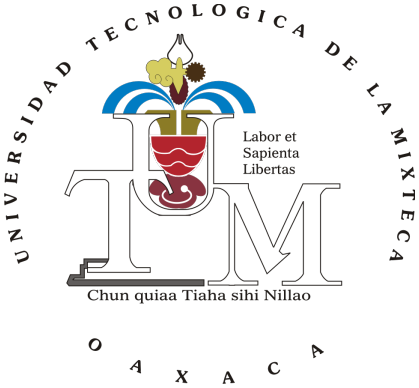


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

" PROTOTIPO VIRTUAL DE UN ROBOT MÓVIL CON LOCOMOCIÓN HÍBRIDA PARA APLICACIONES DE BÚSQUEDA Y RESCATE URBANO "

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN ROBÓTICA

PRESENTA:

ING. RAFAEL ADRIAN GARCÍA GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MANUEL ARIAS MONTIEL

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, AGOSTO DE 2025

©Derechos Reservados: Rafael Adrian García García, 2025

Tesis presentada en agosto de 2025
ante los sinodales:

Dr. Álvaro Jesús Mendoza Jasso
Dr. Juan Javier Montesinos García
Dr. Oscar David Ramírez Cárdenas
Mc. Víctor Manuel Cruz Martinez

Director de tesis:

Dr. Manuel Arias Montiel

Dedico este trabajo de tesis, una vez más, a mi familia, que hoy es más grande que cuando inicié esta maestría. A ustedes, que han estado a mi lado en cada paso, brindándome su apoyo incondicional y la motivación necesaria para no rendirme. Gracias por creer en mí y por todos los sacrificios que hicieron para que este logro fuera posible. Hoy, después de un largo camino, culmino una etapa más en mis estudios, quiero que sepan que este logro es tan mío como suyo.

Agradecimientos

A mis padres, cuyo amor incondicional, guía y apoyo han sido fundamentales en el desarrollo de mi vida académica. Les agradezco profundamente cada sacrificio realizado por mí y por mis hermanos, así como todo el esfuerzo que siempre han dedicado a nuestro bienestar.

A mis hermanos, por los momentos de convivencia que, aunque no tan frecuentes por motivos de trabajo, familia y lugar de residencia, siempre han sido motivo de alegría y unión.

A mi esposa, Saibet, con quien he compartido ya poco más de dieciséis años de vida, llenos de retos y logros, y con quien he tenido la fortuna de formar una familia junto a nuestras hijas, Anya y Zoe. Gracias por tu amor, paciencia y comprensión.

A mis hijas, por ser mi fuente constante de motivación y enseñarme a valorar aún más el esfuerzo de mis propios padres. Quiero que sepan que siempre contarán conmigo y que su alegría ilumina cada uno de nuestros días. Las amamos profundamente.

A mis abuelos, quienes, aunque ya no están presentes, siempre se interesaron por mi bienestar y me brindaron su apoyo con cariño.

Al Dr. Manuel Arias Montiel, por su dirección y acompañamiento a lo largo de este trabajo, el cual, tras casi diez años de su inicio, finalmente llega a su término. Agradezco sinceramente sus consejos, así como el apoyo académico y laboral brindado.

A la Dra. Esther Lugo González, por sus valiosos consejos y apoyo durante estos años para culminar este trabajo a la par de mis actividades de docencia, así como la oportunidad de colaborar en diversas comisiones dentro de la carrera.

Al M.C. Felipe Santiago Espinosa, por su comprensión y respaldo, que me permitieron avanzar en el desarrollo de este trabajo en paralelo con mis responsabilidades laborales.

A la Dra. Patricia Magaly Gallegos, por su apoyo y consejos sobre la labor docente.

Al Dr. Jorge Luis Barahona Ávalos, por las conversaciones que hemos llegado a tener y el apoyo que generosamente me ha brindado.

Al Dr. José Anibal Arias Aguilar, quién siempre dio seguimiento y apertura para retomar dicho trabajo.

