



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA MÓVIL  
OMNIDIRECCIONAL ORIENTADA A ROBÓTICA  
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

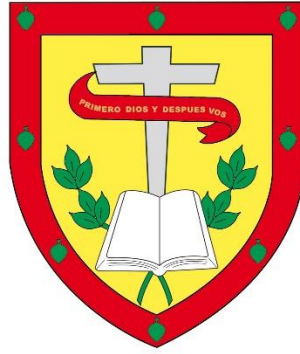
**AUTOR: JOSUÉ DAVID MISACANGO CRIOLLO**

**DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS COBOS TORRES, PH.D.**

**CUENCA – ECUADOR**

**2026**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA MÓVIL  
OMNIDIRECCIONAL ORIENTADA A ROBÓTICA  
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTOR: JOSUÉ DAVID MISACANGO CRIOLLO**

**DIRECTOR: ING JUAN CARLOS COBOS TORRES, PH.D.**

**CUENCA - ECUADOR**


**2026**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## **DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD**

Josué David Misacango Criollo portador de la cedula de ciudadanía N.º 0106877988. Declaro ser el autor de la obra: Desarrollo de una plataforma móvil omnidireccional orientada a robótica automatización industrial, sobre el cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que esta obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 19 de marzo de 2026



.....  
Josué David Misacango Criollo  
0106877988

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Josué David Misacango Criollo, bajo mi supervisión.



.....  
**Ing. Juan Carlos Cobos Torres, Ph.D.**

**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación, con profundo cariño y gratitud, a mis padres y a mi familia.

A mi madre, por su apoyo incondicional durante todo el trayecto de mi formación universitaria. Por brindarme siempre la palabra de aliento necesaria en los momentos difíciles, por inculcarme el valor de la dedicación y perseverancia, además de no permitir que me rindiera ante ninguna adversidad.

A mi padre, por ser un guía constante, por su confianza, su motivación y la fortaleza que me ha transmitido, pero, sobre todo, el invaluable apoyo que me brindó para realizar mis estudios, enseñándome que la perseverancia es la clave para afrontar cualquier situación.

A mi hermano, quien ha sido mi motor y soporte fundamental, dándome la fuerza necesaria para mantenerme firme en este proceso académico.

Esta tesis es, en esencia, un reflejo de su respaldo constante.

**Josué David Misacango Criollo**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme salud, perseverancia y la oportunidad de cumplir esta meta personal y profesional.

De igual manera, expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Católica de Cuenca, a sus docentes, y de manera especial a mi director de tesis, Ing. Juan Carlos Cobos Torres, así como al Ing. Darwin Alexander Angamarca Avedaño, por su apoyo académico y técnico. La guía del primero y la colaboración del segundo fueron fundamentales para el desarrollo y la consolidación de este trabajo de investigación.

Finalmente, quiero agradecer al Laboratorio de Robótica, Automatización, Sistemas Inteligentes y Embebidos (RobLab); al proyecto de investigación formativa “Diseño y construcción de robot móvil omnidireccional didáctico”, código PIFCVI24; y al proyecto de investigación “CompostBot robot de servicio para tratamiento de residuos orgánicos domiciliarios de cocina”, código PICCG24-14.

## RESUMEN

La automatización industrial se ha consolidado como un eje estratégico para la optimización de procesos productivos, donde los robots móviles constituyen una solución versátil al permitir desplazamiento autónomo en superficies complejas y la ejecución de tareas en zonas de difícil acceso. En este contexto, la presente investigación desarrolla el diseño, construcción y validación experimental de una plataforma móvil omnidireccional orientada a aplicaciones de automatización industrial, evaluando su desempeño estructural, estabilidad dinámica, control de velocidad y autonomía energética. La metodología incluyó modelado 3D en Autodesk Fusion 360, análisis estructural por elementos finitos en ANSYS Static Structural, e integración de ROS para la gestión de comunicaciones, control y navegación. Se implementó un controlador Proporcional-Integral para la regulación de velocidad de las ruedas, complementado con pruebas de odometría, análisis de robustez ante perturbaciones mecánicas y evaluación del consumo energético bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados evidenciaron un rango operativo seguro para cargas inferiores a 48,16 kg. Se registró un error máximo de odometría de 5,72% bajo estimación interna sin sensores externos de corrección. La autonomía alcanzó entre 8 y 9 horas sin carga adicional y entre 3-5 horas con carga, demostrando la viabilidad técnica de la plataforma. En conjunto, el proyecto aporta una alternativa de bajo costo y arquitectura abierta para el desarrollo de sistemas móviles industriales, facilitando su integración en procesos de transporte interno, asistencia operativa y experimentación académica, fortaleciendo la adopción tecnológica y la investigación aplicada en robótica móvil.

*Palabras clave:* robótica móvil, plataforma omnidireccional, modelado estructural, suspensión pasiva, sistemas embebidos.

## ABSTRACT

Industrial automation has established itself as a strategic pillar for optimizing production processes, with mobile robots offering a versatile solution by enabling autonomous movement across complex surfaces and executing tasks in areas that are difficult to access. In this context, this research focuses on the design, construction, and experimental validation of an omnidirectional mobile platform intended for industrial automation applications, evaluating its structural performance, dynamic stability, speed control, and energy autonomy. The methodology included 3D modeling in Autodesk Fusion 360, finite element structural analysis in ANSYS Static Structural, and ROS integration for communication, control, and navigation management. A Proportional–Integral controller was implemented for wheel speed regulation, supplemented by odometry tests, robustness analysis under mechanical disturbances, and evaluation of energy consumption under different load conditions. The results demonstrated a safe operating range for loads below 48.16 kg. A maximum odometry error of 5.72% was recorded using internal estimation without external correction sensors. Energy autonomy ranged from 8 to 9 hours without additional load and from 3 to 5 hours with load, demonstrating the platform’s technical feasibility. Overall, the project offers a low-cost, open-architecture alternative for the development of industrial mobile systems, facilitating their integration into internal transport processes, operational support, and academic experimentation, thereby strengthening the adoption of technology and applied research in mobile robotics.

*Keywords:* mobile robotics, omnidirectional platform, structural modeling, passive suspension, embedded systems.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT.....	VII
CAPÍTULO I .....	15
1.1    Introducción .....	15
1.2    Problema .....	18
1.2.1    Formulación del problema.....	18
1.2.2    Delimitación del problema .....	21
1.3    Justificación.....	21
1.4    Objetivos .....	23
1.4.1    Objetivo General .....	23
1.4.2    Objetivos Específicos .....	23
CAPÍTULO II .....	25
2.1    Fundamentación teórica.....	25
2.1.1    Introducción a la robótica industrial .....	25
2.1.2    Automatización industrial y su relación con la robótica .....	28
2.1.3    Robots móviles autónomos y Plataformas Omnidireccionales .....	29
2.1.4    Fundamentos de la cinemática y control de robots móviles omnidireccionales ..	35
2.1.5    Fundamentos de la cinemática omnidireccional .....	36
2.1.6    Odometría en plataformas Omnidireccionales .....	38
2.1.7    Arquitectura de control.....	39
2.1.8    Componentes electrónicos principales de una plataforma móvil .....	41
CAPÍTULO III.....	52
3.1    Desarrollo metodológico .....	52
3.1.1    Enfoque de la investigación.....	52
3.2    Desarrollo de la propuesta .....	52
CAPÍTULO IV.....	58
4.1    Desarrollo del prototipo.....	58
4.2    Selección de hardware para el desarrollo de la plataforma móvil .....	58
4.3    Diseño 3D de la plataforma móvil omnidireccional .....	60
4.3.1    Diseño 3D de extremidades mecánicas.....	60
4.3.2    Diseño 3D del chasis principal .....	61
4.3.3    Diseño de acoples estructurales entre chasis y extremidades mecánicas.....	61
4.3.4    Diseño de uniones estructurales entre almas y soportes para los motores Pololu	62

4.3.5	Diseño de suspensión pasiva con eje diferencial.....	63
4.3.6	Diseño 3D de base principal para los módulos y batería.....	65
4.3.7	Ensamble general del esqueleto de la plataforma móvil .....	66
4.3.8	Diseño 3D de carcasas para las extremidades mecánicas.....	67
4.3.9	Diseño 3d de carcasas del chasis .....	68
4.4	Validación de interferencias y movimiento del diseño 3D .....	70
4.5	Simulación de esfuerzos al esqueleto mediante software ANSYS.....	71
4.5.1	Análisis de respuesta estructural bajo carga estática incremental (0-700 N).....	73
CAPÍTULO V .....		77
5.1	Construcción de la plataforma móvil omnidireccional .....	77
5.2	Fabricación de esqueleto de aluminio de la plataforma móvil .....	77
5.2.1	Fabricación de las almas estructurales de aluminio .....	77
5.2.2	Fabricación de unión de alma a suspensión y eslabón de articulación .....	78
5.2.3	Ensamble de extremidades mecánicas .....	79
5.2.4	Manufactura de chasis principal .....	80
5.2.5	Manufactura del sistema de suspensión .....	80
5.2.6	Ensamble del esqueleto de la plataforma móvil.....	81
5.3	Manufactura del sistema de carenado de la plataforma móvil .....	81
5.3.1	Manufactura del carenado de extremidades mecánicas.....	81
5.3.2	Manufactura de carenado del chasis principal .....	82
5.4	Integración electrónica de la plataforma móvil.....	83
5.4.1	Integración de la batería.....	83
5.4.2	Integración de la SBC de la plataforma móvil .....	83
5.4.3	Integración de los controladores de motores.....	84
5.4.4	Integración de acelerómetro y base para Arduino Nano .....	84
5.4.5	Esquema de conexiones y conexiones físicas .....	85
5.4.6	Implementación de luces LED.....	86
5.4.7	Implementación de sensor INA219.....	87
5.4.8	Ensamble final de la plataforma móvil .....	88
5.5	Implementación del software de control de la plataforma móvil .....	89
5.5.1	Arquitectura general del software de control .....	89
5.5.2	Comunicación serial entre ROS 2 y Arduino Nano .....	90
5.5.3	Implementación del control embebido en Arduino .....	91
5.5.4	Integración con ROS 2 .....	98
5.5.5	Consideraciones finales de la implementación .....	102
CAPITULO VI.....		103
6.1	Pruebas y análisis de resultados.....	103

6.2	Pruebas de control PI en las ruedas de la plataforma .....	103
6.2.1	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de control PI 1 .....	104
6.2.2	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de control PI 2 .....	104
6.3	Pruebas de odometría en trayectorias .....	105
6.3.1	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 1 .....	106
6.3.2	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 2 .....	107
6.3.3	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 3 .....	108
6.3.4	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 4 .....	109
6.3.5	Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 5 .....	110
6.4	Prueba y análisis de consumo energético y autonomía .....	111
6.4.1	Perfil dinámico de carga .....	111
6.4.2	Análisis de resultados obtenidos prueba de autonomía 1 .....	112
6.4.3	Análisis de resultados obtenidos prueba de autonomía 2 .....	113
6.4.4	Análisis de resultados obtenidos prueba de autonomía 3 .....	115
6.4.5	Análisis de resultados obtenidos prueba 4 .....	116
6.4.6	Estimación de eficiencia energética y autonomía operativa.....	117
6.5	Costo de componentes.....	118
6.6	Discusiones .....	120
CAPÍTULO VII .....		124
7.1	Conclusiones y Recomendaciones.....	124
7.1.1	Conclusiones .....	124
7.1.2	Recomendaciones.....	125
8.	..... Referencias	127
9.	..... Anexos (Programaciones, Diagramas, Análisis CFD, Planos, Artículo)	131

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Tipos de Microcontroladores más utilizados en el mercado .....	42
<b>Tabla 2</b> SBC más utilizadas en plataformas móviles .....	43
<b>Tabla 3</b> Tipos de encoders más utilizados en motores DC.....	44
<b>Tabla 4</b> Modelos MPU utilizados en robots móviles terrestres y aéreos.....	45
<b>Tabla 5</b> Drivers de motores comerciales.....	46
<b>Tabla 6</b> Tipos de motores comerciales. ....	47
<b>Tabla 7</b> Tipos de Baterías comerciales. ....	48
<b>Tabla 8</b> Reguladores de voltaje comerciales.....	49
<b>Tabla 9</b> Tipos de suspensión.....	50
<b>Tabla 10</b> Selección de hardware y arquitectura electrónica del prototipo omnidireccional. ....	58
<b>Tabla 11</b> Propiedades mecánicas y parámetros de plasticidad del Aluminio .....	72
<b>Tabla 12</b> Propiedades mecánicas y parámetros de plasticidad del Aluminio .....	72
<b>Tabla 13</b> Tabla comparativa de autonomía.....	118
<b>Tabla 14</b> Costo de los componentes utilizados en la construcción del prototipo .....	119
<b>Tabla 15</b> Análisis comparativo entre plataformas móviles educativas, de investigación e industriales .....	123

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Primer robot industrial Unimate.....	26
<b>Figura 2</b> Proceso industrial automatizado en el contexto de la Industria 4.0 .....	27
<b>Figura 3</b> Implementación de AMR en sistemas de paletización inteligente.....	27
<b>Figura 4</b> Proceso de transporte de productos de Ali Babá .....	28
<b>Figura 5</b> AMR para aplicaciones industriales.....	31
<b>Figura 6</b> Rueda Mecanum con rodillos a 45° .....	32
<b>Figura 7</b> Ruedas Omni .....	32
<b>Figura 8.</b> Robot Omnidireccional educativo.....	34
<b>Figura 9</b> Diagrama de fases de la metodología del proyecto .....	53
<b>Figura 10</b> Alma de aluminio de 2 mm para extremidades mecánicas. ....	61
<b>Figura 11</b> Chasis principal: (a) Pieza central del chasis; (b) Pieza lateral del chasis izquierda; (c) Pieza lateral del chasis derecha; (d) Ensamble chasis principal. ....	61
<b>Figura 12</b> Acoples estructurales: (a) Unión alma a suspensión; (b) Eslabón de articulación; (c) Ensamble de acoples y almas con chumaceras. ....	62
<b>Figura 13</b> Acoples: (a) Acople izquierdo; (b) Acople derecho; (c) Ensamble final; (d) Pasos de ensamble .....	63
<b>Figura 14</b> Piezas principales para suspensión: (a) Soporte de anclaje para chasis; (b) Barra diferencial. ....	64
<b>Figura 15</b> Ensamble: (a) Ensamble normal; (b) Respuesta del mecanismo diferencial ante una inclinación lateral de 10°; (c) Mecanismo diferencial a 0°. ....	64
<b>Figura 16</b> Base inferior: (a) Base inferior sin cubrimientos; (b) Base inferior con cubrimientos. ....	65
<b>Figura 17</b> Cubrimientos (a) Cubrimiento inferior de la base; (b) Cubrimiento superior de la base. ....	66
<b>Figura 18</b> Ensamble del diseño mecánico: (a) Ensamble piezas de aluminio de 2mm; (b) Ensamble piezas de aluminio y tapa inferior del chasis; (c) Pasos de ensamble. ....	66
<b>Figura 19</b> Cubiertas para extremidades mecánicas: (a) Cubierta interior con canales de enrutamiento y apertura para la suspensión; (b) Cubierta exterior de refuerzo; (c) Ensamble. ...	68
<b>Figura 20</b> Anclajes para carcasa: (a) Anclaje delantero; (b) Anclaje posterior; (c) Ensamble de anclajes; (d) Ensamble en plataforma móvil.....	68
<b>Figura 21</b> Esquema de integración de la carrocería modular: (a) Despiece de componentes frontales y laterales; (b) Despiece de componentes posteriores. ....	69
<b>Figura 22</b> Diseño final de la plataforma móvil: (a) Vista delantera); (b) Vista posterior. ....	70
<b>Figura 23</b> Comportamiento del sistema diferencial: (a) Respuesta del sistema de suspensión; (b) Medición de la elevación vertical máxima de la rueda.....	71
<b>Figura 24</b> Análisis cronológico de la respuesta estructural: (a) Relación de esfuerzo, deflexión y deformación unitaria bajo carga incremental; (b) Comparativa de la distribución de Deformación Total en estado de carga inicial a los 0.21s y carga crítica en 1s; (c) Comparativa de la distribución de Máximo Strain Elástico en estado de carga inicial a los 0.53s y carga crítica en 1s. ....	74
<b>Figura 25</b> Fabricación de alma de aluminio: (a) Ruteo en CNC; (b) Pieza obtenida después del corte; (c) Mecanizado CNC de bloques de unión; (d) Detalle del ensamblaje final mostrando la configuración de doble pared .....	78
<b>Figura 26</b> Proceso de conformado de piezas: (a) Corte CNC; (b) Plegadora manual de láminas utilizada; (c) Unión finalizada; (d); Eslabones de articulación finalizados. ....	79

<b>Figura 27</b> Sub-ensamble de extremidades mecánicas: (a) Integración de alma de aluminio, acoples, motorreductor y rueda mecanum; (b) Conexión de extremidades mediante eje de acero. ....	79
<b>Figura 28</b> Chasis principal de la plataforma .....	80
<b>Figura 29</b> Ensamble del sistema de suspensión pasivo.....	80
<b>Figura 30</b> Ensamble del esqueleto final.....	81
<b>Figura 31</b> Proceso de carenado de extremidades: (a) Impresión 3d de las carcasas en PLA; (b) Montaje sobre alma de aluminio; (c) Acabado de las extremidades protegidas.....	82
<b>Figura 32</b> Integración del carenado principal: (a) Proceso de impresión 3D; (b) Montaje de la cubierta superior sobre el chasis; (c) Ensamblaje general unificando cuerpo principal con el tren de rodaje.....	82
<b>Figura 33</b> Montaje de batería Li-Po.....	83
<b>Figura 34</b> Integración de la electrónica SBC .....	83
<b>Figura 35</b> Montaje de drivers: (a) Montaje de primer driver; (b) Montaje del segundo driver y el regulador de voltaje.....	84
<b>Figura 36</b> Integración de lectura de sensores y control de bajo nivel .....	85
<b>Figura 37</b> Diagrama esquemático de conexiones.....	85
<b>Figura 38</b> Implementación física del cableado. ....	86
<b>Figura 39</b> Sistema de iluminación integrado: (a) Provisión de luz frontal; (b) Modulo LED posterior. ....	87
<b>Figura 40</b> Diagrama de conexiones LED .....	87
<b>Figura 41</b> Esquema de conexión sensor INA219.....	88
<b>Figura 42</b> Prototipo final ensamblado .....	88
<b>Figura 43</b> Peso de la plataforma móvil omnidireccional .....	89
<b>Figura 44</b> Diagrama de bloques de la estructura de control embebido implementado en Arduino. ....	92
<b>Figura 45</b> Diagrama de bloques: Entrada de datos .....	93
<b>Figura 46</b> Diagrama de bloques Controlador PI .....	93
<b>Figura 47</b> Visualización en RViz del modelo URDF y sistema de referencias del robot móvil en ROS 2.....	99
<b>Figura 48</b> Diagrama de comunicación y flujo de tópicos ROS 2 del sistema de control y odometría del robot móvil. ....	102
<b>Figura 49</b> Análisis de transitorio y estado estacionario de la plataforma omnidireccional con un setpoint de 30 rad/s.....	104
<b>Figura 50</b> Evaluación de rechazo a perturbaciones del controlador PI ante variaciones abruptas de par resistente.....	105
<b>Figura 51</b> Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria lineal de 50 cm con rotación de 180°; (b) Distribución espacial del error de la trayectoria. ....	106
<b>Figura 52</b> Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria cuadrada holonómica de 500 mm por lado; (b) Distribución espacial del error de la trayectoria. ....	107
<b>Figura 53</b> Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria cuadrada de 500 mm con rotaciones de 90° en los vértices (b) Distribución espacial del error de la trayectoria. ....	108
<b>Figura 54</b> Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria triangular holonómica 500 mm por lado; (b) Distribución espacial del error de la trayectoria.....	110
<b>Figura 55</b> Evaluación de la odometría en trayectoria circular de 500 mm.....	111
<b>Figura 56</b> Perfil energético integral en condición de vacío: (a) Comparativa de estabilidad de voltaje; (b) Análisis dinámico de corriente.....	112
<b>Figura 57</b> Consumo de potencia por tipo de movimiento .....	113

<b>Figura 58</b> Perfil energético integral con carga útil de 2.4 kg: (a) Análisis de estabilidad de voltaje; (b) Análisis de la intensidad de corriente.....	114
<b>Figura 59</b> Consumo de potencia media .....	114
<b>Figura 60</b> Perfil energético integral con carga útil de 2.4 kg: (a) Análisis de estabilidad de voltaje; (b) Análisis de intensidad de corriente.....	115
<b>Figura 61</b> Comparativa de potencia media giro en eje.....	116
<b>Figura 62</b> Perfil energético integral con carga útil de 4.1 kg: (a) Análisis de estabilidad de voltaje; (b) Análisis de intensidad de corriente.....	117
<b>Figura 63</b> Comparativa de potencia media con carga 4.1 kg .....	117

# CAPÍTULO I

## 1.1 Introducción

La automatización industrial y la robótica móvil representan dos de los pilares tecnológicos más relevantes dentro de la cuarta revolución industrial (Industria 4.0), caracterizada por la integración de sistemas ciberfísicos, comunicación máquina-máquina y digitalización avanzada de procesos productivos. En este contexto, los robots móviles han adquirido un rol fundamental en aplicaciones de transporte interno, inspección, logística inteligente y manipulación distribuida, debido a su capacidad para desplazarse de manera autónoma dentro de entornos dinámicos y colaborativos (Siciliano & Khatib, 2008). La incorporación de robots móviles en la industria ha permitido incrementos significativos en productividad, trazabilidad, seguridad operativa y eficiencia energética, lo que los posiciona como una tecnología clave en estrategias de modernización industrial (Palčič & Prester, 2024).

Dentro del campo de la robótica móvil, las plataformas omnidireccionales se han consolidado como una solución versátil para aplicaciones que requieren maniobrabilidad extrema, movimientos precisos y trayectorias suaves en espacios reducidos. A diferencia de las configuraciones diferenciales o de tracción Ackermann, los robots omnidireccionales pueden desplazarse en cualquier dirección sin necesidad de realizar giros previos, lo que optimiza sus tiempos de respuesta y mejora su desempeño en tareas de inspección, manipulación colaborativa o navegación en entornos congestionados (Campion et al., 1993). Estas plataformas han demostrado mejoras en precisión de navegación en escenarios industriales gracias a su capacidad para ejecutar movimientos holonómicos y minimizar trayectorias redundantes (Ma et al., 2022).

La implementación de robots móviles en ambientes industriales y académicos, se ha visto fortalecida por el creciente uso de frameworks de desarrollo como Robot

Operating System (ROS 2), una plataforma software modular, distribuida y orientada a la robótica avanzada y a sistemas embebidos de propósito general. ROS 2 proporciona herramientas para comunicaciones en tiempo real, gestión de sensores, algoritmos de localización y control, así como la integración directa con hardware heterogéneo mediante middleware de comunicación basado en DDS. Esto facilita el desarrollo de arquitecturas escalables y robustas capaces de adaptarse a diferentes escenarios de automatización (Maruyama et al., 2016). Así, ROS 2 se ha convertido en el estándar académico e industrial para investigación en robótica móvil y automatización, debido a su portabilidad, interoperabilidad y soporte para experimentación en sistemas multiagente (Bonci et al., 2023).

En el ámbito educativo, las instituciones técnicas y universitarias requieren herramientas didácticas que permitan a los estudiantes comprender de manera aplicada los principios de control de movimiento, gestión de hardware, control de procesos industriales. Sin embargo, la adquisición de robots móviles industriales o plataformas comerciales representan un desafío económico significativo, especialmente en laboratorios académicos con presupuesto limitado. Esto ha impulsado el desarrollo de plataformas de bajo costo basadas en fabricación híbrida (CNC e impresión 3D), acompañadas de hardware modular y controladores abiertos que permiten una alta adaptabilidad a diferentes proyectos experimentales (Kim et al., 2021). Estas plataformas no solo facilitan el aprendizaje práctico, sino que fomentan la investigación aplicada y el fortalecimiento de capacidades técnicas en estudiantes y profesores.

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño y desarrollo de una plataforma móvil omnidireccional orientada a la robótica y automatización industrial, concebida como una herramienta didáctica para el laboratorio RobLab y para su uso en futuras investigaciones. El diseño estructural de la plataforma, se elaboró mediante

modelado 3D en software CAD, mientras que su fabricación combinó técnicas de corte CNC e impresión 3D, lo que permitió optimizar costos y mejorar la adaptabilidad del sistema. El robot incorpora una computadora de placa única dedicada a la gestión de hardware, junto con controladores para motores de corriente continua con encóder, configurando así un sistema de locomoción preciso y eficiente. El uso de ROS 2 como entorno de desarrollo permitió implementar una arquitectura modular, estable y abierta a la integración de sensores, algoritmos de navegación o sistemas de control avanzado.

En términos funcionales, el prototipo final es capaz de demostrar conceptos fundamentales de odometría, control de movimiento y navegación básica, contribuyendo al fortalecimiento de competencias prácticas en los estudiantes de electricidad, robótica y automatización. Además, la plataforma constituye una base experimental reutilizable para futuros proyectos vinculados a visión artificial, control autónomo o integración con redes industriales. De esta manera, el proyecto no solo aporta una herramienta académica de alto valor, sino que se alinea con las necesidades actuales de formación en tecnologías emergentes dentro de entorno industriales.

Finalmente, este proyecto se sustentó en el objetivo de fomentar la innovación tecnológica y el aprendizaje aplicado, promoviendo la creación de soluciones accesibles y funcionales que contribuyan al desarrollo de la automatización industrial y la robótica móvil en el contexto experimental y académico. Así, la plataforma móvil omnidireccional desarrollada durante esta investigación representa una propuesta viable para fortalecer la formación técnica y apoyar la experimentación en sistemas robóticos dentro de la institución.

## **1.2 Problema**

### **1.2.1 Formulación del problema**

La automatización industrial, se ha consolidado como un pilar fundamental en el desarrollo tecnológico contemporáneo, impulsada por la necesidad de incrementar la eficiencia, precisión y seguridad en los procesos productivos, según (Quinteros et al., 2022), el uso de robots en tareas como paletización, ensamble, transporte interno, inspección y mantenimiento ha permitido optimizar los ciclos operativos, disminuir la intervención humana en actividades de riesgo y mejorar la calidad total de los procesos.

Dentro de este contexto, los robots móviles se han convertido en una tecnología estratégica debido a su capacidad para desplazarse en distintos entornos, adaptarse a superficies complejas y ejecutar tareas autónomas en zonas de difícil acceso, aportando versatilidad y seguridad en entornos industriales (Moctezuma Gutiérrez et al., 2018).

Sin embargo, la incorporación de tecnologías robóticas avanzadas enfrenta barreras estructurales importantes, especialmente en instituciones educativas y en pequeñas y medianas industrias. Uno de los principales desafíos es el elevado costo de adquisición de plataformas robóticas comerciales, cuyos valores pueden superar ampliamente los presupuestos institucionales. De acuerdo con Redondo Polo (2024), la robótica educativa en Latinoamérica evidencia una brecha significativa entre la disponibilidad de kits robóticos y las necesidades formativas reales, señalando que su alto costo limita su implementación incluso en universidades, restringiendo el acceso de los estudiantes a experiencias prácticas esenciales para la información en control automático, programación y automatización.

A este problema se suman los costos asociados al mantenimiento, las licencias de software especializado y la infraestructura necesaria para operar robots industriales modernos.

Estudios recientes demuestran que la inversión en hardware, software y soporte técnico constituye una barrera crítica para instituciones académicas con recursos limitados, reduciendo la formación práctica en áreas clave para la Industria 4.0 (Gabutero & Galigao, 2025). Esta falta de exposición práctica afecta tanto a la formación profesional como a la capacidad de las industrias locales para incorporar tecnologías avanzadas, generando una brecha entre el avance tecnológico global y las condiciones reales de los entornos educativos y productivos regionales (Abidin et al., 2021).

Desde el punto de vista técnico, las plataformas robóticas convencionales presentan limitaciones en movilidad y estabilidad cuando operan en superficies irregulares, entornos estrechos o zonas con obstáculos. Ishigami et al. (2015) evidencian que ciertos robots con tracción diferencial o configuraciones rígidas pierden estabilidad en desplazamientos sobre superficies no niveladas, afectando su desempeño y restringiendo su aplicación en tareas industriales críticas. Además, la ausencia de plataformas móviles multifuncionales que integren capacidades de suspensión, locomoción omnidireccional y soporte de carga limita su utilidad en ámbitos como transporte interno, inspección remota y manipulación colaborativa (Lee et al., 2024).

A pesar de estas limitaciones, múltiples investigaciones han demostrado la viabilidad de desarrollar soluciones educativas y prototipos de bajo costo orientados a la robótica móvil. En Ecuador, Burgos González & Henry Esteban (2020) mostraron que es posible construir robots educativos desmontables utilizando materiales accesibles sin comprometer su funcionamiento. En la misma línea, Chivarov et al. (2025) desarrollaron una plataforma omnidireccional equipada con un brazo robótico, ampliando sus

capacidades de manipulación para entornos académicos e industriales. Por otro lado, Gupta et al. (2025) diseñaron un sistema de reconocimiento y mapeo ambiental, logrando una precisión del 92.7% en la reconstrucción de entornos complejos, demostrando el potencial de plataformas de exploración autónoma. En el ámbito educativo, Ventre et al. (2020) desarrollaron un robot paralelo programable para experimentos de laboratorio, facilitando la enseñanza de conceptos de cinemática y control. Asimismo, Watanabe et al. (2018) implementaron una plataforma omnidireccional con suspensión Rocker-Bogie para mejorar la estabilidad en terrenos irregulares, y Fara et al. (2025) analizaron diversos sistemas de seguimiento humano para interacción robot-humano en plataformas móviles.

A partir de la evidencia revisada, se identifica la necesidad de contar con plataformas móviles educativas, robustas, accesibles y orientadas a la automatización industrial, que integren movimiento omnidireccional, estabilidad en terreno irregular y capacidad de carga, permitiendo su uso tanto en investigación académica como en prácticas de laboratorio. La ausencia de estas herramientas limita la formación de estudiantes en robótica móvil, control, ROS 2 y sistemas embebidos, además de reducir la capacidad institucional de desarrollar proyectos alineados con los principios de la Industria 4.0.

En este sentido, surge la necesidad de diseñar y construir una plataforma móvil que:

- Integre locomoción omnidireccional mediante ruedas Mecanum
- Incorpore un sistema de suspensión pasiva con eje diferencial para hacerla todo terreno
- Permita la futura integración de un proceso industrial en su plataforma

- Sea fabricada con materiales de bajo costo como aluminio y piezas impresas en 3D
- Opere con ROS 2 como framework principal de control y comunicación.

### **1.2.2 Delimitación del problema**

Este proyecto de titulación planteó el diseño y la construcción de una plataforma móvil omnidireccional orientada a aplicaciones académicas e industriales, destinada al laboratorio RobLab de la Universidad Católica de Cuenca. Para ello, se desarrolló una estructura mecánica fabricada mediante corte CNC e impresión 3D, empleando láminas de aluminio de 2 mm de espesor y componentes modulares que permitieron un montaje preciso y un mantenimiento accesible.

La plataforma integra un sistema de locomoción omnidireccional mediante ruedas Mecanum, cuya configuración permitió desplazamientos en múltiples direcciones sin necesidad de maniobras de giro. Adicionalmente, se incorporó un mecanismo de suspensión pasiva con eje diferencial, inspirando en diseños utilizados en plataformas Rover, con el fin de mejorar la estabilidad del sistema ante superficies irregulares y desniveles moderados.

En este sentido, la delimitación del proyecto se centró en la fabricación, ensamble y validación funcional de un prototipo móvil educativo, orientado a fortalecer el aprendizaje práctico en robótica y automatización industrial dentro del laboratorio, sin abordar aplicaciones industriales en planta real o condiciones de campo externo.

