio a evaluarse, del cual se obtiene un valor con mayor peso en la alternativa de solución número dos.

Tabla 16: Evaluación del criterio “Rigidez estructural”.

Alternativas	Alternativa 1	Alternativa 2	Sumatoria	Ponderación (%)
Alternativa 1	0,5	0	0,5	37,50
Alternativa 2	1	0,5	2,5	62,50
		Suma	3	100
Alternativa 1 > Alternativa 2				

Se analizaron los diferentes parámetros con las alternativas de solución, de las cuales la alternativa de solución número dos es la más idónea, al cumplir con la mayoría de requisitos a emplearse en el diseño del robot móvil.

4.3. Especificaciones de la solución

Siguiendo el flujo del diagrama de bloques **Fig. 4.1**, con las especificaciones y alternativa de solución clara, se describe la relación de los sistemas principales: modelo del chasis, estructura, sistemas de transmisión, carcasa, entre varios más. Se abordan cada uno de los subsistemas con los requerimientos técnicos y su integración en la configuración general del robot móvil.

4.3.1. Modelo del chasis

Diseño constituido por diferentes perfiles de acero negro categoría SAE J 403 1008, los cuales son de fácil adquisición; a partir de la **Fig. 4.19** se distingue que el principal perfil empleado es el tubo cuadrado de 3/4" con espesor de 1,5 mm, el cual forma un cubo, en la parte superior se ubican dos perfiles destinados al soporte de carga y en la parte inferior una geometría con dos trapecios los cuales sirven de soporte para la estructura liviana a emplearse.

Además, la base del chasis posee cuatro barras las cuales pertenecen a un perfil de ángulo de 1 1/8” en su espesor, dichas barras están destinadas al soporte de la configuración

del sistema mecánico a emplearse. Adicionalmente, se tiene diferentes placas esparcidas a lo largo del modelo, con un espesor de 1/8”, las cuales están diseñadas para el soporte y ensamble de los diferentes componentes, como perfiles de estructura y planchas destinadas a la carcasa.

Todo el sistema está conectado mediante el método de soldadura por arco eléctrico, de tal manera que garantiza una integridad estructural y una adecuada resistencia mecánica, las cuales son necesarias para el soporte de carga de la plataforma.

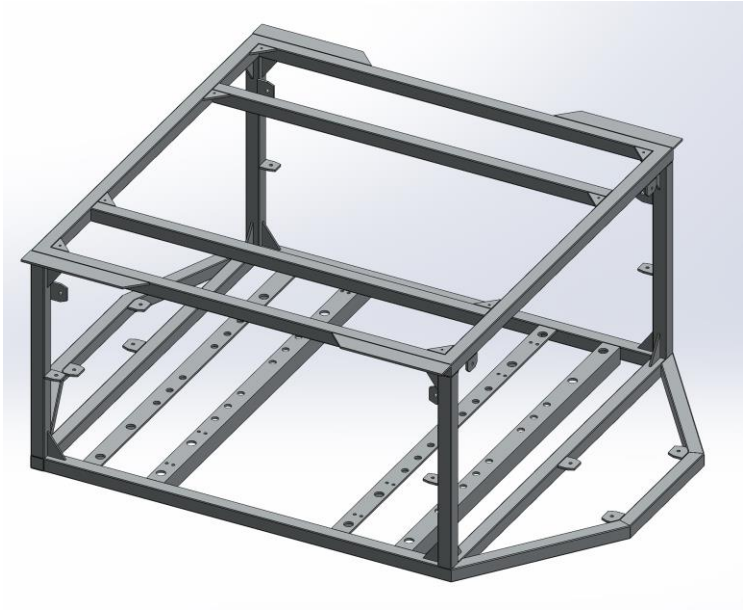

Fig. 4.19. Chasis.

4.3.2. Estructura

El sistema empleado para la estructura de soporte de los diferentes elementos electrónicos y carcazas, se basa en perfiles de aluminio 6063 T5 ranurado de dimensiones de 20 mm, los cuales son cuadrados. La **Fig. 4.20** revela la distribución de los perfiles en el chasis, unidos mediante acoples de aluminio denominados "Soporte de esquina" **Fig. 4.21** y juntas roscadas denominadas “Tuerca T simple” **Fig. 4.22** que ingresan en las ranuras y permiten la sujeción mediante pernos de cabeza hexagonal M5 a las placas previamente colocadas en el modelo del chasis. La configuración del aluminio permite tener tres niveles dentro del chasis, los cuales en el nivel inferior se distribuyen los componentes mecánicos, el segundo nivel los componentes electrónicos y el tercer nivel destinado a la zona de carga.

Por añadidura, el perfil ranurado permite la sujeción en sus cuatro lados, por ende, estos son el soporte para las distintas carcasas que cubren el dispositivo.

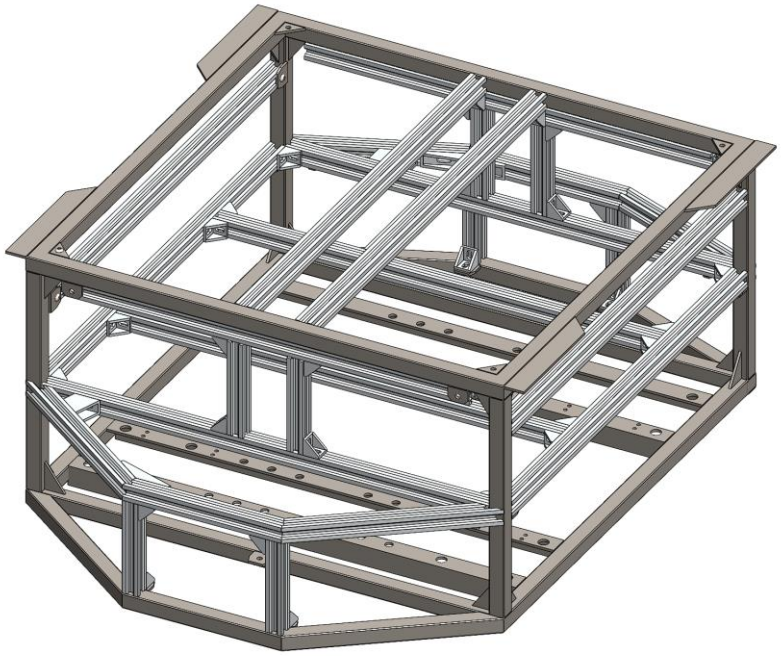

Fig. 4.20. Ensamble de la estructura.

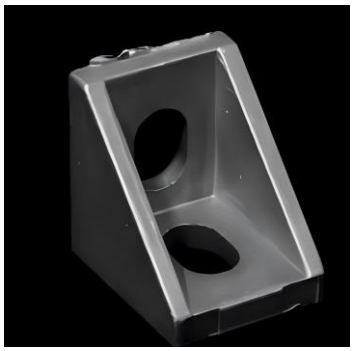

Fig. 4.21. Soporte de esquina.

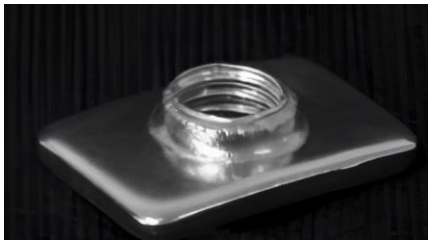

Fig. 4.22. Tuerca T simple.

4.3.3. Sistema de transmisión de potencia

El sistema de transmisión de potencia es el encargado de llevar el torque generado por los motores a las distintas ruedas de manera segura. La **Fig. 4.23** Permite visualizar la distribución de los distintos elementos integrantes del sistema de transmisión, donde los motores están montados en bases de ABS realizadas en impresión 3D, cada uno de los motores están acoplados a ejes de acero AISI 1045 de transmisión que permiten la entrega directa de la potencia, cada eje está soportado por dos chumaceras para eje de 3/4" colocadas de tal manera que permiten la estabilidad. Para finalizar la potencia llega a la rueda, la cual es neumática, con un diámetro de 8 5/8" con capacidad de carga de 130 Kg; su presión puede llegar a 50 PSI y adicional posee cuatro capas o lonas de protección.

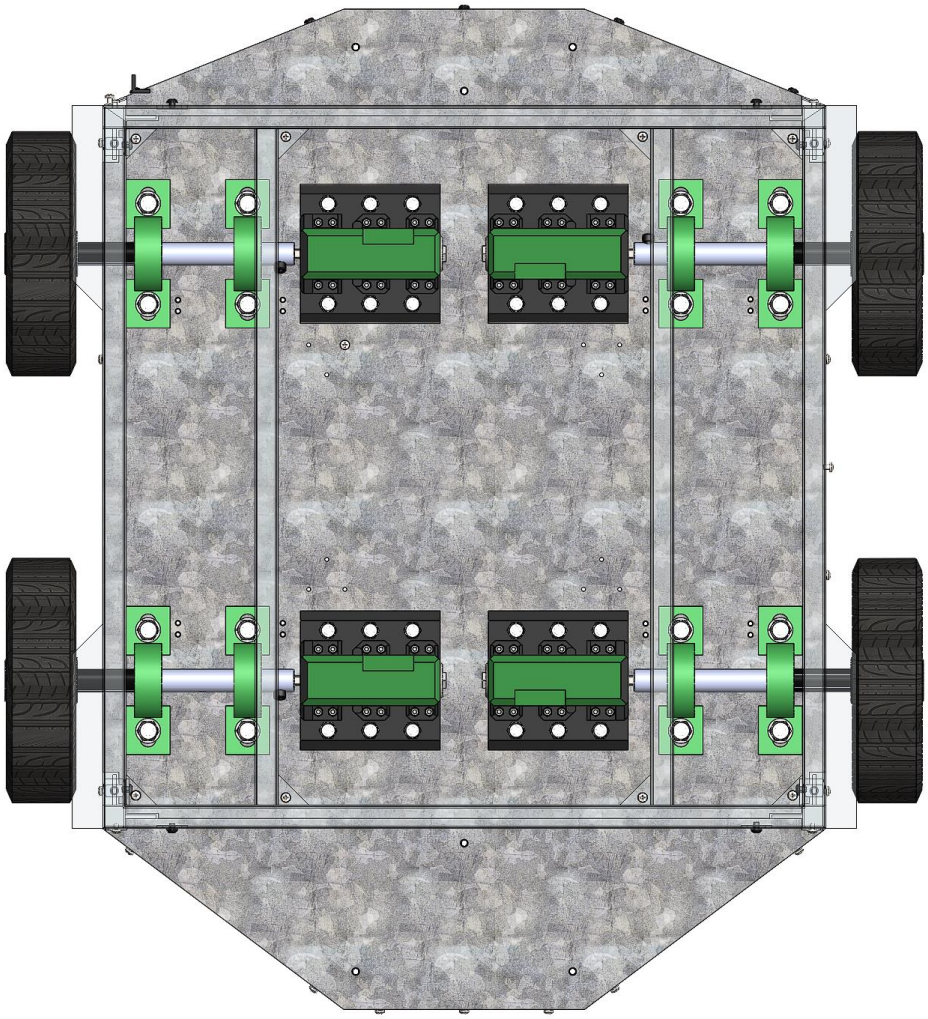

Fig. 4.23. Distribución de los componentes del sistema de transmisión de potencia.

4.3.4. Sistema de sincronización para encoder óptico rotativo

La **Fig. 4.24** muestra el diseño del sistema compuesto por un par de engranajes plásticos fabricados en PETG, los cuales aseguran una relación entre el eje principal y el disco codificador. Este conjunto permite transmitir el movimiento del eje a través de los engranajes hasta la ubicación del encoder, donde el encoder óptico rotativo genera las señales empleadas para la medición de posición o velocidad angular. El uso de PETG reduce el peso y minimiza el desgaste en aplicaciones las cuales en esta situación son de baja carga, por su parte, el soporte del encoder garantiza la correcta alineación y funcionamiento. Este diseño asegura una transmisión de movimiento adecuado, esencial para la obtención de datos del encoder óptico.

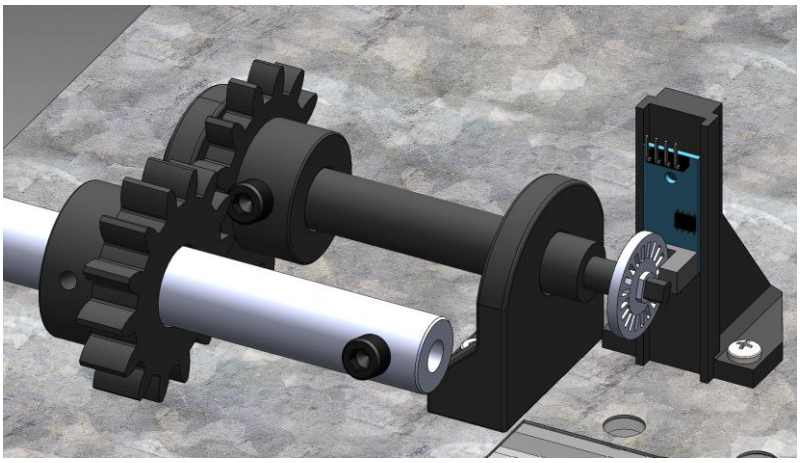

Fig. 4.24. Sincronización para el encoder rotativo óptico.

4.3.5. Carcasa

El diseño empleado en el sistema de carcasas se presenta en distintos materiales según su función. En la **Fig. 4.25**, se muestra todas las carcasas metálicas, el material empleado es plancha de acero galvanizado de 1/32”, el cual está destinado a brindar una estructura resistente a la mayoría de sus elementos y una plancha de 3/32 en la base superior, destinada a soportar alta carga. Por su parte, en la **Fig. 4.26**, se muestran los paneles de acrílico translúcido con un espesor de 2 mm, empleados para facilitar la visualización de los elementos dentro del dispositivo, realizados mediante maquinado CNC y resaltan el diseño estético del robot. Finalmente, las rejillas de ventilación, orientadas a la disipación del calor interno y fabricadas en PETG mediante impresión 3D, se ilustran en la **Fig. 4.27**.

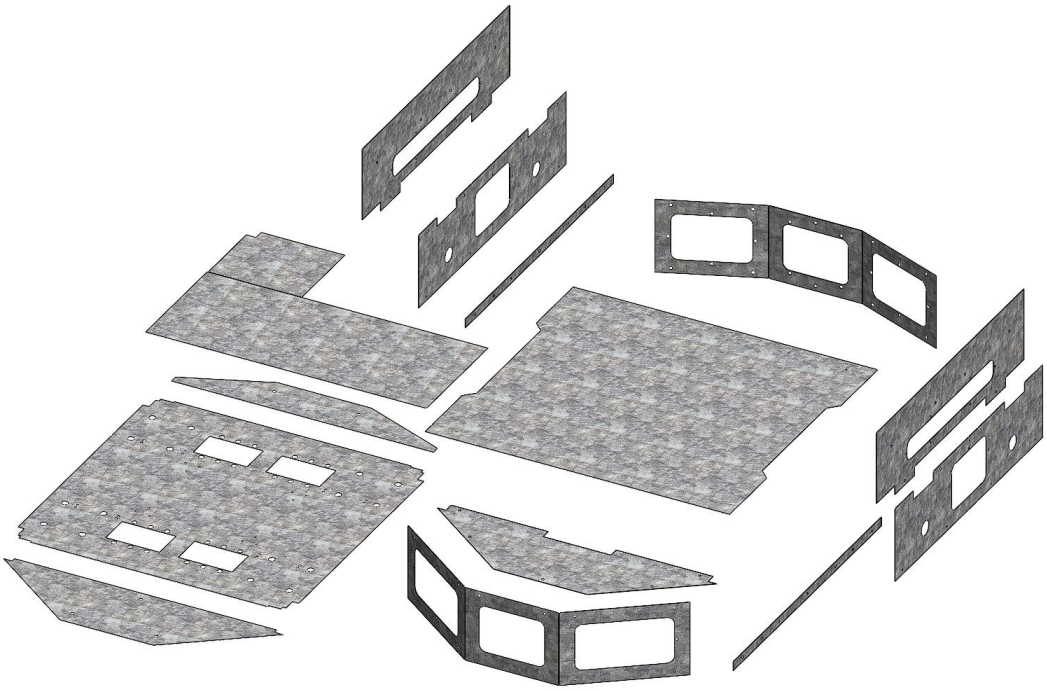

Fig. 4.25. Carcasas metálicas del robot.