A mis sinodales, el Dr. Álvaro Jesús Mendoza Jasso, el Dr. Juan Javier Montesinos García, el Dr. Oscar David Ramírez Cárdenas y el M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez, por sus observaciones y comentarios que contribuyeron a mejorar la claridad y calidad de este documento. Les agradezco el tiempo y dedicación invertidos en la revisión de este trabajo.

A todos aquellos con quienes compartí momentos durante el desarrollo de este trabajo y la docencia, y que cuando me preguntaban por el avance, yo respondía: "Lo importante es que hay salud". Reciban un afectuoso saludo dondequiera que se encuentren: Deira, Bedolla, Karen, Pedro, Pablo, Judith, Marcelino. Les deseo que sigan cosechando muchos más logros en sus labores de docentes e investigadores.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por brindarme no solo una formación de calidad y herramientas para mi desarrollo profesional, sino también, por brindarme la oportunidad de retribuir en la formación de nuevos estudiantes. Así también, a la División de Estudios de Posgrado por proporcionarme las facilidades para retomar y culminar dicho trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ahora Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de maestría (CVU/becario: 643829/571565).

Por último, me queda decirles nuevamente, gracias totales!...

Resumen

La búsqueda y rescate urbano (USAR, Urban Search and Rescue) se refiere a las operaciones realizadas en áreas urbanas afectadas por desastres naturales o provocados por el hombre. Si bien el ciclo de vida de un desastre comprende las fases de preparación, prevención, respuesta y recuperación, el término rescate (a menudo usado de manera intercambiable con búsqueda y rescate) suele emplearse para designar las acciones propias de la etapa de respuesta: localización de víctimas, evaluación de su estado de salud, estabilización y extracción. En este ámbito, la robótica de rescate constituye un campo de aplicación orientado al desarrollo y uso de robots móviles capaces de operar en entornos extremos y no estructurados, facilitando la intervención remota de los equipos de emergencia y reduciendo riesgos y tiempos de respuesta.

Dentro de este contexto, el presente trabajo se centra en el diseño y validación de un prototipo virtual de robot móvil con locomoción híbrida, capaz de operar tanto en tierra como en aire, con el propósito de mejorar su movilidad en escenarios de búsqueda y rescate urbano. La investigación se desarrolló mediante una adaptación de la metodología de ingeniería concurrente, integrando el diseño conceptual, el modelado estructural en SolidWorks® y la simulación multicuerpo en ADAMS/View® para el análisis cinemático y dinámico, sin incluir fases de producción ni comercialización.

Tras un proceso iterativo de diseño, el prototipo incorporó ruedas mecanum, rotores y hélices independientes, así como extremidades reconfigurables, que permiten la transición entre modos de operación terrestre y aéreo, otorgando alta versatilidad y movilidad. Este trabajo constituye una contribución al campo de la robótica de rescate mediante una propuesta innovadora de locomoción híbrida, que sienta las bases para futuras optimizaciones y su eventual implementación física.

Índice general

Índice general xi
Índice de figuras xv
Índice de tablas xxv

1. Introducción **1**
1.1. Antecedentes 2
1.1.1. Impulso de la robótica de rescate 3
1.1.2. ¿Qué es un robot de rescate? y ¿qué tareas realiza? 4
1.1.3. Clasificación de los robots de rescate 6
1.1.4. Diseños y conceptos en los robots de rescate 8
1.1.5. Problemas fundamentales y retos en la robótica de rescate 9
1.2. Planteamiento del problema 9
1.3. Justificación 10
1.4. Hipótesis 11
1.5. Objetivos 11
1.5.1. Objetivo general 11
1.5.2. Objetivos específicos 11
1.6. Limitantes 12
1.7. Delimitantes 12
1.8. Metodología de desarrollo 13
1.9. Estructura de la tesis 14