### **1.3 Justificación**

Ecuador se encuentra en un proceso de fortalecimiento de la innovación tecnológica y modernización de los sectores productivos, alineado con los lineamientos

establecidos en la Ley de Fomento, Innovación y Transferencia de Tecnología (LOFIT) y en las políticas nacionales para la transformación digital.

La Agenda de Transformación Digital del Ecuador 2022-2025 enfatiza la importancia de impulsar tecnologías avanzadas como la automatización, los sistemas inteligentes y la robótica para mejorar la competitividad industrial y fortalecer la productividad nacional (Paúl Meza et al., 2022).

De igual manera, el Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca señala que la adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 (como sensores inteligentes, digitalización de procesos, robótica colaborativa y sistemas ciberfísicos) es fundamental para incrementar la eficiencia y reducir brechas tecnológicas en el sector productivo ecuatoriano (ITahora, 2022). Estas iniciativas respaldan la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones tecnológicas que fortalezcan la innovación y fomenten prácticas industriales más seguras y eficientes.

Por otra parte, la automatización industrial demanda cada vez más profesionales capacitados en tecnologías robóticas capaces de operar en entornos dinámicos, realizar desplazamientos precisos y adaptarse a condiciones de terreno variables. Sin embargo, las plataformas robóticas convencionales presentan limitaciones de movilidad, estabilidad o flexibilidad, lo que dificulta su aplicación en actividades de inspección, transporte interno y manipulación colaborativa (Ishigami et al., 2015; Lee et al., (2024). Ante este escenario el desarrollo de una plataforma móvil omnidireccional, accesible y adaptable, constituye una solución estratégica tanto para la academia como para entornos preindustriales.

Este proyecto contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas locales, promoviendo la investigación aplicada en el país y fortaleciendo la autonomía tecnológica

de las instituciones educativas. La posibilidad de que la plataforma escale a futuras implementaciones, como la integración de brazos robóticos o sistemas avanzados de navegación, amplía su valor formativo y su potencial uso como base para tesis, proyectos de investigación y actividades colaborativas entre estudiantes y docentes. Finalmente, la construcción de esta plataforma móvil omnidireccional permitirá generar un impacto directo en la calidad de la formación profesional, incrementando las oportunidades de aprendizaje práctico, fortaleciendo el desarrollo de competencias técnicas en robótica, y contribuyendo a que la academia responda de manera efectiva a los requerimientos actuales de la Industria 4.0. Por tanto, el desarrollo de este proyecto se justifica plenamente tanto en su pertenencia tecnológica como en su relevancia educativa para el fortalecimiento del capital humano en el país.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar una plataforma móvil con capacidad de movimiento omnidireccional y superación de obstáculos, mediante modelado 3D y fabricación de componentes por corte CNC e impresión 3D, incorporando control a través del framework ROS 2, para la obtención de un prototipo robótico y de automatización funcional escalable a futuros proyectos de investigación y desarrollo en el laboratorio de RobLab.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar la estructura y carrocería de la plataforma móvil mediante modelado 3D, simulación, y prototipado asegurando una integración adecuada de sus componentes garantizando la resistencia estructural necesaria que requiere el prototipo.

- Analizar los esfuerzos mecánicos, mediante software especializado y simulación 3D, para la optimización del diseño estructural y de la resistencia del prototipo ante cargas previstas.
- Construir la plataforma móvil mediante integración de componentes de hardware, software, sistemas de control y comunicación para la obtención de un prototipo funcional totalmente operativo bajo el entorno de ROS 2.
- Evaluar el desempeño de la plataforma móvil mediante la ejecución de pruebas de laboratorio, verificando su correcto funcionamiento y validación de la integración de los sistemas mecánicos, electrónicos y de control.

## CAPÍTULO II

### 2.1 Fundamentación teórica

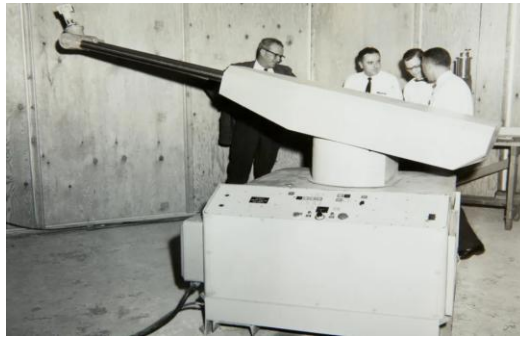
La arquitectura y el desarrollo de sistemas robóticos avanzados han evolucionado hacia la búsqueda de una movilidad superior que permita la navegación en entornos complejos y restringidos. En este contexto, la robótica holonómica surge como una solución disruptiva frente a los sistemas tradicionales de tracción diferencial, al ofrecer una libertad de movimiento omnidireccional.

El presente apartado establece las bases teóricas necesarias para comprender la construcción y operación de un robot holonómico. Para ello, se abordarán los principios de la cinemática omnidireccional, las características mecánicas de las ruedas especializadas (Mecanum u Omni) y los modelos matemáticos que permiten traducir vectores de movimiento en velocidades angulares independientes. Esta fundamentación teórica constituye el marco de referencia esencial para el diseño del sistema de control y la posterior implementación física del prototipo, garantizando que el desplazamiento del robot sea una respuesta precisa a las exigencias de maniobrabilidad del proyecto.

#### 2.1.1 Introducción a la robótica industrial

La robótica industrial se ha consolidado como un eje matriz de la manufactura avanzada y la automatización moderna. Desde la integración del Unimate en la década de 1960 desarrollado por Devol y Engelberger, (ver **Figura 1**) la disciplina ha evolucionado de manipuladores programables básicos hacia sistemas complejos de alta precisión. De acuerdo con Urrea & Kern (2025), los primeros sistemas robóticos, como el *Unimate*, marcaron el inicio de una revolución tecnológica en la manufactura moderna, estableciendo las bases para el desarrollo de manipuladores programables y precisos.

**Figura 1** Primer robot industrial Unimate

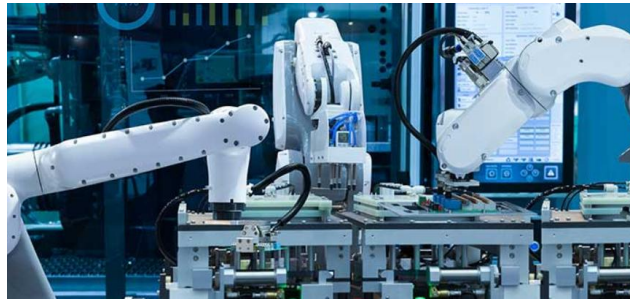


**Nota.** Imagen tomada de (Pantano Allison, 2022).

En la actualidad, los robots industriales no solo ejecutan movimientos predefinidos, sino que integran sistemas de percepción, control inteligente y comunicación, permitiendo una integración más eficiente con su entorno. Gracias a la incorporación de sensores de visión, fuerza y proximidad, los robots son capaces de adaptarse dinámicamente a variaciones del proceso y corregir desviaciones en tiempo real (Urrea & Kern, 2025). Según otro estudio reciente, la robotización industrial también comienza a centrarse en la eficiencia energética y la sostenibilidad, integrando el análisis de consumo, optimización de trayectorias y el impacto macroeconómico de estas tecnologías (Buri & T. Kiss, 2025).

Como se puede ver en la **Figura 2**, la robótica industrial ha experimentado una transición hacia sistemas inteligentes, interconectados y colaborativos adaptados a la Industria 4.0. La integración de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático y los sistemas ciberfísicos (CPS) ha dado origen a entornos de producción flexibles, donde los robots son capaces de comunicarse entre sí, optimizando los flujos de trabajo y la eficiencia energética (Urrea & Kern, 2025).

**Figura 2** Proceso industrial automatizado en el contexto de la Industria 4.0



**Nota.** Imagen tomada de (Redacción Futuro Eléctrico, 2023).

Un aspecto relevante en la evolución reciente de la robótica industrial es el surgimiento de los robots móviles autónomos (AMR), los cuales pueden desplazarse de manera independiente dentro de entornos de manufactura. Estos sistemas combinan movilidad, navegación autónoma y control inteligente, permitiendo el transporte de materiales o la ejecución de tareas logísticas sin la necesidad de intervención humana. Este tipo de tecnología se encuentra directamente relacionada con el desarrollo de plataformas móviles omnidireccionales, como la que se propone en este proyecto, que buscan mejorar la flexibilidad operativa en los laboratorios de robótica y entornos industriales de pequeña escala (ver **Figura 3**).

**Figura 3** Implementación de AMR en sistemas de paletización inteligente



**Nota.** Imagen adaptada de (CADE cobots, 2023).

En síntesis, la robótica industrial ha pasado de ser una herramienta auxiliar en la manufactura a convertirse en un elemento estratégico para la competitividad y sostenibilidad de la industria moderna. Su evolución continúa orientándose hacia sistemas

autónomos, adaptativos y colaborativos, donde la combinación de control inteligente y movilidad representan el siguiente paso hacia una automatización total y eficiente.

### 2.1.2 Automatización industrial y su relación con la robótica

La automatización industrial puede definirse como el uso de sistemas de control, sensores, actuadores y software para gestionar y ejecutar operaciones de maquinaria o procesos productivos sin, o con mínima, intervención humana. En este contexto la robótica industrial emerge como un componente clave ya que se puede incorporar manipuladores o plataformas robóticas programables que ejecutan tareas repetitivas, peligrosas o que exigen alta precisión, como se puede observar en la **Figura 4**, ofreciendo ventajas sustanciales en términos de eficiencia, calidad y seguridad. Según Campilho & Silva (2023), la integración de automatización y robótica ha revolucionado los procesos industriales, haciéndolos más eficientes, precisos y flexibles (refiriéndose al contexto de manufactura inteligente). De hecho, la revisión que presentan subraya como los procesos automatizados acompañados por robótica permiten una productividad continua, reducción de errores y adaptabilidad ante cambios de modelo de producción (Campilho & Silva, 2023).

**Figura 4** Proceso de transporte de productos de Ali Babá



**Nota.** Imagen adaptada de (Adrián Perera, 2020).

La relación entre automatización y robótica se hace aún más estrecha con el advenimiento del paradigma Industria 4.0, donde tecnologías como el IoT, los sistemas

ciber físicos, el análisis de datos y la inteligencia artificial se integran para crear fábricas inteligentes. Por ejemplo, el artículo de Patrício et al. (2025) proponen un marco para la integración de Automatización de Procesos Robóticos (RPA) y IA en el contexto de la Industria 5.0, enfatizando la necesidad de colaboración humano-maquina, interoperabilidad y sostenibilidad. Desde la perspectiva de los pilotos industriales, Alonso et al. (2025a) exponen que las “pilot lines” orientadas a automatización y robótica son ya un componente esencial para validar tecnologías dentro de la transición hacia la industria 5.0, donde la flexibilidad, la adaptabilidad y la integración humano-maquina toman protagonismo.

Para el presente proyecto de plataforma móvil omnidireccional, esta relación entre automatización y robótica es fundamental ya que la automatización propone el marco global para el control, los sensores y los procesos repetitivos, mientras que la robótica aporta movilidad, adaptabilidad al entorno y capacidad de interacción, permitiendo un sistema modular, dinámico y flexible, distinto a las estaciones tradicionales fijas.

En resumen, la automatización industrial y la robótica constituyen un binomio inseparable en la manufactura moderna, la automatización define el “que” (procesos, tareas, eficiencia), mientras que la robótica define el “como” (movimiento, programación, adaptabilidad). Juntas habilitan la transformación hacia sistemas productivos más inteligentes, seguros y competitivos.

### **2.1.3 Robots móviles autónomos y Plataformas Omnidireccionales**

#### **2.1.3.1 Robots Móviles Autónomos (AMR)**

Los AMR representan una evolución en la robótica industrial al prescindir de guías físicas fijas para su desplazamiento. A diferencia de los vehículos de guiado automático (AGV), los AMR integran una arquitectura de navegación inteligente basada

en la fusión de sensores como LiDAR, cámaras y ultrasonido que les permite realizar una toma de decisiones descentralizada. Según Fragapane et al., (2021), esta capacidad de procesar mapas del entorno y planificar rutas de forma dinámica en tiempo real facilita la evasión de obstáculos imprevistos y la optimización de trayectorias. En consecuencia, estos sistemas ofrecen una flexibilidad operativa superior en entornos industriales dinámicos y no estructurados (ver **Figura 3**).

Los AMR se están introduciendo aceleradamente en operaciones intralogísticas de fábricas, almacenes y centros de distribución. Sus tareas típicas incluyen el transporte de materiales, suministro de piezas a líneas de montaje, movimiento de productos en almacenes (similar a los robots de almacén de Amazon) y entregas internas en hospitales. Por ejemplo, en entornos de manufactura y bodegas, un AMR puede recoger autónomamente un contenedor de piezas en un almacén y llevarlo hasta un puesto de ensamblaje, esquivando a personal y montacargas en el camino (ver **Figura 5**). Un caso concreto es el modelo MiR100 de la empresa Mobile Industrial Robots, capaz de transportar hasta 100 kg, este robot utiliza sensores laser de 360° y cámaras 3D para moverse con seguridad por la fábrica, navegando desde un punto de origen hasta distintos destinos de manera autónoma (Hercik et al., 2022). Gracias a esta inteligencia a bordo, los AMR no requieren infraestructura dedicada (como cintas magnéticas en el suelo), lo que reduce costos de implementación y permite reconfigurar sus rutas fácilmente mediante software. Los AMR ya operan en fábricas inteligentes, almacenes, puertos y hasta entornos sanitarios, colaborando con trabajadores humanos en tareas de entrega de materiales y mercancías (Fragapane et al., 2021).

**Figura 5** AMR para aplicaciones industriales



**Nota.** Imagen adaptada de (Robotnik, 2021)

### 2.1.3.2 Plataformas móviles omnidireccionales

Las plataformas móviles omnidireccionales son robots móviles cuya base locomotora está diseñada para moverse en cualquier dirección del plano de forma independiente de su orientación. A diferencia de un robot diferencial convencional (que posee ruedas fijas y debe girar el cuerpo para cambiar de dirección), una plataforma omnidireccional puede trasladarse lateralmente, diagonalmente o rotar sobre si misma simultáneamente, sin restricciones aparentes. Este comportamiento se logra mediante el uso de ruedas especiales, principalmente de dos tipos:

- **Ruedas Mecanum:** Como se observa en la **Figura 6** consisten en ruedas con una serie de rodillos periféricos montados en ángulo típicamente a  $45^\circ$  respecto al plano de la rueda (W. Wang et al., 2025). Al utilizar cuatro ruedas Mecanum en la base (cada una con rodillos orientados alternadamente), la combinación de sus velocidades de giro genera fuerzas resultantes en cualquier dirección deseada. Esto permite que el robot efectúe movimientos laterales (de “traslación pura” hacia la izquierda o derecha) y rotacionales combinados de manera ágil, sin necesidad de girar primero la estructura completa de la base. En otras palabras, las ruedas Mecanum dotan al vehículo de movimiento plano con 3 grados de libertad

decoplados (que puede avanzar/retroceder, desplazarse de lado y girar, todo de forma independiente. (W. Wang et al., 2025).

**Figura 6** Rueda Mecanum con rodillos a 45°



**Nota.** Imagen tomada de (RoboCT, 2025)

- Ruedas omnidireccionales (omni): Son similares en concepto, pero los rodillos libres están dispuestos de forma perpendicular al plano de la rueda (90°). Se suelen emplear tres o cuatro ruedas omni colocadas a 120°, cada una puede lograr omnidireccionalidad completa (ver **Figura 7**). Los rodillos permiten que las ruedas se deslicen lateralmente, de modo que, al controlar sus velocidades relativas, el robot logra cualquier vector de movimiento en el plano.

**Figura 7** Ruedas Omni



**Nota.** Imagen tomada de (Luis Lamas, 2018)

La principal ventaja de un robot omnidireccional radica en su elevada maniobrabilidad, ya que, a diferencia de un robot de tracción diferencial que requiere

realizar giros o maniobras de reorientación para cambiar de dirección, puede desplazarse en cualquier sentido mientras modifica simultáneamente su orientación. Esta capacidad resulta especialmente útil en espacios reducidos o congestionados, donde puede moverse lateralmente para esquivar obstáculos o alinearse con un objetivo sin ejecutar maniobras complejas. Además, facilita acoplamientos precisos a estaciones de trabajo al permitir ajustes en los ejes X-Y sin alterar su orientación frontal. En conjunto, su movilidad holonómica le otorga mayor rapidez y flexibilidad operativa en entornos complejos (Mohd Salih et al., 2006).

Para lograr movimientos omnidireccionales, estas plataformas regulan con precisión la velocidad de cada rueda en función de vectores de desplazamiento. En configuraciones con cuatro ruedas Mecanum, la combinación adecuada de giros permite generar movimientos longitudinales, laterales o rotaciones puras, mediante un modelo cinemático que calcula las velocidades individuales según la velocidad deseada en los ejes X, Y en rotación (W. Wang et al., 2025). Aunque este diseño ofrece movilidad total, también introduce desafíos de control, como deslizamientos y dinámicas más complejas que requieren modelado y compensación adecuados. No obstante, diversos desarrollos han validado su funcionamiento incluso bajo cargas elevadas, incluyendo plataformas de seis ruedas Mecanum que incrementan la capacidad de carga sin perder omnidireccionalidad, empleadas en aplicaciones de manufactura pesada (Tian et al., 2017).

La versatilidad de las plataformas omnidireccionales ha impulsado su adopción en diversos ámbitos. En logística industrial, se emplean en robots de almacén y transporte interno que deben maniobrar en espacios reducidos, un ejemplo es la plataforma KUKA KMR iiwa, que integra un robot colaborativo sobre una base con ruedas Mecanum, combinando movilidad y manipulación con gran libertad en entornos fabriles (Li et al.,

2023). En robótica de servicios, esta capacidad permite desplazamientos precisos en hospitales, museos o viviendas, facilitando interacciones fluidas y movimientos laterales en espacios estrechos, como en sillas de ruedas o asistentes móviles (Mohd Salih et al., 2006). Asimismo, en el ámbito educativo e investigativo (ver **Figura 8**), estas bases son ampliamente utilizadas para experimentar con control holonómico y cooperación multi-robot, destacando desarrollos accesibles orientados a la enseñanza (Kassawat et al. 2022)

Además de su maniobrabilidad, estas plataformas incrementan la productividad al reducir tiempos de posicionamiento y desplazamiento, por ejemplo, pueden alinearse lateralmente a una carga en un solo movimiento, optimizando procesos industriales. No obstante, implican mayor complejidad mecánica y exigencias de control, lo que puede elevar costos y mantenimiento. A pesar de ello, su flexibilidad ha favorecido una adopción creciente en entornos donde la movilidad omnidireccional mejora significativamente el flujo de trabajo, consolidándose como una evolución relevante en robótica móvil aplicada a la industria, los servicios y la educación (Mohd Salih et al., 2006).

**Figura 8.** Robot Omnidireccional educativo.



**Nota.** Imagen tomada de (RDA, 2025)

## 2.1.4 Fundamentos de la cinemática y control de robots móviles omnidireccionales

La robótica móvil ha experimentado una transformación significativa con el desarrollo de plataformas omnidireccionales. La omnidireccionalidad, se define como la característica que permite a un sistema móvil moverse en cualquier dirección, desde cualquier orientación, sin necesidad de maniobras de reorientación previas. Esta capacidad, un atributo de los sistemas holónomos, representa la principal ventaja operativa de estos robots (Gao et al., 2014).

A diferencia de los robots no holónomicos, que tienen restricciones en su movilidad (no pueden moverse lateralmente), los robots omnidireccionales desacoplan la traslación de la rotación. El movimiento de un robot móvil omnidireccional se define mediante un comando de movimiento objetivo, comúnmente expresado como un vector de velocidad en el marco del robot, como se ve en la ecuación (1).

$$\mathbf{M} = (\mathbf{v}, \alpha, \omega) \quad (1)$$

donde:

- $v$  representa el módulo de la velocidad de traslación.
- $\alpha$  es la orientación angular de dicha velocidad de traslación.
- $\omega$  es la velocidad angular del propio robot (su tasa de giro sobre su eje vertical).

La capacidad de gestionar estos tres grados de libertad de forma simultánea en el plano es lo que habilita maniobras complejas. Esta ventaja es crítica en aplicaciones industriales, como la logística, o en entornos peligrosos, donde la capacidad de maniobrar en espacios confinados sin alterar la orientación de la plataforma es fundamental para la eficiencia y la seguridad de la tarea (Pagala et al., 2014).

### 2.1.5 Fundamentos de la cinemática omnidireccional

La cinemática describe el movimiento del robot sin considerar las fuerzas que lo causan. Para un robot móvil, el análisis cinemático se divide en dos problemas complementarios y esenciales, el problema cinemático inverso (IK) y el problema cinemático directo (FK).

- Cinemática Inversa (IK): Este es el problema fundamental para el control del robot. Consiste en determinar las velocidades angulares  $\omega_\kappa$  que deben aplicarse a cada rueda activa  $\kappa$  para lograr el comando de movimiento deseado del robot  $M = (v, \alpha, \omega)$ . En esencia, traduce un objetivo de movimiento de alto nivel.
- Cinemática Directa (FK): Este es el problema inverso, fundamental para la navegación y la odometría. Dadas las velocidades angulares de las ruedas (medidas, por ejemplo, mediante codificadores o encoders), el modelo de FK calcula la velocidad resultante del robot  $(v, \alpha, \omega)$ .

Un análisis clave de estos modelos para ambas configuraciones de ruedas (omni y Mecanum) se presenta en el trabajo de Palacín et al. (2023), que sirve como referencia principal para los siguientes modelos matemáticos.

#### 2.1.5.1 Modelo de cinemática inversa para 4 ruedas Mecanum

Para una plataforma móvil omnidireccional con cuatro ruedas Mecanum, como el robot OSOYOO (ver **Figura 8**), la cinemática inversa permite establecer una relación directa entre las velocidades del cuerpo del robot, expresadas en su marco de referencia local, y las velocidades angulares requeridas en cada una de las ruedas. Este modelo resulta fundamental para transformar los comandos de movimiento deseados en señales de control para los actuadores.

De acuerdo con el modelo general de cinemática inversa para plataformas Mecanum presentado por Palacín et al. (2023), es posible definir una relación matricial entre el vector de velocidades del robot y el vector de velocidades angulares de las ruedas a partir de la geometría de la plataforma y la orientación de los rodillos. Para el caso particular de plataformas Mecanum simétricas, con ruedas de igual radio y ángulos de rodillo de  $45^\circ$ , dicho modelo puede simplificarse adoptando una formulación estándar ampliamente utilizada en la literatura sobre robots móviles omnidireccionales.

Bajo estas consideraciones, la relación de cinemática inversa se expresa en la ecuación (2).

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\mathbf{1} & -(L_x + L_y) \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & (L_x + L_y) \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & -(L_x + L_y) \\ \mathbf{1} & -\mathbf{1} & (L_x + L_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde:

- $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  representan las velocidades angulares de las ruedas Mecanum.
- $v_x$  y  $v_y$  corresponden a las velocidades lineales del robot en los ejes longitudinal y transversal de su marco de referencia local.
- $r_w$  es el radio de las ruedas
- $L_x$  y  $L_y$  representan las distancias desde el centro geométrico del robot hasta las ruedas en los ejes longitudinal y trasversal, respectivamente.

Esta formulación simplificada asume una distribución geométrica uniforme de las ruedas y una configuración ideal de los rodillos, condiciones que se cumplen en plataformas móviles comerciales como el robot OSOYOO. Gracias a estas hipótesis, la

cinemática inversa puede representarse mediante una matriz compacta que facilita el análisis y el diseño de estrategias de control para movimientos omnidireccionales.

Adicionalmente, la relación cinemática directa, utilizada para estimar la velocidad del robot a partir de las velocidades angulares de las ruedas, se expresa en la ecuación (3).

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} = \frac{r_w}{4} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ -\mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & -\mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ -\frac{\mathbf{1}}{(L_x + L_y)} & \frac{\mathbf{1}}{(L_x + L_y)} & -\frac{\mathbf{1}}{(L_x + L_y)} & \frac{\mathbf{1}}{(L_x + L_y)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Este modelo permite tanto el cálculo de las velocidades de las ruedas a partir de un comando de movimiento deseado como la estimación del movimiento real del robot.

### 2.1.6 Odometría en plataformas Omnidireccionales

La estimación robusta de la pose (posición y orientación de un robot dentro de su entorno) constituye un requisito fundamental e ineludible para habilitar cualquier capacidad autónoma avanzada (Tata et al., 2025). Funcionalidades clave como la localización, el mapeo, el control de movimiento y la navegación autónomo dependen intrínsecamente de la capacidad del robot para conocer su estado (pose) en todo momento. Dentro de este contexto, la odometría se define como el proceso de estimar el cambio de pose a lo largo del tiempo (Yang et al., 2022). Tradicionalmente, la odometría de ruedas ha sido el método principal, que infiere el movimiento del robot integrando las velocidades angulares de sus ruedas, medidas comúnmente mediante encoders. Sin embargo, este enfoque se basa en un supuesto fundamental que resulta ser su principal debilidad, la hipótesis de un contacto ideal de “rodadura sin deslizamiento” entre las ruedas y el suelo.

Si bien la odometría es simple e inercialmente no depende de fuentes externas y puede ejecutarse en tiempo real, tiene desventajas significativas, en particular, la acumulación ilimitada de errores con el tiempo. Los pequeños errores en la medición de

la rotación de las ruedas se integran continuamente, por lo que la incertidumbre en la pose crece sin acotación a medida que el robot recorre mayores distancias. Borenstein & Feng, (1996) señalaban que la odometría, por si sola, deriva a errores inaceptablemente grandes después de apenas unos metros de recorrido si no se corrige.

En resumen, la odometría proporciona una solución de localización incremental útil a corto plazo, pero su error crece sin límite a largo plazo. Por esta razón, es arriesgado depender únicamente de odometría para navegación precisa. Típicamente se requieren mecanismos de calibración y corrección de errores u otras técnicas complementarias para mantener la precisión.

### **2.1.7 Arquitectura de control**

La arquitectura de control en una plataforma móvil autónoma define la organización de sus sistemas de procesamiento, sensado, actuación y comunicación. Esta arquitectura integra tanto el hardware (componentes electrónicos) como el software que permite interpretar el entorno, tomar decisiones y ejecutar acciones físicas. En el contexto de plataformas móviles omnidireccionales, la arquitectura debe ser capaz de gestionar múltiples motores en tiempo real, integrar sensores para la navegación autónoma y ejecutar algoritmos de planificación y control distribuidos, preferentemente bajo entornos de software como ROS 2.

#### **2.1.7.1 Estructura general del sistema de control**

Una arquitectura de control moderna se compone generalmente de tres niveles funcionales:

- Nivel bajo (control físico o de hardware): Encargado de tareas de tiempo real como el control de motores (mediante PWM o señales de dirección),

adquisición de datos de sensores de baja latencia (como encoders o IMU) y activación de dispositivos periféricos.

- Nivel intermedio (procesamiento local): Aquí se realiza la interpretación de datos sensoriales, odometría, comunicación entre dispositivos y control cinemático del chasis. Este nivel es ejecutado por microprocesadores más potentes o computadoras embebidas (Raspberry Pi, Jetson Nano), capaces de manejar múltiples tareas simultáneamente.
- Nivel alto (planificación y decisión): En este nivel residen los algoritmos de navegación autónoma, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), detección de obstáculos y lógica de comportamiento, Puede estar soportado por sistema de cómputo más robustos (mini PC o computadoras industriales) y suele implementarse mediante entornos como ROS 2, que permite una arquitectura distribuida y modular, con nodos independientes para cada función.

### **2.1.7.2 Arquitectura distribuida basada en ROS 2**

ROS 2 (Robot Operating System 2) es un entorno de middleware robótico orientado a sistemas distribuidos y tiempo real, ampliamente adoptado en plataformas móviles por su escalabilidad y modularidad. En esta arquitectura, cada función del robot (como la lectura de un sensor o el control de un motor) se implementa como un nodo independiente que se comunica con otros nodos mediante tópicos y servicios.

En plataformas móviles omnidireccionales, ROS 2 permite gestionar simultáneamente la cinemática inversa, planificación de trayectorias, mapeo, control de velocidad de cada rueda, y procesamiento de sensores de navegación. Su compatibilidad con microcontroladores a través de micro-ROS permite trasladar parte del procesamiento

a los niveles más cercanos al hardware, reduciendo latencias y mejorando la eficiencia global del sistema

La arquitectura basada en ROS 2 no solo mejora modularidad y el mantenimiento del sistema, sino que facilita la incorporación de algoritmos avanzados de IA y visión computacional, elementos clave en las plataformas móviles de la Industria 4.0

### **2.1.8 Componentes electrónicos principales de una plataforma móvil**



A continuación, se describen los componentes electrónicos comunes en el mercado para una plataforma móvil:

#### **2.1.8.1 Microcontroladores**

En la arquitectura de los AMR, los microcontroladores cumplen la función de controladores de tiempo real para la gestión de tareas de bajo nivel de forma determinista. A diferencia de los sistemas operativos de propósito general, estos dispositivos permiten la ejecución de firmware bare-metal o sistemas RTOS, garantizando latencias mínimas en la captura de datos sensoriales (encoders e IMU) y el control de actuadores (PWM y lazos PID). De acuerdo con Z. Wang et al., 2024, esta estructura permite una división eficiente del trabajo, el microcontrolador resuelve tareas periódicas de alta frecuencia, mientras que las unidades de procesamiento superior (como Raspberry Pi o Jetson) se dedican a algoritmos computacionalmente intensivos. Adicionalmente, su bajo consumo energético y su capacidad para gestionar protocolos de seguridad independientes, como paros de emergencia, refuerzan la robustez del sistema robótico.

A continuación, en la **Tabla 1**, se puede apreciar las plataformas comunes en este rol de controladores de bajo nivel:

**Tabla 1** Tipos de Microcontroladores más utilizados en el mercado

Microcontroladores	Características	Ventajas
<b>Arduino Nano</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo costo y tamaño reducido.</li> <li>- Facilidad de programación.</li> <li>- 14 pines E/S digitales, 6 para PWM.</li> <li>- 8 entradas analógicas</li> <li>- Velocidad de reloj: 16 MHz.</li> <li>- Puerto USB mini-B</li> <li>- Memoria flash 32 KB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ampliamente utilizado en plataformas móviles educativas.</li> <li>- Simplicidad y bajo costo.</li> <li>- Programación desde IDE nativo.</li> <li>- Capaz de interactuar directamente con sensores</li> </ul>
<b>ESP32</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microcontrolador de 32 bits dual-core, hasta 240 MHz.</li> <li>- Conectividad Wi-Fi y Bluetooth.</li> <li>- 512 KB de RAM</li> <li>- Periféricos de ADC de 12 bits, DAC, múltiples PWM, I<sup>2</sup>C, SPI, UART.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso en proyectos de IoT.</li> <li>- Puede enviar datos a ROS 2 mediante Wi-Fi.</li> <li>- Soporte oficial de micro-ROS.</li> <li>- Un consumo de 80-240 mA con Wi-Fi activo.</li> </ul>

**Nota.** Elaboración propia.

La aplicación de estos microcontroladores en plataformas móviles de bajo costo suele integrarse para tareas de control de movimiento y evitar obstáculos en el caso de Arduino Nano, (Khaleel & Oleiwi, 2024) describen un pequeño robot limpiador autónomo en el que Arduino Nano es el cerebro encargado de controlar motores DC a través de un puente H. Pero una de las funciones clave del Arduino Nano en robótica móvil es la lectura y procesamiento de sensores en tiempo real. Gracias a sus pines y buses de comunicación puede integrar una variedad de sensores comunes en robótica. Por ejemplo, en robots autónomos se emplea el Nano para leer, sensores de distancia (ultrasonicos, infrarrojos), sensores de velocidad como los encoders ópticos, filtrando y fusionando estos datos a nivel local. Betancur-Vásquez et al., (2021) presentan una plataforma móvil open-source donde un Arduino Nano recibe información de un módulo



sensorial compuesto por un sonar ultrasónico y un sensor ToF combinando ambas mediciones para mejorar la fiabilidad en la detección de obstáculos.