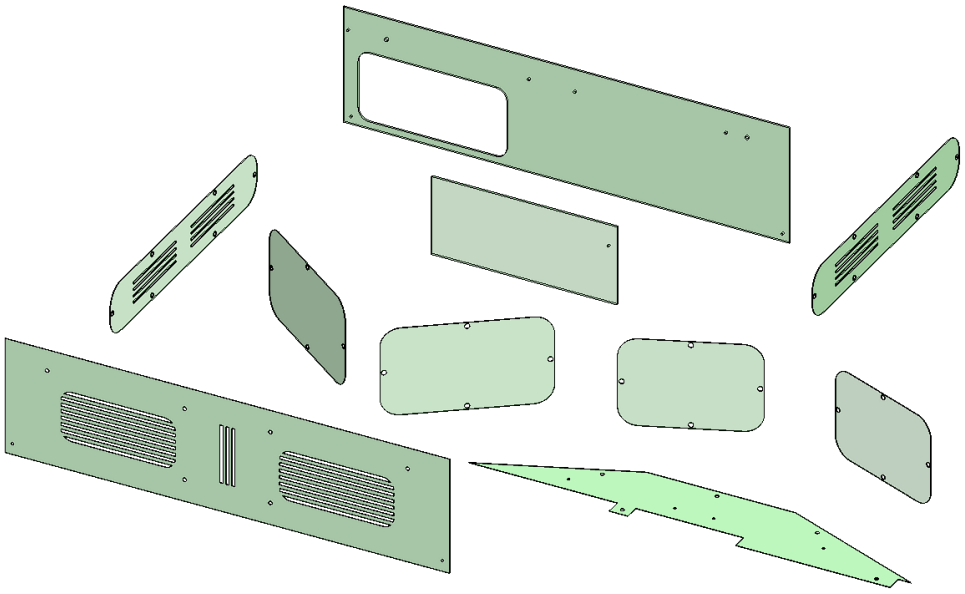

Fig. 4.26. Componentes de acrílico.

Fig. 4.27. Rejillas de ventilación impresas en 3D.

4.4. Análisis estructural

Para el análisis estructural del dispositivo, se emplea el software ANSYS, el cual es reconocido por su eficiencia en simulaciones de elementos finitos. El análisis permite evaluar el comportamiento mecánico de los distintos elementos principales del diseño, sometidos a condiciones de carga y esfuerzos. A cada componente se asigna el material adecuado según la función y características a las cuales trabaja, considerando sus propiedades. Este procedimiento garantiza la integridad estructural de la plataforma robótica, la procedencia de los datos está disponible en MatWeb [43]. Los diferentes materiales empleados están resumidos en la **Tabla 17**.

Tabla 17: Materiales empleados para la simulación.

Material	Módulo de Young (GPa)	Densidad (g/cm^3)	Coeficiente de Poisson	Resistencia a la tracción (MPa)
Acero AISI 1045	200	7.87	0.290	565
Acero SAE J403 1008	190	7.87	0.290	440
ABS	2.1	1.04	0.394	41
PETG	2.1	1.27	0.380	50

4.4.1. Análisis del chasis

La evaluación estructural del chasis está orientada en evaluar la capacidad para soportar una carga de 100 kg, relacionado con el peso máximo que la plataforma móvil deberá trasladar durante su funcionamiento. El valor de peso se representa en una fuerza de 981 N; este valor será el empleado para utilizarlo en la zona superior del dispositivo con una carga puntual que representa el peor caso. Por otra parte, se aplica el valor de 367.875 N en cada uno de los soportes tipo ángulo, los cuales deben soportar no solo el peso a transportarse, también el mismo peso del robot, por ende, toda la plataforma base debe soportar 1471.5 N distribuidos en las cuatro ruedas. El análisis permitirá verificar la resistencia del chasis ante la fuerza aplicada, verificando que el diseño cumpla con las condiciones y requisitos estructurales.

El valor de factor de seguridad mínimo dentro del chasis es de 2.15 representados en la **Fig. 4.28**.

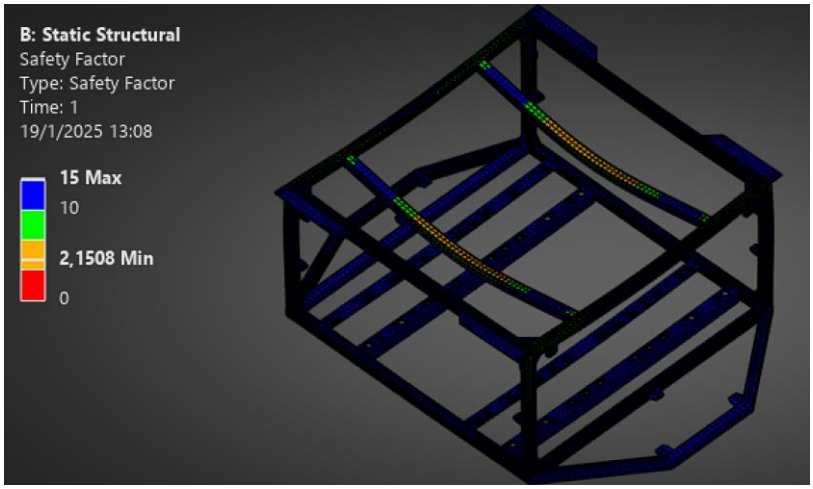

Fig. 4.28. Factor de seguridad del chasis.

El análisis en la **Fig. 4.29** muestra la tensión equivalente de Von-Mises con un valor máximo de 116.24 MPa, este dato se concentra en la parte superior marcada de rojo, muestra el área crítica en términos de esfuerzos, mientras que las zonas marcadas de azul tienen una deformación mínima. La estructura responde muy bien a las cargas aplicadas, la simulación ayuda a identificar áreas las cuales requieren mayor exigencia de trabajo, de tal manera se evalúa la seguridad de la plataforma.

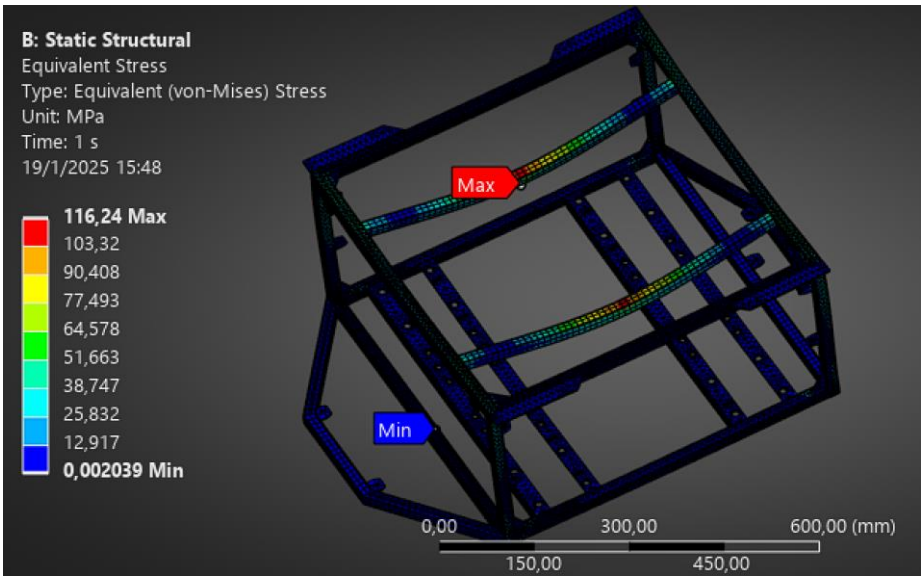

Fig. 4.29. Deformación máxima del chasis.

En la **Fig. 4.30** se presenta el mallado final aplicado al chasis. Se utiliza un método de refinamiento tipo *h*, en el cual se incrementa el número de elementos en áreas críticas, lugares en los cuales se concentran los esfuerzos y en superficies con curvaturas. El proceso adaptativo permite mejorar la exactitud de los resultados.

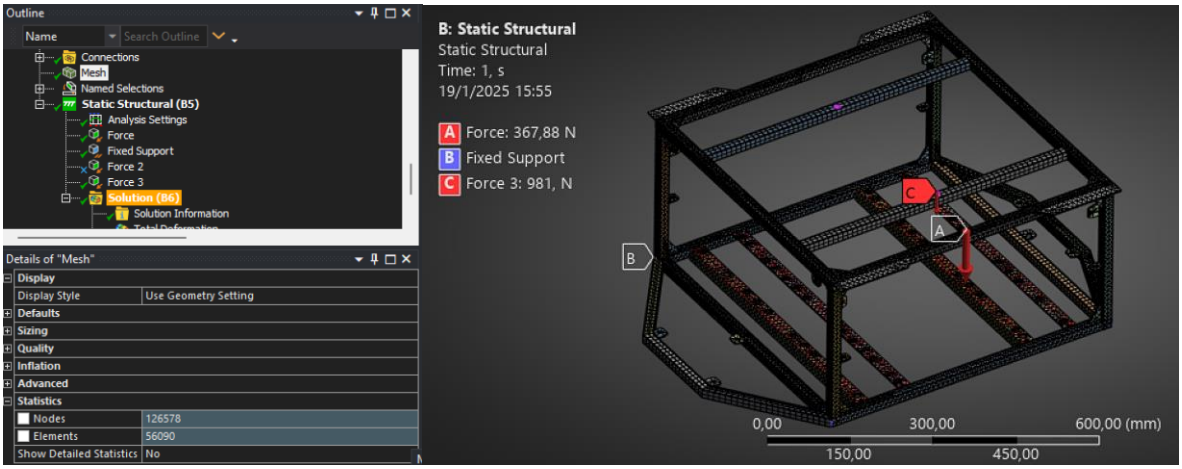

Fig. 4.30. Mallado en el chasis.

Para verificar la confiabilidad de los datos arrojados, se emplea un estudio de convergencia de mallado, lo cual se traduce a varias simulaciones sucesivas variando los niveles de refinamiento en el mallado. La convergencia permite llegar a resultados óptimos para el refinamiento, sin la necesidad de gastar recursos computacionales.

El procedimiento parte de un mallado grueso con alrededor de 2 000 elementos, hasta llegar a los 100 000 elementos aproximadamente, además de obtener la tensión máxima de Von-Mises para cada mallado. La **Fig. 4.31** muestra la tensión de manera estabilizada en el valor de 116.24 MPa (línea roja discontinua) cuando supera los 56 000 elementos con ligeras variaciones; además, el eje horizontal, muestra el incremento no lineal de los elementos. A partir de estos valores se observa la convergencia de la malla estabilizada en 56 090 elementos, valor detallado en la **Fig. 4.30**. Para finalizar, se demuestra que el mallado es adecuado, no se necesita mayor refinamiento para obtener los mismos resultados de tensión.

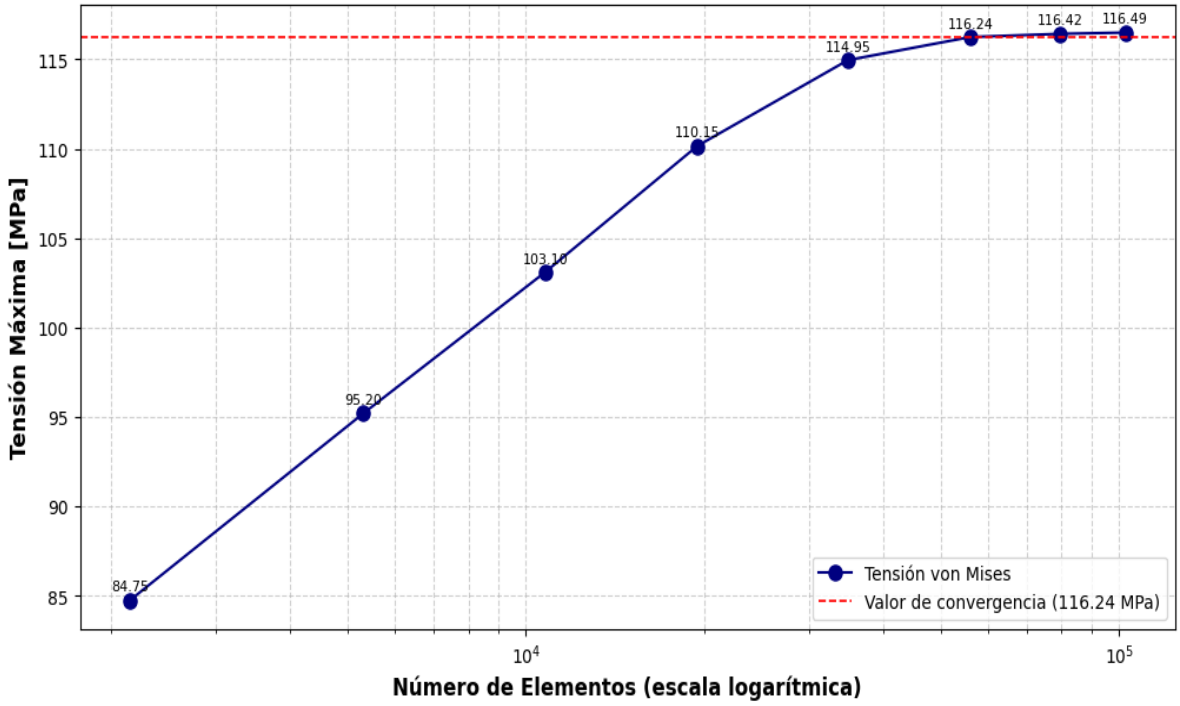

Fig. 4.31. Análisis de convergencia en el chasis.

4.4.2. Análisis de la base del motor

En un caso crítico las cuatro bases del motor deben soportar una masa equivalente a 150 kg**,** lo cual se traduce a 1 471.5 N. La carga se distribuye en cuatro locaciones de anclaje, de modo que cada punto recibe una carga de aproximadamente 367.875 N. En el diseño, se aplica estos valores de cargas puntuales para analizar la resistencia de la placa de plástico ABS, de tal manera se asegura que los valores de tensión y deformación cumplan con los requisitos.