2. Robots móviles **15**
2.1. Sistemas de locomoción 16
2.1.1. Locomoción terrestre 16
2.1.2. Locomoción aérea 27
2.2. Robots multimodales 29
2.2.1. Entornos terrestres-acuáticos 31
2.2.2. Entornos acuáticos-aéreos 32
2.2.3. Entornos terrestres-aéreos 33
2.3. Guías de diseño y evaluación del desempeño de robots móviles para búsqueda y rescate 42

2.3.1. Normas de evaluación por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) . . . 46
2.3.2. Versatilidad y complejidad en el diseño de robots con alta movilidad . . 54
2.4. Empleo de robots en operaciones de búsqueda y rescate . . . 59

3. Diseño y desarrollo de productos 63
3.1. Ingeniería del diseño . . . 63
3.1.1. Definición del producto . . . 64
3.2. Herramientas para prototipado virtual . . . 66
3.2.1. Herramientas computacionales para prototipado virtual . . . 67

4. Diseño del robot 69
4.1. Definición del producto . . . 69
4.2. Desarrollo del producto . . . 74
4.2.1. Diseño del sistema mecánico . . . 75
4.2.2. Primer rediseño del sistema mecánico . . . 102
4.2.3. Segundo rediseño del sistema mecánico . . . 109
4.2.4. Sistema electrónico . . . 130
4.2.5. Selección de materiales . . . 140
4.2.6. Tercer rediseño del sistema mecánico . . . 147

5. Modelado cinemático 153
5.1. Parámetros del robot . . . 153
5.2. Cinemática de las extremidades en modo cuadrúpedo . . . 155
5.2.1. Cinemática directa de las extremidades . . . 155
5.2.2. Cinemática inversa de las extremidades . . . 160
5.3. Cinemática del robot móvil con ruedas mecanum . . . 164
5.3.1. Cinemática diferencial del robot móvil con ruedas . . . 167
5.4. Cinemática del hexacóptero . . . 175

6. Resultados 181
6.1. Análisis de esfuerzos . . . 181
6.2. Análisis de movimiento en ADAMS/View . . . 193
6.2.1. Configuración del estudio de movimiento en Solidworks . . . 193
6.2.2. Configuración del modelo en ADAMS/View . . . 196
6.2.3. Resultados del análisis de movimiento en ADAMS/View . . . 205
6.2.4. Validación de la cinemática directa del robot en modo cuadrúpedo . . . 211
6.2.5. Validación de la cinemática inversa del robot en modo cuadrúpedo . . . 213
6.2.6. Validación de la cinemática diferencial directa del robot móvil con ruedas 220
6.3. Dimensiones y parámetros finales . . . 222
6.3.1. Características estructurales y capacidades funcionales del robot . . . 226
6.3.2. Versatilidad y complejidad . . . 231

6.3.3. Comparativa entre requerimientos de diseño y resultados 232

7. Conclusiones y trabajo futuro **239**
7.1. Conclusiones 239
7.2. Trabajo futuro 243

Apéndice A1 Apéndices **245**
A1.1. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 1 . . . 245
A1.2. Simulación del mecanismo de reconfiguración en la rueda del diseño 2 245
A1.3. Simulación de la reconfiguración entre modo aéreo y terrestre del diseño 2 . . . 246
A1.4. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 2 . . . 246
A1.5. Simulación del funcionamiento del sistema de bloqueo liberación de los rodillos en el diseño 3 247
A1.6. Simulación de funcionamiento del ensamble de la rueda completa bajo acción de la gravedad y contacto entre elementos 247
A1.7. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 3 . . . 248
A1.8. Simulación de movimiento aéreo para el diseño 3 248
A1.9. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional, extremidades y aéreo para el diseño final 249
A1.10. Carpeta con los reportes de análisis estructurales 249

Bibliografía **251**

Anexo A Anexos **271**
A.1. Artículo publicado 271
A.2. Base de datos - Granta EduPack® 272