### 2.1.8.2 Unidades de procesamiento

En la jerarquía de control de un robot móvil, la Unidad de Procesamiento Central o Single Board Computer (SBC) ocupa el estrato superior. Es responsable de las tareas cognitivas que requieren un ancho de banda computacional masivo, como el procesamiento de imágenes, gestión del sistema operativo típicamente ROS y la orquestación de la navegación global.

En la robótica móvil, la selección de la unidad de procesamiento embebido es crítica para equilibrar el rendimiento computacional, el consumo energético y la integración con sensores/actuadores. ROS 2 se ha convertido en un estándar para desarrollar software en robots móviles, pero impone ciertos requisitos de hardware. Las plataformas embebidas más comunes en estos robots se pueden apreciar en la **Tabla 2**.

**Tabla 2** SBC más utilizadas en plataformas móviles

Unidades de procesamiento	Descripción
<p>Raspberry Pi</p> 	<p>Raspberry Pi 4 y 5 son los modelos más usados en robótica, es una SBC de bajo costo con procesador Broadcom BCM2711 y hasta 8 GB de RAM. Es muy popular en robots educativos y de investigación por su gran comunidad y soporte de software. Por ejemplo, el TurtleBot3 utiliza un Raspberry Pi 4 con Ros 2 para integración de sensores y navegación básica (Gargouri et al., 2025a).</p>
<p>NVIDIA Jetson Nano</p> 	<p>La Jetson nano consiste en un CPU quad-core ARM Cortex-A57 a 1.43 GHz, 4 GB RAM. Fue diseñada para ser accesible y es capaz de ejecutar algoritmos de visión en tiempo real. Un ejemplo es el JetBot de NVIDIA, que puede ejecutar detección de objetos aprovechando la GPU, logrando precisiones de 80-85% en detección de objetos domésticos con interferencias en torno a 1 Hz (Gargouri et al., 2025).</p>

**Nota.** Elaboración propia.

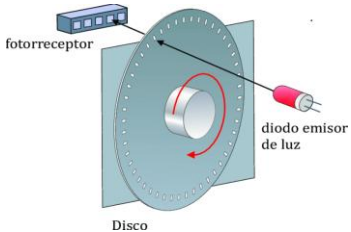
### 2.1.8.3 Sensores

La autonomía en robótica móvil no es meramente una función de la capacidad de locomoción, sino fundamentalmente una consecuencia de la capacidad de percepción. En el contexto específico de una plataforma móvil omnidireccional la arquitectura sensorial adquiere una complejidad crítica. A diferencia de los robots diferenciales convencionales, donde las restricciones no holonómicas limitan el movimiento y simplifican parcialmente la predicción de la trayectoria, los robots omnidireccionales equipados con ruedas Mecanum u omniruedas, introducen grados de libertad adicionales que, paradójicamente, aumentan la incertidumbre en la estimación de la pose debido a la naturaleza física de la interacción rueda-suelo.

### 2.1.8.4 Encoders

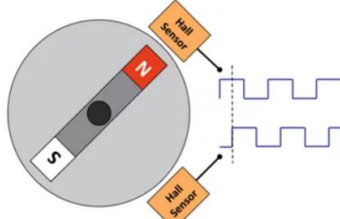
La localización relativa en robótica móvil se fundamenta en la odometría, proceso que estima la posición del sistema mediante la integración temporal de las velocidades de las ruedas. En plataformas omnidireccionales, este proceso presenta una complejidad superior, ya que exige la descomposición de los vectores de velocidad lineal y angular en cuatro actuadores independientes. Para resolver esta necesidad, se emplean encoders, transductores que transforman el desplazamiento angular del eje del motor en señales digitales procesables por el microcontrolador. A continuación, en la **Tabla 3** se presentan los tipos de encoders más utilizados del mercado:

**Tabla 3** Tipos de encoders más utilizados en motores DC

<b>Encoders</b>	<b>Funcionamiento</b>
<p data-bbox="225 1729 794 1765"><b>Encoders ópticos incrementales</b></p>  <p data-bbox="347 1765 699 1995">El diagrama ilustra el funcionamiento de un encoder óptico incremental. Un disco con ranuras (etiquetado como 'Disco') gira alrededor de un eje. Un diodo emisor de luz (etiquetado como 'diodo emisor de luz') emite un haz de luz que atraviesa las ranuras del disco. Un fotoreceptor (etiquetado como 'fotorreceptor') detecta las interrupciones de luz que ocurren al pasar por las ranuras, generando una señal digital.</p>	<p data-bbox="801 1729 1359 1995">Históricamente el estándar en robótica de precisión, estos dispositivos operan mediante la interrupción de un haz de luz infrarroja a través de un disco ranurado que es conocido como codificador.</p>

---

## Encoders magnéticos



Utilizan sensores de efecto Hall para detectar la variación del campo magnético generado por un imán diametralmente polarizado acoplado al eje del motor, su ausencia de contacto óptico los hace prácticamente inmunes a la suciedad, el aceite y la humedad.


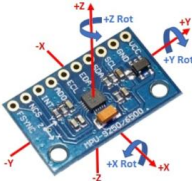
---

**Nota.** Elaboración propia.

### 2.1.8.5 Sistema de navegación inercial

La capacidad de una máquina para percibir su propia dinámica de movimiento y su orientación relativa en el espacio tridimensional constituye uno de los pilares fundamentales de la robótica móvil. La llegada y maduración de los sistemas Microelectromecánicos (MEMS) ha democratizado el acceso a la navegación inercial de alta precisión, permitiendo la integración de acelerómetros y giroscopios en chips de silicio de dimensiones milimétricas. En este contexto, la serie MPU de InvenSense, específicamente los modelos se pueden observar en la **Tabla 4**, MPU-6050 y MPU-9250, se han establecido como un estándar de facto en la investigación académica y el desarrollo industrial de robots móviles terrestres y aéreos (Das et al., 2025).

**Tabla 4** Modelos MPU utilizados en robots móviles terrestres y aéreos

Modelos MPU	Principios fundamentales
MPU-6050 	Es un dispositivo de seguimiento de movimiento que integra un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes y un procesador digital de movimiento (DMP).
MPU-9250 	Es un módulo multi-chip que combina dos sensores distintos en un mismo encapsulado. Por un lado, incluye un acelerómetro y giroscopio de 6 ejes, y por otro lado integra un magnetómetro de 3 ejes, completando el sistema de medición inercial.



---

**Nota.** Elaboración propia.

### 2.1.8.6 Drivers de motores

Los controladores o drivers de motores operan como la interfaz de potencia entre el microcontrolador y los actuadores eléctricos de la plataforma. Su función principal es suministrar los niveles de corriente y voltaje requeridos para el accionamiento de los motores, superando las limitaciones de potencia de las salidas lógicas del controlador. Técnicamente, estos dispositivos implementan configuraciones de puente H, lo que permite la inversión de polaridad para el cambio de giro y la regulación de velocidad mediante la modulación por ancho de pulsos (PWM) (V. Gupta, 2010). En el contexto de los robots móviles, los drivers son componentes críticos que traducen las consignas de movimiento en variables físicas, garantizando una regulación eficiente de la energía y la protección de los circuitos de control ante picos de corriente. En la **Tabla 5**, se presentan los drivers más comunes en el mercado:

**Tabla 5** Drivers de motores comerciales.

Drivers de motores	Descripción
<p data-bbox="228 1214 427 1249">Driver L298N</p> 	<p data-bbox="801 1214 1359 1518">Se trata de un circuito integrado puente H dual que permite controlar dos motores DC en ambos sentidos de giro, utilizando transistores bipolares en configuración puente completo y soporta corrientes del orden de 2 A por canal con picos de hasta los 3-4 A con buena disipación.</p>
<p data-bbox="228 1527 794 1572">Driver dual de alta potencia M2H18V18</p> 	<p data-bbox="801 1527 1359 1904">Es un driver más moderno, diseñado para plataformas móviles de mayor envergadura, es una tarjeta controladora dual para motores DC brushed (con escobillas) que se conecta como HAT apilable sobre una Raspberry Pi, y se comunica con la misma a través de I<sup>2</sup>C. Admite tensiones de motor de 6.5 V hasta 30 V y puede entregar corrientes continuas de hasta 18 A por canal.</p>



**Nota.** Elaboración propia.

### 2.1.8.7 Motores DC

El motor de corriente continua con escobillas (brushed DC motor) es el actuador predominante en robótica móvil debido a su simplicidad de control y alta densidad de potencia. Su funcionamiento se basa en la interacción de campos magnéticos generados entre un estator de imanes permanentes y un rotor bobinado, donde un conmutador mecánico (escobillas) asegura la continuidad del par motor. Operacionalmente, la velocidad de giro es proporcional al voltaje aplicado, mientras que el torque depende directamente de la intensidad de corriente.

En plataforma móviles, los motores DC brindan un movimiento suave y continuo, adecuado para tracción de ruedas. Además, tienen una alta densidad de potencia para su tamaño y pueden responder rápidamente a cambios de voltaje, lo que se traduce en aceleraciones rápidas del robot. Sus aplicaciones en plataformas móviles son prácticamente en todos los robots con ruedas diferenciales, el más conocido TurtleBot usa motores DC pequeños con caja reductora (ver **Tabla 6**). De hecho, motores DC de imán permanente han sido ampliamente utilizados en robótica (Metwly et al., 2024).

**Tabla 6** Tipos de motores comerciales.



<b>Motores DC</b>	<b>Descripción</b>
<p data-bbox="225 1435 638 1473">Motores DC con caja reductora</p> 	<p data-bbox="715 1480 1359 1659">Un motorreductor DC combina un motor de alta velocidad con un tren de engranajes que típicamente entrega una velocidad de giro mucho menor pero un par multiplicado por el factor de reducción.</p>
<p data-bbox="225 1718 638 1756">Motores brushless DC (BLDC)</p> 	<p data-bbox="715 1778 1359 1921">En un BLDC el conmutador es electrónico, no existen escobillas, sino que la conmutación de corriente en las bobinas del estator la realiza un controlador externo.</p>

**Nota.** Elaboración propia.

### 2.1.8.8 Sistema de alimentación y regulación de voltaje.

Las plataformas robóticas móviles requieren fuentes de energía compactas, densas y confiables para lograr largas duraciones de operación con alta productividad (Mikołajczyk et al., 2023). En la actualidad, la gran mayoría de estos robots utilizan baterías recargables como sistema de alimentación, dada su portabilidad y capacidad de entregar potencia eléctrica de forma sostenida. Aunque existen alternativas como motores de combustión interna o celdas de combustible (útiles por su alta densidad de energía), las baterías de ion-litio puede suministrar potencias específicas mucho mayores que las celdas de combustible, por lo que siguen siendo la opción lógica para robots móviles en la mayoría de casos. A continuación, en la **Tabla 7** se resumen las tecnologías de baterías más comunes en robótica móvil, junto con su funcionamiento básico:

**Tabla 7** Tipos de Baterías comerciales.



Baterías	Descripción
<p>Baterías de Ion de Litio (Li-ion)</p> 	<p>Alta densidad de energía (típicamente 100-265 Wh/kg) y alto voltaje por celda (3.7 V), lo que permite packs más ligeros y compactos. Su electrónica de control (BMS) gestiona la carga/descarga para evitar sobredescarga, sobrecarga y mantener la seguridad.</p>
<p>Baterías de Polímero de Litio (Li-Po)</p> 	<p>Son esencialmente una variante de las Li-ion que usan un electrolito en polímero gel y suelen presentarse en celdas tipo pouch. Tienen prestaciones similares en voltaje y densidad de energía a las Li-ion convencionales, pero destacan por poder entregar altas corrientes de descarga (elevadas tasas C).</p>

**Nota.** Elaboración propia.

El sistema electrónico requiere una alimentación estable y segura para garantizar el correcto funcionamiento de todos los componentes. En un entorno robótico, donde se

manejan diferentes niveles de tensión (por ejemplo, 12 V para los motores y 5 V para los sistemas lógicos), es indispensable el uso de reguladores de voltaje que conviertan la energía de manera eficiente y protejan los circuitos sensibles ante variaciones o picos de corriente (ver **Tabla 8**).

**Tabla 8** Reguladores de voltaje comerciales.

Reguladores	Descripción
Regulador de voltaje DC-DC Buck LM2596	Es un regulador conmutado tipo Step-Down utilizado en prototipado por su bajo costo y versatilidad para reducir voltajes de hasta 40V a una salida ajustable de 1.25V – 35V. Con una eficiencia de hasta el 92%, genera mínimo calor comparado con reguladores lineales, soportando corrientes continuas de hasta 2A o 3A con disipación externa.
	Es un regulador conmutado tipo Step-Down de alta potencia, diseñado para entregar una salida constante de 5V y hasta 5A desde un rango de entrada de 6V a 38V. Destaca por su eficiencia superior al 90%, lo que minimiza el calor y lo hace ideal para alimentar dispositivos de alto consumo como la Raspberry Pi 5 o módulos de comunicación.
Regulador de voltaje Pololu D24V50F5	
	

**Nota.** Elaboración propia.

### 2.1.8.9 Sistema de suspensión y estabilización

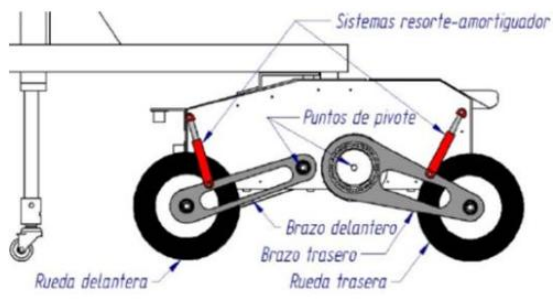
La ingeniería de plataformas móviles robóticas ha experimentado una transformación radical en las últimas dos décadas. Lo que comenzó como una disciplina enfocada en la navegación en entornos controlados y planos ha evolucionado hacia la demanda de autonomía robusta en terrenos complejos, irregulares y hostiles. Esta transición ha elevado el subsistema de suspensión desde un componente periférico a uno de importancia crítica. En la robótica de campo moderna, el sistema de suspensión no

solo cumple la función tradicional de amortiguación de impactos, sino que es el garante principal de la estabilidad de la pose, la tracción continua y la integridad de los datos sensoriales.

La estabilidad de una plataforma móvil, se define termodinámica y cinemáticamente por su capacidad para mantener el equilibrio estático y dinámico mientras atraviesa perturbaciones topográficas. A diferencia de la ingeniería automotriz, donde el confort del pasajero es la métrica de optimización, en la robótica móvil, la función de costo se centra en minimizar la varianza de la orientación del efector final y maximizar la adherencia o contacto rueda-suelo. Un robot que pierde contacto con el suelo pierde el control, además un robot que vibra excesivamente pierde percepción.

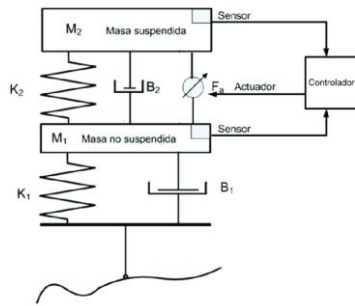
Los sistemas de suspensión para robótica móvil, se pueden clasificar en función de su consumo energético y capacidad de respuesta. A continuación, en la **Tabla 9** se detalla un análisis de cada categoría.

**Tabla 9** Tipos de suspensión

Sistemas de suspensión	Descripción
<p data-bbox="236 1458 624 1491">Sistema de suspensión pasiva</p> 	<p data-bbox="805 1335 1361 1989">La suspensión pasiva prescinde de actuadores y basa su funcionamiento en la configuración cinemática de eslabones y elementos complacientes. Un exponente de esta arquitectura es el mecanismo Rocker-Bogie, compuesto por dos secciones simétricas vinculadas mediante un diferencial. Cada lado integra un eslabón principal (Rocker) conectado al chasis por un pivote pasivo, y un eslabón secundario (Bogie) que soporta dos de las tres ruedas motrices. Esta articulación permite que el sistema mantenga contacto constante con el suelo superando obstáculos de hasta 1.5 veces el diámetro de la rueda, optimizando así la tracción y la estabilidad en superficies irregulares (García Caicedo et al., 2020).</p>

---

### Sistema de suspensión activa



A diferencia del sistema pasivo, la suspensión activa integra actuadores para suministrar energía al sistema y controlar la dinámica vertical y rotacional del robot. Su objetivo primordial trasciende la absorción de impactos, enfocándose en el control de postura, esto permite mantener el chasis nivelado y los sensores alineados con el horizonte, mitigando el riesgo de volcadura al gestionar el centro de gravedad en terrenos inclinados. Según Jiang et al., 2019 esta tecnología habilita la robótica reconfigurable, permitiendo que el sistema altere su morfología para adaptarse a restricciones espaciales o priorizar la estabilidad a altas velocidades.

---

**Nota.** Elaboración propia.

## **CAPÍTULO III**

### **3.1 Desarrollo metodológico**

El desarrollo metodológico de la presente investigación se fundamenta en un enfoque sistémico y estructurado, orientado a la integración efectiva de los componentes mecánicos, electrónicos y de control del robot holonómico. Dado que la construcción de un sistema omnidireccional demanda una alta precisión en la sincronización de sus actuadores, la metodología se divide en fases secuenciales que permiten la validación progresiva de cada subsistema.

#### **3.1.1 Enfoque de la investigación**

En este proyecto se empleó metodología cuantitativa de tipo experimental enfocada en el diseño, construcción y validación funcional del prototipo. En primera instancia, se realizó la revisión teórica de los conceptos fundamentales relacionados con la automatización en la industria, los sistemas de control y aplicaciones de estos sistemas. Posteriormente, se llevó a cabo el diseño conceptual y modelado 3D de la plataforma móvil mediante software, con el objetivo de definir la estructura y disposición óptima de los componentes.

### **3.2 Desarrollo de la propuesta**

La propuesta consiste en el diseño y construcción de una plataforma móvil omnidireccional equipada con ruedas tipo Mecanum y sistema de suspensión diferencial adaptado al entorno de laboratorio. Esta plataforma está controlada mediante una computadora de placa única (SBC) Raspberry Pi 5, ejecutando el entorno ROS 2, lo cual permite gestionar la arquitectura de nodos, sensores y actuadores de manera distribuida y modular.

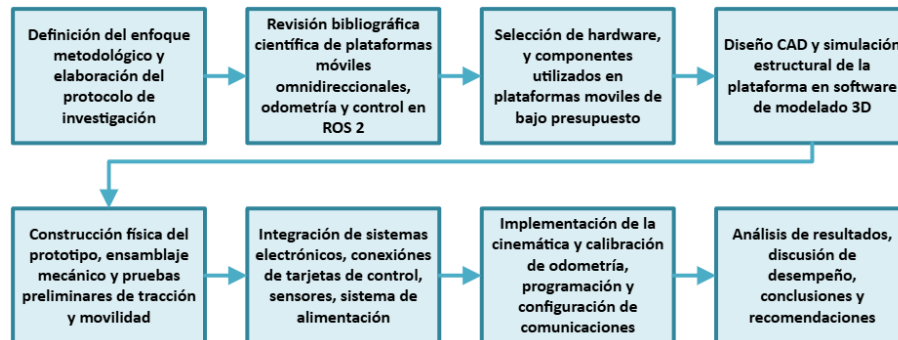
La obtención de datos cinemáticos se realiza mediante encoders magnéticos acoplados a los ejes de los motores, cuya lectura está gestionada por un microcontrolador

Arduino Nano. Este actúa como interfaz de adquisición de datos en tiempo real, comunicándose con la Raspberry Pi a través de conexión UART (TX-RX), permitiendo así integrar las lecturas de velocidad angular y posición para la estimación de odometría y posterior control de trayectoria.

El sistema completo está evaluado en condiciones controladas, verificando su comportamiento frente a comandos de movimiento lineal y rotacional, así como su capacidad para mantener estabilidad en desplazamientos multidireccionales. En consecuencia, se obtiene un prototipo funcional y replicable, con fines de docencia y experimentación en cursos de automatización y control.

En la **Figura 9** se detalla el flujo metodológico propuesto para el desarrollo del proyecto.

**Figura 9** Diagrama de fases de la metodología del proyecto



**Nota.** Elaboración propia.

Las etapas para desarrollar el proyecto de plataforma móvil omnidireccional, constan en detalle de:

- En primer lugar, como ya se detalló se definió el enfoque metodológico basado en una estrategia cuantitativa y experimental, orientada al diseño, implementación y validación funcional de una plataforma robótica móvil omnidireccional. Se realizó una revisión bibliográfica rigurosa a partir de fuentes científicas

indexadas, empleando bases de datos confiables como *IEEE Xplore*, *MDPI*, *ScienceDirect*, *SpringerLink* y *Scopus*.

- El protocolo de investigación fue estructurado a partir del análisis de literatura especializada. La búsqueda se realizó mediante el uso de combinaciones de palabras clave. Entre las principales palabras clave utilizadas se encuentran:

*Plataformas móviles omnidireccionales, Robots holonómicos, Cinemática diferencial y holonómica, Robots Mecanum, ROS 2 en robótica móvil, Odometría en robots móviles, Encoders magnéticos, Suspensión robótica diferencial, Control distribuido con microcontroladores, Automatización industrial con robótica móvil, Robots en la Industria 4.0, Robots colaborativos, Diseño y simulación de plataformas robóticas, Robots con ruedas omnidireccionales, Integración de hardware y software en robótica.*

- Una vez concluida la fase de revisión y planteamiento del proyecto, se procedió con la selección de los componentes de hardware necesarios. Esta etapa fue guiada por criterios de compatibilidad funcional, integración eficiente en el ecosistema de la plataforma móvil y factibilidad de implementación tanto técnica como económica:

- Esta etapa se basó en un estudio comparativo de los elementos más utilizados en plataformas móviles de uso industrial, educativo y experimental, priorizando aquellos con documentación técnica extensa, soporte activo en entornos de desarrollo como ROS 2, y disponibilidad en el mercado local e internacional. Se considero especialmente la relación costo-beneficio, buscando optimizar el rendimiento del sistema sin

comprometer su accesibilidad para su posterior uso como herramienta didáctica en el laboratorio de RobLab. Se verifico que todos los componentes pudieran integrarse armónicamente con los subsistemas del prototipo.

- Con la selección de los componentes de hardware definida, se procedió con la siguiente fase del proyecto, el diseño y modelado 3D de la plataforma móvil, con el objetivo de integrar adecuadamente todos los elementos mecánicos, electrónicos y estructurales en una configuración coherente, funcional y visualmente optimizada:
  - Esta etapa se diseña el proyecto utilizando el software Autodesk Fusión 360, una herramienta profesional de modelado paramétrico que permite no solo la creación de geometría 3D, sino también la simulación de movimientos, análisis de interferencias y validación de ensambles mecánicos. Para realizar los ajustes estructurales necesarios antes de la fabricación física del prototipo.
  - Adicionalmente, para realizar simulaciones de movimiento y análisis de interferencias entre partes móviles, que permita validar el correcto funcionamiento de los sistemas de tracción y suspensión, asegurando que no existieran rozamientos indebidos ni bloqueos mecánicos en el rango operativo, específicamente en la implementación de la suspensión pasiva con eje diferencial.
- Una vez realizado el diseño 3D y validadas las simulaciones estructurales de movimiento, se procedió con la fabricación física y ensamblaje del prototipo:
  - En esta fase del proyecto, se realizó la construcción de la estructura base utilizando láminas de aluminio de 2mm de espesor, cortadas mediante

tecnología CNC. Estas piezas conforman el esqueleto del chasis, ofreciendo una combinación óptima entre ligereza y rigidez estructural.

- Complementando la estructura, se imprimieron en material PLA (Ácido Poliláctico) varias piezas 3D que cumple funciones tanto estéticas como funcionales, tales como, soportes internos y cubiertas.
- Finalizada la construcción mecánica, se realizó el montaje de los motores, sistemas de suspensión, ruedas Mecanum y tarjetas electrónicas, asegurando un correcto acoplamiento de los elementos críticos.
- Posteriormente, se efectuaron las primeras pruebas funcionales de tracción y movilidad, enfocadas en validar la correcta distribución del peso sobre el sistema de suspensión pasiva con eje diferencial, además, el anclaje firme de los motores y la respuesta a las órdenes básicas de movimiento.
- Posteriormente, se procedió a la integración de los sistemas electrónicos:
  - En esta fase se inició con la instalación y conexión de las tarjetas de control, microcontroladores y el sistema de alimentación eléctrica, previamente elegidos, esta etapa permitió garantizar la operatividad funcional del prototipo, ya que une el componente físico con la lógica de control.
  - Para asegurar la fiabilidad de las conexiones, se realizaron soldaduras y cableado directo en puntos críticos, especialmente en la distribución de energía y los pines de comunicación.
- Finalizada la instalación y conexión del hardware, se procedió con la programación del sistema de control de la plataforma:
  - En esta fase, se instaló el sistema operativo sobre la SBC configurado con la distribución ROS 2. La instalación fue optimizada para permitir la

- ejecución de múltiples nodos encargados de las tareas de control, lectura de sensores y generación de comandos de movimiento.
- Adicionalmente, se desarrollaron algoritmos de calibración de odometría, los cuales permitieron estimar en tiempo real la posición y orientación de la plataforma. Esto se logró mediante la integración numérica de las velocidades angulares proporcionadas por los encoders, considerando los parámetros físicos de la plataforma.
  - Finalmente, se procedió a la etapa de validación funcional del prototipo. Las pruebas se realizaron en entornos controlados del laboratorio, con el objetivo de evaluar el desempeño general, autonomía y estabilidad estructural:
    - Se colocaron diferentes niveles de peso sobre la estructura superior para evaluar la estabilidad mecánica y la rigidez del sistema de suspensión. Los cuáles serán indicados posteriormente.
    - Se analizaron los desplazamientos en los ejes X, Y y rotación en su propio eje, mediante comandos enviados desde ROS 2.
    - Se sometió a la plataforma a irregularidades en el terreno (pequeñas rampas y desniveles) con el objetivo de verificar la respuesta del sistema de suspensión pasiva con eje diferencial. El sistema demostró una mejora notable en la absorción de vibraciones y estabilidad del robot en comparación con chasis rígidos.
    - Los resultados obtenidos se detallaron y analizaron, posteriormente, fueron documentados en el proyecto.

## CAPÍTULO IV



### 4.1 Desarrollo del prototipo

Este capítulo presenta el desarrollo del prototipo de una plataforma móvil omnidireccional. El proceso comprendió la selección de componentes, el modelado tridimensional paramétrico en Fusion 360 para validar el ensamblaje y la distribución espacial, y la integración del sistema de control junto con la arquitectura de programación.

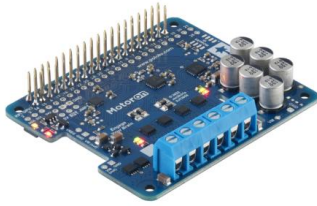
### 4.2 Selección de hardware para el desarrollo de la plataforma móvil

Como primer paso en el desarrollo, se realizó la selección adecuada de los componentes electrónicos y mecánicos, considerando tanto los requerimientos funcionales del proyecto como la necesidad de mantener un costo accesible (ver **Tabla 10**).

**Tabla 10** Selección de hardware y arquitectura electrónica del prototipo omnidireccional.

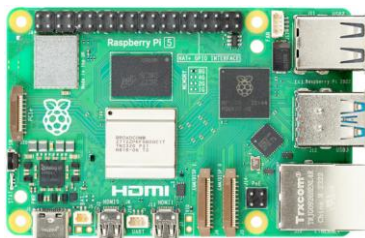
Hardware seleccionado	Especificaciones técnicas
<p>Sistema de tracción: 50:1 Metal Gearmotor</p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Voltaje nominal de operación del motor: 12 V.</li><li>• Relación de transmisión de la caja reductora: 50:1</li><li>• Velocidad angular del eje de salida en vacío: 200 RPM</li><li>• Corriente de consumo máximo en bloqueo: 5.5 A</li><li>• Corriente de funcionamiento en vacío: 0.2 A</li><li>• El sistema cuenta con un encoder de cuadratura de efecto Hall integrado de dos canales (A y B)</li><li>• Potencia máxima de salida: 10 W</li></ul>
<p>Sistema de tracción: Ruedas omnidireccionales</p> 	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diámetro exterior de la rueda: 97 mm.</li><li>• 9 rodillos pasivos de caucho.</li><li>• Rodillos periféricos posicionados a un ángulo exacto de 45° con respecto al eje de rotación de la rueda.</li><li>• Capacidad de carga máxima por rueda: 15 kg (fuerza).</li></ul>

Controlador de motores:  
Motoron M2H18v18



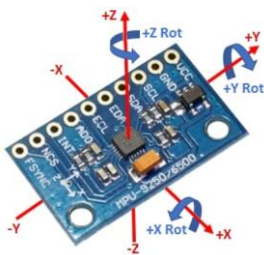
- Voltaje de alimentación operativo: 6.5 V a 30 V.
- Corriente de salida continua por canal: 18 A.
- La interfaz de comunicación con Raspberry Pi a través del bus I2C.
- Incluye funcionalidad de sensado de corriente integrado.
- El formato físico es tipo Hardware Attached on Top, diseñado para apilarse sobre el conector GPIO de la Raspberry Pi.

SBC: Raspberry Pi 5 Modelo B 8 GB RAM



- Procesador central: Broadcom BCM2712 de cuatro núcleos (Quad-core)
- Memoria RAM: 8 GB SDRAM
- Conectividad inalámbrica: Wi-Fi de doble banda y Bluetooth 5.0 / BLE.
- Alimentación requerida: 5V / 5A DC a través de un conector USB-C.
- Posee un cabezal GPIO estándar de 40 pines compatible con HATs.

Sistema de medición inercial:  
MPU-9250



- El dispositivo es un sistema en paquete que integra acelerómetro, giroscopio y magnetómetro.
- Voltaje de operación del chip: 2.4 V a 3.6 V.
- El giroscopio tiene rangos de escala completa programables de  $\pm 250$  °/s (grados por segundo).
- El acelerómetro tiene rangos de escala completa programables de  $\pm 8g$  (aceleración de la gravedad estándar).
- Incluye un magnetómetro de efecto Hall de 3 ejes con un rango de medición de  $\pm 4800$   $\mu T$  (micro-tesla).

Sistema de alimentación:  
HOOVO 4S Lipo - Batería  
9200mAh 14.8V 100C



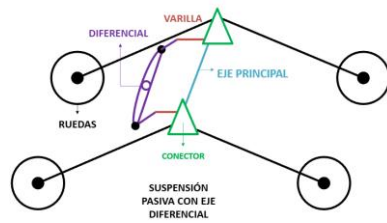
- La química de la batería es de Polímero de Litio (LiPo)
- Configuración de celdas: 4S1P.
- Voltaje nominal de operación: 14.8 V.
- Voltaje máximo a plena carga: 16.8 V
- Capacidad de almacenamiento de carga: 9.2 Ah.
- La tasa de descarga (C) es de 100C, permitiendo suministrar altas corrientes instantáneas sin caídas de tensión significativas.

Sistema de regulación de voltaje: D24V50F5 STEP DOWN 5A



- Voltaje de entrada permitido: 6 V a 38 V.
- Voltaje de salida: fijo de 5 V.
- Corriente de salida máxima continua: 5 A.
- Cuenta con protección integrada contra inversión de voltaje hasta 40 V.

Sistema de suspensión pasiva



Para garantizar la estabilidad y el contacto continuo de las ruedas con el terreno, se diseñó un sistema de suspensión pasiva con eje diferencial, inspirado en el mecanismo rocker-bogie. Esta configuración permite distribuir las cargas y absorber irregularidades, minimizando la transmisión de vibraciones hacia los sensores y la electrónica de control. Al prescindir de actuadores activos, el diseño reduce significativamente la complejidad mecánica y el consumo energético, resultando en una solución eficiente y robusta para su operación en entornos de laboratorio.

**Nota.** Elaboración propia.

### 4.3 Diseño 3D de la plataforma móvil omnidireccional

El diseño tridimensional de la plataforma fue una etapa clave para planificar la distribución interna e integrar los sistemas de tracción, suspensión y electrónica. Mediante modelado paramétrico en Fusion 360, se validó el espacio disponible y se realizaron análisis de interferencias. Se diseñaron los componentes de forma individual y luego se efectuó el ensamble digital para asegurar compatibilidad dimensional, constituyendo la validación virtual previa a la fabricación mediante corte CNC y manufactura aditiva.