La evaluación final de la base del motor alcanza un factor de seguridad mínimo de 4.0029; este valor demuestra que el elemento supera los requisitos de carga previstos, puede ser evidenciado en la **Fig. 4.32.**

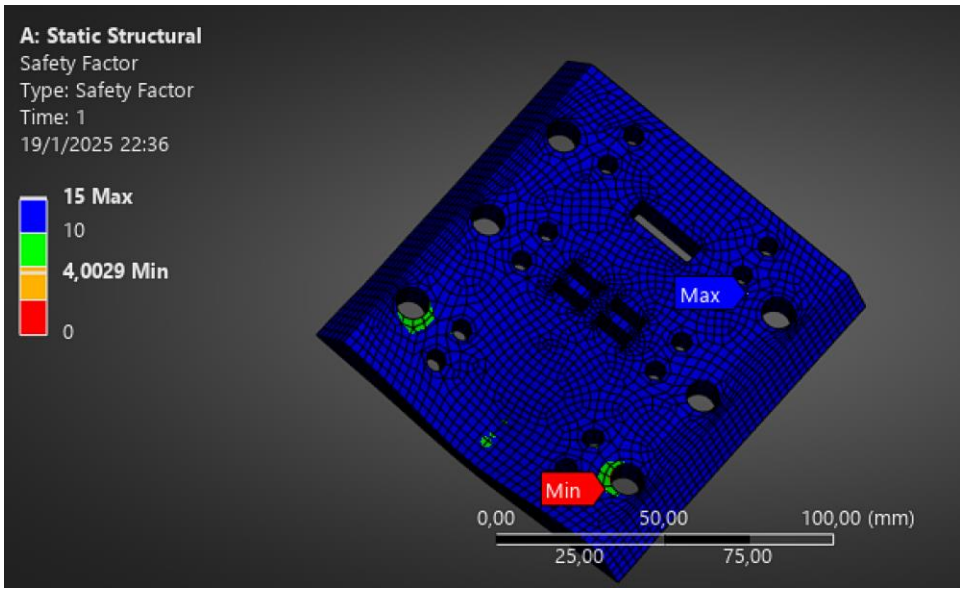

Fig. 4.32. Factor de seguridad en las bases del motor.

En la **Fig. 4.33** se muestra que la tensión máxima alcanzada es de 9.99 MPa, localizada en la zona superior cercana a los orificios de anclaje, mientras que la tensión mínima de 7.05×10^{-5} MPa aparece en áreas menos exigidas mecánicamente. El comportamiento indica que las concentraciones de esfuerzo se presentan en los puntos de fijación de la pieza.

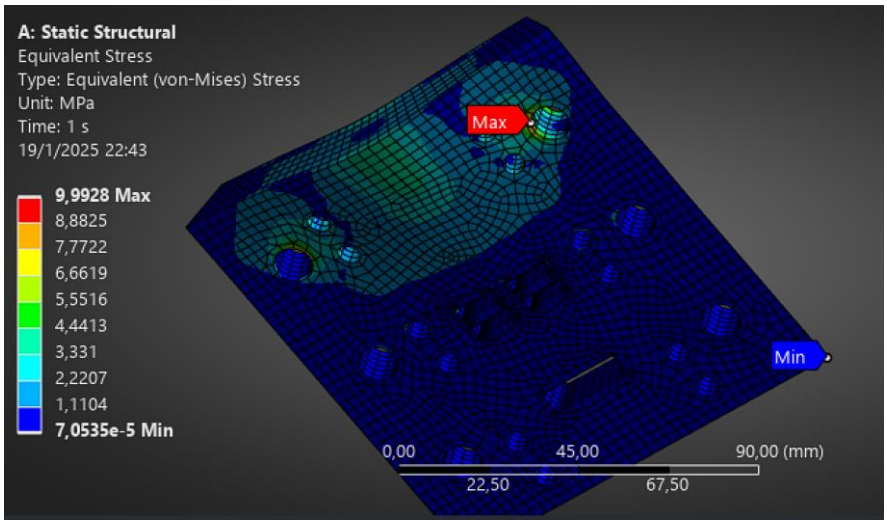

Fig. 4.33. Tensiones de la base del motor.

En la **Fig. 4.34** se indica el mallado final empleado en la base del motor, ejecutado mediante el método de refinamiento tipo h. En este, se incrementa la densidad de elementos en las zonas u áreas que contienen mayor concentración de esfuerzos y en áreas de gran curvatura, con el fin de capturar con precisión los gradientes de tensión. El modelo resultante incluye 55 464 nodos y 11 460 elementos, lo que involucra un nivel de detalle correcto en la simulación sin sobrecargos. El proceso mejora la exactitud de los resultados, asegura que las regiones críticas sean analizadas de forma confiable.

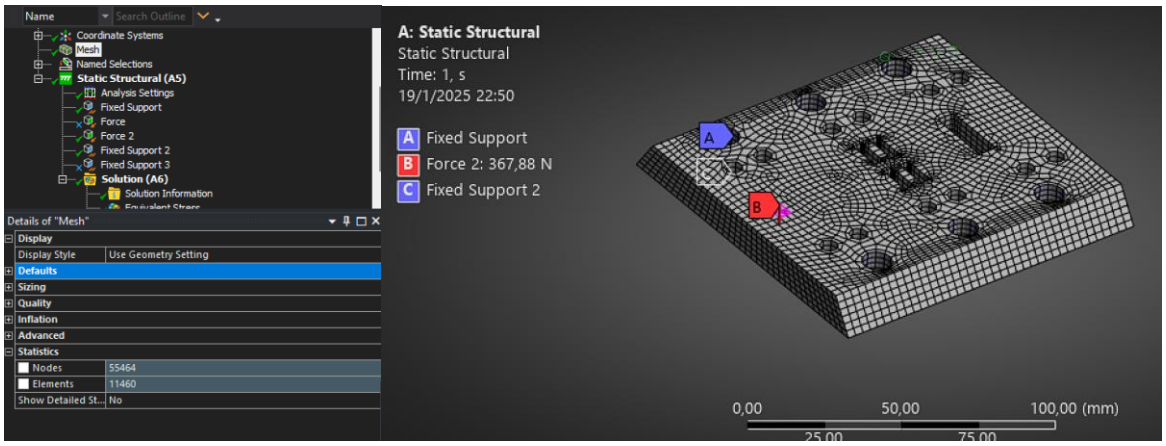

Fig. 4.34. Mallado base del motor.

Empleando el modelo de estudio de convergencia, se parte desde un mallado de 1 850 elementos a 25 000 elementos, obteniendo un valor máximo de Von-Mises cercano a los 9.99 MPa (línea discontinua roja) cuando supera los 11 460 elementos, existen pequeñas variaciones típicas en este tipo de estudio. El eje horizontal revela el incremento de elementos en cada mallado, la **Fig. 4.35** evidencia la convergencia que se desarrolla desde los 10 000 elementos, esto refleja que los datos obtenidos en la **Fig. 4.34** son los adecuados para obtener los valores de tensión y factor de seguridad del componente.

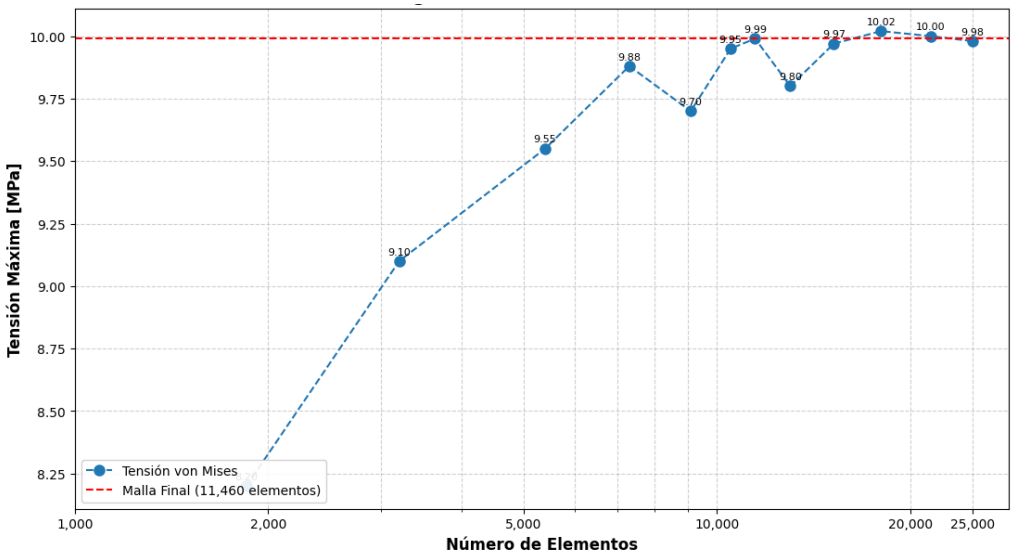

Fig. 4.35. Análisis de convergencia en la base del motor.

4.4.3. Análisis del eje

En la **Fig. 4.36** se observa que el factor de seguridad mínimo tiene un valor de 2.70; mientras que en otras zonas de menor esfuerzo del eje se eleva hasta un valor de 15. Esto indica que la región más crítica conserva todavía un margen de seguridad satisfactorio frente a las cargas a emplearse. Las áreas en azul presentan tensiones muy bajas, lo que explica el factor de seguridad dado en esas áreas.

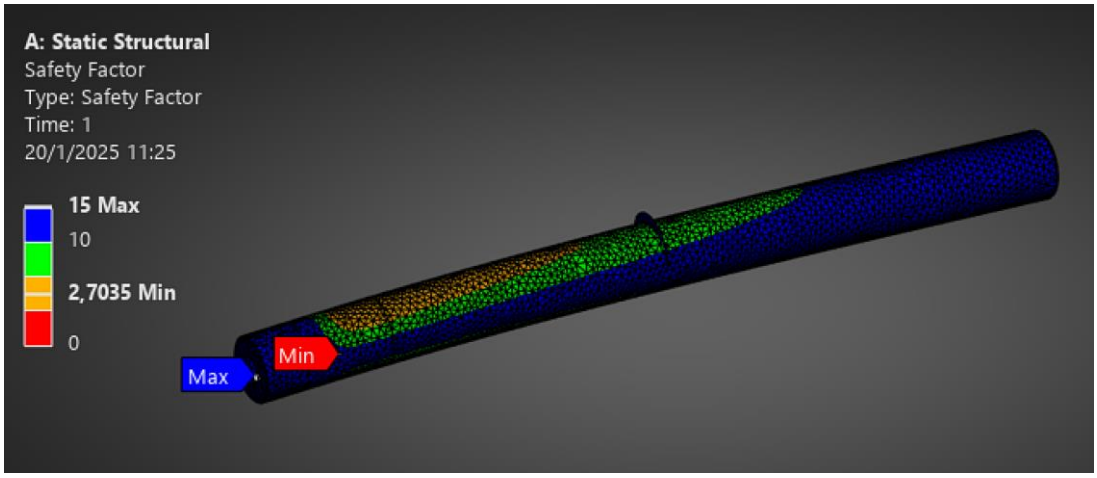

Fig. 4.36. Factor de seguridad del eje principal.

Se aprecia en la **Fig. 4.37**, que la tensión posee un valor máximo de 136.86 MPa, puede visualizarse en la zona roja, en uno de los extremos del eje, mientras que en el resto de la superficie los valores se distribuyen desde 0 MPa, representadas en las áreas azules, hasta

llegar a unos 90–100 MPa, empleando tonos intermedios. Esta superficie de tensión suele localizarse cuando se produce el mayor momento flector, lo cual concuerda con la concentración de esfuerzos en la región. El valor máximo se mantiene dentro de un rango de seguridad fiable.

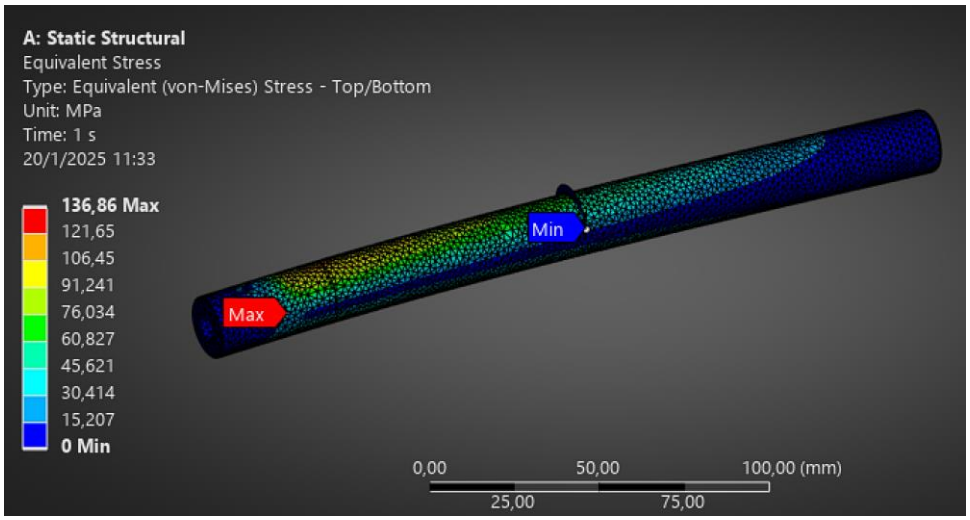

Fig. 4.37. Distribución de las tensiones en el eje de transmisión.

En la **Fig. 4.38** se aprecia el mallado final en el eje de transmisión, donde se observa un refinamiento tipo *h* en las áreas de mayor solicitación. El resultado es uniforme a lo largo de la pieza, con una mayor densidad de elementos en los extremos o puntos críticos, de tal manera se obtiene fiabilidad de los resultados dentro del análisis estructural.

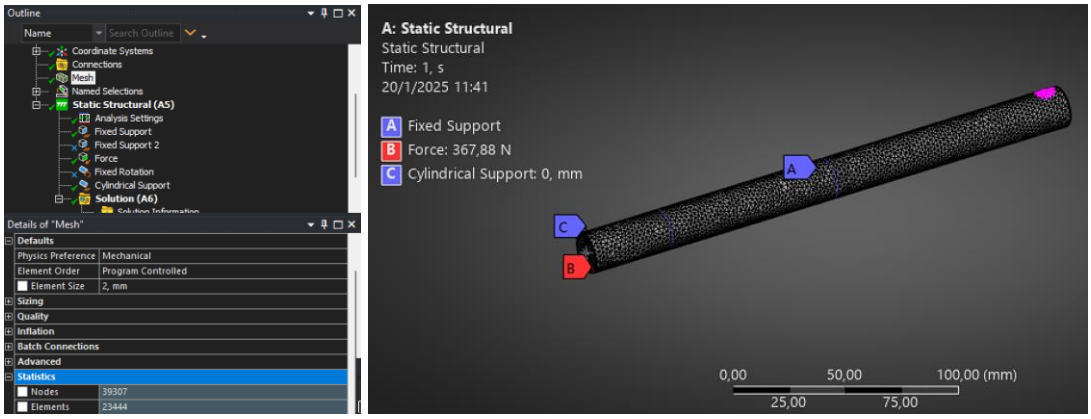

Fig. 4.38. Mallado del eje de transmisión.

Al realizar un análisis de convergencia para el eje con un número muy bajo de elementos se obtienen fluctuaciones muy disparejas, que van tomando un sentido correcto a partir de los 23 000 elementos, convergiendo con un valor máximo de tensión cercano a

136.86 MPa. Los datos son observables en la **Fig. 4.39**, corroborando un adecuado mallado para la simulación efectuada en la **Fig. 4.38** con un valor de 24 444 elementos de mallado.