Índice de figuras

1.1. Acontecimientos que impulsaron el uso de robots en situaciones de desastre. (a) Fotografía del desastre ocurrido en el terremoto de Kobe, Japón 1995; (b) Fotografía del bombardeo realizado al Edificio Federal Alfred P. Murrah en Oklahoma 1995. 3
1.2. Organizaciones de competencias en robótica. (a) Logo de la AAAI; (b) Logo RoboCup Rescue. 4
1.3. Ejemplos de desastre natural y antrópico. (a) Tsunami en Natori, Japón 2011; (b) Bombardeo en Israel. 6
1.4. (a) Ejemplo de Vehículo Autónomo Terrestre UGV; (b) Ejemplo de Vehículo Autónomo Aéreo UAV. 7
1.5. (a) Ejemplo de Vehículo Autónomo Submarino UUV; (b) Ejemplo de Vehículo Autónomo de Aguas Superficiales USV. 7
1.6. Ejemplos de la clasificación de los robots en cuanto a tamaño. (a) Robot de tamaño *Man-Packable*; (b) Robot de tamaño *Man-Portable*; (c) Robot de tamaño *Maxi-Sized*. 8
1.7. Metodología a emplear durante el desarrollo del trabajo de investigación. . . . 13

2.1. Clasificación de los entornos de operación para robots móviles. 15
2.2. Robots móviles con diversos sistemas de locomoción: a) ruedas, b) orugas, c) extremidades. 16
2.3. Cuatro tipo de ruedas básicas. 17
2.4. Configuraciones de ruedas con base en el número, tipo y arreglo de ruedas. . . 18
2.5. Ejemplos de configuraciones de ruedas. 19
2.6. Ejemplos de clasificaciones de robots con orugas. (a) Respecto a la arquitectura del cuerpo; (b) Respecto al perfil de la oruga; (c) Respecto al tipo de oruga. . 21
2.7. Ejemplos de robots con locomoción con extremidades. (a) robot de una sola pierna o saltador; (b) robot bípedo; (c) robot cuadrúpedo; (d) robot hexápodo. 22
2.8. Estructuras topológicas para cuadrúpedos. 23
2.9. Configuración de las articulaciones de las extremidades. 24
2.10. Ejemplos de robots con ruedas reconfigurables. 25
2.11. Ejemplos de robots reconfigurables con orugas. 25
2.12. Categorías de los sistemas de locomoción para robots terrestres. 26

2.13. Ejemplos de robots con sistema de locomoción híbrido. (a) locomoción híbrida Extremidades con Ruedas (L-W); (b) locomoción híbrida Extremidades con Orugas (L-T); (c) locomoción híbrida Ruedas con Orugas (W-T); (d) locomoción híbrida Extremidades con Ruedas y Orugas (L-W-T). 26

2.14. Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados. 28

2.15. Enfoques de diseño para sistemas multimodal: diseño aditivo, adaptativo y múltiples vehículos. 30

2.16. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-acuáticos. (a) robot con locomoción compuesta de ruedas con orugas y hélices internas; (b) robot (Ninja Legs) con locomoción compuesta de extremidades-ruedas y aletas; (c) robot con locomoción compuesta de ruedas y palas excéntricas; (d) robot (Pleurobot) con locomoción compuesta de extremidades y columna vertebral; (e) robot (GOAT) con locomoción compuesta de ruedas con rayos sin rin y cables tensores; (f) robot (AmphiSTAR) con locomoción compuesta de apéndices de arrastre, hélices y tanques de aire; (g) robot (AmphiFinbot-II) con locomoción compuesta de orugas y aletas onduladas. . 32

2.17. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos acuáticos-aéreos. (a) robot (AquaMAV) con locomoción compuesta de alas plegables y sistema de propulsión a chorro; (b) robot (HUAUV) con locomoción compuesta de rotores con hélices acuáticas y aéreas; (c) robot (RoboBee) con locomoción compuesta de mini alas plegables. 33

2.18. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean alas. (a) robot (MultiMo-Bat) con locomoción compuesta de alas plegables; (b) robot inspirado en la langosta y murciélago con locomoción compuesta de alas plegables y extremidades; (c) robot (DALER v11) con locomoción compuesta de alas plegables y rotores-hélices; (d) robot inspirado en la ardilla voladora con locomoción compuesta de extremidades de arrastre y membranas flexibles; (e) robot (UniCore) con locomoción compuesta de alas plegables y extremidades. 35