#### 4.3.1 Diseño 3D de extremidades mecánicas

El alma estructural de las extremidades mecánicas se diseñó con geometría angular tipo chevrón (ver **Figura 10**), para optimizar la distribución de cargas durante el desplazamiento. Inicialmente, se definió un espesor de 2 mm acorde a las láminas de aluminio disponibles, sin embargo, para asegurar mayor robustez, se implementó una configuración laminar uniendo dos piezas, alcanzando un espesor final de 4 mm.

**Figura 10** Alma de aluminio de 2 mm para extremidades mecánicas.



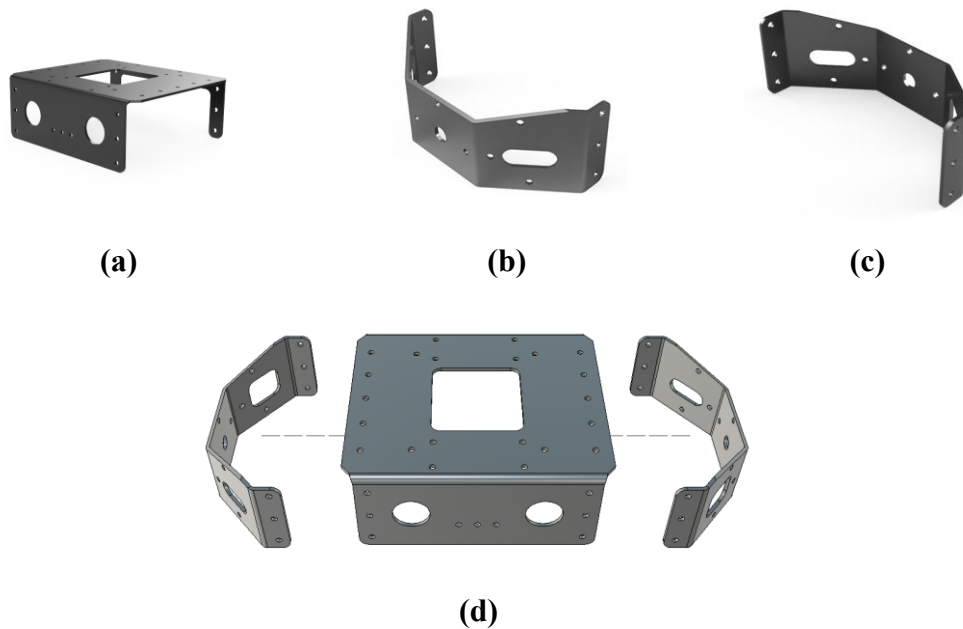
**Nota.** Elaboración propia.

#### 4.3.2 Diseño 3D del chasis principal

El chasis principal fue diseñado bajo una arquitectura modular compuesta por tres piezas independientes de lámina plegada del aluminio, las cuales, al ensamblarse, conforman una estructura unificada y robusta (**Figura 11 (a)**, **Figura 11 (b)**, **Figura 11 (c)**).

Este enfoque garantiza la rigidez estructural necesaria para la plataforma móvil.

**Figura 11** Chasis principal: (a) Pieza central del chasis; (b) Pieza lateral del chasis izquierda; (c) Pieza lateral del chasis derecha; (d) Ensamble chasis principal.



**Nota.** Elaboración propia.

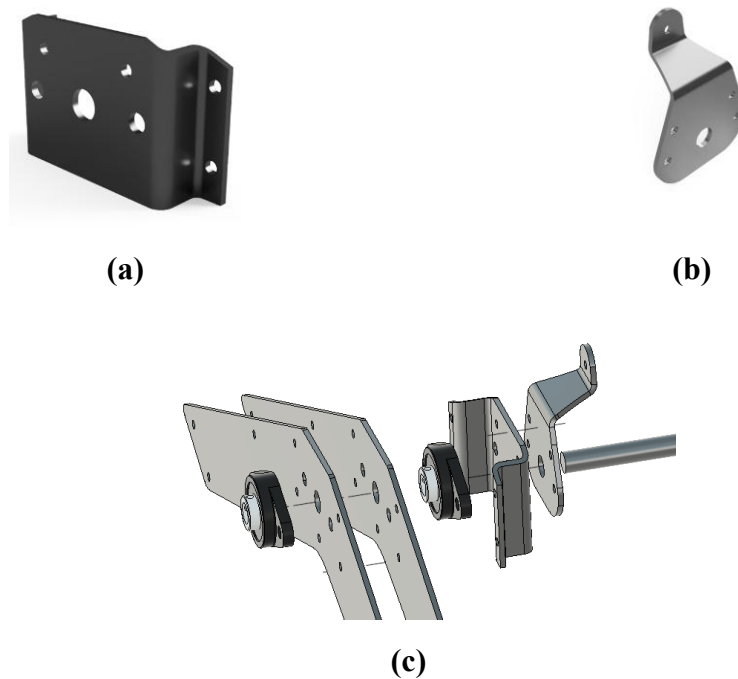
#### 4.3.3 Diseño de acoples estructurales entre chasis y extremidades mecánicas

Para garantizar la transición mecánica entre el chasis fijo y las extremidades móviles, se diseñó un sistema de acople compuesto por dos piezas de aluminio que

mantienen la continuidad estructural (ver **Figura 12 (a)**, **Figura 12 (b)**). El soporte de alojamiento incorpora una geometría plegada que permite su fijación a las extremidades mecánicas y, simultáneamente, el alojamiento y protección de una chumacera.

En conjunto, el eslabón de articulación de geometría lobular confina el rodamiento y permite el paso del eje principal, asegurando su alineación y fijación adecuada. Este ensamble posibilita el pivote suave de la suspensión sobre la chumacera, garantizando estabilidad y correcto funcionamiento mecánico (ver **Figura 12 (c)**).

**Figura 12** Acoples estructurales: (a) Unión alma a suspensión; (b) Eslabón de articulación; (c) Ensamble de acoples y almas con chumaceras.



**Nota.** Elaboración propia.

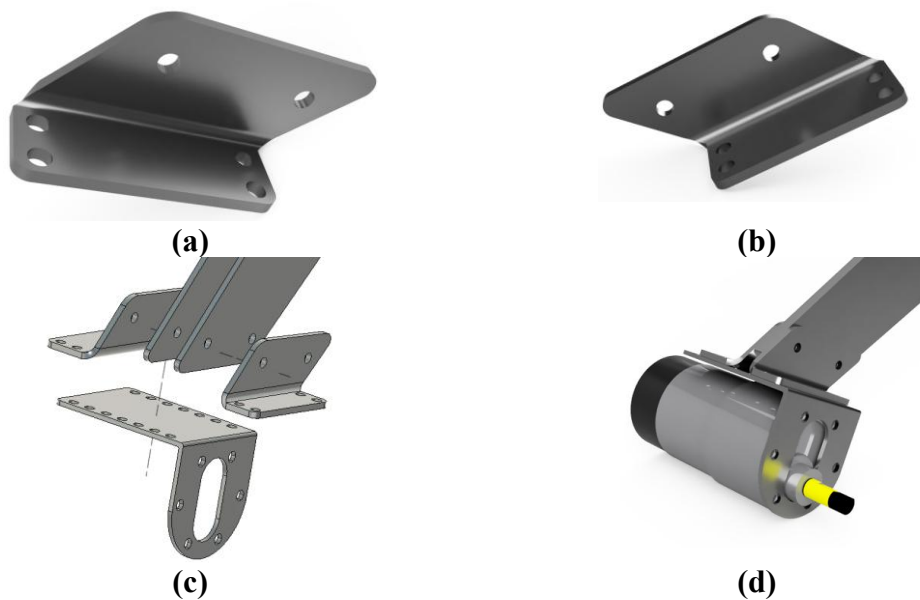
#### 4.3.4 Diseño de uniones estructurales entre almas y soportes para los motores

##### Pololu

Para completar la integración del sistema de locomoción, se diseñaron interfaces de acople distal ubicadas en los extremos de las almas estructurales, cuya función es servir como unión mecánica entre las extremidades y los soportes de los motores Pololu. Estas

piezas, fabricadas como placas de aluminio anguladas, abrazan el perfil final del alma y proporcionan una superficie firme de montaje para los actuadores (ver **Figura 13 (a)**, **Figura 13 (b)**), Su diseño modular permite que los motores se fijen mediante pernos en lugar de uniones permanentes, facilitando el mantenimiento y el reemplazo rápido de componentes. (ver **Figura 13 (c)**, **Figura 13 (d)**).

**Figura 13** Acoples: (a) Acople izquierdo; (b) Acople derecho; (c) Ensamble final; (d) Pasos de ensamble



**Nota.** Elaboración propia.

#### 4.3.5 Diseño de suspensión pasiva con eje diferencial

Para mejorar la estabilidad y la tracción en terrenos irregulares, se implementó un sistema de suspensión pasiva basado en un mecanismo de barra diferencial, el cual conecta cinemáticamente el chasis principal con las extremidades mecánicas mediante un eje pivotante central y tirantes de enlace (ver **Figura 15 (c)**).

La premisa fundamental de este diseño es el promedio mecánico del ángulo de inclinación. Como se observa en la simulación de movimiento de la **Figura 15 (b)**, cuando una de las extremidades laterales se eleva al encontrar un obstáculo, el movimiento se transmite a través de los tirantes hacia la barra diferencial central, obligándola a rotar

sobre su eje. Se puede comparar la distancia de movimiento del pivote central en la **Figura 15 (a)**, con una respuesta del movimiento ante una inclinación de  $0^\circ$ .

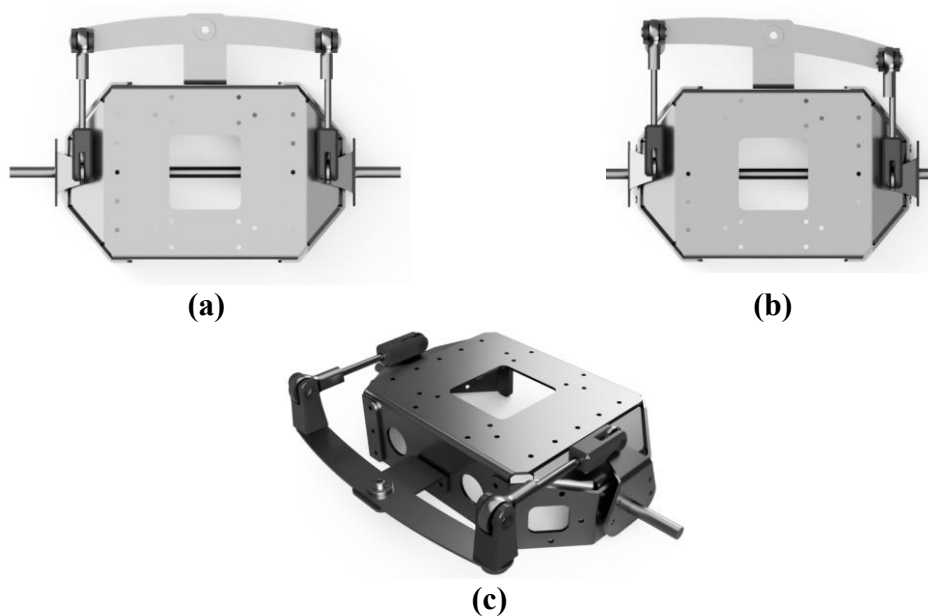
La materialización del mecanismo se realizó mediante dos componentes estructurales de aluminio, un soporte de fulcro estático y una barra oscilante. El soporte, con geometría plegada en “L”, se fija al chasis y aloja el eje de rotación (ver **Figura 14 (a)**), mientras que la barra diferencial de diseño curvilíneo se articula sobre este mediante un perno pivotante (ver **Figura 14 (b)**).

**Figura 14** Piezas principales para suspensión: (a) Soporte de anclaje para chasis; (b) Barra diferencial.



**Nota.** Elaboración propia.

**Figura 15** Ensamble: (a) Ensamble normal; (b) Respuesta del mecanismo diferencial ante una inclinación lateral de  $10^\circ$ ; (c) Mecanismo diferencial a  $0^\circ$ .



**Nota.** Elaboración propia.

#### 4.3.6 Diseño 3D de base principal para los módulos y batería

Se diseñó una base inferior multifuncional que se fabricó mediante impresión 3D con material plástico PLA (Ácido Poliláctico). Esta pieza se acopla estratégicamente en la cara ventral de la plataforma móvil para cumplir un doble propósito, actuar como carcasa protectora de cierre y servir de alojamiento para la batería y los módulos de control. La ubicación no es arbitraria, sino, se busca concentrar el centro de gravedad ya que la batería que se adquirió es grande y con un peso considerable, por esta razón necesita estar centrada para no esforzar la suspensión o perder equilibrio. Como se puede ver en la **Figura 16 (a)**, el orificio más grande es para alojar la batería y la parte trasera de la base corresponde a la función de alojar los módulos de control.

**Figura 16** Base inferior: (a) Base inferior sin cubrimientos; (b) Base inferior con cubrimientos.



**Nota.** Elaboración propia.

En la **Figura 16 (b)**, se puede ver que el encapsulamiento de la batería se completa mediante dos cubiertas funcionales que se diseñaron para acoplarse a la base. La primera es la placa de retención inferior (ver **Figura 17 (a)**). La segunda cubierta se acopla en la parte superior de la base y cumple las funciones de proteger a la batería, y aprovechar su ubicación central para integrar una base de montaje elevada. Este soporte fue diseñado específicamente para alojar el módulo de estabilización, ubicándolo estratégicamente sobre el eje principal de la plataforma (ver **Figura 17 (b)**).

**Figura 17** Cubrimientos (a) Cubrimiento inferior de la base; (b) Cubrimiento superior de la base.



**Nota.** Elaboración propia.

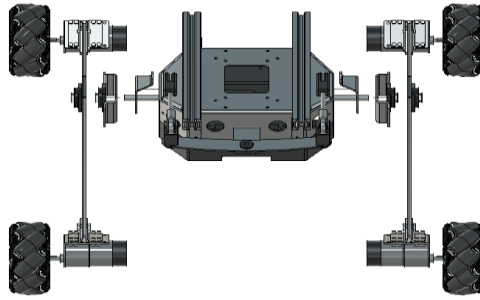
#### 4.3.7 Ensamble general del esqueleto de la plataforma móvil

Como culminación de la fase de diseño mecánico, se procedió a la integración de todos los subsistemas (chasis, suspensión diferencial y extremidades) para conformar el esqueleto estructural definitivo de la plataforma móvil (ver **Figura 18 (a)**). El ensamble representa la arquitectura final del vehículo, validando la coherencia dimensional y funcional de las uniones previamente descritas. Posteriormente en la **Figura 18 (b)**, se puede observar el ensamble con el recubrimiento inferior que alojará la batería.

Un añadido crucial en esta etapa final fue la implementación de una interfaz de montaje superior, materializada mediante dos perfiles de extrusión de aluminio estándar 20x20 (tipo T-slot) con una longitud de 20 cm cada uno. Estos rieles se fijaron longitudinalmente sobre la cara superior del chasis principal, como se puede apreciar en la **Figura 18 (c)**, además de los pasos de ensamble.

**Figura 18** Ensamble del diseño mecánico: (a) Ensamble piezas de aluminio de 2mm; (b) Ensamble piezas de aluminio y tapa inferior del chasis; (c) Pasos de ensamble.





(c)

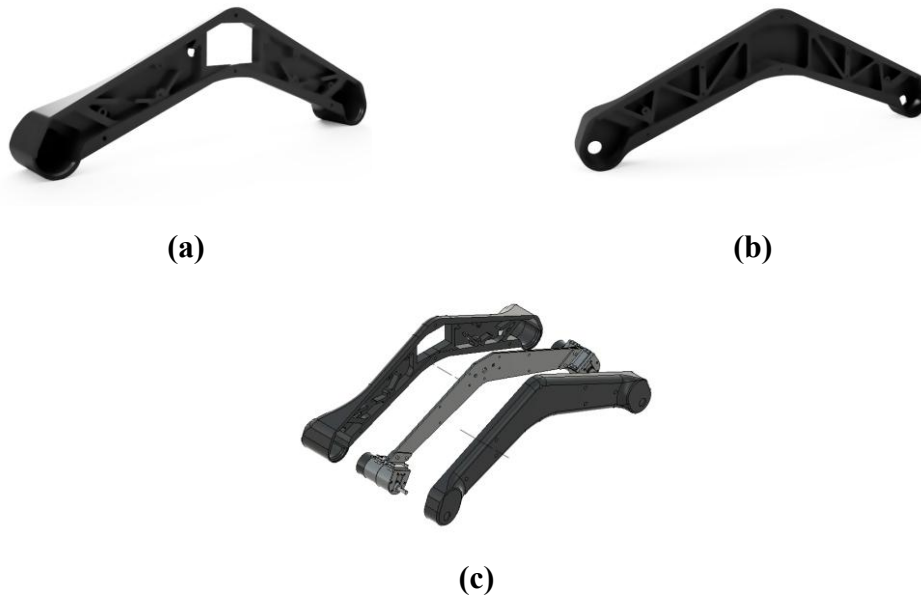
**Nota.** Elaboración propia.

#### 4.3.8 Diseño 3D de carcasas para las extremidades mecánicas

Para dotar a las extremidades mecánicas de una protección ambiental y una estética industrial acabada, se diseñó un sistema de carcasas poliméricas envolventes. Estas no funcionan meramente como tapas, sino que conforman una estructura híbrida que, al ensamblarse, comprimen el alma de aluminio central, encapsulando los motores y el cableado para protegerlos de polvo, impactos y atrapamientos accidentales.

El encapsulamiento de las extremidades se logra mediante un sistema de dos carcasas complementarias que actúan como una estructura de protección tipo sándwich. La cubierta interior vista en la **Figura 19 (a)**, prioriza la funcionalidad operativa, integrando una apertura de holgura para la unión de la suspensión y canales internos para la gestión oculta del cableado. En contraparte, la cubierta exterior vista en la **Figura 19 (b)**, aporta rigidez mecánica, ya que sus nervaduras internas inmovilizan los motores y rodamientos contra el alma de aluminio. En la **Figura 19 (c)**, se puede apreciar más detalladamente el ensamble de estas cubiertas.

**Figura 19** Cubiertas para extremidades mecánicas: (a) Cubierta interior con canales de enrutamiento y apertura para la suspensión; (b) Cubierta exterior de refuerzo; (c) Ensamble.



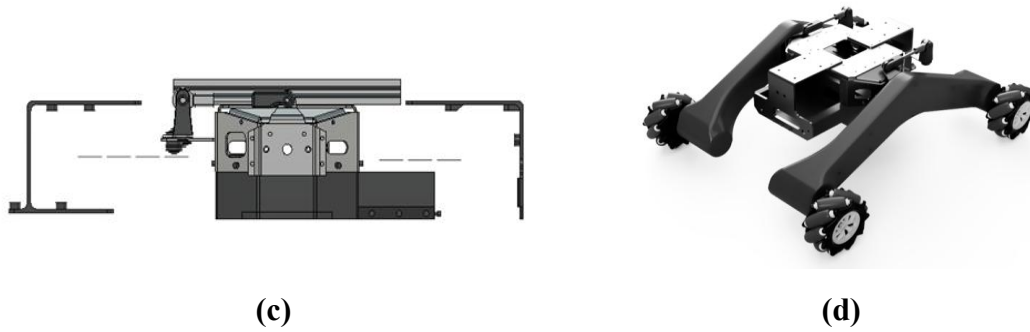
**Nota.** Elaboración propia.

#### 4.3.9 Diseño 3d de carcasas del chasis

Para lograr una integración precisa entre el chasis de aluminio y el carenado estético, se diseñó un sistema de anclaje estructural, que actúa como nexo de unión con las cubiertas exteriores. El anclaje delantero (ver **Figura 20 (a)**) se fija al bastidor y se vincula con la sección inferior de la cubierta de la batería. Por su parte, la base posterior (ver **Figura 20 (b)**) se distingue por incluir una ventana de acceso técnico, alineada estratégicamente con los puertos de la Raspberry Pi, para poder acceder a los puertos sin necesidad de desmontar la estructura. En la **Figura 20 (c)**, **Figura 20 (d)**, se puede ver un ensamble explicativo y a su vez el ensamble con el chasis.

**Figura 20** Anclajes para carcasa: (a) Anclaje delantero; (b) Anclaje posterior; (c) Ensamble de anclajes; (d) Ensamble en plataforma móvil.

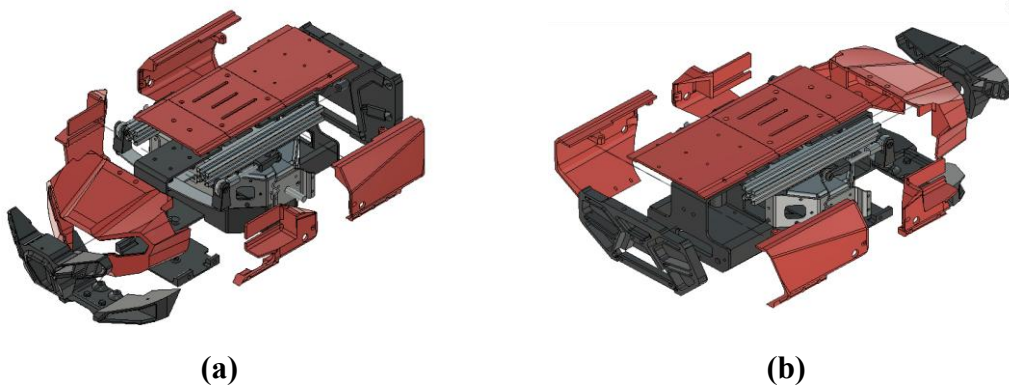




**Nota.** Elaboración propia.

La arquitectura del diseño exterior de la plataforma, se resolvió mediante un sistema de cerramiento modular de espesor de 3mm, compuesto por varias piezas interconectadas. Para los costados, se diseñaron cubiertas laterales de simetría especular (ver **Figura 21 (a)**). Estas piezas cumplen con la función de permitir el paso de los cables de los motores hacia el sistema de control. A continuación, la cubierta superior se compone de varias piezas planas con los respectivos orificios y protuberancias, las cuales sirven como puntos de fijación sólidos hacia los anclajes estructurales vistas en la **Figura 20 (a)**, **Figura 20 (b)**, **Figura 20 (c)** y **Figura 20 (d)**. Finalmente, el ensamble se sella con una tapa trasera, delantera que presentan un diseño de rejilla, además, albergan cavidades perimetrales destinadas a la instalación de una cinta LED (ver **Figura 21 (b)**).

**Figura 21** Esquema de integración de la carrocería modular: (a) Despiece de componentes frontales y laterales; (b) Despiece de componentes posteriores.



**Nota.** Elaboración propia.

La integración de la totalidad de los subsistemas descritos (chasis estructural, suspensión diferencial, sistema de carenados) culmina en el modelo 3D final de la plataforma móvil (ver **Figura 22 (a)** y **Figura 22 (b)**).

**Figura 22** Diseño final de la plataforma móvil: (a) Vista delantera); (b) Vista posterior.



(a)



(b)

**Nota.** Elaboración propia.

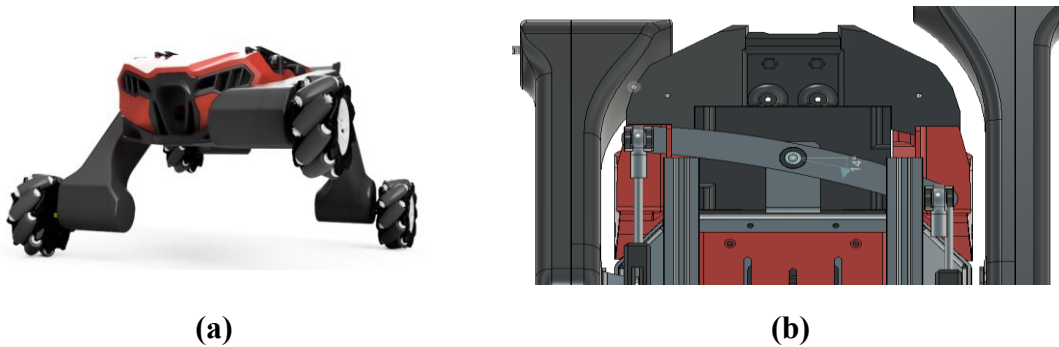
#### 4.4 Validación de interferencias y movimiento del diseño 3D

Una vez terminado el diseño mecánico y estructural de la plataforma, se procedió a realizar una validación funcional virtual aprovechando las herramientas de ensamblaje dinámico y detección de contactos de Fusion 360. El objetivo de esta prueba fue doble: garantizar la coherencia estructural (ausencia de colisiones entre piezas móviles y estáticas) y verificar la correcta transmisión cinemática del sistema de suspensión diferencial (ver **Figura 23 (a)** y **Figura 23 (b)**).

El análisis determinó que el límite geométrico del mecanismo se encuentra a los 16° de inclinación de la barra diferencial, al superar este ángulo existen interferencias físicas entre los componentes del chasis y el carenado. Con base en este hallazgo, se definió un rango operativo seguro de  $\pm 14^\circ$  (ver **Figura 23 (c)**). Bajo esta configuración máxima admisible, la simulación arrojó los siguientes resultados:

1. La rueda de la extremidad traccionada alcanza una elevación vertical de 9.89 cm respecto al plano del suelo (ver **Figura 23 (b)**).
2. Se validó visual y numéricamente que el sistema cumple su función pasiva (ver **Figura 23 (a)**).

**Figura 23** Comportamiento del sistema diferencial: (a) Respuesta del sistema de suspensión; (b) Medición de la elevación vertical máxima de la rueda



**Nota.** Elaboración propia.

#### 4.5 Simulación de esfuerzos al esqueleto mediante software ANSYS

Para validar la integridad del chasis, se realizó un análisis de esfuerzos por elementos finitos (FEA) mediante el software ANSYS Static Structural. Este estudio permitió predecir el comportamiento físico del sistema ante cargas operativas, evaluando variables críticas como la deformación total y esfuerzos equivalentes.

El proceso de simulación inició con la incorporación de la geometría al módulo Static Structural de ANSYS. A continuación, se definieron los parámetros de configuración física y de materiales que rigen la simulación:

- Aluminum Alloy NL: Este material se asignó a las láminas del chasis y perfiles estructurales, y sus propiedades se observan en la **Tabla 11**.

**Tabla 11** Propiedades mecánicas y parámetros de plasticidad del Aluminio

Categoría	Propiedad	Valor	Unidad
<b>Física</b>	Densidad	2700	kg/m <sup>3</sup>
<b>Elástica</b>	Módulo de Young	70	GPa
	Coeficiente de Poisson	0,33	-
	Módulo de Compresibilidad	68,62	GPa
	Módulo de Cizalladura	26,31	GPa
<b>Plástica</b>	Esfuerzo de Fluencia	193	MPa
	Módulo Tangente	500	MPa

**Nota.** Elaboración propia.

- Structural Steel: Este material se asignó al eje principal de la plataforma móvil y a la tornillería, sus propiedades se observan en la **Tabla 12**.

**Tabla 12** Propiedades mecánicas y parámetros de plasticidad del Aluminio

Categoría	Propiedad	Valor	Unidad
<b>Física</b>	Densidad	7850	kg/m <sup>3</sup>
<b>Elástica</b>	Módulo de Young	200	GPa
	Coeficiente de Poisson	0,3	-
	Módulo de Compresibilidad	166,67	GPa
	Módulo de Cizalladura	76,92	GPa
<b>Resistencia</b>	Esfuerzo de Fluencia	250	MPa
	Resistencia a la Tracción Última	460	MPa

**Nota.** Elaboración propia.

Para configurar el entorno de simulación, se definieron contactos de unión rígida en las conexiones atornilladas y se aplicaron restricciones de Fixed Support en los anclajes de los motores, simulando una condición estática de frenado y omitiendo la geometría de las ruedas para reducir la carga computacional. Posteriormente, se generó

una malla de elementos finitos optimizada mediante una estrategia de refinamiento local, aplicando un Body Sizing de 1 mm en los componentes críticos (eje central y placas del chasis) para capturar con precisión los gradientes de esfuerzo sin comprometer la eficiencia del cálculo.

Para la definición de las cargas en el entorno de simulación, es necesario realizar la conversión de la masa estimada (kg) a unidades de fuerza (N) aceptadas por el sistema internacional. Considerando la aceleración de la gravedad estada que es igual  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ , la relación entre la carga relativa y la fuerza aplicada se rige por la ecuación (4).

$$F = m * g \quad (4)$$

donde:

- $F$  = Fuerza o peso (Newton)
- $m$  = Masa (kilogramo)
- $g$  = Aceleración de la gravedad

Por consiguiente, despejando la fórmula para saber la masa (kg), se tiene la ecuación (5).

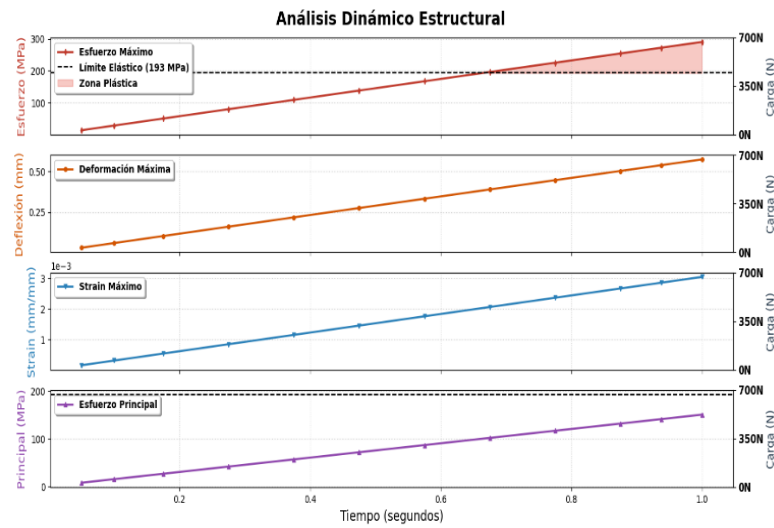
$$m = \frac{F}{g} \quad (5)$$

#### 4.5.1 Análisis de respuesta estructural bajo carga estática incremental (0-700 N)

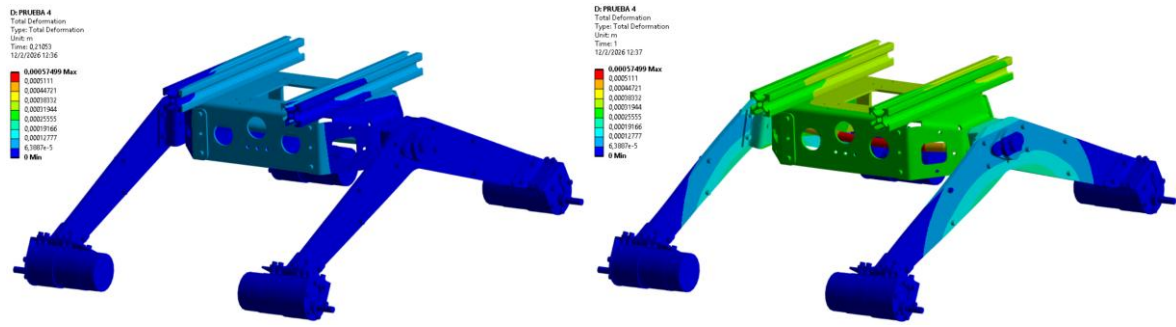
Se realizó una simulación numérica para evaluar el comportamiento mecánico del chasis ante cargas críticas de operación. La condición de carga consistió en una fuerza vertical descendente distribuida equitativamente en 350 N por perfil, totalizando 700 N (equivalentes a 71.36 kg según la ecuación (5)). Esta configuración simula el peso de los componentes internos y la carga útil sobre la estructura.