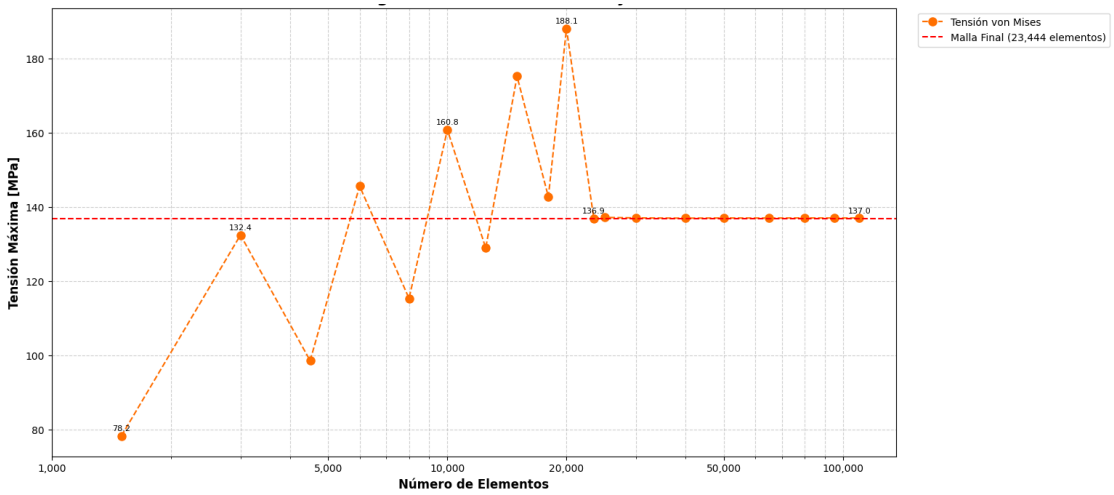

Fig. 4.39. Análisis de convergencia en el eje principal.

4.4.4. Análisis de los engranajes

Los engranajes empleados para la simulación son de plástico con la denominación PETG, material resistente, aunque no tiene la capacidad adecuada de transmisión de grandes esfuerzos. En este caso, el engranaje no trabaja para transmitir el torque nominal de los motores ni altos torques, forma parte de un arreglo de transmisión encargado de hacer girar un disco perteneciente al encoder óptico rotativo, en el cual la fuerza requerida para su movimiento es mínima, lo que indica una resistencia al movimiento despreciable. Por ende, a partir de varias simulaciones se obtiene un valor adecuado de fuerza máxima 100 N, permitiendo que el elemento trabaje de forma adecuada sin deformación. Cabe recalcar que el valor es demasiado grande para esta aplicación, pero el fin de esta simulación es obtener el factor de seguridad a máxima carga del elemento.

4.4.4.1. Análisis del engranaje conductor

El resultado de la simulación para factor de seguridad del engranaje es de 2.55, los cuales están representados en la **Fig. 4.40**.

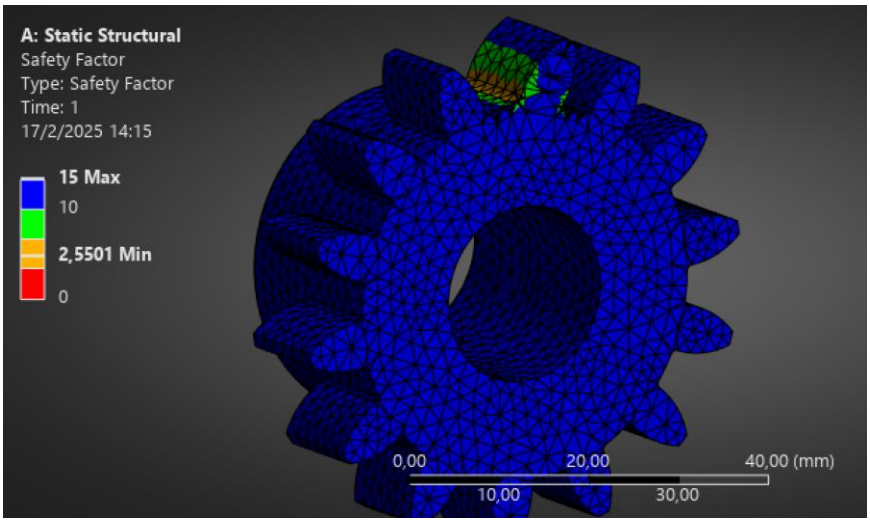

Fig. 4.40. Factor de seguridad del engranaje conductor.

De acuerdo con la **Fig. 4.41**, el valor máximo de tensión equivalente de Von-Mises es de 19.607 MPa, representada en la zona roja del elemento. La simulación permite observar los puntos de mayor demanda estructural, lo cual facilita la evaluación del elemento.

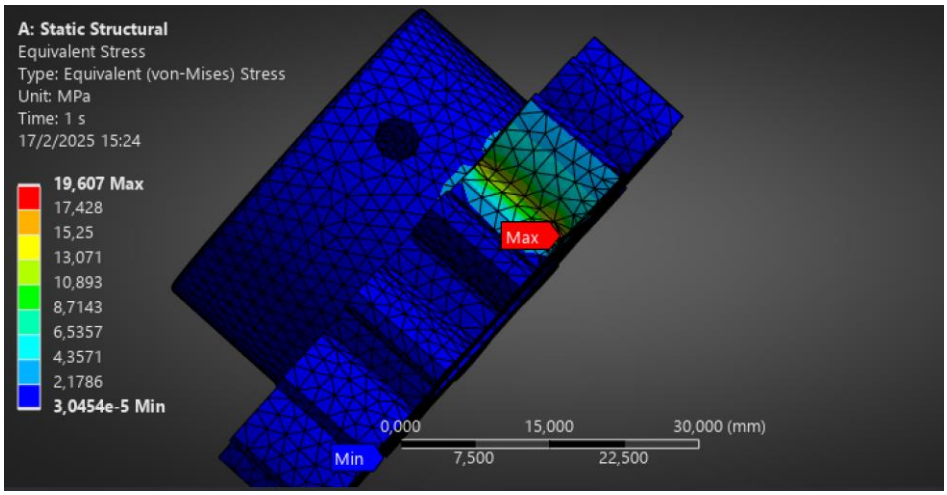

Fig. 4.41. Deformación máxima del engranaje conductor.

La **Fig. 4.42** muestra el mallado final aplicado al elemento. De igual forma se emplea un refinamiento para mejores resultados. Paso seguido, se utiliza el estudio de convergencia para mallado.

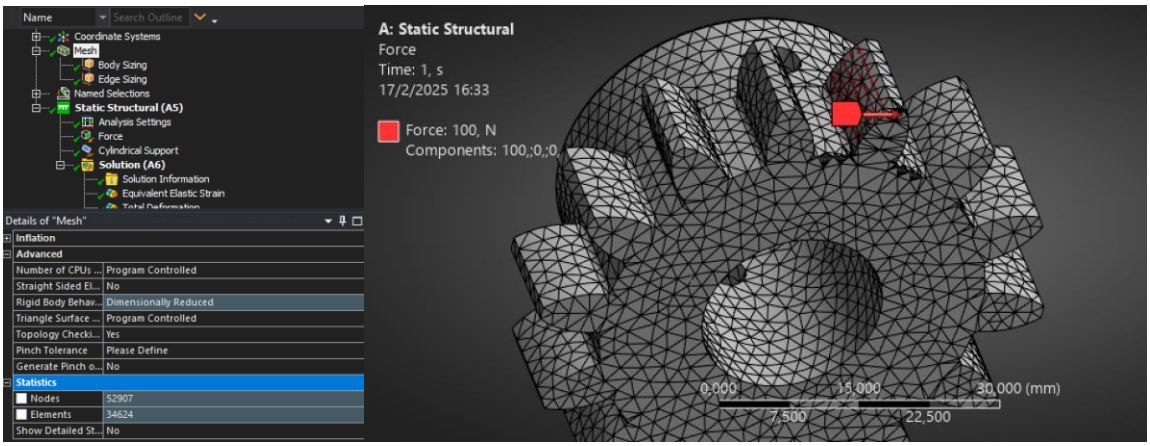

Fig. 4.42. Mallado del engranaje conductor.

La **Fig. 4.43**, empieza con un análisis de alrededor de 12 500 elementos, hasta llegar a un valor de convergencia de 34 624 elementos, los cuales se ven reflejados en la **Fig. 4.42**. Los resultados validan la robustez del mallado del modelo.

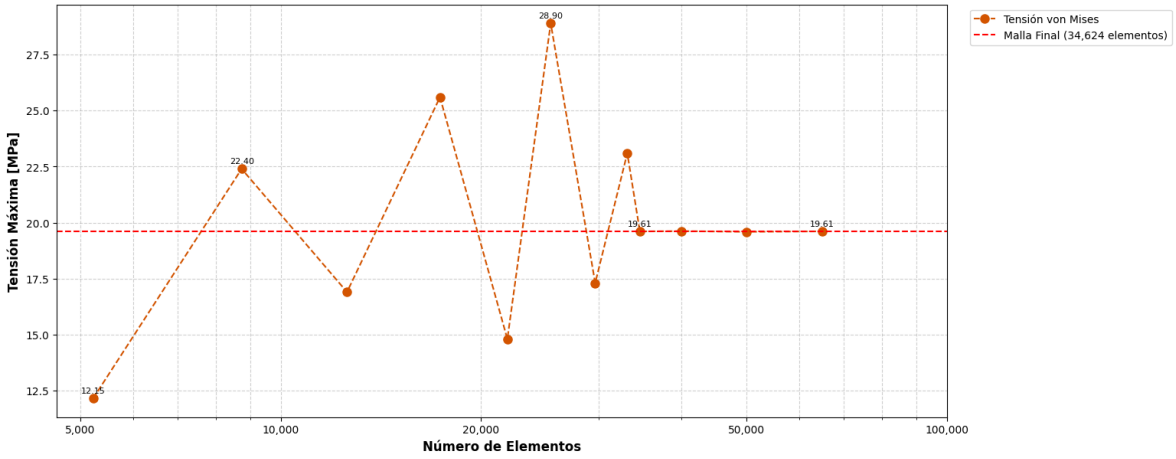

Fig. 4.43. Análisis de convergencia en el engranaje conductor.

4.4.4.2. Análisis del engranaje conducido

El resultado de la **Fig. 4.44**, es un factor de seguridad de 2.5578. Resultado fiable para un diseño estructurado dentro de los márgenes de seguridad.

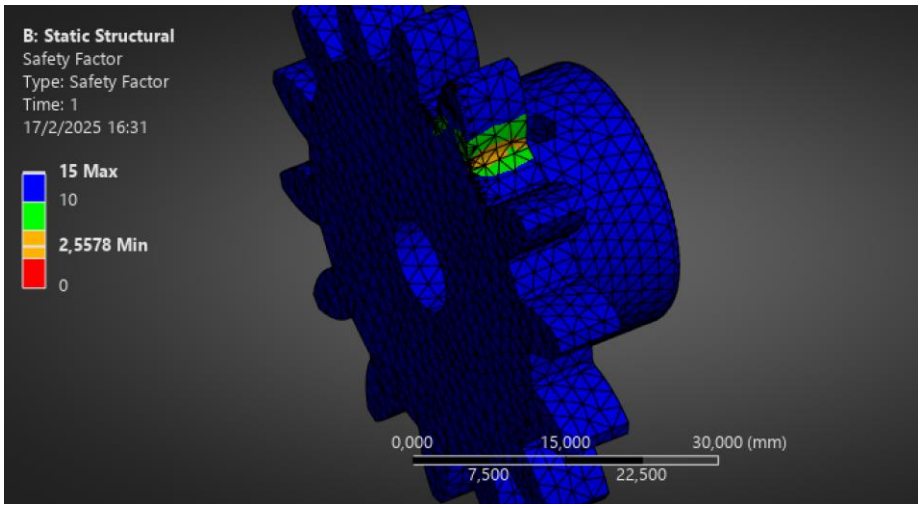

Fig. 4.44. Factor de seguridad en el engranaje conducido.

De acuerdo a la **Fig. 4.45**, la tensión equivalente máxima de Von-Mises se encuentra en el valor de 19.548 MPa, concentrándose en la zona roja de la pieza. Tener una correcta apreciación de las zonas con mayor esfuerzo permite un mejor diseño del elemento

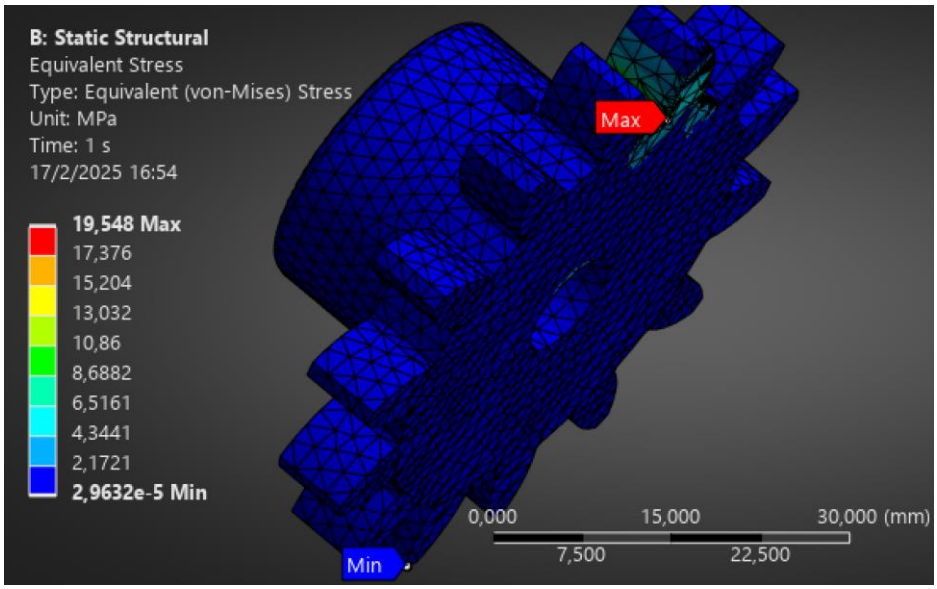

Fig. 4.45. Tensión máxima en el engranaje conducido.

Se observa en la **Fig. 4.46**, el mallado final realizado en el objeto, con la implementación de un refinamiento destinado a optimizar con precisión los resultados. Posteriormente, se genera un estudio de convergencia a partir de diferentes mallados.