2.19. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean rotores y ruedas o jaulas. (a) robot (HyTAQ) con locomoción compuesta de un cuadricóptero y jaula rodante; (b) robot (WAMORN) con locomoción compuesta de un cuadricóptero y jaula con ruedas activas; (c) robot aéreo para inspección de puentes con locomoción compuesta de un cuadricóptero y jaula con ruedas pasivas; (d) robot (TIE) con locomoción compuesta de un micro cuadricóptero y ruedas pasivas; (e) robot (Quadroller) con locomoción compuesta de un cuadricóptero y ruedas pasivas con rodamientos de baja fricción tipo patineta; (f) robot (FSTAR2) con locomoción compuesta de un cuadricóptero con apéndices extensibles y ruedas. 36

2.20. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean dos rotores y ruedas. (a) robot (MTABot) con locomoción compuesta de dos ruedas transformables sin rin y en su interior un par rotor-hélice; (b) robot (Skater) con locomoción compuesta de dos rotores-hélices y dos ruedas pasivas; (c) robot (DoubleBee) con locomoción compuesta de dos rotores-hélices con ajuste de inclinación y ruedas activas; (d) robot (VertiGo) con locomoción compuesta de dos rotores-hélices inclinables y ruedas pasivas-direccionables. 37
2.21. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean múltiples rotores y bases móviles. (a) robot (HERALD) con locomoción compuesta de tres robots independientes (dos serpientes con ruedas y cuadricóptero); (b) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero y base móvil con dirección Ackerman; (c) robot (AQT-HR) con locomoción compuesta de un cuadricóptero con sistema de inclinación y base móvil con ruedas orientables; (d) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero con brazos expandibles/retráctiles y una base móvil con tracción trasera, dirección Ackerman y suspensión MacPherson; (e) robot (BogieCopter) con locomoción compuesta de un cuadricóptero con inclinación en sus rotores y una base móvil con ruedas pasivas; (f) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero y ruedas omniwheels con sistema resorte-amortiguador. 39
2.22. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean rotores y extremidades. (a) robot con locomoción compuesta de cuatro piernas con actuación lineal y arquitectura cuadricóptera; (b) robot con locomoción compuesta de seis piernas (hexápodo) reconfigurable a modo cuadricóptero; (c) robot (QQR) con locomoción compuesta de un cuadrúpedo en cuyas extremidades se monta un cuadricóptero; (d) robot (SNAG) con locomoción compuesta de dos piernas con garras y una arquitectura cuadricóptera; (e) robot (LEONARDO) con locomoción compuesta de dos piernas ligeras y un sistema de propulsión compuesta de cuatros rotores-hélices; (f) robot (KUO-III) con locomoción compuesta de dos piernas ligeras y una estructura cuadricóptera. 41
2.23. Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción altamente integrados. (a) robot con locomoción compuesta de cuatro ruedas y sistema de reconfiguración aérea; (b) robot con locomoción compuesta de cuatro ruedas omnidireccionales en cuyo interior se alojan un par rotor-hélice; (c) robot (M4) con locomoción compuesta de diversos apéndices (ruedas, rotor-hélice, extremidades); (d) robot (ATMO) con locomoción compuesta de rotores-hélices en configuración cuadricóptera y cuyos marcos de protección se comportan como ruedas; (e) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero plegable y ruedas en estructura tipo jaula. 43
2.24. Ciclo de desarrollo de métodos de prueba. 47
2.25. Cruzar brechas horizontales en locales cerrados. 48