Tras ajustar las condiciones de borde y ejecutar el modelo, los resultados se consolidaron en la **Figura 24 (a)**, **Figura 24 (b)** y **Figura 24 (c)**. La **Figura 24 (a)** presenta de forma cronológica la respuesta estructural frente a los cuatro parámetros fundamentales analizados: esfuerzo equivalente de Von Mises, deflexión total, deformación unitaria elástica y esfuerzo principal máximo. En cambio, la **Figura 24 (b)**, presenta el análisis de la deflexión geométrica que permite evaluar la rigidez del chasis frente a la aplicación gradual de la carga, por último, la **Figura 24 (c)** presenta el análisis de la Deformación Unitaria Elástica Máxima (Strain) que proporciona una medida cuantitativa de la elongación local del material en respuesta a la carga aplicada.

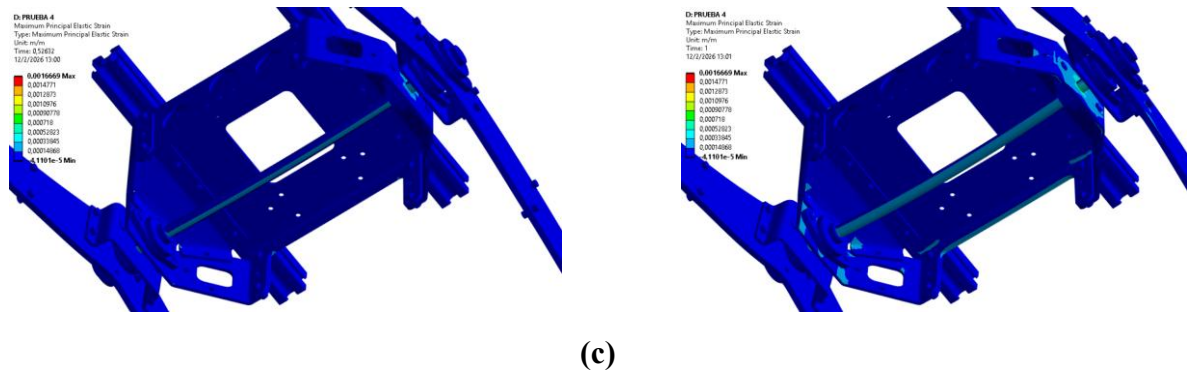
**Figura 24** Análisis cronológico de la respuesta estructural: (a) Relación de esfuerzo, deflexión y deformación unitaria bajo carga incremental; (b) Comparativa de la distribución de Deformación Total en estado de carga inicial a los 0.21s y carga crítica en 1s; (c) Comparativa de la distribución de Máximo Strain Elástico en estado de carga inicial a los 0.53s y carga crítica en 1s.



(a)



(b)



**Nota.** Elaboración propia.

El análisis estructural de la plataforma móvil, basado en el criterio de Von Mises, revela una respuesta lineal proporcional a la carga aplicada durante el ciclo de simulación. Al establecer un límite elástico de 193 MPa para la aleación de aluminio, se determinó que la estructura transgrede este umbral de seguridad exactamente a los 0.67 segundos, lo que corresponde a una carga crítica de 472.5 N. Superado este punto, identificado por la zona sombreada en la gráfica, el material inicia una fase de deformación irreversible (ver **Figura 24 (a)**). Este comportamiento se correlaciona con el Máximo Strain Elástico Principal, que registra un valor de  $2.05 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$  (0.2%) en el punto crítico, validando el inicio convencional de la fluencia y estableciendo la capacidad de carga nominal segura del chasis en 48.18 kg, equivalente a los 472 N.

Simultáneamente, la evaluación de la Deformación Total confirma una elevada rigidez mecánica, con un desplazamiento geométrico pico de apenas 0.5749 mm bajo la carga máxima de 700 N. La distribución de desplazamientos en el modelo 3D muestra que las deformaciones se concentran exclusivamente en los perfiles de soporte superiores, mientras que las bases de los motores y ejes laterales mantienen valores cercanos a 0 mm (ver **Figura 24 (b)**). Esta estabilidad garantiza la alineación cinemática del sistema de tracción omnidireccional.

En conclusión, la correlación de los análisis de esfuerzo, deflexión y strain permite validar el diseño para cargas de trabajo inferiores a 472.5 N. Mientras que el Esfuerzo Principal Máximo (150.54 MPa) visto en la **Figura 24 (c)**, permanece por debajo del límite de fluencia, indicando que no hay riesgo por tracción pura, el fallo potencial se atribuye a esfuerzos combinados detectados por el método Von Mises. Por lo tanto, se define un rango operativo seguro que evita la fatiga prematura y garantiza una recuperación elástica total de la estructura, optimizando la durabilidad del aluminio en entornos de automatización industrial.

## CAPÍTULO V

### 5.1 Construcción de la plataforma móvil omnidireccional

Este capítulo presenta la fase de construcción, integración y validación experimental de la plataforma móvil omnidireccional. El objetivo principal es verificar la factibilidad técnica del diseño propuesto, materializando el modelo virtual y las simulaciones previas en un sistema físico funcional.

### 5.2 Fabricación de esqueleto de aluminio de la plataforma móvil

La fabricación del esqueleto de la plataforma se llevó a cabo mediante procesos de mecanizado CNC, utilizando la infraestructura del laboratorio de robótica y prototipado de la universidad “RobLab”. Para la materialización de las piezas, se emplearon láminas de aluminio de 2 mm de espesor, además se utilizó una impresora 3D encargada de las piezas plásticas en material PLA. El flujo de trabajo inicio con la exportación de los vectores desde el diseño CAD hacia el software CAM Aspire Vectric. Esta herramienta permitió definir las trayectorias de corte y generar el código G necesario para controlar la fresadora CNC.

#### 5.2.1 Fabricación de las almas estructurales de aluminio

Las almas o refuerzos internos constituyen el núcleo estructural de cada extremidad. Su fabricación se realizó siguiendo el proceso de corte CNC sobre la lámina de aluminio de 2 mm (ver **Figura 25 (a)** y **Figura 25 (b)**).

Es importante destacar una iteración crítica en el diseño, aunque inicialmente se contempló una única alma central por extremidad, se optó por implementar una configuración de doble alma (dos placas paralelas) para cada brazo. Esta modificación tuvo como objetivo incrementar la rigidez torsional del conjunto. De esta forma, cada

extremidad pasó a tener dos paredes de aluminio en lugar de una, aumentando el grosor total de soporte de 2 mm a 4 mm.

Luego se procedió con la manufactura de las piezas de unión (ver **Figura 25 (c)** y **Figura 25 (d)**) diseñadas para sujetar el motor firmemente entre las dos láminas de aluminio.

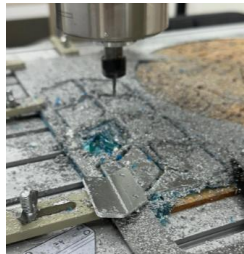
**Figura 25** Fabricación de alma de aluminio: (a) Ruteo en CNC; (b) Pieza obtenida después del corte; (c) Mecanizado CNC de bloques de unión; (d) Detalle del ensamblaje final mostrando la configuración de doble pared



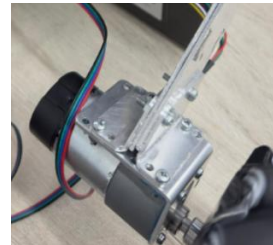
(a)



(b)



(c)



(d)

**Nota.** Elaboración propia.

### 5.2.2 Fabricación de unión de alma a suspensión y eslabón de articulación

La fabricación de los componentes de interconexión y los eslabones de articulación siguió una metodología híbrida. En una primera etapa se replicó el proceso de corte CNC para obtener el perfil plano de las piezas, (ver **Figura 26 (a)**), posteriormente, las piezas fueron sometidas a una operación secundaria de plegado mecánico. Dado que el diseño 3D exigía geometrías con ángulos específicos para el correcto funcionamiento cinemático de la suspensión, se utilizó un plegador manual de láminas (ver **Figura 26 (b)**). Este equipo permitió aplicar la fuerza necesaria para deformar

plásticamente el aluminio de 2 mm en las líneas de doblez predefinidas (ver **Figura 26 (c)** y **Figura 26 (d)**).

**Figura 26** Proceso de conformado de piezas: (a) Corte CNC; (b) Plegadora manual de láminas utilizada; (c) Unión finalizada; (d); Eslabones de articulación finalizados.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Nota.** Elaboración propia.

### 5.2.3 Ensamble de extremidades mecánicas

Cada módulo fue equipado con su respectivo motor y rueda Mecanum, utilizando tornillería de seguridad para evitar holguras por vibración (ver **Figura 27 (a)**). La integración de las extremidades se logró conectando ambas mediante un eje transversal de acero sólido. Este eje se encuentra asegurado mediante chumaceras (ver **Figura 27 (b)**).

**Figura 27** Sub-ensamble de extremidades mecánicas: (a) Integración de alma de aluminio, acoples, motorreductor y rueda mecanum; (b) Conexión de extremidades mediante eje de acero.



(a)



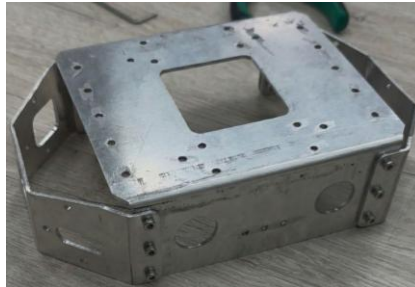
(b)

**Nota.** Elaboración propia.

#### 5.2.4 Manufactura de chasis principal

Tras la etapa de corte y limpieza, se procedió al doblado de las piezas según los ángulos especificados en los planos de diseño, utilizando el plegador manual. Finalmente, se procedió al ensamblaje del chasis principal (ver **Figura 28**).

**Figura 28** Chasis principal de la plataforma

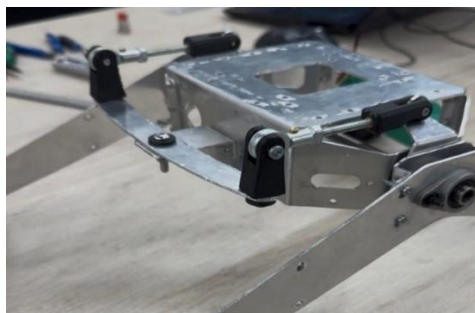


**Nota.** Elaboración propia.

#### 5.2.5 Manufactura del sistema de suspensión

Para completar el sistema de locomoción, se fabricaron las piezas restantes del sistema de suspensión de igual manera con mecanizado CNC. Luego, los componentes de unión y articulación se fabricaron mediante impresión 3D. Estas piezas plásticas actúan como rótulas o bisagras mecánicas que conectan las barras de aluminio con el chasis central. La función de estos elementos impresos es permitir el movimiento basculante de la suspensión (ver **Figura 29**).

**Figura 29** Ensamble del sistema de suspensión pasivo.

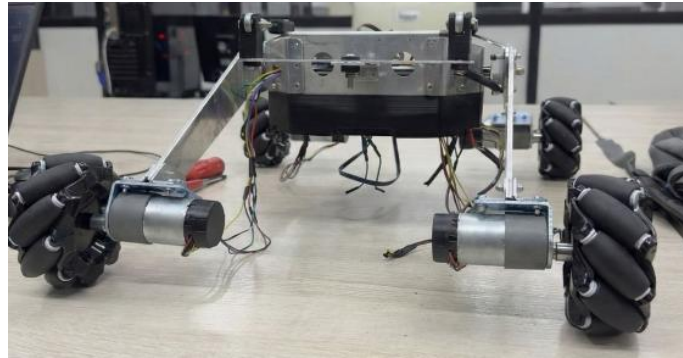


**Nota.** Elaboración propia.

### 5.2.6 Ensamble del esqueleto de la plataforma móvil

Una vez completados los sub-ensambles del chasis superior, suspensión y las extremidades, se procedió a la unificación del sistema para conformar el esqueleto final de la plataforma (ver **Figura 30 (c)**).

**Figura 30** Ensamble del esqueleto final.



**Nota.** Elaboración propia.

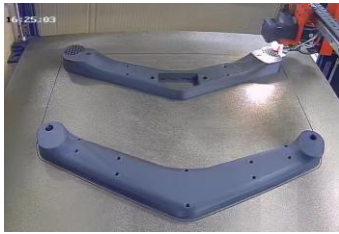
## 5.3 Manufactura del sistema de carenado de la plataforma móvil

La manufactura del sistema de carenado constituye una fase crítica en el desarrollo del hardware, ya que su propósito trasciende la estética para cumplir funciones de protección y soporte estructural. Este componente actúa como el "chasis" o envolvente externa diseñada para resguardar la electrónica sensible, los actuadores y las fuentes de energía de factores ambientales y posibles colisiones.

### 5.3.1 Manufactura del carenado de extremidades mecánicas

Se procedió a la fabricación de las carcasas exteriores mediante impresión 3D, utilizando filamento PLA de color negro (ver **Figura 31 (a)**, **Figura 31 (b)** y **Figura 31 (c)**).

**Figura 31** Proceso de carenado de extremidades: (a) Impresión 3d de las carcasas en PLA; (b) Montaje sobre alma de aluminio; (c) Acabado de las extremidades protegidas.



(a)



(b)



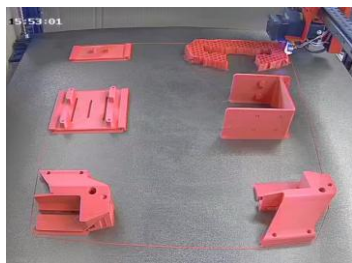
(c)

**Nota.** Elaboración propia.

### 5.3.2 Manufactura de carenado del chasis principal

La fabricación del recubrimiento superior se realizó utilizando filamento PLA de color rojo, tonalidad seleccionada para mantener la identidad visual institucional de la universidad (ver **Figura 32 (a)**, **Figura 32 (b)** y **Figura 32 (c)**).

**Figura 32** Integración del carenado principal: (a) Proceso de impresión 3D; (b) Montaje de la cubierta superior sobre el chasis; (c) Ensamblaje general unificando cuerpo principal con el tren de rodaje.



(a)



(b)



(c)

**Nota.** Elaboración propia.

## 5.4 Integración electrónica de la plataforma móvil

### 5.4.1 Integración de la batería

Se procedió a la instalación de la batería dentro de la base plástica del chasis. El circuito de potencia incluye un interruptor basculante instalado en serie con la batería que está ubicado en una posición accesible del chasis, permitiendo el encendido y apagado manual de la plataforma de manera rápida y segura. La disposición final de estos elementos se muestra en la **Figura 33**.

**Figura 33** Montaje de batería Li-Po

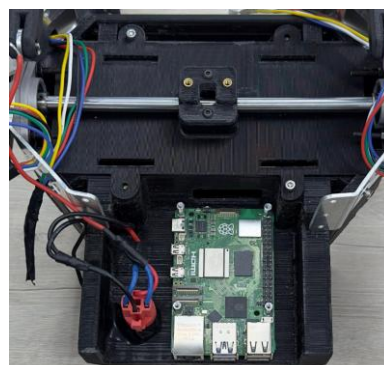


**Nota.** Elaboración propia.

### 5.4.2 Integración de la SBC de la plataforma móvil

La instalación de la tarjeta de control principal Raspberry Pi 5, se realizó en el espacio reservado dentro de la estructura impresa en 3D (ver **Figura 34**).

**Figura 34** Integración de la electrónica SBC

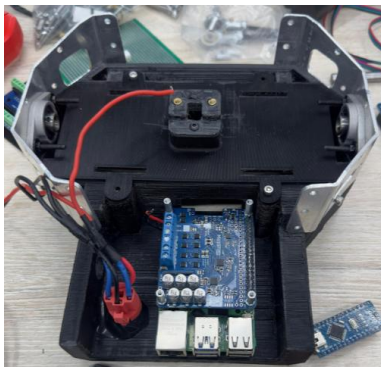


**Nota.** Elaboración propia.

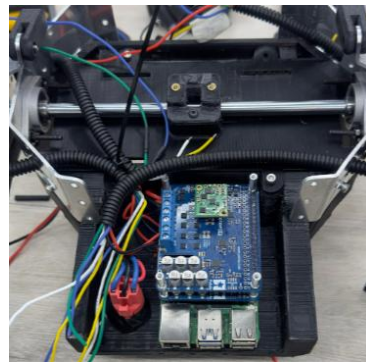
### 5.4.3 Integración de los controladores de motores

Se instalaron los controladores Motoron que son compatibles con el formato de la SBC (Single Board Computer), lo que permitió su montaje directo sobre la tarjeta principal introduciéndose a las pinetas de la Raspberry Pi 5 (ver **Figura 35 (a)**). Finalmente, se instaló el módulo regulador de voltaje en la parte superior del conjunto. Este sistema permite que, con una sola entrada de la batería, se alimente toda la electrónica del robot (ver **Figura 35 (b)**).

**Figura 35** Montaje de drivers: (a) Montaje de primer driver; (b) Montaje del segundo driver y el regulador de voltaje.



(a)



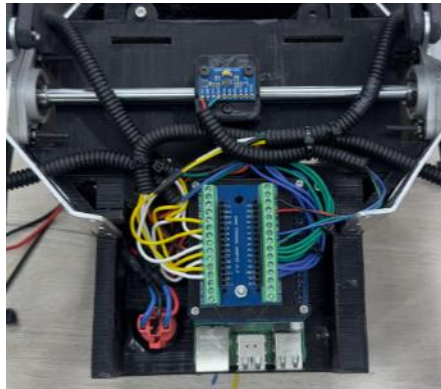
(b)

**Nota.** Elaboración propia.

### 5.4.4 Integración de acelerómetro y base para Arduino Nano

Sobre los controladores de motores, se añadió un tercer nivel destinado al Arduino Nano. En esta unidad se centralizaron las señales (A y B) de los encoders de los cuatro motores. Asimismo, mediante el bus de comunicación I2C, se integró el sensor inercial MPU-9250, para el cálculo de la odometría, junto con la interfaz de control para los drivers Motoron. Esta configuración permite que el Arduino Nano procese de forma independiente la velocidad y posición de cada actuador, ejecutando los algoritmos de control necesarios para la dinámica del sistema (ver **Figura 36**).

**Figura 36** Integración de lectura de sensores y control de bajo nivel

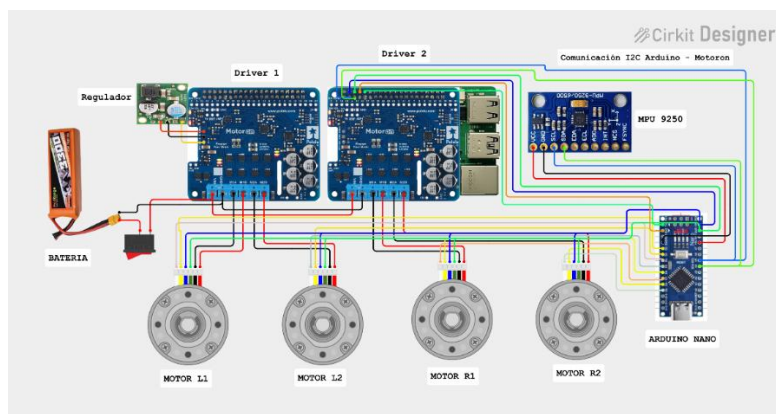


**Nota.** Elaboración propia.

### 5.4.5 Esquema de conexiones y conexiones físicas

La integración electrónica final se ejecutó replicando físicamente el diagrama esquemático desarrollado previamente en el software Circuit Designer (ver **Figura 37**). La arquitectura de hardware centraliza la etapa de potencia sobre la Raspberry Pi 5 mediante el montaje apilado de los controladores, donde el driver inferior gestiona los motores del flanco izquierdo y el superior los del flanco derecho, integrando en este último la regulación de voltaje para la alimentación general del sistema.

**Figura 37** Diagrama esquemático de conexiones.

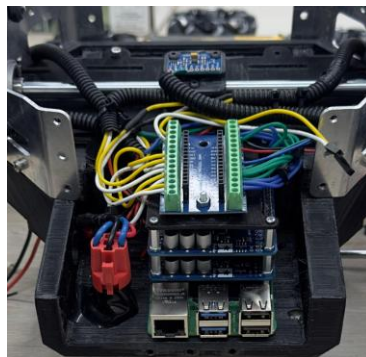


**Nota.** Elaboración propia.

Para la adquisición de datos de odometría, se conectaron las fases de los encoders en cuadratura a los pines digitales del Arduino Nano, configurando la lectura de las fases A y B de cada motor en puertos específicos para su procesamiento en paralelo. Es

fundamental destacar que la alimentación lógica de estos sensores se deriva de la línea de 5V del microcontrolador, habiéndose unificado todas las referencias entre la batería, la Raspberry Pi 5 y el Arduino Nano para establecer un nodo de tierra común y mitigar el ruido eléctrico. Asimismo, el Arduino Nano asume el control directo de los drivers Motoron, gestionando las instrucciones de movimiento y lazo de control de los actuadores de forma síncrona. Finalmente, el microcontrolador integra los datos del sensor inercial MPU-9250 con la información de los encoders para transmitir el estado del sistema vía protocolo UART (pines TX/RX) hacia la unidad central de procesamiento, completando así la implementación física mostrada en la **Figura 38**.

**Figura 38** Implementación física del cableado.



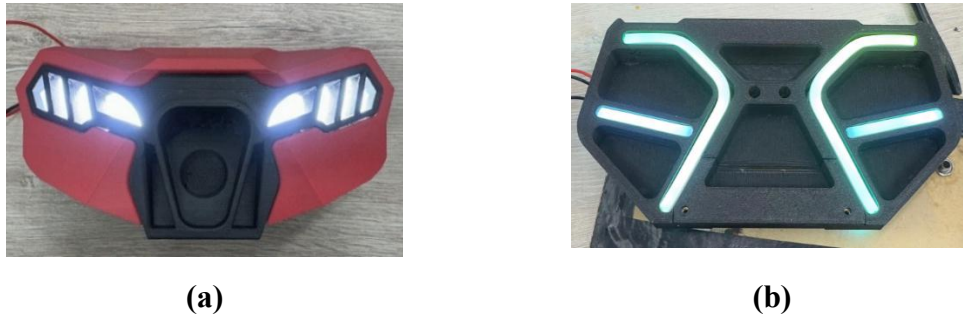
**Nota.** Elaboración propia.

#### 5.4.6 Implementación de luces LED

Se integró un sistema de iluminación LED en la parte frontal y posterior de la plataforma. Este subsistema fue concebido no solo como elemento estético, sino como una fuente de luz activa necesaria para futuras implementaciones de visión artificial, facilitando la detección de objetos mediante cámaras en entornos de baja luminosidad (ver **Figura 39 (a)**).

De manera complementaria, se instaló una matriz de tiras LED en la sección posterior del carenado. Este componente cumple una función dual, estética y señalización visual, alojado dentro de una carcasa impresa en 3D (ver **Figura 39 (b)**).

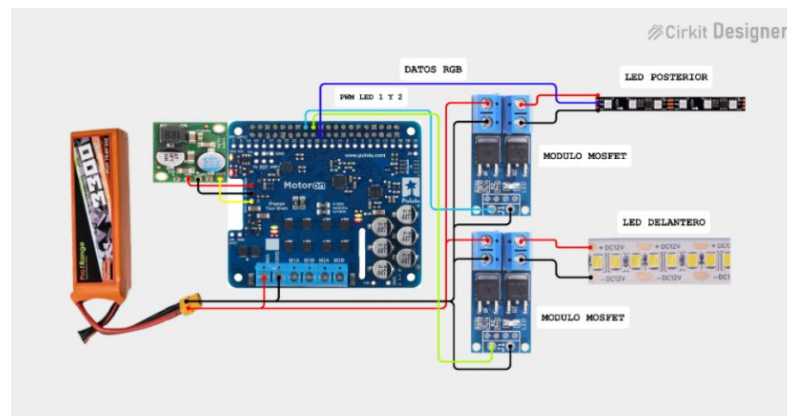
**Figura 39** Sistema de iluminación integrado: (a) Provisión de luz frontal; (b) Modulo LED posterior.



**Nota.** Elaboración propia.

A continuación, en la **Figura 40** se observa el diagrama de conexiones para el control desde la Raspberry Pi 5.

**Figura 40** Diagrama de conexiones LED

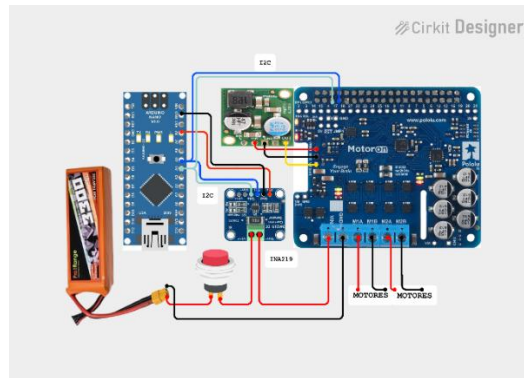


**Nota.** Elaboración propia.

#### 5.4.7 Implementación de sensor INA219

Para la caracterización energética de la plataforma, se implementó un sistema de monitoreo en tiempo real basado en el sensor de potencia INA219. Este dispositivo se seleccionó por su capacidad de realizar mediciones de corriente en el lado alto, con una frecuencia de muestreo de 50 Hz ( $T_s = 20 \text{ ms}$ ) y un protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C, lo que permite monitorear el consumo total del sistema sin alterar la referencia de tierra. El esquema de conexión se puede ver en la **Figura 41**, el sensor intercepta la línea positiva de la fuente de alimentación principal.

**Figura 41** Esquema de conexión sensor INA219



**Nota.** Elaboración propia.

#### 5.4.8 Ensamble final de la plataforma móvil

Se procedió a la integración definitiva de todos los subsistemas, unificando el chasis carenado con el tren motriz y asegurando el cableado interno. El prototipo resultante incorpora rieles superiores de aluminio para futura escalabilidad, quedando el hardware totalmente operativo para dar inicio a la etapa de programación (ver **Figura 42**).

**Figura 42** Prototipo final ensamblado



**Nota.** Elaboración propia.

Luego se procedió a evaluar el peso de la plataforma móvil, obteniendo un peso de 13.6 Kg, de acuerdo con la **Figura 43**.

**Figura 43** Peso de la plataforma móvil omnidireccional



**Nota.** Elaboración propia.

## 5.5 Implementación del software de control de la plataforma móvil

La implementación del software de control de la plataforma móvil omnidireccional se desarrolló bajo una arquitectura distribuida, en la cual se separan claramente las tareas de alto nivel, ejecutadas en un sistema basado en ROS 2, y las tareas de control en tiempo real, ejecutadas en un microcontrolador Arduino.

El sistema de control fue diseñado para accionar una base móvil con cuatro ruedas mecanum, permitiendo desplazamientos omnidireccionales mediante el control independiente de la velocidad angular de cada rueda. Para ello, se implementaron algoritmos de cinemática, control en lazo cerrado, comunicación serial y mecanismos de seguridad ante fallos de comunicación.

### 5.5.1 Arquitectura general del software de control

El software se estructuró en tres niveles funcionales claramente definidos:

1. Nivel de supervisión y planificación (ROS 2): Encargado de generar comandos de movimiento en forma de velocidades lineales y angulares (`/cmd_vel`), provenientes de interfaces de teleoperación o módulos de navegación.
2. Nivel de conversión cinemática y comunicación (ROS 2): Responsable de transformar los comandos de velocidad del robot en velocidades angulares

individuales para cada rueda Mecanum, y de establecer la comunicación serial bidireccional con el microcontrolador.

3. Nivel de control en tiempo real (Arduino): Encargado de ejecutar el control de velocidad de cada rueda mediante controladores PI, leer los encoders, accionar los drivers de potencia y garantizar la seguridad del sistema ante fallos.

Esta división permitió que las tareas críticas en tiempo real se ejecuten de forma determinista en el microcontrolador, mientras que las tareas de mayor nivel se gestionan en el sistema embebido con ROS 2.

### **5.5.2 Comunicación serial entre ROS 2 y Arduino Nano**

La comunicación entre el sistema de alto nivel implementado en ROS 2 y el controlador embebido Arduino Nano, se realiza mediante un enlace serial tipo UART sobre interfaz USB. Esta comunicación sigue un modelo maestro–esclavo, en el cual el sistema PC/SBC que ejecuta ROS 2 actúa como maestro, mientras que el Arduino opera como un controlador esclavo de bajo nivel.

El objetivo de esta interfaz es la transmisión de consignas de velocidad y el intercambio de información de diagnóstico y monitoreo, manteniendo una clara separación entre las funciones de control de alto nivel y el control embebido.

#### **5.5.2.1 Datos recibidos por el Arduino Nano**

El Arduino Nano recibe exclusivamente comandos de velocidad por rueda, los cuales son enviados desde ROS 2 en formato ASCII mediante la siguiente estructura:

$$D, sp_{fl}, sp_{fr}, sp_{rl}, sp_{rr}$$

donde:

- *D*: indica un comando de conducción (*Drive*)

- $sp_{fl}$ : referencia de velocidad angular para la rueda delantera izquierda.
- $sp_{fr}$ : referencia de velocidad angular para la rueda delantera derecha.
- $sp_{rl}$ : referencia de velocidad angular para la rueda trasera izquierda.
- $sp_{rr}$ : referencia de velocidad angular para la rueda trasera derecha.

Estas consignas son utilizadas directamente como referencias de entrada para los controladores proporcional e integral (PI) independientes de cada rueda. Cabe destacar que el Arduino no recibe información de alto nivel, como trayectorias, posiciones, controladores externos o estados globales del robot, ya que estos cálculos se realizan íntegramente en el sistema ROS 2.

### 5.5.2.2 Datos enviados por el Arduino

Como salida, el Arduino transmite información de realimentación y diagnóstico de forma periódica a una frecuencia aproximada de 50 Hz. El mensaje enviado tiene el siguiente formato general:

$$F, t_{us}, w_{fl}, w_{fr}, w_{rl}, w_{rr}, u_{fl}, u_{fr}, u_{rl}, u_{rr}, sp_{fl}, sp_{fr}, sp_{rl}, sp_{rr}$$

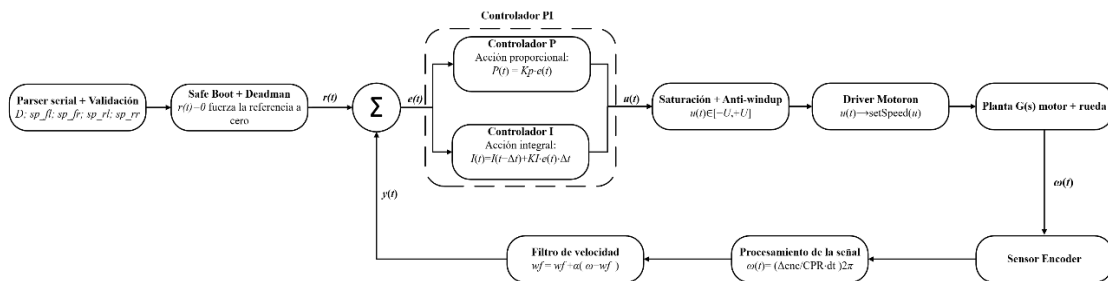
donde  $t_{us}$  corresponde al tiempo del microcontrolador,  $w_*$  son las velocidades angulares medidas y filtradas,  $u_*$  representan las señales de control aplicadas a los motores y  $sp_*$  los setpoints activos en cada rueda. Esta información es utilizada para odometría. Adicionalmente, durante el arranque o ante eventos específicos, el Arduino puede enviar mensajes de estado simples, como READY, con el fin de indicar que el sistema se encuentra operativo.

### 5.5.3 Implementación del control embebido en Arduino

El microcontrolador Arduino actúa como controlador de bajo nivel de la plataforma móvil, ejecutando las consignas de velocidad generadas por el sistema ROS

2. Su función principal es regular la velocidad angular de cada una de las cuatro ruedas. Las referencias de velocidad son recibidas mediante comunicación serial y transformadas en señales de control para los actuadores, como se muestra en la **Figura 44**, la referencia de velocidad  $r(t)$  recibida desde el sistema de alto nivel es comparada con la velocidad realimentada  $y(t)$ , permitiendo el cálculo del error de control  $e(t)$ . Este error es procesado por el controlador PI en tiempo discreto, cuya salida es limitada mediante un bloque de saturación con mecanismo anti-windup antes de ser enviada al sistema de actuación. Los drivers de motor ejecutan las consignas de velocidad sobre la planta motor/rueda, mientras que los encoders proporcionan la información necesaria para la realimentación del sistema.