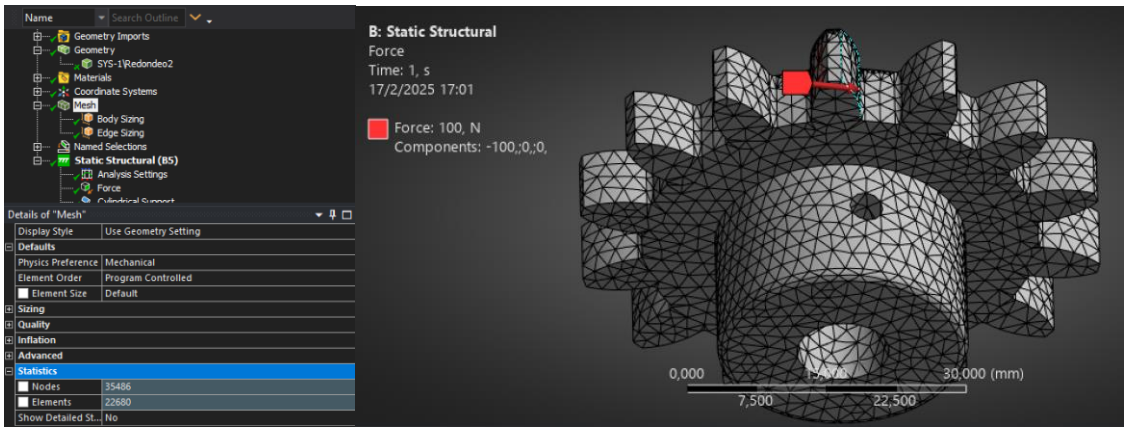

Fig. 4.46. Mallado del engranaje conducido.

El proceso representado en la **Fig. 4.47**, parte de un análisis de 4 500 elementos en adelante, los valores iniciales de tensión son variados, al no tener suficientes elementos, pero comienza a estabilizarse con valores cercanos a los 22 680 elementos de malla. La convergencia de los valores es un indicativo de fiabilidad y consistencia de la simulación.

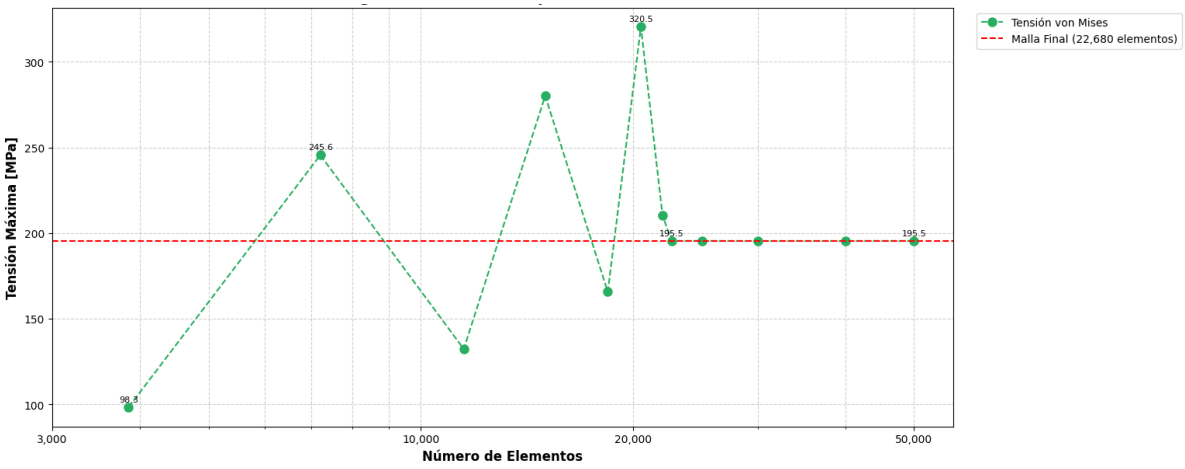

Fig. 4.47. Análisis de convergencia para el engranaje conducido.

4.4.5. Eje plástico del encoder

Para la simulación se aplican 100 N de fuerza, en la zona de acoplamiento del engranaje conducido, esta fuerza es tangencial, simulando la carga de torque generada por la transmisión del engranaje. Además, en la zona de chumaceras se fijan y restringen los desplazamientos en las direcciones *x*, *y*, mientras se permite la rotación en el eje *z*.

El factor de seguridad de la pieza es de 3.077, lo cual indica un adecuado modelado para su funcionamiento en condiciones reales, este valor es presentado en la **Fig. 4.48**.

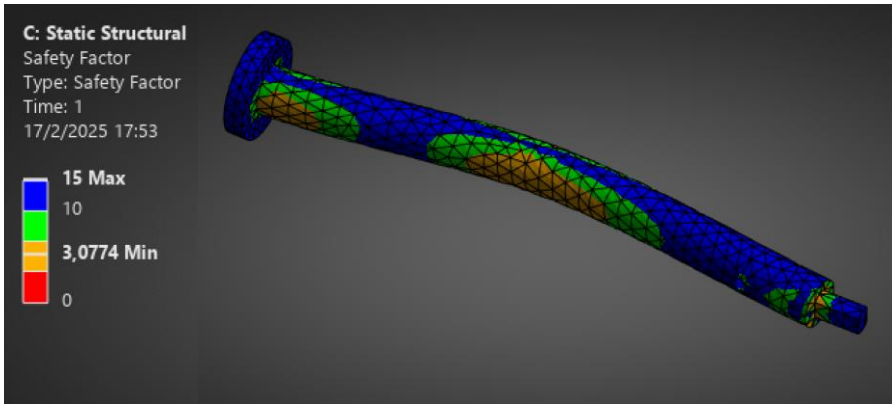

Fig. 4.48. Factor de seguridad en el eje del encoder.

En la **Fig. 4.49**, la tensión máxima de Von-Mises alcanza el valor de 34.87 MPa, representados de forma gráfica en las zonas rojas del elemento. Traducidas a las zonas de mayor esfuerzo, en las cuales la pieza comienza a deformarse.

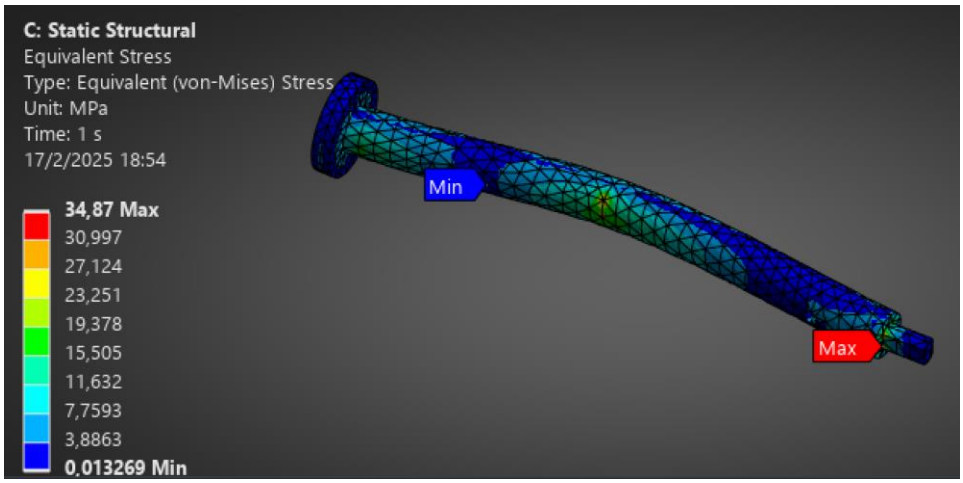

Fig. 4.49. Tensión máxima en el eje del encoder.

En la **Fig. 4.50**, se presenta el mallado final empleado para la simulación del elemento. El mallado es el adecuado y está presente en el análisis de convergencia del elemento.

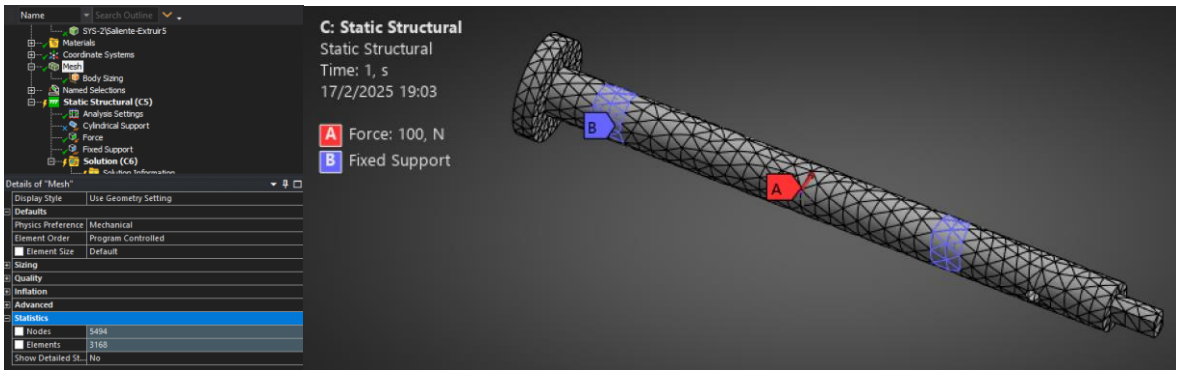

Fig. 4.50. Mallado en el eje del encoder.

El análisis de convergencia inicia con 250 elementos, y van aumentando gradualmente hasta llegar a una convergencia en el punto de 3 168 elementos, a partir de este número de elementos el valor de tensión máxima se vuelve estable, por lo tanto, la simulación y datos obtenidos a partir de este número de elementos es adecuada, y los datos son reflejados en la **Fig. 4.51**.

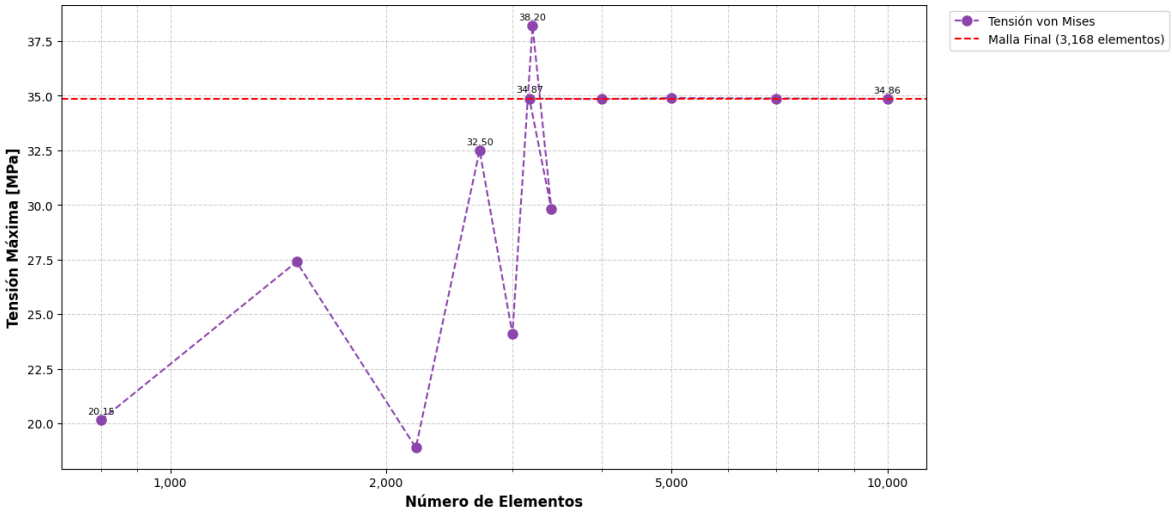

Fig. 4.51. Análisis de convergencia en el eje del encoder.

Del apartado análisis estructural, se obtiene un valor de factor de seguridad de 2.15, la cifra corresponde al mínimo valor registrado después de realizar la simulación de los principales componentes mecánicos sometidos a esfuerzos.

4.5. Construcción y ensamble del dispositivo

A continuación, se expone la construcción y ensamble de la plataforma robótica, partiendo de los lineamientos establecidos en el diagrama de bloques **Fig. 4.1**. En esta fase, se describe el proceso práctico de montaje, desde la preparación de piezas hasta la integración de todas ellas, asegurando que los componentes desempeñen adecuadamente los lineamientos de diseño.

4.5.1. Construcción del chasis

La construcción del chasis consiste en un proceso de soldadura por arco eléctrico, mediante procedimiento MIG (Metal Inert Gas), el cual garantiza resistencia, además al finalizar su construcción pasa por un proceso de pintura, el cual posee una base de primer anticorrosivo con características de alta adherencia y como recubrimiento una pintura anticorrosiva brillante, los mismos que pueden ser apreciados en las **Fig. 4.52** y **Fig. 4.53**.

Fig. 4.52. Proceso de pintura del chasis.

Fig. 4.53. Vista superior del chasis.

Los materiales empleados para la construcción del chasis del dispositivo, están representados en la **Tabla 18**, la cual presenta el perfil de material usado, cantidad y una descripción.

Tabla 18: Materiales empleados en la construcción del chasis.

Perfil de Material	Dimensiones	Cantidad
Tubo estructural cuadrado negro	l= 3/4", e= 1.5 mm	2
Perfil tipo ángulo	l= 1”, e= 1/8”	1
Platina	l= 1”, e= 1/8”	1

4.5.2. Montaje de elementos mecánicos

En la primera etapa, se coloca una esponja antivibración sobre la estructura del chasis. El material tiene el propósito de reducir las vibraciones transmitidas, se aprecia la colocación en la **Fig. 4.54**, por consecuencia, protege elementos mecánicos y electrónicos que serán ubicados a lo largo del procedimiento. Posterior a ello, se ensamblan los motores a sus respectivas bases impresas en ABS. Para finalizar, se distribuyen los distintos elementos sobre el chasis asegurando cada uno de ellos con sus respectivos anclajes, la **Fig. 4.55** muestra la distribución de los elementos como bases, chumaceras y motores.

Fig. 4.54. Preparación del chasis antes del montaje de paneles y elementos.

Fig. 4.55. Integración de elementos mecánicos sobre el chasis.

4.5.3. Montaje de estructura de aluminio

La estructura interna del chasis visualizada en la **Fig. 4.56** se fabrica con perfiles en aluminio 6063 T5 ranurado de 20 mm **Fig. 4.57**, los cuales están acoplados mediante soportes de esquina y tuercas T simples, el método de sujeción empleado son pernos M5.

Esta configuración modular admite tres niveles de espacio: el inferior para componentes mecánicos, el intermedio para todos aquellos elementos electrónicos y el superior empleado como la zona de carga. Gracias a la geometría de los perfiles, se facilita la sujeción de las carcasas externas, de tal manera se obtiene una estructura ligera y funcional.

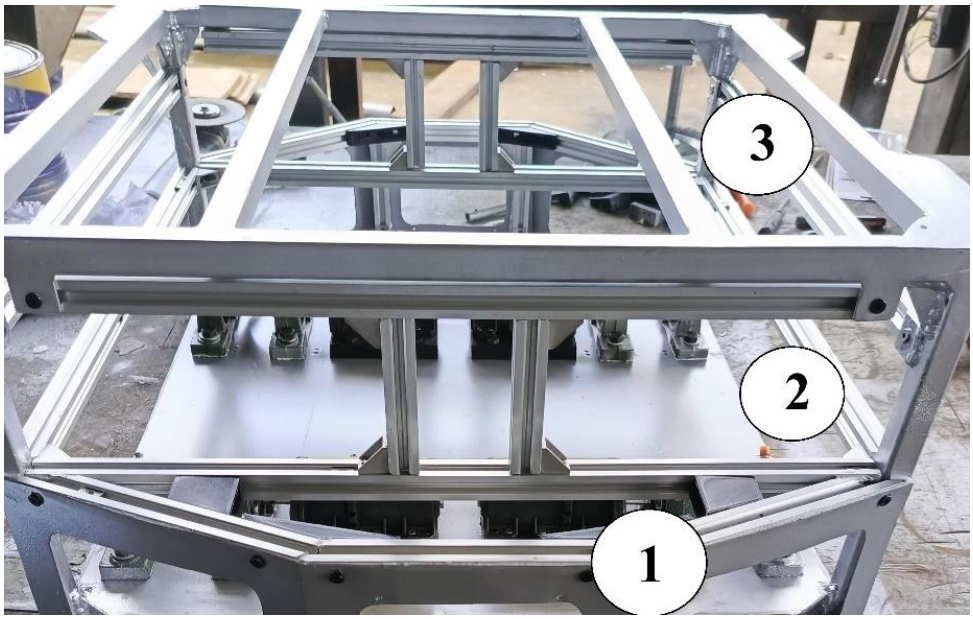

Fig. 4.56. Montaje de la estructura interna en aluminio.