2.26. Método E2802 para atravesar obstáculos verticales en locales cerrados. 48
2.27. Método E2803 para atravesar planos inclinados en locales cerrados. 49
2.28. Método E2804 para atravesar escaleras con aterrizajes en locales cerrados. . . 49
2.29. Método E2826 para atravesar terreno complejo compuesto por rampas contínuas. 49
2.30. Método E2827 para atravesar terreno complejo compuesto por peldaños simétricos. 49
2.31. Método E2828 para atravesar terreno complejo compuesto por peldaños simétricos en locales cerrados. 50
2.32. Clasificación de las geometrías de los obstáculos basadas en el tamaño relativo de la estructura general de un robot. 55
2.33. Clasificación de cada tipo de obstáculo. 56
2.34. Gráfica de límite superior de versatilidad frente a complejidad categorizado por modo de locomoción. 57
2.35. Gráfica comparativa entre versatilidad y complejidad de sistemas robóticos. . . 58
2.36. Robots con diseño innovador empleados en la DARPA Robotics Challenge (DRC). (a) robot ATLAS de Boston Dynamics IHMC Team; (b) robot Momaro de NimbRo Rescue Team; (c) robot DRC-Hubo+ de KAIST Team; (d) robot CHIMP de Carnegie Mellon Team; (e) robot ROBOSIMIAN de JPL-NASA Team. 61

3.1. Tipos de oportunidades. Los horizontes 1, 2 y 3 representan los niveles crecientes del riesgo que reflejan diversos tipos de incertidumbre. 65
3.2. Pantalla de inicio del programa SolidWorks® 2015. 67
3.3. Pantalla de inicio del programa ADAMS/view® 2015. 68

4.1. Matriz de calidad QFD. 73
4.2. Principales sistemas y subsistemas del robot móvil. 74
4.3. Árbol de clasificación de conceptos para la locomocion terrestre. 79
4.4. Variaciones de la rueda mecanum. 80
4.5. Primer prototipo de rueda tipo omni-wheel; (a) doble rueda omniwheel sin marco de 8 rodillos y engrane interno;(b) doble rueda omni-wheel sin marco de 12 rodillos con rin de soporte; (c) doble rueda omni-wheel sin marco de 12 rodillos con rin de soporte transparente. 80
4.6. Dimensiones en [mm]del rodillo de la rueda omniwheel con 12 rodillos. 81
4.7. Prototipos de inspiración para el empleo de ruedas sin marco. 81
4.8. (a) Ensamble en Solidworks del prototipo de rueda como tracción y dirección del robot; (b) Ensamble en Adams View del prototipo de rueda como tracción y dirección del robot. 82
4.9. Influencia de los rodillos en el diseño de ruedas mecanum. (a) distancia entre el eje de los rodillos al eje central de la rueda; (b) longitud y diámetro de extremos conforme al número de rodillos para un mismo diámetro de rueda; (c) montaje en extremos o parte central. 83
4.10. Perfil de rodillo para rueda tipo mecanum como aproximación a la silueta. . . 84