**Figura 44** Diagrama de bloques de la estructura de control embebido implementado en Arduino.



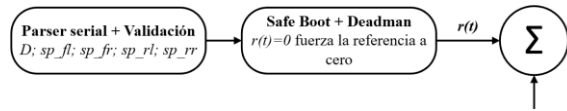
**Nota.** Elaboración propia.

### 5.5.3.1 Inicialización y arranque seguro

Durante el arranque, el microcontrolador Arduino se inicializa en un modo SAFE BOOT, manteniendo los motores completamente detenidos para evitar movimientos inesperados ante reinicios o fallos de alimentación. En este estado, la referencia de velocidad  $r(t)$  se fuerza a cero, impidiendo que el controlador PI genere acción sobre los actuadores. La habilitación de los motores ocurre únicamente cuando se recibe un comando válido desde el sistema de alto nivel en ROS 2, el cual es verificado por el bloque de Parser serial + Validación. Además, se implementa un mecanismo deadman

que desactiva automáticamente los motores si no se reciben comandos dentro de un tiempo definido, forzando nuevamente la referencia a cero (ver **Figura 45**).

**Figura 45** Diagrama de bloques: Entrada de datos



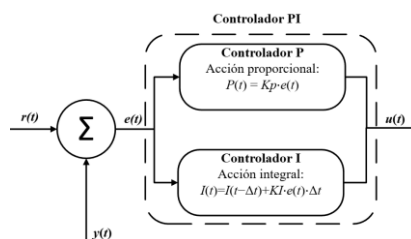
**Nota.** Elaboración propia.

### 5.5.3.2 Implementación del controlador PI

El control de velocidad de cada una de las ruedas de la plataforma móvil se implementa mediante un controlador proporcional/integral (PI) ejecutado en el microcontrolador Arduino. Este controlador constituye el núcleo del sistema de control embebido y tiene como objetivo minimizar el error entre la referencia de velocidad angular y la velocidad real medida por los encoders.

Tal como se muestra en la **Figura 46** el controlador PI recibe como entrada el error de velocidad  $e(t)$ , el cual se obtiene a partir de la diferencia entre la referencia de velocidad  $r(t)$  y la señal de realimentación  $y(t)$ , correspondiente a la velocidad angular estimada de cada rueda.

**Figura 46** Diagrama de bloques Controlador PI



**Nota.** Elaboración propia.

- Acción proporcional: se implementa de forma directa y está dada por la ecuación (6):

$$P(t) = K_p \cdot e(t) \quad (6)$$

donde  $K_p$  es la ganancia proporcional, encargada de proporcionar una respuesta rápida del sistema ante cambios en la referencia.

- Acción Integral: Con el fin de eliminar el error en régimen permanente, se incorpora una acción integral, la cual se implementa en forma discreta considerando el período de muestreo  $T_s$ , como se ve en la ecuación (7).

$$I(t) = I(t - 1) + K_i \cdot e(t) T_s \quad (7)$$

donde  $K_i$  es la ganancia integral y  $I(t)$  representa el valor acumulado de la integral del error, y el periodo de muestreo  $T_s = 0.01s$  que equivale a una frecuencia de muestreo de 100Hz.

- Señal de control: Es la salida del controlador PI se obtiene como la suma de las acciones proporcional e integral, como se observa en la ecuación (8).

$$u(t) = P(t) + I(t) \quad (8)$$

Esta señal de control representa la consigna de velocidad que será aplicada a los actuadores, previa etapa de saturación y protección, tal como se indica en el diagrama de bloques.

El controlador PI se ejecuta de manera periódica dentro del ciclo principal del microcontrolador Arduino Nano, con un período de muestreo constante ( $T_s = 100Hz$ ), garantizando una ejecución determinista del algoritmo de control. La implementación discreta permite su integración directa con el procesamiento de los encoders y la

comunicación serial con el sistema ROS 2. La correcta selección de las ganancias  $K_p$  y  $K_i$  permite alcanzar un compromiso adecuado entre rapidez de respuesta, estabilidad y precisión en el seguimiento de las consignas de velocidad.

### 5.5.3.3 Saturación y mecanismo anti-windup

La señal de control generada por el controlador PI está sujeta a limitaciones físicas propias de los actuadores y de los drivers de motor. Por esta razón, la salida del controlador es sometida a un proceso de saturación antes de ser enviada al bloque de actuación, tal como se muestra en la **Figura 44**.

La saturación impone límites máximos y mínimos a la señal de control  $u(t)$ , garantizando que los comandos de velocidad enviados a los motores se mantengan dentro de un rango seguro de operación, como se puede ver en la ecuación (9).

$$\mathbf{u}_s(t) = \mathbf{sat}(\mathbf{u}(t)), \quad \mathbf{u}_s(t) \in [\mathbf{u}_{min}, \mathbf{u}_{max}] \quad (9)$$

donde  $u_{min}$  y  $u_{max}$  representan los valores extremos permitidos por los drivers de motor.

Sin embargo, cuando la señal de control alcanza los límites de saturación, el término integral del controlador PI puede continuar acumulándose, provocando el fenómeno conocido como integrator windup. Este efecto genera sobreimpulsos, respuestas lentas al salir de la saturación y posibles oscilaciones en el sistema.

Para mitigar este problema, se implementó un mecanismo de anti-windup, el cual actúa directamente sobre el término integral del controlador. Este mecanismo limita el crecimiento del integrador cuando la señal de control alcanza los límites de saturación y reduce progresivamente su contribución en dichas condiciones.

En la práctica, el término integral es restringido a un rango predefinido y se evita su acumulación adicional cuando (ver ecuación (10)):

$$\mathbf{u}(t) \neq \mathbf{u}_s(t) \quad (10)$$

De esta forma, el integrador solo actúa plenamente cuando el sistema opera dentro del rango lineal del controlador, permitiendo una recuperación rápida y estable una vez que la señal de control vuelve a valores no saturados.

#### 5.5.3.4 Configuración de los drives de motor

El bloque de actuación del sistema de control embebido está conformado por los controladores de motor tipo Motoron, los cuales convierten la señal de control  $u(t)$  generada por el controlador PI en comandos de velocidad para los motores de la plataforma móvil. La plataforma emplea dos controladores Motoron comunicados mediante el bus I<sup>2</sup>C, permitiendo el control independiente de las cuatro ruedas. Durante la inicialización, se configuran las direcciones I<sup>2</sup>C, los límites de aceleración y desaceleración, los temporizadores de seguridad y los rangos máximos de velocidad.

#### 5.5.3.5 Adquisición y procesamiento de la señal de los encoders

La medición de la velocidad angular de cada rueda se realiza mediante encoders incrementales en cuadratura acoplados a los motores de la plataforma móvil. Este bloque proporciona la realimentación necesaria para el lazo de control de velocidad implementado en el Arduino. Las señales de los encoders son adquiridas mediante interrupciones por cambio de estado. A partir de estas señales, se calcula el incremento de cuentas del encoder durante cada período de muestreo, el cual representa el desplazamiento angular de la rueda en dicho intervalo.

El cálculo de la velocidad angular de la rueda  $i$  en el instante de muestreo  $k$  se expresa mediante la ecuación (11).

$$\omega_i[k] = \frac{s_i \Delta enc_i[k]}{CPR T_s} 2\pi \quad (11)$$

donde:

- $\omega_i[k]$  es la velocidad angular de la rueda  $i$  en el instante  $k$ , expresada en rad/s.
- $\Delta enc_i[k]$  es el incremento de cuentas del encoder medido durante el período de muestreo.
- $CPR$  es el número de cuentas del encoder por una vuelta completa de la rueda, considerando la cuadratura y la relación de transmisión.
- $T_s$  es el período de muestreo del sistema de control (en segundos).
- $s_i \in \{+1, -1\}$  es un factor de corrección de signo que asegura una conversión de giro consistente entre ruedas.
- $2\pi$  es el factor de conversión de revoluciones a radianes

Debido al carácter discreto de la medición y a la presencia de ruido en la señal del encoder, la velocidad calculada es posteriormente sometida a un filtro de primer orden. Este filtrado suaviza la señal de realimentación antes de ser utilizada por el controlador PI, mejorando la estabilidad del sistema y reduciendo oscilaciones no deseadas.

La ecuación discreta del filtro de velocidad se expresa en la ecuación (12):

$$\omega_f[k] = \omega_f[k - 1] + \alpha(\omega[k] - \omega_f[k - 1]) \quad (12)$$

donde:

- $\omega_f[k]$  es la velocidad angular filtrada en el instante  $k$ .
- $\omega[k]$  es la velocidad angular calculada a partir del encoder.

- $\alpha \in (0,1)$  es el coeficiente de filtrado, el cual determina el compromiso entre suavizado de la señal y rapidez de respuesta del sistema.

Este filtro corresponde a un filtro paso bajo exponencial, el cual atenúa componentes de alta frecuencia asociadas al ruido de medición sin introducir retardos en la dinámica de control

La señal de velocidad filtrada constituye la salida del bloque de medición  $y(t)$  y es empleada directamente en el cálculo del error de control del lazo cerrado de velocidad de cada rueda. El error de control, se define como la diferencia entre la consigna de velocidad y la velocidad realimentada del sistema, de acuerdo con la ecuación (13).

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (13)$$

donde  $r(t)$  representa la consigna de velocidad angular generada por el sistema de alto nivel, y  $y(t)$  corresponde a la velocidad angular medida y procesada a partir de los encoders.

La ejecución periódica de este lazo, sincronizada con el período de muestreo del sistema, garantiza un control estable y preciso de la velocidad angular de cada rueda, permitiendo que la plataforma móvil reproduzca de forma confiable las consignas generadas por el sistema ROS 2.

#### 5.5.4 Integración con ROS 2

La integración del sistema robótico con ROS 2 se estructura bajo una arquitectura modular basada en paquetes, permitiendo una separación clara entre la descripción del robot, la lógica de control y la orquestación del sistema completo. Esta organización facilita la escalabilidad, depuración y reutilización del código.

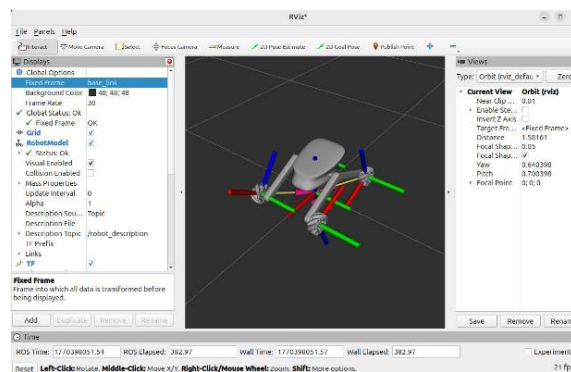
### 5.5.4.1 Estructura del workspace ROS 2

El workspace ROS 2 se organiza en tres paquetes principales, cada uno con una función claramente definida:

#### A) robot\_description

Este paquete contiene la descripción geométrica y cinemática del robot. Se define el modelo URDF/XACRO, incluyendo el *base\_link*, las ruedas mecanum, las relaciones entre *links* y *joints*, así como las propiedades geométricas necesarias para visualización y publicación de transformaciones (*TF*). Su función principal es proporcionar un modelo consistente del robot para herramientas como RViz y para el manejo de referencias espaciales dentro del sistema ROS (ver Figura 47).

**Figura 47** Visualización en RViz del modelo URDF y sistema de referencias del robot móvil en ROS 2



**Nota.** Elaboración propia.

#### B) omni\_base

Este paquete implementa la capa de control y sensado de la base móvil.

Incluye:

- La cinemática directa e inversa del sistema mecanum (kinematics.py)

- El nodo de comunicación serial con el microcontrolador Arduino (serial\_bridge.py, wheel\_omega, /joint\_states, /cmd\_vel)
- La generación de odometría basada en velocidades de rueda (Wheel\_odom.py: /wheel/odom, base\_link)
- La publicación de estados de las ruedas y transformaciones dinámicas.

En esta capa, se realiza la traducción entre comandos de alto nivel (/cmd\_vel) y consignas de velocidad por rueda, manteniendo al Arduino como controlador de bajo nivel.

#### C) omni\_bringup

Este paquete se encarga de la inicialización y coordinación del sistema completo mediante archivos *launch*. Permite levantar de forma simultánea todos los nodos necesarios, descripción del robot (robot\_state\_publisher), comunicación serial (serial\_bridge), cálculo de odometría y fusión sensorial (wheel\_odometry, robot\_localization), garantizando una ejecución reproducible y coherente del sistema.

#### 5.5.4.2 Flujo de información en ROS 2

El flujo de información sigue una arquitectura jerárquica:

1. El sistema inicia con la generación de comandos de velocidad a través del nodo /teleop\_twist\_keyboard, el cual publica mensajes en el tópico /cmd\_vel.
2. El nodo /serial\_bridge recibe esta información y actúa como interfaz entre ROS 2 y el controlador embebido, enviando las consignas al Arduino mediante comunicación serial.

3. En paralelo, el nodo `/datos_ina` publica información del estado energético en el tópico `/battery_state`, permitiendo la supervisión del sistema.
4. El Arduino ejecuta el control PI de velocidad por rueda y devuelve información de realimentación (velocidades y estados). Esta información es procesada por el nodo `/serial_bridge`, que publica velocidades individuales en `/wheel_omega` y estados articulares en `/joint_states`.
5. El nodo `/wheel_odometry` utiliza las velocidades de rueda para calcular la odometría del robot, mientras que `/ekf_imu_odom` fusiona información adicional para mejorar la estimación del estado.
6. Posteriormente, `/robot_state_publisher` emplea `/joint_states` junto con el modelo definido en `/robot_description` para generar las transformaciones cinemáticas.
7. Finalmente, el sistema publica las transformaciones en `/tf`, las cuales son consumidas por los nodos `transform_listener`, permitiendo la correcta representación espacial del robot dentro del entorno ROS 2 y su visualización en herramientas como RViz.

Esta arquitectura permite desacoplar claramente el control embebido del control de alto nivel, garantizando modularidad, escalabilidad y alineación con las buenas prácticas de diseño en sistemas robóticos basados en ROS 2 (ver **Figura 48**).

**Figura 48** Diagrama de comunicación y flujo de tópicos ROS 2 del sistema de control y odometría del robot móvil.



**Nota.** Elaboración propia.

### 5.5.5 Consideraciones finales de la implementación

La implementación del software de control de la plataforma móvil permitió obtener un sistema estable, seguro y modular. La separación entre el control de alto nivel y el control embebido en tiempo real facilita el mantenimiento del sistema y su futura ampliación, permitiendo la incorporación de nuevos sensores o algoritmos de navegación sin modificar la estructura base del control.

Asimismo, la inclusión de múltiples mecanismos de seguridad y monitoreo contribuye a una operación confiable, lo cual es fundamental para plataformas móviles autónomas u operadas en entornos reales.

## CAPITULO VI

### 6.1 Pruebas y análisis de resultados

Una vez finalizada la integración del hardware y la programación de los algoritmos de control, se procedió con la fase de experimentación para validar el comportamiento del sistema holonómico. Esta etapa es fundamental para determinar la precisión del movimiento omnidireccional y la fiabilidad de la plataforma en condiciones de operación real.

### 6.2 Pruebas de control PI en las ruedas de la plataforma

Para la interpretación de las gráficas de telemetría, es necesario establecer que el eje de las ordenadas (Y) representa la velocidad angular medida en radianes por segundo, mientras que el eje de las abscisas (X) cuantifica el tiempo mediante muestras discretas. Dado que el sistema envía los datos por el puerto serial a una frecuencia de muestreo de 50 Hz, cada muestra equivale a un intervalo de 20 ms, por lo tanto, un bloque de 50 muestras representa exactamente un segundo de operación.

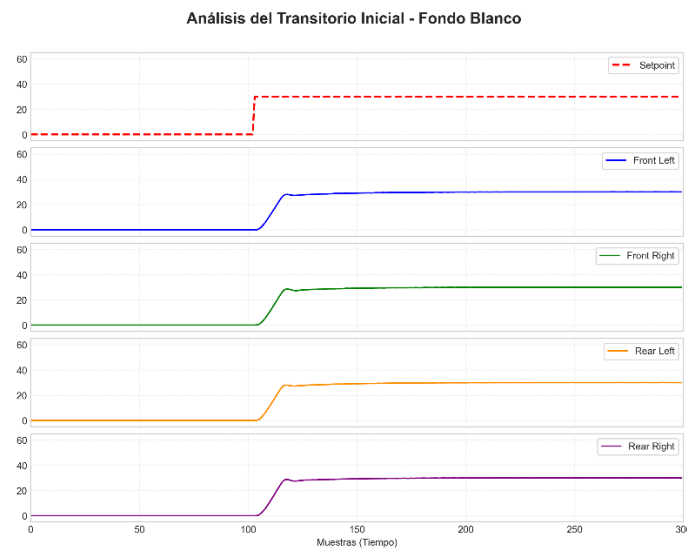
En la visualización, la línea roja segmentada define el Setpoint o valor de referencia (30 rad/s), mientras que las líneas continuas de colores (azul, verde, naranja y púrpura) corresponden a la respuesta dinámica de cada una de las cuatro ruedas.

Para estas pruebas se emplearon las ganancias del controlador  $K_p = 15$  y  $K_i = 45$ , seleccionadas experimentalmente mediante ajuste incremental. El valor de  $K_p$  fue definido para garantizar una respuesta rápida ante variaciones de la referencia sin generar oscilaciones significativas, mientras que  $K_i$  se incorporó para eliminar el error en régimen permanente y compensar efectos de fricción y pérdidas mecánicas del sistema.

### 6.2.1 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de control PI 1

El primer análisis del transitorio muestra un Tiempo de Subida ( $t_r$ ) aproximado de 0.25 segundos (12 a 13 muestras), indicando una respuesta casi instantánea ideal para la agilidad industrial. Se identificó un sobreimpulso Máximo ( $M_p$ ) de 36 rad/s, lo que representa un 20% de exceso sobre el valor deseado, este pico es aceptable para la inercia del sistema y no compromete la transmisión mecánica. El Tiempo de Asentamiento ( $t_s$ ) se sitúa cercano a 1.0 segundo, punto en el cual las oscilaciones desaparecen y la velocidad se estabiliza dentro de una banda de error del 2%. Finalmente, el Error de Estado Estacionario ( $e_{ss}$ ) es nulo, ya que la acción integral ( $K_i$ ) logra que la señal real converja exactamente con el setpoint, eliminando cualquier desfase causado por la fricción (ver Figura 49).

**Figura 49** Análisis de transitorio y estado estacionario de la plataforma omnidireccional con un setpoint de 30 rad/s



**Nota.** Elaboración propia.

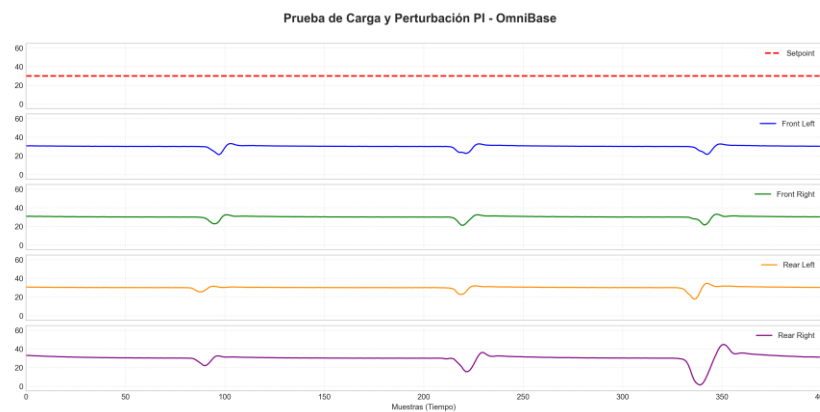
### 6.2.2 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de control PI 2

En esta prueba (ver Figura 50), se evaluó la robustez del sistema ante cambios abruptos de carga mediante tres eventos de contacto súbito con la superficie, manteniendo un setpoint de 30 rad/s. Al generarse la fricción con el suelo, la velocidad de las ruedas

descendió momentáneamente hasta un rango de 20 a 22 rad/s, sin embargo, la acción integral del controlador compensó el error acumulado incrementando la potencia, logrando recuperar la referencia en un tiempo de estabilización promedio de 0.6 s a 0.8 s, lo que confirma un rechazo efectivo a las perturbaciones de carga.

El tercer evento es el caso más crítico, donde la rueda trasera derecha sufrió una desaceleración drástica hasta casi 0 rad/s. La respuesta agresiva del controlador generó un sobreimpulso de recuperación hasta los 45 rad/s debido a la acumulación del término integral, pero logró estabilizarse nuevamente en menos de 1.2 segundos sin oscilaciones residuales. Esto valida que la sintonización PI implementada posee la dinámica necesaria para recuperar la tracción y mantener la velocidad constante, incluso ante variaciones severas en la resistencia del terreno.

**Figura 50** Evaluación de rechazo a perturbaciones del controlador PI ante variaciones abruptas de par resistente.



**Nota.** Elaboración propia.

### 6.3 Pruebas de odometría en trayectorias

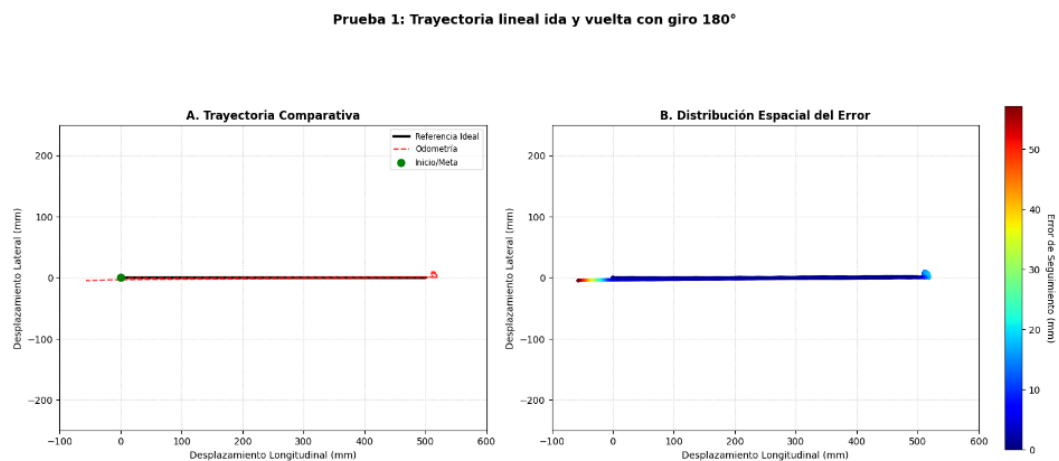
El sistema implementado fue sometido a pruebas experimentales con el objetivo de evaluar su desempeño y precisión. Para ello, se utilizaron los datos de odometría generados en ROS 2 a partir de la información de realimentación enviada por el Arduino, permitiendo monitorear el comportamiento del robot en tiempo real. A partir de estos

datos, se enviaron diferentes comandos de velocidad para ejecutar trayectorias omnidireccionales. Finalmente, se comparó la trayectoria planificada con la trayectoria realmente recorrida, además del error de la trayectoria real en base a la trayectoria programada.

### 6.3.1 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 1

La prueba 1 consistió en una trayectoria de traslación lineal de 500 mm seguida de un giro de  $180^\circ$  para retornar al origen, tal como se observa en la **Figura 51 (a)**, donde se comparan la referencia ideal y la odometría real en milímetros (mm). Por su parte, la **Figura 51 (b)**, presenta la Distribución Espacial del Error, utilizando una escala cromática para identificar las desviaciones que ocurren en la marcha.

**Figura 51** Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria lineal de 50 cm con rotación de  $180^\circ$ ; (b) Distribución espacial del error de la trayectoria.



**Nota.** Elaboración propia.

La gráfica resultante muestra un comportamiento lineal consistente durante el trayecto de ida (0 a 500 mm), validando la correcta sincronización de los motores y la precisión de la cinemática inversa programada. Sin embargo, al ejecutar la rotación de  $180^\circ$  en el extremo de la trayectoria, se observa un error de posición final acumulado de  $5.72\%$ , lo que representa un error relativo del 5.72 cm respecto a la distancia total

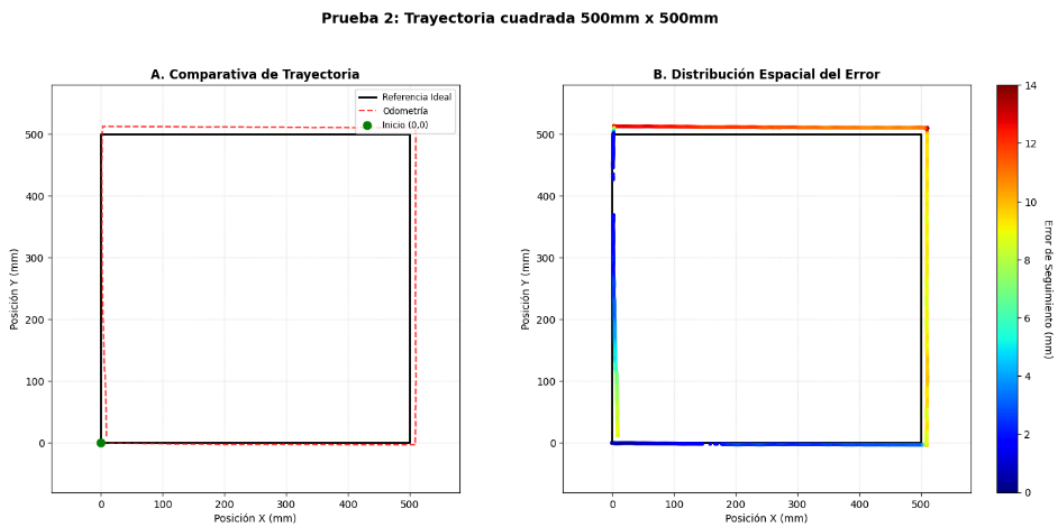
programada (ver **Figura 51 (b)**). Este desfase se produce principalmente en el eje longitudinal (X) y es atribuible al deslizamiento mecánico de los rodillos al invertir el sentido de marcha.

### 6.3.2 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 2

En esta prueba se ejecutó una trayectoria cuadrada de 500 mm por lado mediante desplazamientos holonómicos (capaz de girar sin necesidad de cambiar su orientación). Al inicio, la **Figura 52 (b)**, muestra una alta precisión en tonalidades azules (error cercano a 0 mm), no obstante, al aproximarse a los vértices, la inercia y el cambio brusco de velocidad elevan el error hasta picos de 14 mm, representados por estelas amarillas y rojas. Tras superar estos puntos críticos, el sistema recupera estabilidad y regresa a niveles mínimos de error antes de concluir cada segmento.

Como se observa en la **Figura 52 (a)**, el sistema mantiene una alta fidelidad en los tramos rectos, finalizando con un error de posición de 1.47 cm. Esto representa un error relativo de apenas 0.74% respecto al perímetro total de 2 metros, validando la eficacia del control cinemático.

**Figura 52** Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria cuadrada holonómica de 500 mm por lado; (b) Distribución espacial del error de la trayectoria.



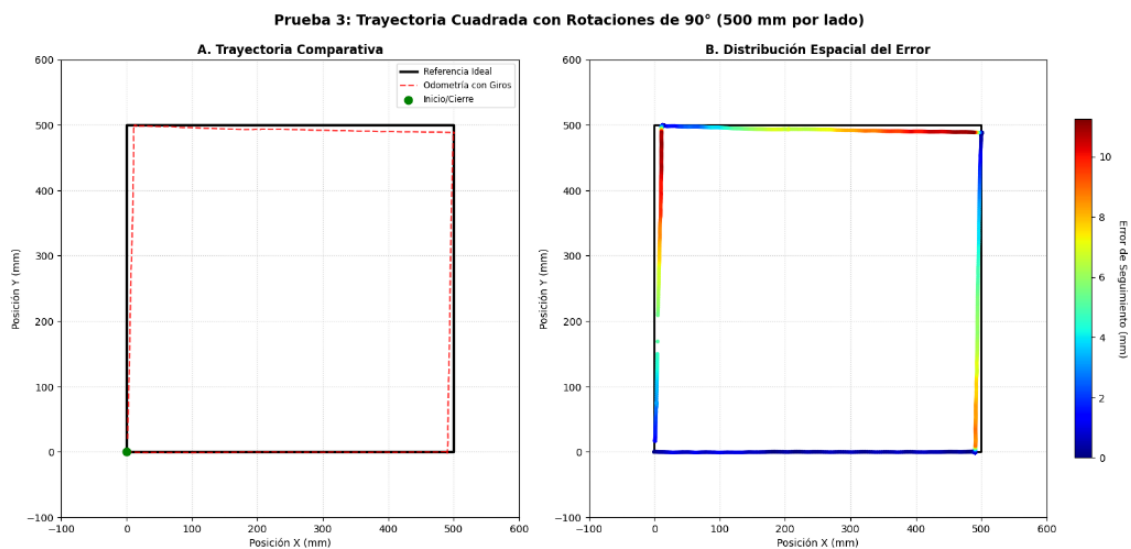
**Nota.** Elaboración propia.

### 6.3.3 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 3

Esta variante de la prueba cuadrada integra giros de  $90^\circ$  sobre el eje central del robot en cada vértice. Los resultados de la gráfica de la **Figura 53 (a)**, muestran que la inclusión de rotaciones activas incrementa la complejidad de la odometría, observándose una ligera deformación trapezoidal en la trayectoria estimada. Este fenómeno se debe a que cualquier error mínimo en la velocidad angular durante el giro, se traduce en un desvío de dirección para el siguiente tramo recto, provocando que los vectores de desplazamiento no sean perfectamente ortogonales entre sí.

Al analizar la **Figura 53 (b)**, se observa que la distribución del error espacial es más heterogénea que en la prueba holonómica pura, con estelas rojas persistentes tras cada giro que indican una mayor dificultad del sistema para estabilizarse tras una rotación. El experimento concluyó con un error de posición final de 2.14 cm, lo que representa un error relativo del 1.07% respecto al perímetro de 2 metros. Estas métricas confirman que, aunque la plataforma mantiene una precisión elevada, la ejecución de giros mecánicos sobre el eje introduce un componente de incertidumbre adicional en la navegación estimada.

**Figura 53** Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria cuadrada de 500 mm con rotaciones de  $90^\circ$  en los vértices (b) Distribución espacial del error de la trayectoria.



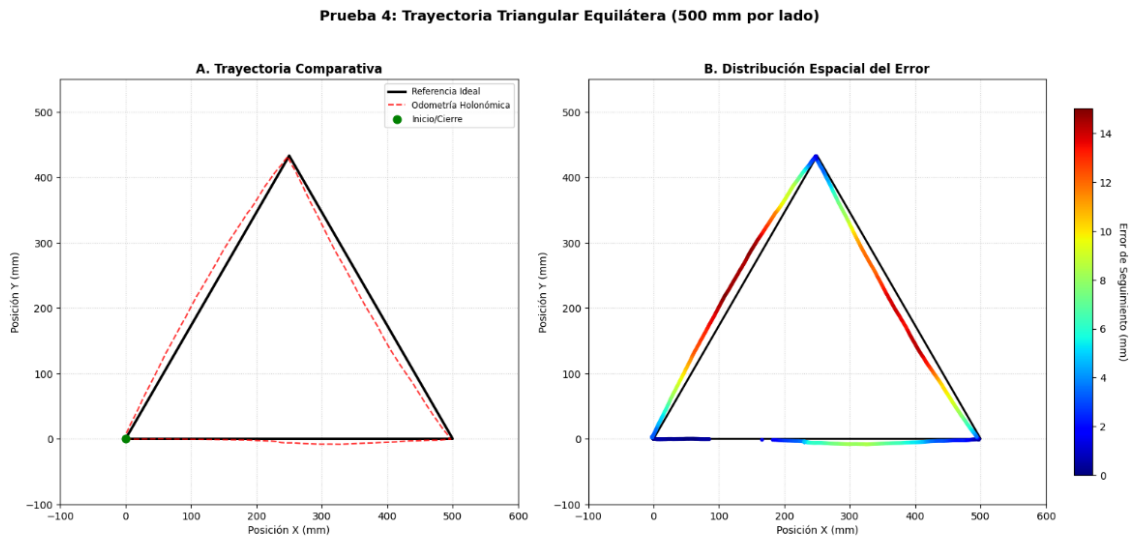
**Nota.** Elaboración propia.