Fig. 4.57. Perfil de aluminio serie 20**.**

La materia prima empleada para la construcción de la estructura del robot, están figurados en la **Tabla 19**, la cual detalla los perfiles utilizados, la cantidad requerida y dimensión.

Tabla 19: Materiales empleados para el ensamble de la estructura.

Perfil de Material	Dimensiones	Cantidad
Aluminio ranurado serie 20	l= 20x20 mm, L=3 m	4
Soportes de esquina serie 20	l= 20 mm	28
Tuercas T simple M5	l=10x15 mm, M5	111

4.5.4. Ensamble de paneles

El sistema principal empleado es de paneles metálicos compuestos de planchas de acero galvanizado de 0,7 mm de espesor. En la **Fig. 4.58**, se muestran las carcasas después de haber sido sometidas a un proceso de pintura, lo cual asegura su durabilidad y acabado estético. La **Fig. 4.59,** representa la colocación de aislantes, de tal manera se asegura la preparación de la estructura antes de fijar los paneles. Finalmente, se observa mediante la **Fig. 4.60**, el proceso de montaje de los paneles en el chasis y la estructura. Los paneles son fijados mediante tornillos M5 en los puntos establecidos, logrando una unión firme y la protección de los componentes internos.

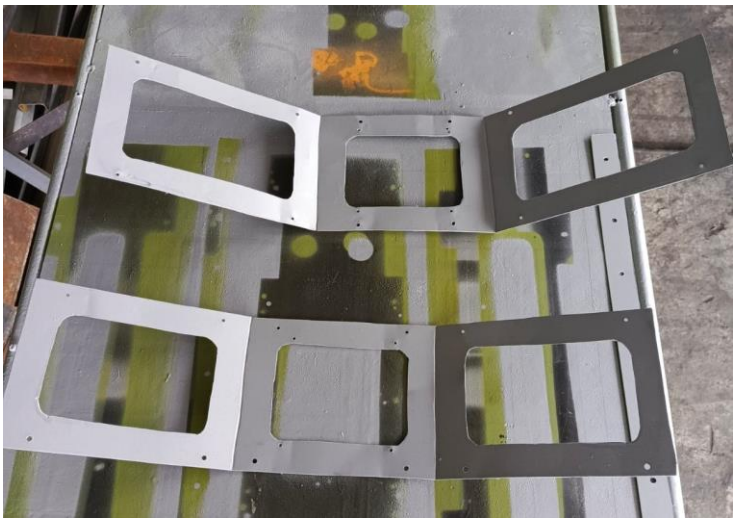

Fig. 4.58. Proceso de pintura en paneles metálicos.

Fig. 4.59. Preparación de la estructura previo montaje de paneles.

Fig. 4.60. Ensamble de paneles a la estructura y chasis.

4.5.5. Montaje de ruedas

Esta fase es muy importante, ya que garantiza la movilidad y soporte de la carga total de la estructura. En la **Fig. 4.61**, se observa la instalación de las ruedas en el chasis y estructura, aseguradas directamente a los ejes y soportadas por un par de chumaceras para cada eje, de tal manera distribuyen las cargas durante el movimiento. El diseño y configuración de las ruedas aseguran estabilidad y maniobrabilidad de toda la plataforma.

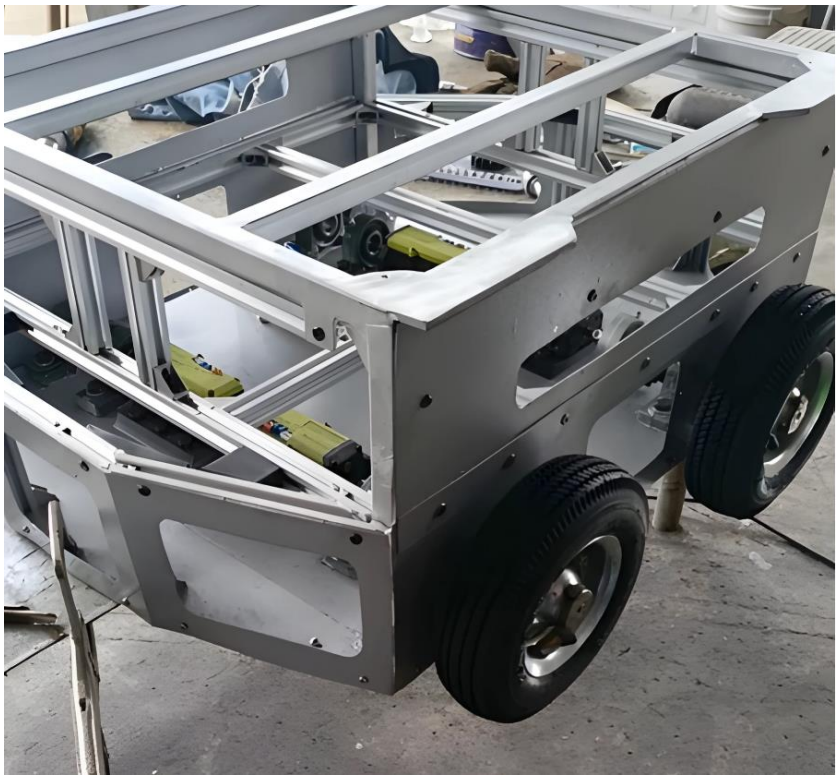

Fig. 4.61. Instalación de las ruedas en el dispositivo.

4.5.6. Instalación del sistema de sincronización para el encoder

La **Fig. 4.62** muestra el diseño del sistema de sincronización impreso en 3D con material PETG, integrado por un par de engranajes que aseguran la transmisión de movimiento entre el eje principal y el disco codificador, de tal manera, permite que el sensor registre las señales necesarias para determinar la posición o velocidad angular.

El uso de PETG ofrece ventajas clave, como la reducción de peso y la disminución del desgaste en aplicaciones de baja carga, en este caso solo transmisión de movimiento. Además, la facilidad de manufactura, impresión y su costo lo hace ideal para la aplicación.

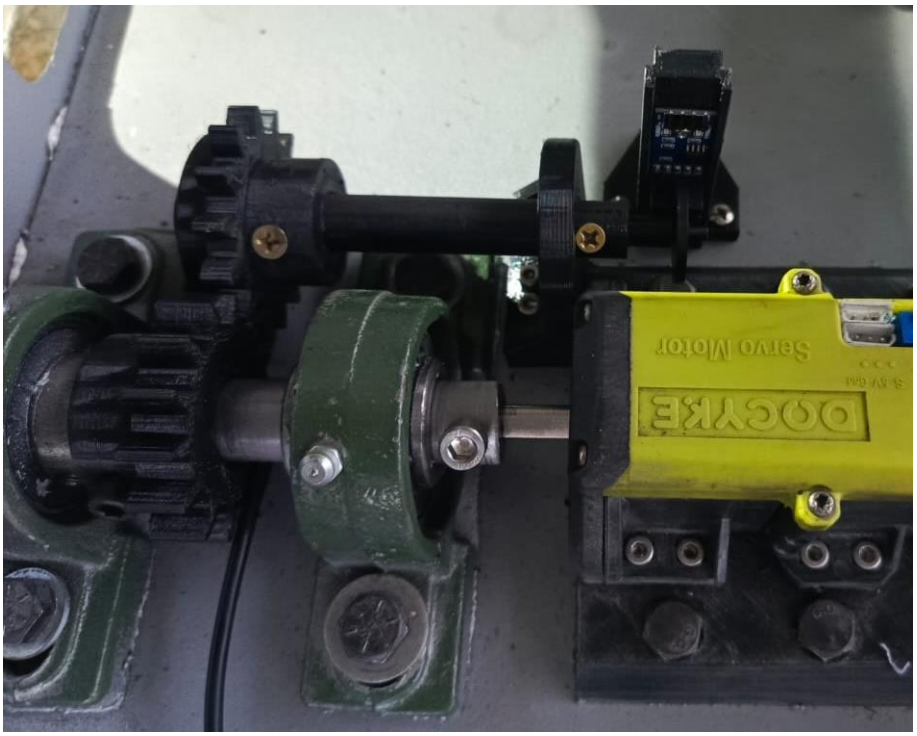

Fig. 4.62. Sistema de sincronización para el encoder.

4.5.7. Componentes eléctricos y electrónicos

En esta etapa, se instala todos los componentes electrónicos dentro del área designada en el interior de la plataforma, se comprueba que cada elemento ingresa correctamente en su posición, como se observa en la **Fig. 4.63**. El montaje ratifica que el diseño estructural del chasis desempeña los requisitos necesarios para albergar y resguardar adecuadamente los elementos. Además, se diseñan carcasas **Fig. 4.64** como soportes para el sistema de control, con la función de ofrecer una protección adicional como aislamiento eléctrico y posibles daños físicos.

Es de suma relevancia mencionar que este documento se centraliza únicamente en el proceso de ensamble de los elementos electrónicos, mientras que la selección, diseño y análisis detallado de dichos componentes se aborda en el documento con el desarrollo electrónico [44].

Fig. 4.63. Componentes eléctricos y electrónicos.

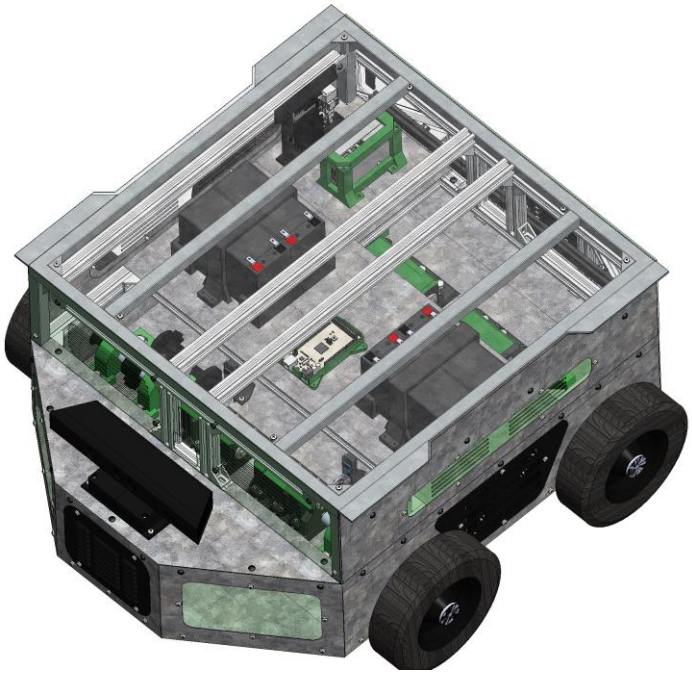

Fig. 4.64. Distribución de los componentes electrónicos.

4.5.8. Colocación de acrílico y elementos de ventilación.

En la **Fig. 4.65**, se observa el montaje de los paneles de ventilación impresos en PETG, los cuales garantizan un flujo de aire adecuado al interior del chasis. Permite la disipación de calor generado por los distintos elementos electrónicos distribuidos en el interior de la plataforma, evitando sobrecalentamientos.

Por otro lado, la **Fig. 4.66** muestra la colocación del acrílico que forman parte del diseño final. Estos paneles protegen los componentes internos y permiten la visibilidad parcial del interior para proporcionar inspecciones rápidas y mantenimiento.

Fig. 4.65. Montaje de paneles de ventilación

Fig. 4.66. Montaje de paneles de acrílico.

4.5.9. Construcción final

El resultado de un proceso integral de diseño está en el ensamblaje y montaje de componentes mecánicos, electrónicos y estructurales. En las **Fig. 4.67** y **Fig. 4.68**, se exhiben las perspectivas delantera y posterior de la plataforma, donde se puede apreciar la combinación de los paneles de acrílico, ventilación, ruedas y demás sistemas dentro de la estructura interna.

La **Fig. 4.69** muestra el dispositivo físico, con detalles de pintura y acabados estéticos en la instalación.

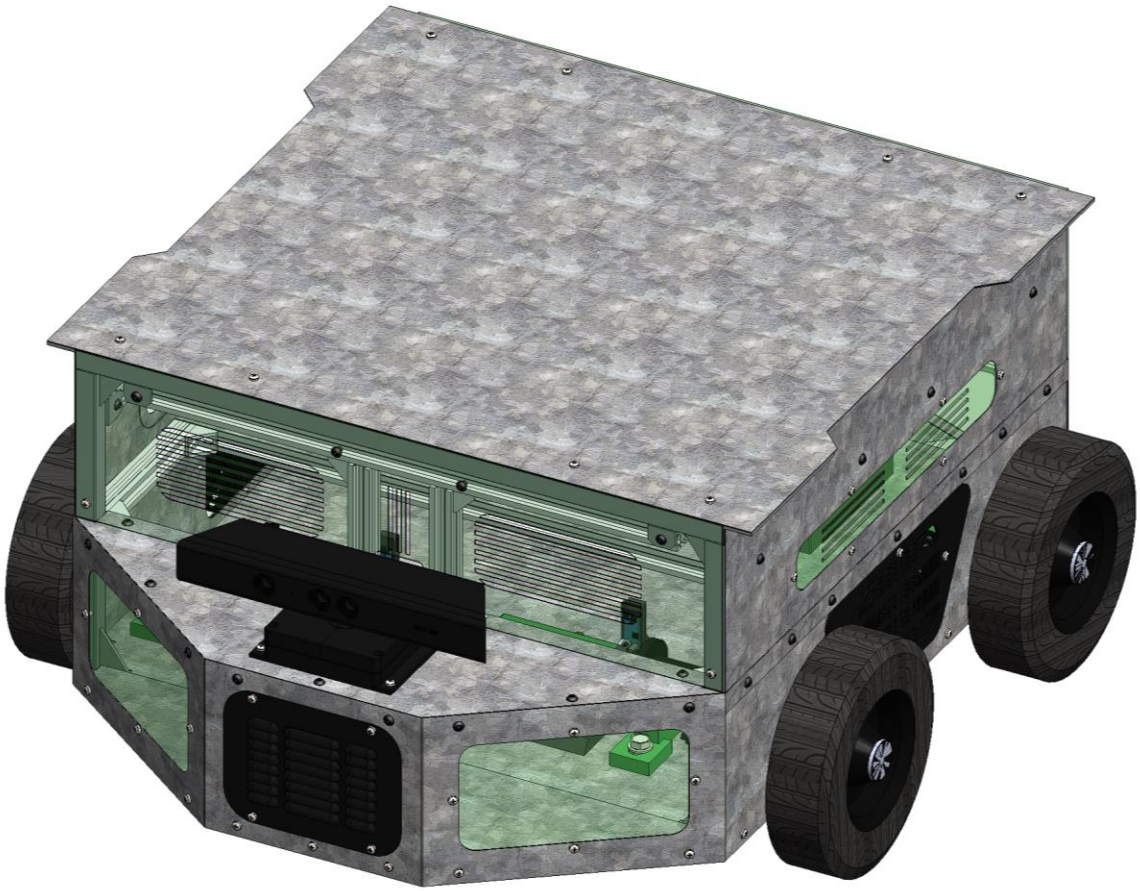

Fig. 4.67. Vista delantera del dispositivo.