#### **6.3.4 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 4**

Esta prueba consistió en la ejecución de un triángulo equilátero de 50 cm por lado, realizada mediante desplazamientos holonómicos. Esta trayectoria es técnicamente más exigente, ya que requiere velocidades diferenciales constantes para generar vectores a 60° y 120°, logrando definir con claridad los vértices en la **Figura 54 (a)**, y validando el modelo cinemático en ROS 2. No obstante, se observa una ligera curvatura en los segmentos y un error de cierre final atribuidos a la tracción no uniforme en movimientos oblicuos, lo que genera una deriva lateral por variaciones en el par motor de los actuadores.

Al analizar la **Figura 54 (b)**, muestra una precisión inicial elevada que se degrada ligeramente hacia tonalidades amarillas en los tramos oblicuos, con picos de error de seguimiento de hasta 15 mm. A pesar de estas variaciones, la prueba concluyó con un error de posición final de apenas 0.35 cm, lo que representa un error relativo de 0.23% respecto al perímetro total de 1.5 metros. Estos resultados confirman una alta repetibilidad y eficiencia del sistema ante comandos de velocidad complejos que involucran el movimiento simultáneo en ambos ejes.

**Figura 54** Respuesta de la odometría: (a) Trayectoria triangular holonómica 500 mm por lado; (b) Distribución espacial del error de la trayectoria.



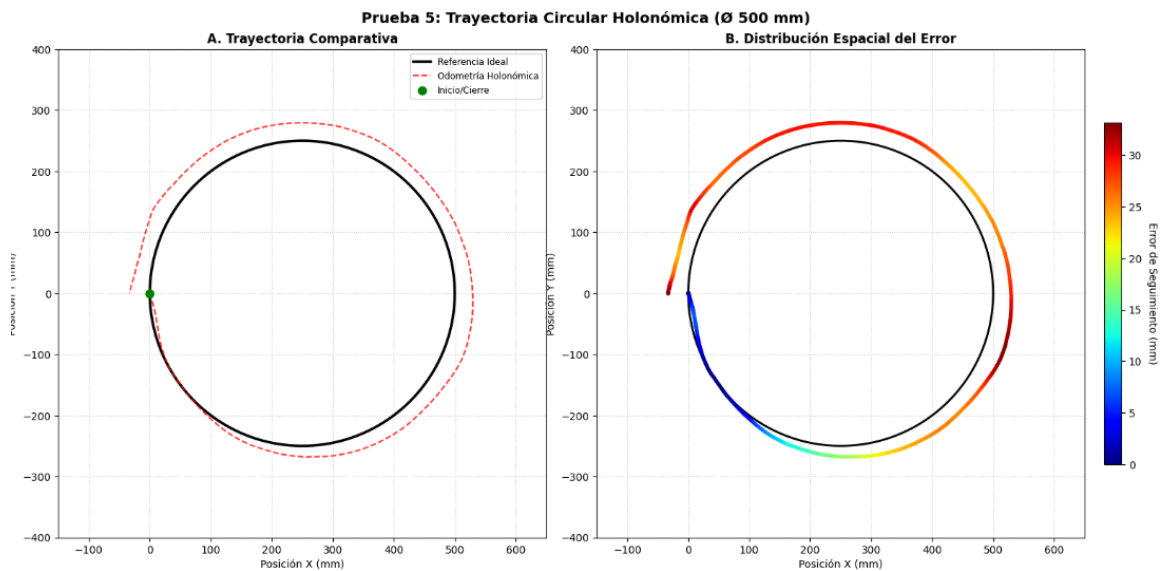
**Nota.** Elaboración propia.

### 6.3.5 Análisis de resultados obtenidos en la prueba de odometría 5

La quinta prueba consistió en generar una trayectoria circular de 500 mm de diámetro, representando el máximo nivel de exigencia algorítmica al requerir actualizaciones constantes de los vectores de velocidad tangencial para cada actuador. La **Figura 55 (a)**, muestra una curva suave que confirma una tasa de refresco robusta entre ROS 2 y el microcontrolador, no obstante, se observa una ligera tendencia en espiral abierta debido al error de cuantización de los encoders y la inercia rotacional de los rodillos. Estos factores introducen un retraso mecánico infinitesimal frente a la consigna variable, generando una deriva acumulada tras completar el ciclo de 360°.

Al analizar la **Figura 55 (b)**, se refleja este comportamiento con una transición gradual hacia tonalidades cálidas, alcanzando picos de error de seguimiento de hasta 33.17 mm. La prueba concluyó con un error de posición final de 3.27 cm, lo que representa un error relativo del 2.08% respecto al perímetro total de aproximadamente 1.57 metros.

**Figura 55** Evaluación de la odometría en trayectoria circular de 500 mm



**Nota.** Elaboración propia.

El error relativo máximo de todas las trayectorias es de 5.72% se considera aceptable para un sistema de navegación que opera exclusivamente con odometría (sin sensores de corrección externa como LIDAR). Este error se concentra tras la maniobra de rotación, donde las fuerzas de inercia y el cambio de par en los motores provocan un ligero patinado en las ruedas holonómicas. No obstante, la estabilidad de las pruebas demuestra que el robot es capaz de corregir desviaciones transversales de manera efectiva durante el desplazamiento en línea recta.

## 6.4 Prueba y análisis de consumo energético y autonomía

### 6.4.1 Perfil dinámico de carga

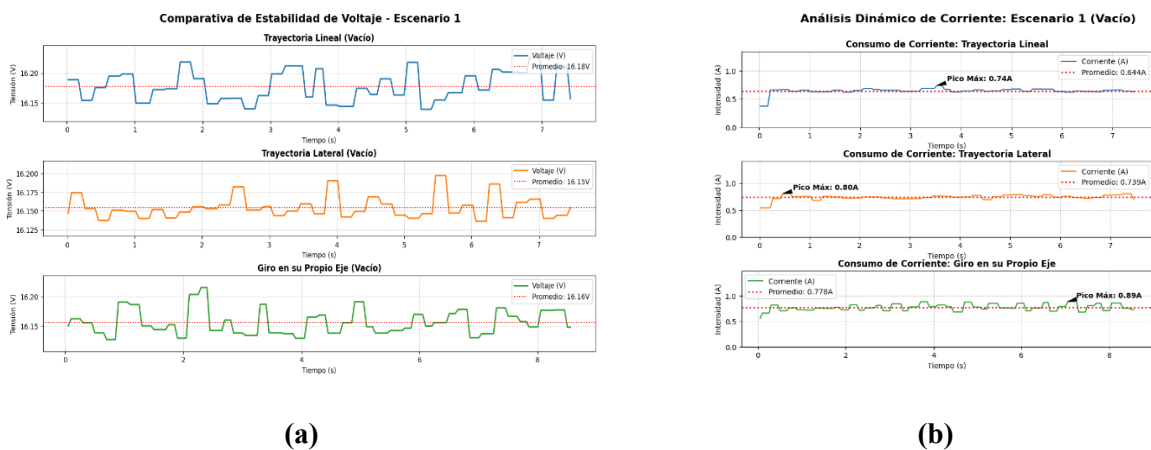
En este apartado se describe la metodología empleada para la recolección de datos energéticos de la plataforma omnidireccional con ruedas Mecanum, cuyo consumo presenta un comportamiento no lineal debido a las fuerzas de fricción lateral y a los vectores de fuerza generados en cada motor. La adquisición de datos se realizó mediante un sensor INA219 y se utilizó una batería LiPo de 14.8 V nominal y 9200 mAh (100 C). Las pruebas se efectuaron variando la velocidad de consigna (0.3 a 1.0 m/s), el tipo de

trayectoria (lineal, lateral y angular) y la carga útil (0 kg, 2.4 kg y 4.1 kg), con el fin de evaluar el comportamiento energético bajo distintas condiciones operativas.

#### 6.4.2 Análisis de resultados obtenidos prueba de autonomía 1

La prueba de autonomía 1, ejecutada sobre una superficie nivelada y en condición de vacío (sin peso en la plataforma) lo que permitió definir el perfil dinámico obteniendo una estabilidad notable en el bus de tensión, con un promedio de 16.163 V (ver **Figura 56 (a)**). Por otro lado, el consumo de corriente reflejó que, mientras que el desplazamiento lineal presentó la mayor eficiencia con un promedio de 0.644 A, los movimientos laterales y de rotación incrementaron la demanda a 0.739 A y 0.778 A, respectivamente (ver **Figura 56 (b)**). Este fenómeno, se atribuye a la mayor fricción axial inherente a las ruedas Mecanum durante desplazamientos no longitudinales, resultando en picos transitorios de hasta 0.89 A durante los giros sobre el propio eje, los cuales representan el esfuerzo máximo de torque requerido para vencer la inercia rotacional del sistema en este escenario.

**Figura 56** Perfil energético integral en condición de vacío: (a) Comparativa de estabilidad de voltaje; (b) Análisis dinámico de corriente.

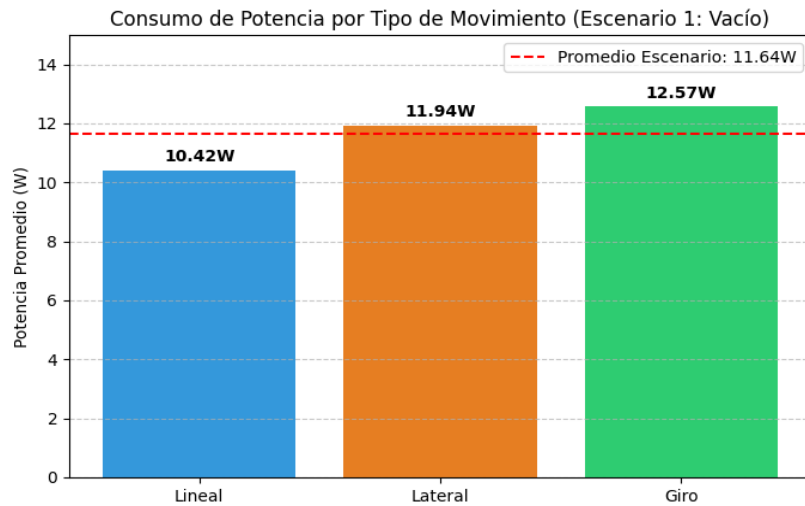


**Nota.** Elaboración propia.

La comparativa de potencia media por tipo de movimiento revela que la traslación lineal es la maniobra más eficiente del sistema con un consumo de 10.42 W, mientras que

los desplazamientos laterales y las rotaciones sobre el propio eje incrementan la demanda energética a 11.94 W y 12.57 W, respectivamente. En conjunto, estas variaciones definen un promedio operativo para el Escenario 1 de 11.64 W.

**Figura 57** Consumo de potencia por tipo de movimiento

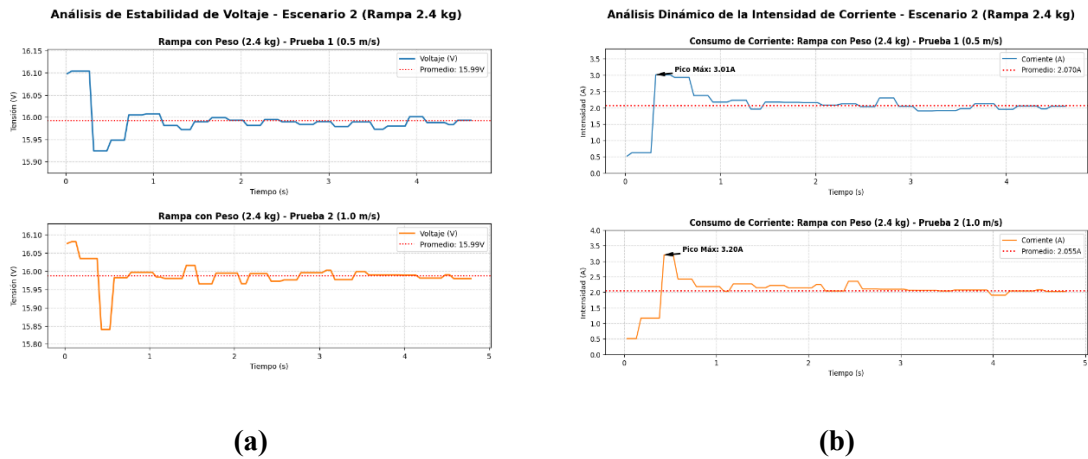


**Nota.** Elaboración propia.

### 6.4.3 Análisis de resultados obtenidos prueba de autonomía 2

La Prueba de autonomía 2, ejecutada sobre una superficie inclinada con una carga útil de 2.4 kg, evidencia un incremento sustancial en la exigencia energética del sistema en comparación con el escenario base. El análisis de estabilidad de voltaje muestra un descenso en el promedio operativo a 15.99 V, acompañado de fluctuaciones más pronunciadas durante los transitorios de velocidad (ver **Figura 58 (a)**). En cuanto a la intensidad de corriente, se registró un aumento drástico, alcanzando promedios de 2.070 A y 2.055 A para las velocidades de 0.5 m/s y 1.0 m/s, respectivamente. Este comportamiento resalta la influencia de la carga gravitatoria, la cual genera picos de arranque de hasta 3.20 A (visto en la prueba a 1.0 m/s de la **Figura 58 (b)**), necesarios para vencer la inercia en ascenso.

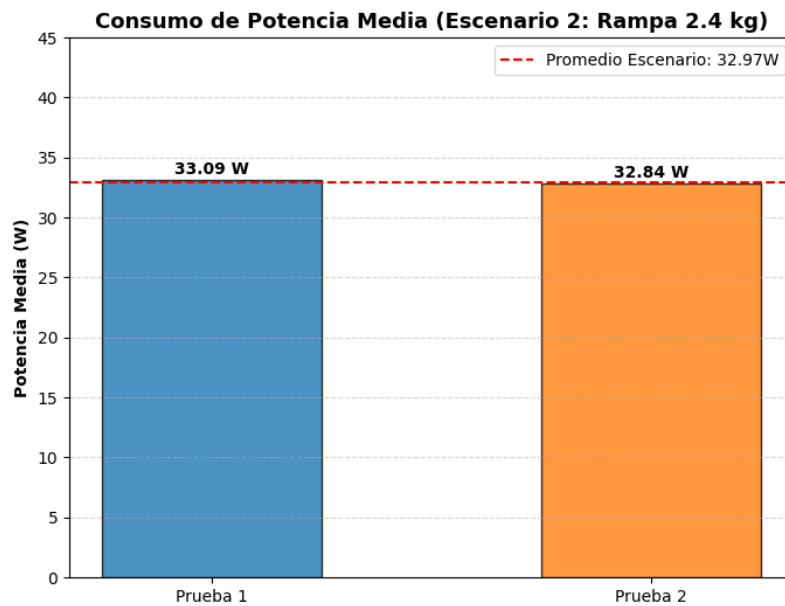
**Figura 58** Perfil energético integral con carga útil de 2.4 kg: (a) Análisis de estabilidad de voltaje; (b) Análisis de la intensidad de corriente



**Nota.** Elaboración propia.

Estos resultados consolidan una potencia media de 32.97 W (ver **Figura 59**), demostrando que la operación en rampa bajo estas condiciones de carga, triplica el consumo energético en comparación a la prueba anterior, lo que reduce significativamente la autonomía proyectada de la plataforma.

**Figura 59** Consumo de potencia media

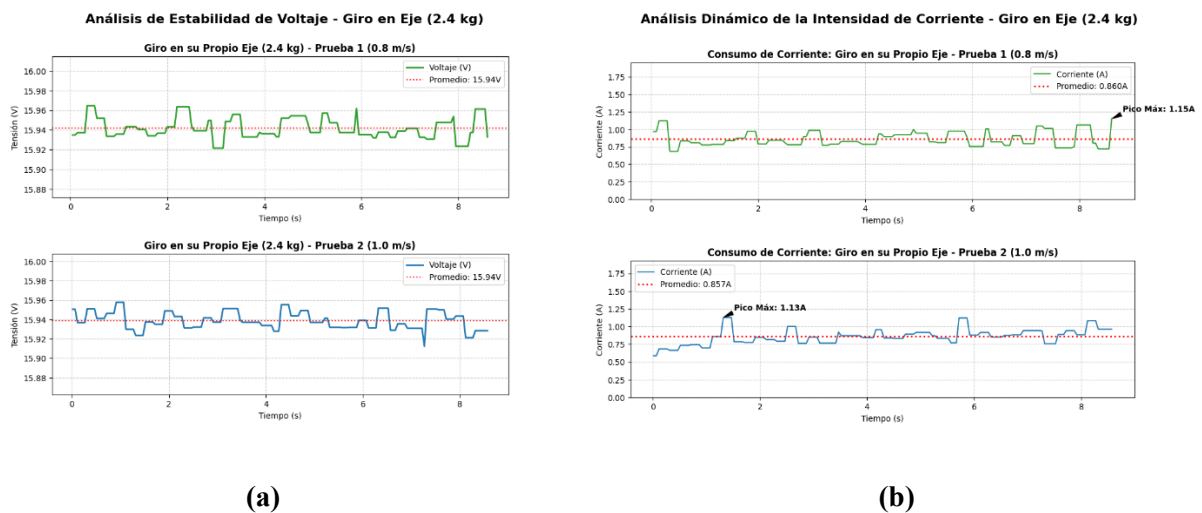


**Nota.** Elaboración propia.

### 6.4.4 Análisis de resultados obtenidos prueba de autonomía 3

La Prueba de autonomía 3, ejecutada sobre una superficie de ladrillos de piso con una carga útil de 2.4 kg, permitió evaluar el comportamiento del sistema durante maniobras de giro sobre su propio eje. El análisis de estabilidad de voltaje reveló un promedio constante de 15.94 V en ambas repeticiones (ver **Figura 60 (a)**). En cuanto a la dinámica de corriente, se registraron promedios de 0.860 A (a 0.8 m/s) y 0.857 A (a 1.0 m/s), valores que representan un incremento aproximado del 11.7% respecto al giro en vacío (ver **Figura 60 (b)**). No obstante, se identificaron picos de corriente de hasta 1.15 A, los cuales corresponden a los transitorios de arranque necesarios para vencer el rozamiento estático inicial de las ruedas Mecanum bajo carga.

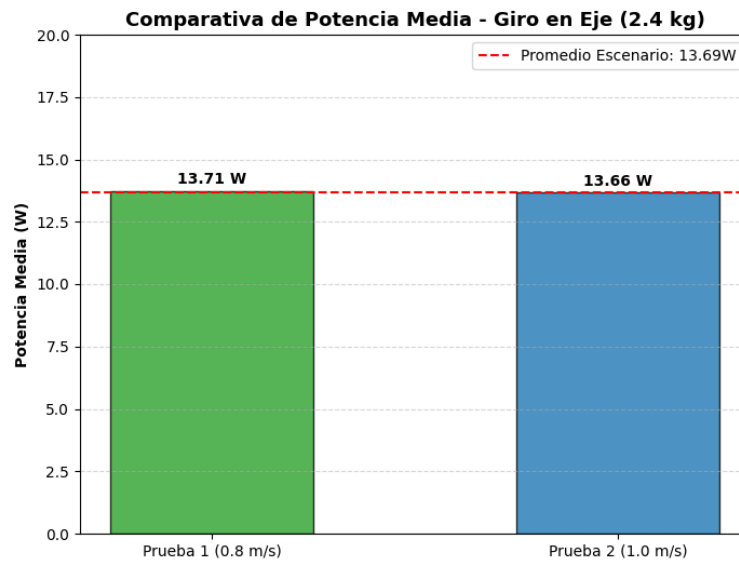
**Figura 60** Perfil energético integral con carga útil de 2.4 kg: (a) Análisis de estabilidad de voltaje; (b) Análisis de intensidad de corriente



**Nota.** Elaboración propia.

Estos resultados consolidan una potencia media de 13.69 W para este escenario (ver **Figura 61**).

**Figura 61** Comparativa de potencia media giro en eje.

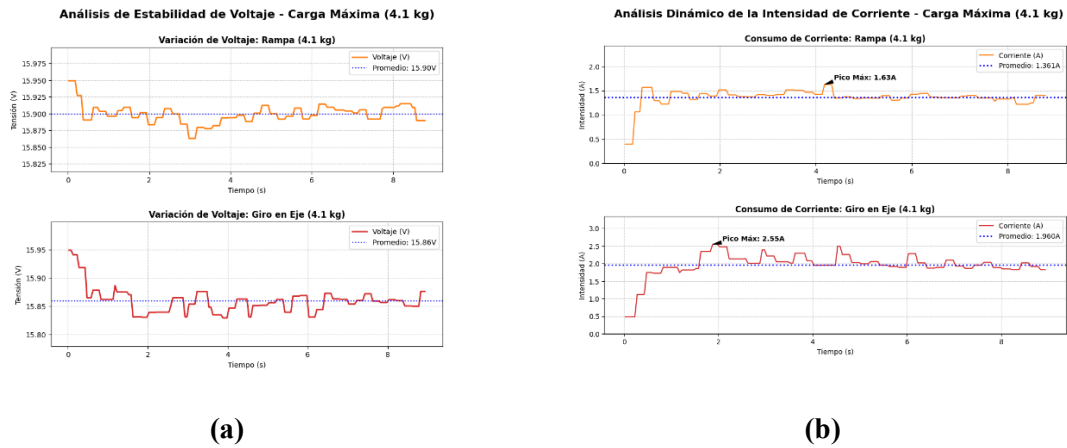


**Nota.** Elaboración propia.

#### 6.4.5 Análisis de resultados obtenidos prueba 4

La Prueba de Autonomía 4, ejecutada con una carga útil de 4.1 kg en superficies de rampa y ladrillo, brindo los datos de voltaje que muestra los valores más bajos registrados, con promedios de 15.90 V en rampa y 15.86 V en giro, evidenciando una caída de voltaje pronunciada debido a la alta demanda de torque (ver **Figura 62 (a)**). En cuanto a la corriente, se observó un comportamiento diferenciado por la gestión de la velocidad, en rampa, la corriente media fue de 1.361 A al operar a 0.5 m/s, mientras que en las maniobras de giro ascendió a 1.960 A (ver **Figura 62**). Se identificaron picos críticos de hasta 2.55 A durante los transitorios de rotación, confirmando que el giro con esta carga útil sobre superficies irregulares es una maniobra con mayor estrés eléctrico.

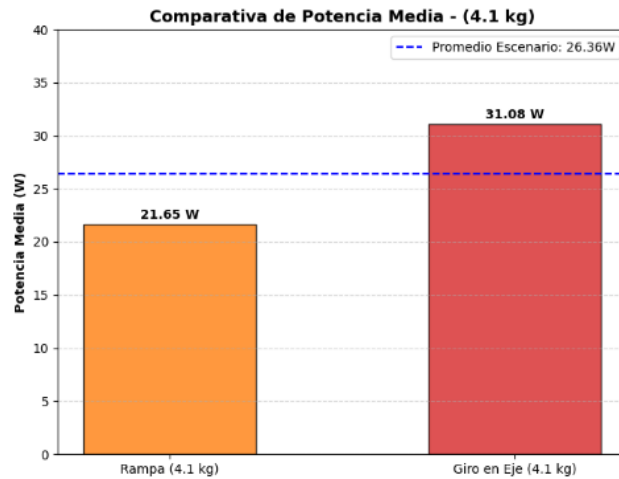
**Figura 62** Perfil energético integral con carga útil de 4.1 kg: (a) Análisis de estabilidad de voltaje; (b) Análisis de intensidad de corriente



**Nota.** Elaboración propia.

Estos resultados consolidan una potencia media de 26.36 W (ver **Figura 63**), validando que la plataforma mantiene su integridad funcional bajo una exigencia con carga útil de 4.1 kg.

**Figura 63** Comparativa de potencia media con carga 4.1 kg



**Nota.** Elaboración propia.

### 6.4.6 Estimación de eficiencia energética y autonomía operativa

Para determinar la autonomía real de la plataforma bajo condiciones de operación continua, se emplea el modelo matemático de gestión energética fundamentado en la

capacidad nominal de la batería y los perfiles de consumo promedio obtenidos experimentalmente. La autonomía estimada ( $T_{op}$ ) se calcula mediante la **ecuación 14**.

$$T_{op} = \frac{E_{nom} \cdot DOD \cdot \eta_{batt}}{P_{avg}} \quad (14)$$

Donde:

- $E_{nom}$  es la energía nominal de la batería (136.16 Wh), calculada de 14.8v y 9.2 Ah
- $DOD$  es la profundidad de descarga del 80% (0.8), factor de seguridad estándar en baterías LiPo.
- $\eta_{batt}$  es el factor de eficiencia de descarga (0.95), estándar para baterías LiPo, que contempla pérdidas térmicas internas de la batería.
- $P_{avg}$  es la potencia promedio demandada según el escenario de carga y trayectoria.

Aplicando el modelo con una energía útil disponible, se obtienen las proyecciones de tiempo de operación presentadas en la **Tabla 13**:

**Tabla 13** Tabla comparativa de autonomía

Peso Agregado	Corriente Promedio (I)	Potencia Promedio (P)	Autonomía en Horas
Vacío (13.6 kg peso propio)	0.644 A	11.64 W	De 8 a 9 h aprox.
2.4 kg	1.4605 A	22.33 W	De 4 a 5 h aprox.
4.1 kg	1.6605 A	26.36 W	De 3 a 4 h aprox.

**Nota.** Elaboración propia.

## 6.5 Costo de componentes

En la **Tabla 14**, se describe el costo de los componentes utilizados para la construcción del prototipo de plataforma móvil omnidireccional.

**Tabla 14** Costo de los componentes utilizados en la construcción del prototipo

<b>Cantidad</b>	<b>Componentes/Materiales</b>	<b>Precio (\$)</b>
4	Acoplador hexagonal de 0.236	8,43
1	HOOVO 4S Lipo - Batería 9200mAh 14.8V 100C	99,5
4	50:1 Metal Gearmotor 12V with 64 CPR Encoder	300,00
1	APIELE Interruptor de botón de bloqueo	16,85
2	M2H18v18 controlador de alta potencia para Raspberry Pi	167,00
1	Regulador de voltaje 5V Setp-down 5A Reductor	29,30
1	cargador de baterías lipo A 12VDC	31,99
2	llanta omnidireccional mecanum izquierda 97mm	20,00
2	llanta omnidireccional mecanum derecha 97mm	20,00
2	Par de soportes Pololu para motor 37D	24,00
1	Cable 10cm xt60 xt-60 macho	5,00
1	Raspberry PI 5 Modelo B 8 GB RAM	150,00
1	Tarjeta de memoria sd 128gb clase 10 140mb/s	25,00
1	Kit de 6 rollos de cable siliconado 18awg	32,50
1	Kit de 25 tuercas #2-56 y Kit de 25 tornillos #2-56	6,00
7	Rodamiento kfl08 8mm bloque de almohada	21,00
1	Plancha de aluminio de 2,0 mm (4x8)"	79,91
4	Rodamientos articulados PHS5 Hembra	30,48
2	Modulo mosfet AOD4184	10,00
1	Medio metro tira led pixel	6,50
1	Tira led luz blanca	6,00
1	Sensor de corriente INA219	4,40
1	Arduino Nano	11,00
2	Rollos de filamento PLA Negro y Rojo	40,00
1	Mano de obra	500,00
<b>Total \$</b>		<b>1545,36</b>

**Nota.** La mayoría de componentes fueron brindados por el proyecto de investigación formativa:

Diseño Y Construcción De Robot Móvil Omnidireccional Didáctico, código PIFCVI24.

## 6.6 Discusiones

El costo total de construcción de la plataforma desarrollada en esta investigación fue de 1,545.36 USD, lo que la sitúa en un rango intermedio entre plataformas educativas de bajo costo y robots móviles autónomos industriales (AMR). En la literatura científica se reportan plataformas móviles educativas basadas en ROS 2, como SMARTmBOT (Jo et al., 2022), diseñadas principalmente con fines formativos y experimentales, cuyo costo aproximado ronda los 300 USD. Estas soluciones priorizan la accesibilidad y el aprendizaje de algoritmos básicos de navegación y control, sin embargo, presentan limitaciones en términos de robustez estructural, capacidad de carga y desempeño mecánico en escenarios más exigentes. A nivel mecánico, la integración de una suspensión pasiva con eje diferencial mejora significativamente la distribución de esfuerzos y la adaptación frente a irregularidades del terreno. Esta característica, combinada con la cinemática holonómica, permite no solo desplazamiento omnidireccional, sino también mayor estabilidad dinámica respecto a robots de tracción diferencial convencionales, ampliando así su campo de aplicación hacia entornos de investigación aplicada y prototipado preindustrial.

Dentro del ámbito de plataformas omnidireccionales de investigación semi-profesional, proyectos como Robotont (Raudmäe et al., 2023), reportan costos aproximados de 2000 € y una arquitectura modular basada en ROS. Si bien estas soluciones ofrecen mayores prestaciones que los robots educativos básicos, su costo continúa siendo superior al de la plataforma desarrollada en esta tesis, y no incorporan necesariamente un sistema de suspensión diferencial pasiva orientado a mejorar la adaptación a superficies irregulares. Por lo tanto, la propuesta presentada mantiene una relación costo/prestaciones, competitiva dentro del segmento de investigación avanzada.

Dentro del segmento de plataformas móviles comerciales para investigación, el Leo Rover se posiciona como una solución consolidada para pruebas de navegación autónoma en entornos interiores y exteriores (Fictionlab, 2019). Tanto el Leo Rover como la plataforma desarrollada en esta investigación comparten características técnicas relevantes, como la suspensión pasiva para adaptación al terreno y la integración de una Raspberry Pi para la implementación de ROS, lo que las ubica en un nivel comparable desde el punto de vista funcional y arquitectónico. No obstante, la diferencia principal se evidencia en la relación costo–prestaciones y en la capacidad energética, mientras el Leo Rover incorpora una batería Li-Ion 3S (11.1 V) de 6800 mAh con PCM interno, la plataforma propuesta utiliza una batería LiPo de 9200 mAh a 14.8 V y 100C, ofreciendo mayor densidad energética y capacidad de suministro de corriente para aplicaciones de mayor demanda dinámica. Esta condición influye directamente en la autonomía y en la posibilidad de integrar sensores o módulos adicionales sin comprometer el rendimiento, y, considerando además que el costo del Leo Rover es significativamente superior, la propuesta desarrollada optimiza la inversión manteniendo prestaciones mecánicas y de arquitectura comparables dentro del ámbito de la investigación móvil autónoma.

Por otra parte, el AgileX Scout Mini se posiciona como una plataforma de investigación avanzada, suspensión independiente y compatibilidad con ROS para desarrollo de navegación SLAM y aplicaciones industriales de inspección (AgileX Robotics, 2020). Su diseño está orientado a escenarios de mayor exigencia operativa y carga útil superior, lo que naturalmente incrementa su costo y complejidad estructural. En contraste, aunque la plataforma desarrollada en esta tesis no alcanza los niveles de robustez industrial del Scout Mini, introduce una ventaja diferencial al combinar cinemática holonómica con suspensión pasiva diferencial, permitiendo desplazamiento

omnidireccional con mejor adaptación a irregularidades del terreno respecto a configuraciones rígidas convencionales.

Por otra parte, los robots móviles autónomos industriales (AMR) utilizados en entornos de Industria 4.0, equipados con navegación basada en LiDAR y algoritmos avanzados de SLAM, suelen superar los 15,000 USD dependiendo de la capacidad de carga y certificaciones requeridas. Estudios comparativos indican que su elevado costo se asocia a sistemas propietarios cerrados, sensores de alto nivel y certificaciones de seguridad industrial (Gargouri et al., 2025b). Aunque estos sistemas ofrecen alta precisión, soporte técnico especializado y cumplimiento normativo, presentan limitaciones en cuanto a personalización estructural y modificación de firmware sin incurrir en costos adicionales. En contraste, la arquitectura abierta basada en ROS 2 implementada en esta investigación favorece la escalabilidad, la adaptabilidad tecnológica y el desarrollo local.

En consecuencia, aunque los AMR comerciales superan a la propuesta en términos de certificación industrial y precisión multisensorial, la plataforma desarrollada se justifica plenamente cuando se priorizan criterios de flexibilidad técnica, personalización estructural, escalabilidad y optimización de costos. Con una inversión aproximadamente diez veces menor que soluciones industriales y prestaciones superiores a plataformas educativas básicas, la propuesta se consolida como una alternativa viable para investigación aplicada, validación tecnológica y desarrollo de soluciones preindustriales.

La **Tabla 15** sintetiza el posicionamiento técnico y económico de la plataforma desarrollada frente a soluciones educativas, de investigación avanzada e industriales. Se observa que la propuesta supera claramente a las plataformas educativas en robustez estructural, capacidad de carga y adaptación al terreno, al tiempo que mantiene un costo

considerablemente inferior al de los AMR industriales comerciales. Aunque estos últimos ofrecen certificaciones y precisión multisensorial superiores, su arquitectura cerrada y elevado costo limitan la flexibilidad de implementación en entornos académicos o de desarrollo tecnológico local. En este contexto, la plataforma propuesta logra un equilibrio entre prestaciones mecánicas, arquitectura abierta y optimización económica, consolidándose como una solución intermedia estratégicamente justificada dentro del ecosistema actual de robots móviles autónomos.

**Tabla 15** Análisis comparativo entre plataformas móviles educativas, de investigación e industriales

<b>ROBOTS</b>	<b>Prestaciones</b>	<b>Estructura mecánica</b>	<b>Arquitectura de software</b>	<b>Suspensión</b>	<b>Adaptación al terreno</b>	<b>Precios aprox.</b>
<b>Plataforma desarrollada</b>	Investigación aplicada y prototipado industrial	Chasis de aluminio estructural de 2 mm de espesor	ROS 2 arquitectura abierta y personalizable	Suspensión pasiva con eje diferencial	Alta adaptación	1,545.36 USD
<b>SMART mBOT</b>	Enseñanza de navegación y control básico	Estructura ligera educativa	ROS 2	No incorpora sistema de suspensión	Diseñada para superficies planas	300 USD
<b>Robotont</b>	Investigación y educación avanzada	Chasis modular estándar	ROS (arquitectura modular abierta)	No reporta suspensión	Adaptación moderada	2000 €
<b>Leo Rover</b>	Investigación y desarrollo con autonomía extendida	Chasis robusto con protección IP55	ROS & ROS 2 compatible	Suspensión pasiva tipo rocker-bogie	Buena adaptación a terrenos variados	6,630 USD
<b>AgileX Scout Mini Mecanum</b>	Alta capacidad de carga	Chasis robusto	ROS & ROS 2 compatible	Suspensión independiente	Muy alta adaptación	7,334 €
<b>AMR industrial comercial</b>	Navegación autónoma con LiDAR y SLAM avanzado	Chasis industrial certificado	Sistema propietario cerrado	Rígida o industrial estándar	Optimizada para pisos industriales planos	>15,000 USD

**Nota.** Elaboración propia.

## CAPÍTULO VII

### 7.1 Conclusiones y Recomendaciones

#### 7.1.1 Conclusiones

Se cumplieron satisfactoriamente los objetivos planteados en la presente investigación mediante el diseño, modelado, implementación y validación experimental de una plataforma móvil holonómica. El desarrollo integró de manera estructurada el diseño mecánico del chasis, el modelado cinemático directo e inverso, la arquitectura electrónica de potencia y control, así como el sistema de adquisición y análisis de datos, logrando una plataforma funcional capaz de desplazarse en los ejes X–Y y realizar rotaciones simultáneas, validando su comportamiento holonómico en entornos controlados.

El modelo cinemático implementado permitió calcular con precisión las velocidades individuales de cada rueda en función de las velocidades deseadas del robot, demostrando coherencia entre el planteamiento teórico y el comportamiento experimental observado. Las pruebas de control PI aplicadas de manera independiente a cada rueda evidenciaron una respuesta estable, con adecuado seguimiento de las referencias y errores en régimen permanente dentro de márgenes aceptables para aplicaciones de navegación móvil. La telemetría operando a una frecuencia de muestreo de 50 Hz permitió analizar con suficiente resolución temporal la dinámica del sistema, confirmando la estabilidad del lazo de control y la correcta sincronización entre adquisición, procesamiento y registro de datos.

Desde el punto de vista estructural, el diseño del chasis y del sistema de suspensión pasiva con eje diferencial, contribuyó a mejorar la distribución de cargas y la estabilidad en desplazamientos sobre superficies con ligeras irregularidades, reduciendo vibraciones y favoreciendo la tracción efectiva de las ruedas Mecanum. Esto permitió mantener un

comportamiento dinámico consistente incluso bajo condiciones de carga adicional, validando la robustez mecánica de la plataforma.

El análisis energético permitió caracterizar el comportamiento operativo del robot omnidireccional, evidenciando que la autonomía depende principalmente de la carga mecánica transportada. El sistema presenta un rango operativo aproximado de entre 3 y 9 horas de funcionamiento continuo, manteniendo estabilidad durante todo el periodo de operación. Se comprobó que el incremento de carga exige mayor demanda de torque y, por consiguiente, un aumento del consumo energético, reduciendo la duración de la batería. No obstante, el modelo de estimación energética desarrollado permite anticipar de manera confiable la disponibilidad temporal del robot, demostrando la viabilidad del sistema para la planificación de tareas en distintos escenarios de trabajo

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la plataforma desarrollada constituye una solución técnicamente viable para aplicaciones que requieren alta maniobrabilidad, posicionamiento preciso y movilidad omnidireccional, integrando de manera efectiva diseño mecánico, control electrónico y análisis energético en un sistema coherente y funcional.

### **7.1.2 Recomendaciones**

Se recomienda implementar un protocolo estricto de gestión y carga para la batería Li-Po, considerando que este tipo de tecnología es sensible a sobrecargas, descargas profundas y elevadas corrientes. Es fundamental utilizar un cargador balanceado específico para baterías Li-Po, configurar correctamente el número de celdas y limitar la carga a 4.2 V por celda, evitando descargas por debajo de 3.0 V por celda durante la operación.

En el ámbito mecánico-estructural, se recomienda realizar un análisis topológico para reducir el peso total de la plataforma móvil, manteniendo la misma rigidez. De igual manera, se sugiere optimizar el carenado y las piezas plásticas, evaluando la reducción de espesores o el uso de materiales alternativos más livianos sin comprometer la resistencia mecánica ni la protección de los componentes internos. Una disminución del peso contribuiría directamente a mejorar la eficiencia energética, reducir la demanda de corriente en aceleraciones y aumentar la autonomía operativa.

Adicionalmente, se recomienda integrar un sistema de refrigeración interna para los componentes electrónicos críticos, especialmente la Raspberry Pi y los módulos de iluminación LED. La incorporación de disipadores térmicos adecuados, ventilación forzada interna o canales de flujo de aire diseñados dentro del chasis permitiría mejorar la estabilidad térmica del sistema, aumentar la confiabilidad operativa y prevenir degradación prematura por sobrecalentamiento durante jornadas prolongadas de trabajo.

En cuanto a la arquitectura de hardware, se recomienda que en futuras iteraciones del proyecto se evalúe la sustitución del Arduino Nano, actualmente encargado de la lectura de encoders y el control de los drivers de motores, por un microcontrolador ESP32. Si bien el Arduino Nano ha demostrado un funcionamiento estable y adecuado para los requerimientos del presente proyecto, la incorporación de un ESP32 podría representar una mejora evolutiva al ofrecer mayor capacidad computacional, mayor velocidad de procesamiento y recursos adicionales que permitirían integrar funciones más complejas de control, comunicación o procesamiento en tiempo real, fortaleciendo así la escalabilidad y el desempeño global de la plataforma móvil.

Con miras a una posible escalabilidad, se recomienda el diseño e implementación de una tarjeta electrónica madre (PCB principal) que integre en una sola arquitectura los sistemas de control, alimentación, acondicionamiento de señales y comunicación. Esta

integración permitiría reducir la cantidad de conexiones cableadas, soldaduras manuales y puntos de fallo, mejorando la confiabilidad eléctrica, facilitando el mantenimiento y optimizando los tiempos de ensamblaje. Además, una PCB dedicada favorecería la estandarización del sistema, disminuiría interferencias eléctricas y abriría la posibilidad de una futura fabricación en serie con mayor calidad y repetibilidad en el proceso constructivo.

Finalmente, se recomienda como línea futura evaluar la integración de un brazo robótico ligero sobre la plataforma móvil. La incorporación de un manipulador permitiría transformar el sistema en una plataforma móvil manipuladora, ampliando significativamente sus aplicaciones hacia tareas de manipulación en entornos académicos, además, se recomienda la incorporación de sensores adicionales de percepción del entorno, tales como un sistema LiDAR o una cámara frontal, que permitan ampliar las capacidades de monitoreo y análisis espacial de la plataforma. Dado que el robot ya dispone de iluminación frontal integrada, existe una base adecuada para implementar sistemas de visión que aprovechen estas condiciones de iluminación controlada. La integración de estos sensores permitiría desarrollar funciones de detección de obstáculos, mapeo básico del entorno o asistencia visual en tareas supervisadas, incrementando la versatilidad de la plataforma sin alterar su arquitectura fundamental de control.

## 8. Referencias

- Abidin, Z., Arifudin, R., Hardyanto, W., Akhlis, I., Umer, R., & Kurniawan, N. (2021). Low-cost educational robotics for promoting STEM education. *Journal of Physics: Conference Series*, 1918(4), 042018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1918/4/042018>
- Adrián Perera. (2020, October 25). *La Industria 4.0 a través de ejemplos*. AutomatismosMundo.
- Agilex Robotics. (2020). *SCOUT MINI*. <https://global.agilex.ai/products/scout-mini>
- Alonso, R., Sánchez, T. F., Alfaro, D. A., Cruz, Y. J., Villalonga, A., & Castaño, F. (2025). Automation and Robotics Pilot Lines in the Context of Industry 5.0. *Applied Sciences*, 15(5), 2510. <https://doi.org/10.3390/app15052510>

- Betancur-Vásquez, D., Mejia-Herrera, M., & Botero-Valencia, J. S. (2021). Open source and open hardware mobile robot for developing applications in education and research. *HardwareX*, *10*, e00217. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00217>
- Bonci, A., Gaudeni, F., Giannini, M. C., & Longhi, S. (2023). Robot Operating System 2 (ROS2)-Based Frameworks for Increasing Robot Autonomy: A Survey. *Applied Sciences*, *13*(23), 12796. <https://doi.org/10.3390/app132312796>
- Borenstein, J., & Feng, L. (1996). Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots. In *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (Vol. 12, Number 5).
- Burgos González, & Henry Esteban. (2020). *Prototipo de robot educativo desmontable de bajo costo para competencias de seguidor de línea y laberinto*. Universidad de Guayaquil.
- Buri, Z., & T. Kiss, J. (2025). Robotics and Automation for Energy Efficiency and Sustainability in the Industry 4.0 Era: A Review. *Energies*, *18*(20), 5399. <https://doi.org/10.3390/en18205399>
- CADE cobots. (2023, February 15). *¿Son seguros los vehículos autónomos AGV y AMR?* CADE Cobots.
- Campilho, R. D. S. G., & Silva, F. J. G. (2023). Industrial Process Improvement by Automation and Robotics. *Machines*, *11*(11), 1011. <https://doi.org/10.3390/machines11111011>
- Campion, G., Bastin, G., & D'Andrea-Novel, B. (1993). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. [1993] *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 462–469. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1993.292023>
- Chivarov, N., Vasilev, R., Staikova, M., & Chivarov, S. (2025). Development of an Educational Omnidirectional Mobile Manipulator with Mecanum Wheels. *The 14th International Scientific Conference TechSys 2025—Engineering, Technologies and Systems*, 16. <https://doi.org/10.3390/engproc2025100016>
- Das, S., Nandy, S., Chakraborty, S., Singh, J., & Halder, T. (2025). *Implementation of Complimentary filter on MPU 6050*.
- Fara, V.-A., Petruc, S.-I., Bogdan, R., & Marcu, M. (2025). A Comparison of Human Tracking Systems on a Mobile Robotic Platform. *Sensors*, *25*(19), 6172. <https://doi.org/10.3390/s25196172>
- Fictionlab. (2019). *Leo Rover · GitHub*. <https://github.com/LeoRover>
- Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *Elsevier*, *294*(2), 405–426.
- Gabutero, A. M., & Galigao, R. (2025). Edtech on the rise: the role of robots in education and its economic implications. *Pantao (International Journal of the Humanities and Social Sciences)*. <https://doi.org/10.69651/PIJHSS040104>
- Gao, Z. Q., Chen, H. Bin, Du, Y. P., & Wei, L. (2014). Design and Development of an Omni-Directional Mobile Robot for Logistics. *Applied Mechanics and Materials*, *602–605*, 1006–1010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.602-605.1006>
- García Caicedo, J. M., Bohórquez Rodríguez, A., & Valero Mora, A. A. (2020). Suspension Effect in Tip-over Stability and Steerability of Robots Moving on Sloping Terrains. *IEEE Latin America Transactions*, *18*(08), 1381–1389. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9111673>

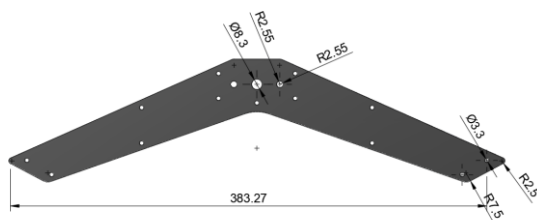
- Gargouri, A., Karray, M., Zalila, B., & Ksantini, M. (2025a). Design and Development of an Autonomous Mobile Robot for Unstructured Indoor Environments. *Machines*, 13(11), 1044. <https://doi.org/10.3390/machines13111044>
- Gargouri, A., Karray, M., Zalila, B., & Ksantini, M. (2025b). Design and Development of an Autonomous Mobile Robot for Unstructured Indoor Environments. *Machines*, 13(11), 1044. <https://doi.org/10.3390/machines13111044>
- Gupta, S., Kaiser, S., & Ray, K. (2025). Intelligent Terrain Mapping with a Quadruped Spider Robot: A Bluetooth-Enabled Mobile Platform for Environmental Reconnaissance. *Automation*, 6(4), 50. <https://doi.org/10.3390/automation6040050>
- Gupta, V. (2010). Working and analysis of the H - bridge motor driver circuit designed for wheeled mobile robots. *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, 441–444. <https://doi.org/10.1109/ICACC.2010.5486818>
- Hercik, R., Byrtus, R., Jaros, R., & Koziorek, J. (2022). Implementation of Autonomous Mobile Robot in SmartFactory. *Applied Sciences*, 12(17), 8912. <https://doi.org/10.3390/app12178912>
- Ishigami, G., Iagnemma, K., Overholt, J., & Hudas, G. (2015). Design, Development, and Mobility Evaluation of an Omnidirectional Mobile Robot for Rough Terrain. *Journal of Field Robotics*, 32(6), 880–896. <https://doi.org/10.1002/rob.21557>
- ITahora. (2022, February 22). *El sector productivo nacional reconoce la importancia de avanzar hacia una industria inteligente*. IT Ahora.
- Jiang, H., Xu, G., Zeng, W., Gao, F., & Chong, K. (2019). Lateral Stability of a Mobile Robot Utilizing an Active Adjustable Suspension. *Applied Sciences*, 9(20), 4410. <https://doi.org/10.3390/app9204410>
- Jo, W., Kim, J., Wang, R., Pan, J., Senthilkumaran, R. K., & Min, B.-C. (2022). *SMARTmBOT: A ROS2-based Low-cost and Open-source Mobile Robot Platform*.
- Kassawat, M., Cervera, E., & del Pobil, A. P. (2022). An Omnidirectional Platform for Education and Research in Cooperative Robotics. *Electronics*, 11(3), 499. <https://doi.org/10.3390/electronics11030499>
- Khaleel, H. Z., & Oleiwi, B. K. (2024). Design and Implementation Low Cost Smart Cleaner Mobile Robot in Complex Environment. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(10), 2869–2877. <https://doi.org/10.18280/mmep.111030>
- Kim, J., Kang, T., Song, D., & Yi, S.-J. (2021). Design and Control of a Open-Source, Low Cost, 3D Printed Dynamic Quadruped Robot. *Applied Sciences*, 11(9), 3762. <https://doi.org/10.3390/app11093762>
- Lee, W., Won, J., Park, G., & Seo, T. (2024). Mechanical Survey on Wheeled Mobile Robot Platform for Industrial and Personal Service Robots. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 25(8), 1739–1753. <https://doi.org/10.1007/s12541-024-01014-7>
- Li, H., Liu, J., Lyu, C., Liu, D., & Liu, Y. (2023). Design and Implementation of Omnidirectional Mobile Robot for Materials Handling among Multiple Workstations in Manufacturing Factories. *Electronics*, 12(22), 4693. <https://doi.org/10.3390/electronics12224693>
- Luis Lamas. (2018, September). *Robot con Omni Wheel controlado por Arduino*.
- Ma, B., Shaqura, M. Z., Richardson, R. C., & Dehghani-Sanij, A. A. (2022). A Study on Phase-Changing Materials for Controllable Stiffness in Robotic Joints. *Robotics*, 11(3), 66. <https://doi.org/10.3390/robotics11030066>
- Maruyama, Y., Kato, S., & Azumi, T. (2016). Exploring the performance of ROS2. *Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software*, 1–10. <https://doi.org/10.1145/2968478.2968502>

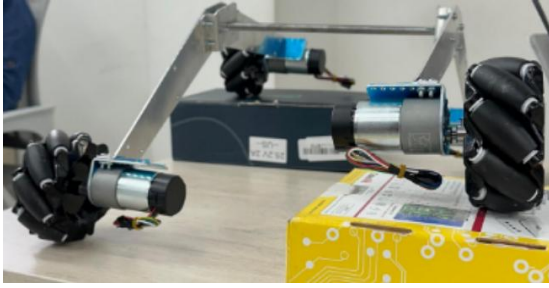
- Metwly, M. Y., Clark, C. L., He, J., & Xie, B. (2024). A Review of Robotic Arm Joint Motors and Online Health Monitoring Techniques. *IEEE Access*, *12*, 128791–128809. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3447573>
- Mikołajczyk, T., Mikołajewski, D., Kłodowski, A., Łukaszewicz, A., Mikołajewska, E., Paczkowski, T., Macko, M., & Skornia, M. (2023). Energy Sources of Mobile Robot Power Systems: A Systematic Review and Comparison of Efficiency. *Applied Sciences*, *13*(13), 7547. <https://doi.org/10.3390/app13137547>
- Moctezuma Gutiérrez, S. G., Cruz Pazarán, A., Galicia Mejía, R., & Oliva Moreno, L. N. (2018). Desarrollo de plataforma para implementación de robots colaborativos. *Visión Electrónica*, *12*(1), 22–31. <https://doi.org/10.14483/22484728.13308>
- Mohd Salih, J. E., Rizon, M., & Yaacob, S. (2006). Designing Omni-Directional Mobile Robot with Mecanum Wheel. *American Journal of Applied Sciences*, *3*(5), 1831–1835. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2006.1831.1835>
- Pagala, P., Ferre, M., & Armada, M. (2014). *Design of Modular Robot System for Maintenance Tasks in Hazardous Facilities and Environments* (pp. 185–197). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03653-3\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03653-3_15)
- Palacín, J., Rubies, E., Bitriá, R., & Clotet, E. (2023). Phasor-Like Interpretation of the Angular Velocity of the Wheels of Omnidirectional Mobile Robots. *Machines*, *11*(7), 698. <https://doi.org/10.3390/machines11070698>
- Palčič, I., & Prester, J. (2024). Effect of Usage of Industrial Robots on Quality, Labor Productivity, Exports and Environment. *Sustainability*, *16*(18), 8098. <https://doi.org/10.3390/su16188098>
- Pantano Allison. (2022, August 30). *En 1961, el primer brazo robótico entró La era de los robots industriales comenzó con Unimate, en una planta de GM en Trenton*. IEEE Spectrum.
- Patrício, L., Varela, L., Silveira, Z., Felgueiras, C., & Pereira, F. (2025). A Framework for Integrating Robotic Process Automation with Artificial Intelligence Applied to Industry 5.0. *Applied Sciences*, *15*(13), 7402. <https://doi.org/10.3390/app15137402>
- Paúl Meza, Fabián Iñiguez, Mauricio Becerra, Oswaldo Rivera, Johanna Vera, Juan Carlos Chiluita, Jorge Ortega, Rocío Malla, Franklin Simbaña, Adriana Valverde, Sheldon López, & Marcelo Sotaminga. (2022). *Mensaje de la Ministra Vianna Maino*.
- Quinteros, P. A., Calero Zurita, M., Zambrano, N. C., & Lapo Manchay, E. (2022). Automatización de los procesos industriales \* Automation of industrial processes. *Journal of Business and Entrepreneurial Julio-Diciembre*, *4*. <https://doi.org/10.37956/jbes.v4i2.82>
- Raudmäe, R., Schumann, S., Vunder, V., Oidekivi, M., Nigol, M. K., Valner, R., Masnavi, H., Singh, A. K., Aabloo, A., & Kruusamäe, K. (2023). ROBOTONT – Open-source and ROS-supported omnidirectional mobile robot for education and research. *HardwareX*, *14*, e00436. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00436>
- RDA. (2025). *ROBOT OMNIDIRECCIONAL*.
- Redacción Futuro Eléctrico. (2023). *Industria 4.0 | Los prolegómenos de la cuarta revolución industrial*. Futuro Eléctrico.
- Redondo Polo, J. A. (2024). Robótica Educativa en Colombia: Percepciones y Desafíos en los Niveles de Educación Básica y Media. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(5), 6775–6788. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5.14096](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14096)
- RoboCT. (2025). *Módulo de rueda Mecanum integrado*. RoboCT.
- Robotnik. (2021, August 11). *¿Qué es un Robot Móvil Autónomo (AMR)? Lo que aportan nuestros robot móviles a tu empresa*. Robotnik.

- Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5>
- Tata, D., Chamorro, W., Maldonado, D., & Pillajo, R. (2025). Extended Kalman Filter-Based 2D Pose Estimation for Omnidirectional Mecanum Robots via Sensor Fusion: A SO(2) Lie Group Formulation. *The XXXIII Conference on Electrical and Electronic Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3390/engproc2025115003>
- Tian, Y., Zhang, S., Liu, J., Chen, F., Li, L., & Xia, B. (2017). Research on a new omnidirectional mobile platform with heavy loading and flexible motion. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(9), 168781401772668. <https://doi.org/10.1177/1687814017726683>
- Urrea, C., & Kern, J. (2025). Recent Advances and Challenges in Industrial Robotics: A Systematic Review of Technological Trends and Emerging Applications. *Processes*, 13(3), 832. <https://doi.org/10.3390/pr13030832>
- Ventre, L. O., Micolini, O., Ayme, R. E., Gutierrez, D. I., & Pillicioni, E. (2020). Diseño e implementación de plataforma robótica de seis grados de libertad, como máquina de ensayo [Not available in English]. *2020 IEEE Congreso Biental de Argentina (ARGENCON)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON49523.2020.9505465>
- Wang, W., Li, J., Zhang, S., Deng, J., Chen, W., & Liu, Y. (2025). A self-propelled piezoelectric Mecanum wheel robot with mode-superposition principle and agile planar motions. *Cell Reports Physical Science*, 6(8), 102782. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.102782>
- Wang, Z., Liu, S., Ji, D., & Yi, W. (2024). Improving Real-Time Performance of Micro-ROS with Priority-Driven Chain-Aware Scheduling. *Electronics*, 13(9), 1658. <https://doi.org/10.3390/electronics13091658>
- Watanabe, K., Mori, I. Y., & Nagai, I. (2018). Experiments for Verifying Basic Behaviors in an Omnidirectional Mobile Platform Using a Rocker-Bogie Suspension System. *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 7845–7850. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8484114>
- Yang, M., Sun, X., Jia, F., Rushworth, A., Dong, X., Zhang, S., Fang, Z., Yang, G., & Liu, B. (2022). Sensors and Sensor Fusion Methodologies for Indoor Odometry: A Review. *Polymers*, 14(10), 2019. <https://doi.org/10.3390/polym14102019>

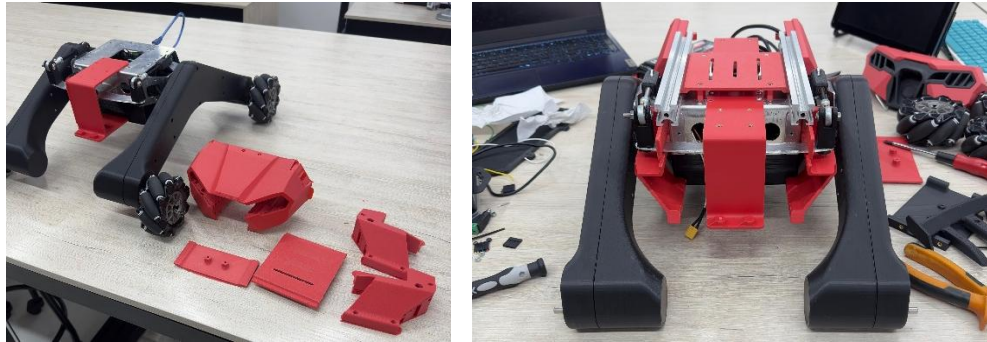
## 9. Anexos (Programaciones, Diagramas, Análisis CFD, Planos, Artículo)

### Anexo 1. Elaboración de extremidades.

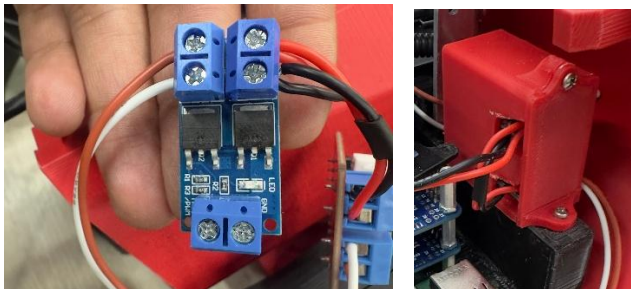




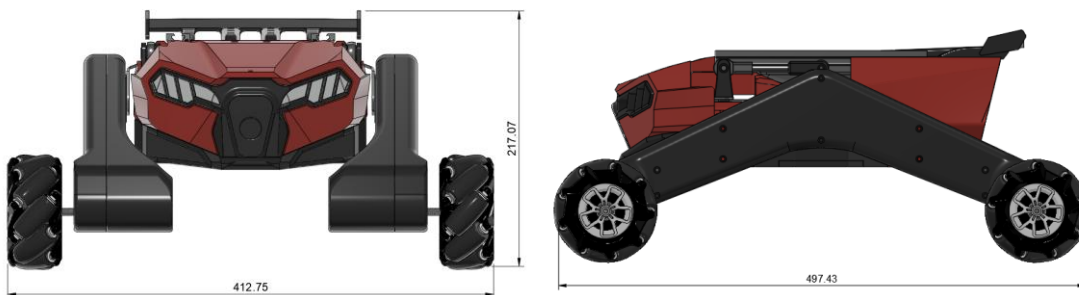
**Anexo 2.** Ensamble de carenado



**Anexo 3.** Ensamble modulo Mosfet



**Anexo 4.** Dimensiones de la plataforma móvil



**Anexo 5.** Implementación de las luces LED



Anexo 6. Estructura de archivos y scripts de Python para el control de la base omnidireccional

```

src > src \ omni_base \ omni_base \ wheel_odom.py
1 #!/usr/bin/env python3
2 # -*- coding: utf-8 -*-
3
4 # import math
5 # from typing import Optional
6
7 # import rclpy
8 # from rclpy.node import Node
9 # from std_msgs.msg import Int64MultiArray
10 # from nav_msgs.msg import Odometry
11 # from geometry_msgs.msg import TransformStamped
12 # import tf2_ros
13
14
15 motoron_interf = rclpy_interfaces_omni_base_interfaces_omni_base_interfaces_1.Odom(Node):
16
17 # Convierte contadores de encoders (fl, fr, rl, rr) en /wheel/odom.
18
19 # Assume:
20 # - msg.data = [FL, FR, RL, RR] (contadores acumulados)
21 # - encoder.cpr = cuentas por vuelta de RUEDA (ej. 1600)
22 # - Cinemática mecanum estándar (misma convención que omni_base)
23 # - use los flags Invert_FL/FR/RL/RR para que odom sea coherente
24 # con la inversión de motores en omni_base.
25
26
27 def __init__(self) -> None:
28     super().__init__("wheel_odom")
29
30     p = self.declare_parameter
31
32 # ----- Parámetros geométricos y encoders -----
33 self.encoder_cpr = float(pi*"encoder_cpr", 1600.0).value)
34 self.r = float(pi*"wheel_radius m", 0.0485).value)
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74

```

Anexo 7. Código de control PI

```

9 #include <dire.h>
10 #include <Motoron.h>
11 #include <stdlib.h> // strtod
12
13 // ===== Motoron =====
14 Motoron12C mcA(0x10) ;
15 Motoron12C mcB(0x11) ;
16
17 #define M_FL 1 // mcA ch1
18 #define M_RL 2 // mcA ch2
19 #define M_FR 1 // mcB ch1
20 #define M_RR 2 // mcB ch2
21
22 #define DIR_FL +1
23 #define DIR_RL +1
24 #define DIR_FR -1
25 #define DIR_RR -1
26
27 const uint16_t CMD_TIMEOUT_MS = 1000;
28 const int16_t U_MAX = 800;
29
30 // ===== Encoders =====
31 const uint8_t FL_A_PIN = 2; // PD2
32 const uint8_t FL_B_PIN = 4; // PD4
33 const uint8_t FR_A_PIN = 3; // PD3
34 const uint8_t FR_B_PIN = 5; // PD5
35 const uint8_t RL_A_PIN = 6; // PD6
36 const uint8_t RL_B_PIN = 7; // PD7
37 const uint8_t RR_A_PIN = 8; // PD8
38 const uint8_t RR_B_PIN = 9; // PD9
39
40 volatile long denc_fl = 0, denc_fr = 0, denc_rl = 0, denc_rr = 0;
41
42
43
44 static inline int8_t quad_delta(uint8_t prev, uint8_t curr) {
45     static const int8_t LUT[16] = {
46         0, +1, -1, 0,
47         -1, 0, 0, +1,
48         +1, 0, 0, -1,
49         0, -1, +1, 0
50     };
51     return LUT[(prev << 2) | curr];
52 }
53
54 static inline uint8_t ab_state_from_portd(uint8_t portd, uint8_t a_bit, uint8_t b_bit) {
55     uint8_t a = (portd >> a_bit) & 0x01;
56     uint8_t b = (portd >> b_bit) & 0x01;
57     return (a << 1) | b;
58 }
59
60 static inline uint8_t ab_state_from_portb(uint8_t portb, uint8_t a_bit, uint8_t b_bit) {
61     uint8_t a = (portb >> a_bit) & 0x01;
62     uint8_t b = (portb >> b_bit) & 0x01;
63     return (a << 1) | b;
64 }
65
66 // ===== Encoder scale =====
67 const float ENC_CPR_WHEEL = 3200.0f;
68
69 #define ENC_SIGN_FL -1
70 #define ENC_SIGN_FR +1
71 #define ENC_SIGN_RL -1
72 #define ENC_SIGN_RR +1
73
74 // ===== Control =====
75 const float KP = 15.0f;
76 const float KI = 45.0f;

```

## **AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Yo, Josué David Misacango Criollo portador de la cédula de ciudadanía N.º 0106877988. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Desarrollo de una plataforma móvil omnidireccional orientada a robótica automatización industrial” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 19 de marzo de 2026



.....  
Josué David Misacango Criollo  
0106877988