Fig. 4.68. Vista posterior del dispositivo.

Fig. 4.69. Robot móvil de alto torque.

4.6. Pruebas y evaluaciones

Antes de aprobar el rendimiento del robot móvil de alto torque, es esencial realizar una cadena de pruebas que permitan evaluar el cumplimiento de los objetivos de diseño y garantizar su desempeño en condiciones operativas reales. Las pruebas están orientadas a analizar la capacidad de carga, el rendimiento en diferentes maniobras y la estabilidad estructural.

4.6.1. Pruebas de capacidad de carga en superficies planas línea recta

Se evalúa la capacidad de la plataforma para transportar diferentes variaciones de carga, mientras se desplaza en una superficie plana, con una trayectoria en línea recta, asegurando su estabilidad estructural, eficiencia en el movimiento y la funcionalidad del dispositivo.

Se realiza pruebas mediante el incremento gradual del peso transportado, comenzando con una carga en vacío, que viene a representar el peso propio del robot de 50 kg, posterior a ello se agrega 20 kg, los cuales van aumentando en intervalos de 20 kg hasta alcanzar la carga máxima de diseño 100 kg y posterior a ello llegar a una carga experimental de 185 kg **Fig. 4.70**. De las evaluaciones realizadas la **Fig. 4.71** refleja una de las gráficas arrojadas de los experimentos donde está la velocidad, con dos trayectorias, las cuales representan el lado derecho e izquierdo del robot, gráficas arrojadas por los sensores, donde se toma el valor promedio de las curvas en el eje *y*, se promedian las dos, de la cual se obtiene la velocidad promedio final. La **Tabla 20** representa los resultados de las pruebas.

Fig. 4.70. Pruebas de carga.

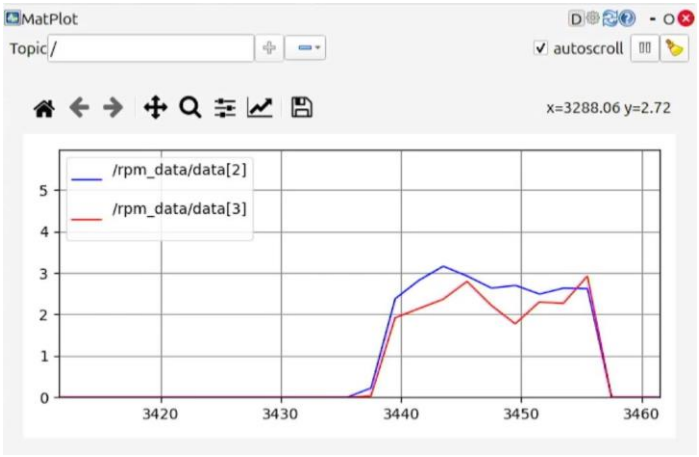

Fig. 4.71. Datos de velocidad en pruebas de línea recta 0 kg.

Tabla 20: Resultados en la prueba de capacidad de carga en línea recta.

Carga (kg)	Velocidad (m/s)	Descripción
0	2,75	Movimiento fluido sin vibraciones.
20	2,72	Ligera disminución por la carga
40	2,60	Desempeño estable con carga media
60	2,50	Disminución gradual
80	2,40	Velocidad funcional sin vibraciones
100	2,35	Movimiento constante
120	2,30	Carga cercana superior al límite
140	2,25	Notable esfuerzo por el peso
160	2,20	Velocidad moderada
185	2,10	Límite de carga funcional

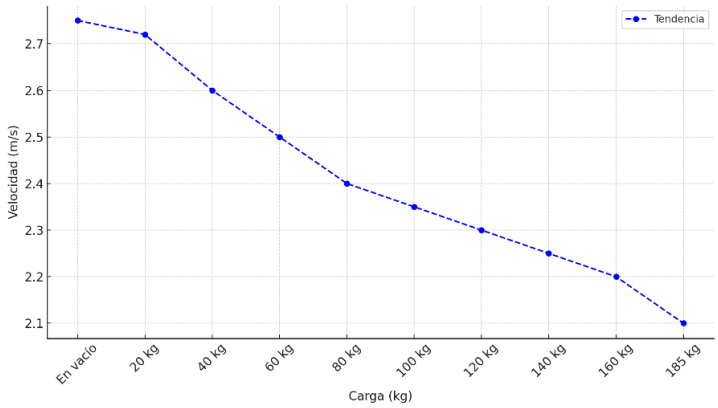

Fig. 4.72. Velocidad promedio vs Carga en línea recta.

De la **Fig. 4.72**, se interpreta que, a medida del incremento de carga, se observa un desempeño progresivamente afectado en términos de velocidad. En vacío, el robot se desplaza de manera fluida, alcanza su velocidad nominal sin inconvenientes. Con 20, 40, 60, y 80 kg, el cambio de velocidad es casi imperceptible, el movimiento es estable. A partir de los 100 kg, la velocidad comienza a reducirse de forma paulatina. Con 140 y 160 kg, la velocidad disminuye de manera notable, pero el dispositivo sigue operativo. Finalmente, al alcanzar los 185 kg, se registra una reducción apreciable en la velocidad, aunque el robot conserva su estabilidad estructural, se valida la capacidad de operación más allá de las condiciones establecidas.

4.6.2. Pruebas de carga en superficies planas con rotación en el mismo eje

Las pruebas de rotación permiten evaluar el desempeño de la plataforma móvil al enfrentar un giro en su mismo eje, se analiza su facultad para mantener la tracción y estabilidad al transportar cargas. Estas evaluaciones dan como resultado la velocidad máxima que el robot puede superar mientras opera de manera funcional. Se realizan pruebas incrementales representadas con la **Fig. 4.73**, desde su ejecución en vacío, con aumentos de cargas en tramos de 20 kg hasta alcanzar la carga límite establecida para las pruebas de 185 kg.

En la **Fig. 4.74** se visualiza una de las gráficas experimentales para rotación que arrojan valores de velocidad, con un par de trayectorias que representan la sección derecha e izquierda del dispositivo, con gráficas dadas por sensores, el valor promedio de las curvas en el eje vertical es tomado, se promedian ambos y el resultado es la velocidad promedio final.

Fig. 4.73. Pruebas de carga en rotaciones.

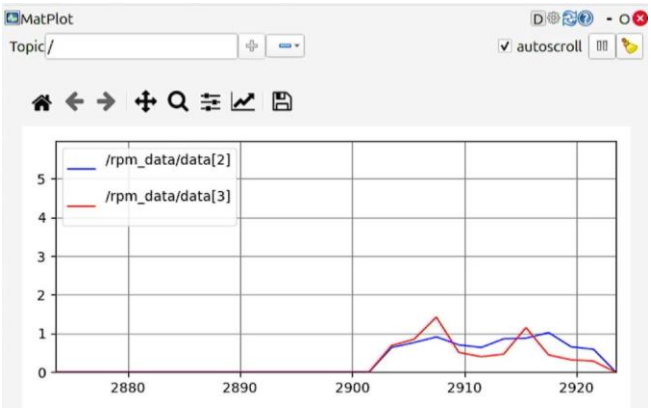

Fig. 4.74. Datos de velocidad en pruebas de rotación en el mismo eje 185 kg.

Tabla 21: Resultados de las pruebas de rotación en el mismo eje.

Carga (kg)	Velocidad (m/s)	Descripción
0	2,65	Movimiento fluido
20	2,55	Rotación estable
40	2,35	Ligera disminución en la velocidad, carga moderada
60	2,15	Rotación estable, notable reducción de la velocidad
80	1,95	Disminución progresiva
100	1,75	Rotación estable con carga de diseño
120	1,55	Sin pérdida de estabilidad
140	1,45	Movimiento lento pero funcional
160	1,25	Reducción evidente de la velocidad
185	1,05	Velocidad mínima aceptable con límite de carga

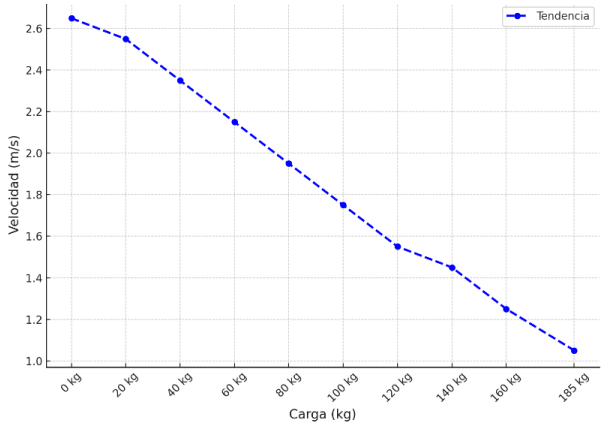

Fig. 4.75. Velocidad del dispositivo en función de la inclinación.

Con base en los resultados de la **Tabla 21** y la **Fig. 4.75**, el robot tiene la capacidad de cargar 185 kg y realizar la maniobra. Al momento de incremento del peso en la carga, se identifica una reducción progresiva en los valores de velocidad, traducido a una pérdida de tracción que no influye en el desempeño general. Los valores arrojados confirman que el diseño es adecuado incluso para un movimiento de rotación.

4.7. Cinemática del dispositivo

La cinemática figura la etapa final en el desarrollo de este documento, conforme el diagrama de bloques **Fig. 4.1**. Este estudio describe el movimiento de la plataforma con el análisis de posición, velocidad y orientación; se fundamenta en las características del sistema mecánico establecido y parámetros cinemáticos definidos en capítulos anteriores. La ejecución de la cinemática se realiza en MATLAB, empleando herramientas como MATLAB Graphics con la finalidad de representar las trayectorias, el uso de Robotic System Toolbox que garantiza el control preciso y eficiente del robot, además, se forma el cimiento para agregar modelos más avanzados de simulación.

4.7.1. Desplazamiento en línea recta

Para realizar el movimiento en línea recta, se emplean las ecuaciones cinemáticas planteadas para la cinemática del robot, de las cuales se interpreta; si todos los neumáticos giran a la misma velocidad angular se obtiene una trayectoria rectilínea, que se traduce a no variaciones en la orientación del robot.

$$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 \qquad (5)$$
$$\theta = constante$$

La velocidad lineal promedio ubicada en el eje *y* (*Vy*), se ha modelado como la suma del efecto de las cuatro ruedas, por otra parte, las velocidades en el eje *x*, además de la rotación $\dot{\theta}$, permanecen sin efecto. Este enfoque se ve aplicado en la **Fig. 4.76**, la simulación permite examinar cómo la plataforma se desplaza uniformemente en un intervalo de tiempo (*dt*), basado en los parámetros definidos.

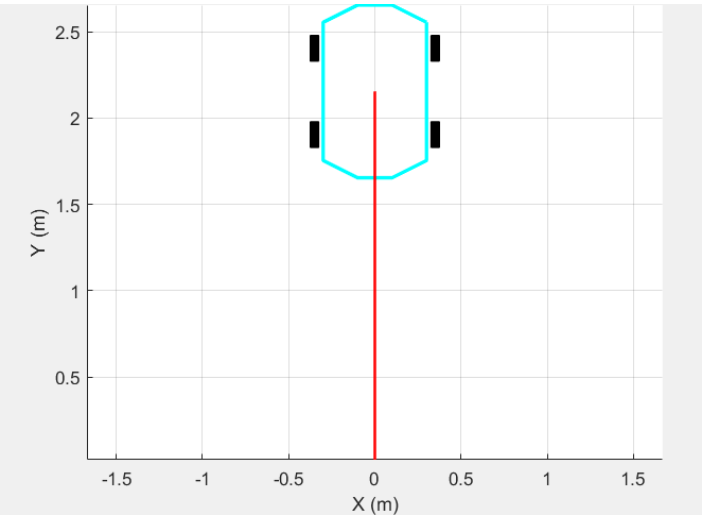

Fig. 4.76. Movimiento en línea recta del dispositivo.

4.7.2. Desplazamiento con giros

Para el desplazamiento del robot con giros, es necesario centrarse en dos temas velocidad lineal y angular, ya planteadas en la teoría de la cinemática, donde la ecuación de la velocidad angular describe las diferencias de velocidades entre los neumáticos de la zona izquierda y derecha que generan el giro de la plataforma móvil.

En la **Fig. 4.77**, se aprecia la trayectoria de la diferencia de velocidades, donde las ruedas del lado izquierdo para este caso deben girar a menor velocidad que las de la zona derecha. Para el caso de una circunferencia completa se debe establecer que $w_1 = w_3$ y $w_2 = w_4$, provocando el giro de manera continua gracias a las ecuaciones establecidas.

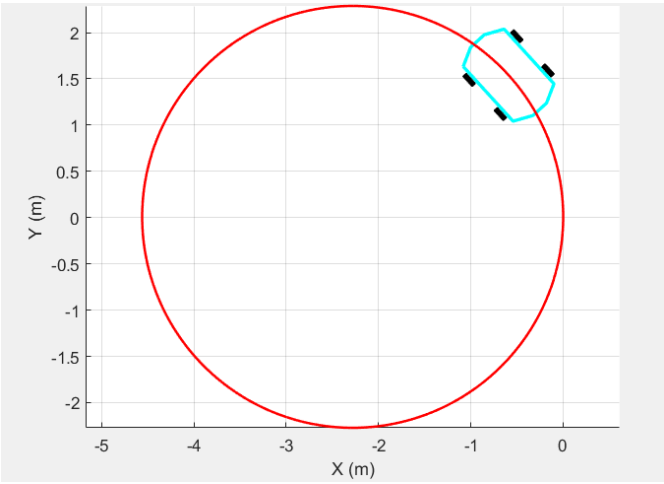

Fig. 4.77. Trayectoria circular del dispositivo.

4.7.3. Rotación en el mismo eje

Para la ejecución de la rotación en el mismo eje, en este caso eje *z*, un par de ruedas de la zona izquierda o derecha giran en sentido contrario a las ruedas del lado opuesto, como resultado se genera un torque el cual hace girar la plataforma sin desplazamiento. Para lo mencionado deben cumplirse una serie de requisitos, los cuales consisten, como primer paso, las velocidades de los neumáticos de cada zona poseen el mismo valor absoluto con signos contrarios; $w_1 = -w_2$ y $w_3 = -w_4$. Como segunda característica, la velocidad promedio debe ser cero, esto debido a que no existe desplazamiento lineal.

$$v = \frac{r}{4}\left(w_1 + w_2 + w_3 + w_4\right) = 0 \qquad (6)$$

Como paso final, la velocidad angular *w* no puede tener un valor nulo de cero, debido a que el robot gira, todo lo mencionado puede visualizarse en la **Fig. 4.78**.

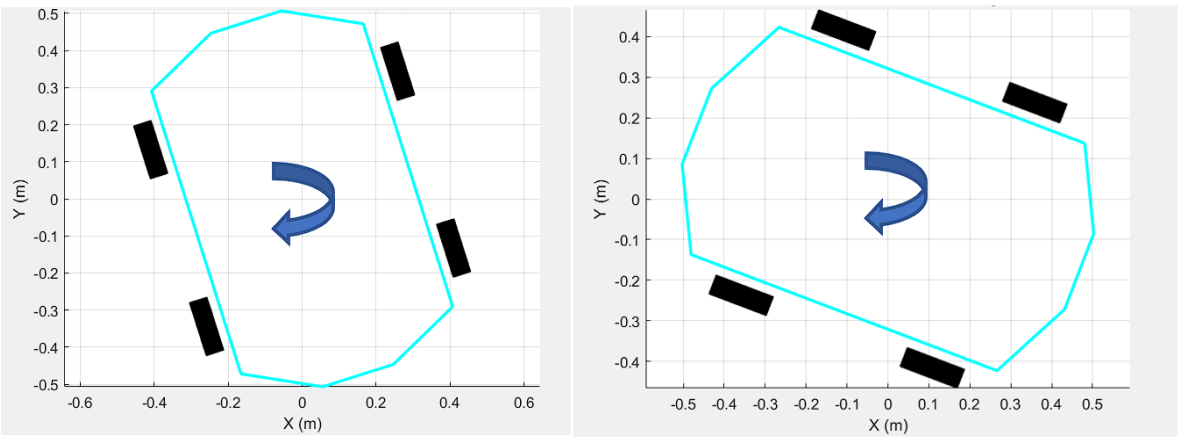

Fig. 4.78. Rotación del robot en el eje *z*.

El comportamiento de todas las simulaciones es representado de manera visual en MATLAB, además de validar las diferentes implementaciones de movimientos y trayectoria, ratificando el modelo matemático y la utilidad de la plataforma para operar en desplazamientos precisos con entornos controlados.

El repositorio con información acerca de todo el proyecto, con todos los aspectos, mecánica, electrónica, visión artificial y código para emplearse en MATLAB de este documento, se encuentra en el siguiente enlace:

https://github.com/pericao320/robot-kinematics-simulations

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El presente trabajo, Robot Móvil de alto Torque se realizó con un enfoque multidisciplinario que abarcan tres áreas específicas: desarrollo mecánico, desarrollo electrónico y visión artificial. Se desarrolló un trabajo colaborativo, el cual se basó en actividades simultáneas de los autores, la ejecución de cada fase involucró soluciones específicas a diferentes aspectos o componentes a emplearse dentro del proyecto. Esta colaboración permitió la investigación, impulso y construcción de un dispositivo funcional vinculado a las tres temáticas establecidas para el dispositivo [44], [45].

La selección adecuada de componentes mecánicos para los sistemas, se fundamentó en criterios de alto torque y resistencia. Los elementos empleados como ruedas, perfiles, y chumaceras son adecuados para aplicaciones que requieren alta capacidad de carga. Además, son componentes estándar, su fácil adquisición en el mercado local implica facilidad de disponibilidad y mantenimientos.

El desarrollo del sistema mecánico para la plataforma robótica cumple adecuadamente los parámetros de diseño establecidos, como la estructura capaz de soportar altas cargas, incluyendo condiciones dinámicas durante el desplazamiento y giros en su propio eje lo hacen un dispositivo funcional. Las medidas del chasis, materiales empleados en la manufactura y la ubicación de las ruedas favorecen la operación de forma estable y eficiente.

El modelo cinemático directo como base del diseño mecánico para el dispositivo, validó su desempeño para ejecutar distintos desplazamientos de manera controlada, en este caso trayectorias en línea recta, circulares y rotaciones sobre su eje de rotación. Lo cual se traduce a la precisión en el diseño para transmitir fuerzas y torques de los motores hacia las ruedas.

5.2. Recomendaciones

Aunque para el diseño actual no se consideraron sistemas de amortiguación dados los limites en el presupuesto, se propone considerar su implementación para futuros trabajos sobre la plataforma. El sistema mencionado mejora la estabilidad del robot móvil para operar en terrenos irregulares, que generan vibraciones, lo cual ofrece un rendimiento adecuado en aplicaciones exigentes.

Evaluar la capacidad del sistema en diferentes entornos, como superficies lisas, terrenos irregulares y operaciones que involucren vibraciones. Esto permite validar la eficacia del diseño en escenarios de trabajo real, además de permitir posibles ajustes que optimicen la adaptabilidad a distintas aplicaciones.

Emplear ruedas con un mayor tamaño es una elección factible en la mejora del desempeño del dispositivo en operación con trayectorias largas, se traduce a un mayor campo de desplazamiento en menor tiempo.

Bibliografía

[1] S. Anwar, N. A. Bascou, M. Menekse, and A. Kardgar, "A Systematic Review of Studies on Educational Robotics," *Journal of Pre-College Engineering Education Research (J-PEER)*, vol. 9, no. 2, p. 2, Jul. 2019, doi: 10.7771/2157-9288.1223.

[2] S. Kamran *et al.*, "The Impact of Artificial intelligence and Robotics on the Future Employment Opportunities," *Trends in Computer Science and Information Technology*, pp. 050–054, Sep. 2020, doi: 10.17352/TCSIT.000022.

[3] H. Lehmann and P. G. Rossi, "Social robots in educational contexts: Developing an application in enactive didactics," *Journal of E-Learning and Knowledge Society*, vol. 15, no. 2, 2019, doi: 10.20368/1971-8829/1633.

[4] N. Kerimbayev, N. Beisov, A. Kovtun, N. Nurym, and A. Akramova, "Robotics in the international educational space: Integration and the experience," *Educ Inf Technol (Dordr)*, vol. 25, no. 6, pp. 5835–5851, Nov. 2020, doi: 10.1007/S10639-020-10257-6/METRICS.

[5] S. E. Oltean, "Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation," *Procedia Manuf*, vol. 32, pp. 572–577, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.254.

[6] A. Afzal, C. Le Goues, M. Hilton, and C. S. Timperley, "A Study on Challenges of Testing Robotic Systems," *Proceedings - 2020 IEEE 13th International Conference on Software Testing, Verification and Validation, ICST 2020*, pp. 96–107, Oct. 2020, doi: 10.1109/ICST46399.2020.00020.

[7] L. Nwankwo, C. Fritze, K. Bartsch, and E. Rueckert, "ROMR: A ROS-based open-source mobile robot," *HardwareX*, vol. 14, p. e00426, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.OHX.2023.E00426.

[8] W. Wu *et al.*, "Mechanostructures: Rational mechanical design, fabrication, performance evaluation, and industrial application of advanced structures," *Prog Mater Sci*, vol. 131, p. 101021, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2022.101021.

[9] O. Flor, M. Fuentes, C. T.-A. Engineering, and undefined 2020, "Criteria for the design of an educational robotics platform," *athenea.autanabooks.com*, vol. 21, pp. 29–40, 2017, doi: 10.47460/athenea.v1i1.4.

[10] T. Jaime Cardona Londoño, T. Sebastián Correa Zapata, E. Rico Mesa, and J. Hernández Riveros, "SOLAR MOBILE ROBOT ROBOT MÓVIL SOLAR".

[11] M. Di Castro, "A novel robotic framework for safe inspection and telemanipulation in hazardous and unstructured environments," 2019, Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: https://oa.upm.es/id/eprint/57127

[12] R. V. Guerrero, M. Teresa, O. Guerrero, and R. M. Quijas, “DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN ROBOT MÓVIL AUTÓNOMO Y TELE-OPERADO (DESIGN AND PROTOTYPING OF AN AUTONOMOUS AND TELE-OPERATED MOBILE ROBOT),” *Pistas Educativas*, vol. 42, no. 136, Dec. 2020, Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2429

[13] J. Li, J. Wang, H. Peng, Y. Hu, H. S.-I. T. on, and undefined 2021, “Fuzzy-torque approximation-enhanced sliding mode control for lateral stability of mobile robot,” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9339917/

[14] T. Deemyad, R. Moeller, and A. Sebastian, “Chassis Design and Analysis of an Autonomous Ground Vehicle (AGV) using Genetic Algorithm,” *2020 Intermountain Engineering, Technology and Computing, IETC 2020*, Oct. 2020, doi: 10.1109/IETC47856.2020.9249180.

[15] J. Fernando, N. Herrera, H. Santiago, and S. Bedón, “Rediseño del robot cartesiano del laboratorio de automatización industrial de procesos mecánicos,” Jun. 2019, Accessed: Nov. 07, 2023. [Online]. Available: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20296

[16] J. B. Ruiz Sánchez, “Diseño e implementación de un prototipo robótico móvil todo terreno con un mecanismo de suspensión tipo rocker-bogie para la exploración de entornos de alto riesgo en aplicaciones militares,” 2022, Accessed: Nov. 07, 2023. [Online]. Available: http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/32301

[17] J. Guillermo, G. Marin, D. Bautista Díaz, J. Sebastián, and S. Torres, “Una Revisión Sobre la Evolución de la Robótica Móvil A”.

[18] Oliva L, Gómez M, and Vicario C, “Vista de Etapas en la construcción de un robot móvil con sistema de sensado y comunicación.” Accessed: Jan. 11, 2024. [Online]. Available: https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/11357/10687

[19] C. Restrepo and L. Felipe, “Diseño y construcción de un prototipo de plataforma robótica para aplicaciones en seguridad,” 2018, Accessed: Jan. 11, 2024. [Online]. Available: http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/14119

[20] H. D. Cubides Vásquez, L. F. Cuvi Largo, and J. L. Cuzco Paida, “Diseño, construcción e implementación de una plataforma robótica multifuncional con propósitos didácticos,” 2011, Accessed: Jan. 11, 2024. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1243

[21] J. B. Lozano and A. Morell Pérez, “Plataforma robótica experimental,” Jan. 2019, Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/87465

[22] Y. Cheng, R. Jia, H. Du, G. Wen, and W. Zhu, “Robust finite-time consensus formation control for multiple nonholonomic wheeled mobile robots via output feedback,” *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 28, no. 6, pp. 2082–2096, Apr. 2018, doi: 10.1002/RNC.4002.

[23] “CI-2657 Robótica Prof. Kryscia Ramírez Benavides Cinemática Directa del Robot”.

[24] “Cinemática Diferencial.” Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.google.com/search?q=Hernando%2C+M.+(2017).+Cap%C3%ADtulo+6.+Cinem%C3%A1tica+Diferencial.+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Madrid.&oq=Hernando%2C+M.+(2017).+Cap%C3%ADtulo+6.+Cinem%C3%A1tica+Diferencial.+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Madrid.&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIGCAEQLhhA0gEHNzUwajBqMagCALACAA&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[25] “Modelado en Tiempo Discreto y Seguimiento de Trayectorias para un Robot Móvil Propulsado por Ruedas.” Accessed: Jan. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-55462009000400003&script=sci_abstract&utm_source=chatgpt.com

[26] S. E. Oltean, “Mobile Robot Platform with Arduino Uno and Raspberry Pi for Autonomous Navigation,” *Procedia Manuf*, vol. 32, pp. 572–577, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.254.

[27] G. A. Gonzales López, “Diseño de un robot móvil para realizar tareas de vigilancia nocturna en la facultad de ingeniería mecánica de la U.N.P.R.G,” Jan. 2020, Accessed: Jan. 12, 2024. [Online]. Available: http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/11790

[28] D. H. Vásquez, “Diseño del sistema mecánico y chasis de un robot todoterreno para operaciones de búsqueda y rescate.,” 2019, Accessed: Jan. 13, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3604

[29] Y. E. González, M. A. Violet, H. D. Agudelo, Y. E. González, M. A. Violet, and H. D. Agudelo, “Aplicación del método de diseño para manufactura y ensamblaje al chasis de un vehículo de tracción humana de tres ruedas tipo recumbent como alternativa de transporte en la ciudad de Montería,” *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 13, no. 25, pp. 35–44, Jun. 2019, doi: 10.31908/19098367.4012.

[30] I. Ponce, “ESTUDIO DINÁMICO DEL REDISEÑO DE UN ROBOT MANIPULADOR RECONFIGURABLE DE DOS GRADOS DE LIBERTAD POR MEDIO DE ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO”.

[31] G. Ismael and P. Carpio, “Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO,” 2019, Accessed: Jan. 01, 2025. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17123

[32] Jhon A. Schey, “Procesos De Manufactura,” *200.37.174.120*, pp. 1–176, 2019, Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: http://200.37.174.120/Esp/ProgramacionAcademica/Pregrado/17/syllabus\170417412.pdf

[33] Y. N. Quevedo Supelano and C. A. Bonilla Dueñas, “Caracterización de las propiedades mecánicas del copolímero PETG mediante impresión FDM 3D - hdl:11349/28358.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/28358

[34] G. Ismael and P. Carpio, “Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS y PLA/MLO,” 2019, Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17123

[35] William D. Callister Jr., “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Volumen I.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=38n7DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Fundamento+de+ciencia+de+los+materiales&ots=s_lZ7xXWQO&sig=KFtudnorl1RI5JVdOJI-xDJcbP4#v=onepage&q=Fundamento%20de%20ciencia%20de%20los%20materiales&f=false

[36] “Innovaciones y aplicaciones de robots móviles industriales| Robotnik ®.” Accessed: Jan. 01, 2025. [Online]. Available: https://robotnik.eu/es/innovaciones-y-aplicaciones-de-robots-moviles-industriales/

[37] Adedeji B. Badiru, Vhance V. Valencia, and Liu David, “Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry - Google Libros.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=1joPEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Additive+Manufacturing+Handbook&ots=_HGw5oKbfo&sig=MHV6eRWcn5mMZ9eMhO-Z6VFA2uY#v=onepage&q=Additive%20Manufacturing%20Handbook&f=false

[38] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, and M. Khorasani, “Additive manufacturing technologies,” *Additive Manufacturing Technologies*, pp. 1–675, Nov. 2020, doi: 10.1007/978-3-030-56127-7/COVER.

[39] J. J. Castro Maldonado, L. K. Gómez Macho, E. Camargo Casallas, J. J. Castro Maldonado, L. K. Gómez Macho, and E. Camargo Casallas, “La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI,” *Tecnura*, vol. 27, no. 75, pp. 140–174, Jan. 2023, doi: 10.14483/22487638.19171.

[40] A. Sánchez, D. M. R. Figueroa, M. Alayza, R. María, and T. Puente, “LIBRO LOS MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN-MAESTRÍA 2020”, Accessed: Jan. 03, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343426365

[41] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, “Metodología de la investigación,” 2019.

[42] D. L. Goetsch and S. B. Davis, “QUALITY MANAGEMENT FOR ORGANIZATIONAL EXCELLENCE Introduction to Total Quality Ninth Edition,” 2021, Accessed: Jan. 02, 2025. [Online]. Available: https://lccn.loc.gov/2019008777

[43] “Online Materials Information Resource - MatWeb.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.matweb.com/index.aspx

[44] E. Mediavilla, *Robot Móvil de Alto Torque: Desarrollo Electrónico*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte, 2025.

[45] P. Hinojosa, *Robot Móvil de Alto Torque: Visión Artificial*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte, 2025.

Anexos

A continuación, se anexan en un repositorio todos los planos correspondientes a sistemas, conjuntos y elementos mecánicos del proyecto. Los documentos incluyen representaciones detalladas, dimensiones y especificaciones técnicas para la fabricación y ensamblaje del dispositivo. Se puede ingresar a la información a través del siguiente link:

https://github.com/pericao320/robot-kinematics-simulations/tree/main/Planos