4.11. Segundo prototipo de rueda tipo mecanum; (a) rueda mecanum sin marco de 24 rodillos y engrane interno;(b) rueda mecanum sin marco de 24 rodillos con rin de soporte; (c) rueda mecanum sin marco de 24 rodillos con rin de soporte transparente. 85
4.12. Perfil circular de la rueda empleando una aproximación geométrica. 85
4.13. Árbol de clasificación de conceptos para el despegue vertical del sistema aéreo. 86
4.14. Árbol de clasificación de conceptos para la orientación durante el vuelo del sistema aéreo. 87
4.15. Hélice triple de 5 pulgadas para locomoción aérea. 88
4.16. Integración de los sistemas de locomoción terrestre-aéreo. (a) rediseño del rin; (b) vista explosionada de los componentes del rin; (c) vista isométrica de la rueda con ambos módos de locomoción; (d) vista frontal de la rueda con ambos modos de locomoción. 89
4.17. Concepto de robot con sistemas de locomoción terrestre-aérea. (a) modo terrestre; (b) modo aéreo. 89
4.18. Resultados gráficos de las simulaciones en Adams View; (a) movimientos holonómicos de la locomoción terrestre; (b) capacidad de despegue en locomoción aérea. 90
4.19. Sistema de ajuste de altura; (a) altura predeterminada; (b) altura mínima; (c) altura máxima; (d) dimensiones del eslabón. 91
4.20. Diversos sistemas del robot; (a) sistema de acoplamiento y transmisión; (b) vista isométrica del robot con sistemas de locomoción, ajuste de altura, acoplamiento y transmisión ; (c) vista lateral del robot. 95
4.21. Rediseño del rin de la rueda; (b) vista explosionada de los componentes del rin rediseñado; (c) vista isométrica de la rueda; (d) vista frontal de la rueda. . . . 96
4.22. Comparativa entre el concepto de la rueda y su diseño a detalle; (a) concepto funcional; (b) concepto a detalle. 96
4.23. Rueda mecanum a detalle; (a) vista isométrica; (b) vista explosionada. 97
4.24. Árbol de clasificación de conceptos para el sistema de suspensión. 97
4.25. Sistema de suspensión; (a) aplicación típica en autos de radio control; (b) ensamble de la suspensión diseñada en Solidworks. 98
4.26. Ensamble actualizado con los sistemas de locomoción, ajuste de altura, transmisión, acoplamiento y suspensión; (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista superior; (d) vista isométrica. 98
4.27. Rediseño del sistema de acoplamiento-transmisión-suspensión; (a) vista frontal; (b) vista isométrica; (c) vista isométrica explosionada; (d) vista isométrica con el sistema de locomoción. 99
4.28. Árbol de clasificación de conceptos para el sistema de reconfiguración. 100
4.29. Mecanismos de reconfiguración. 4.29(a) Mecanismo de 4 barras; (b) funcionamiento del mecanismo de 4 barras; (c) actuador eléctrico lineal de 50mm de carrera; (d) funcionamiento del actuador lineal. 100
4.30. Prototipo en configuración terrestre; (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista superior; (d) vista isométrica. 101

4.31. Prototipo en configuración aérea; (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista superior; (d) vista isométrica. 101
4.32. Diagrama de cuerpo libre para determinar el par de torsión de las ruedas. . . 103
4.33. Rediseño de las ruedas; (a) vista isométrica frontal; (b) vista isométrica posterior ; (c) vista isométrica explosionada. 105
4.34. Características de desempeño de las hélices KDE. 106
4.35. Segunda versión del prototipo; (a) vista isométrica en modo terrestre; (b) vista isométrica modo aéreo. 106
4.36. Trayectorias de movimiento omnidireccional del segundo prototipo. 107
4.37. Secuencia de reconfiguración realizada en Adams View. 108
4.38. Motor sin escobillas para aplicaciones de cinematografía, modelo SPEEDX2 2806.5 1350KV. 110
4.39. Comparativa entre desempeños del motor-hélice. (a) teóricos; (b) proporcionados por el fabricante. 110
4.40. Comparativa entre desempeños de la versión final de motor-hélice. (a) teóricos; (b) proporcionados por el fabricante. 112
4.41. Perfil elíptico del rodillo obtenido tras el corte de un plano a un ángulo $\gamma = 45°$ del plano axial de la rueda y tamaño acorde al número de rodillos determinado por φ. 113
4.42. Obtención del perfil del rodillo en Solidworks mediante ecuaciones paramétricas. 114
4.43. Ensamblaje del diseño a detalle del rodillo. (a) vista isométrica; (b) corte en la vista frontal; (c) vista isométrica explosionada. 115
4.44. Ensamble del soporte para rodillos. (a) vista frontal; (b) vista isométrica; (c) vista superior; (d) vista isométrica explosionada. 117
4.45. Ensamblaje del rodillo y soporte. (a) Vista isométrica; (b) corte lateral que muestra los diversos componentes;(c) corte frontal mostrando el sistema de bloqueo activo; (d) corte frontal mostrando el sistema de bloqueo liberado. . . 118
4.46. Configuraciones de rueda. (b) configuración A; (b) configuración B; (c) corte superior que visualiza el engrane interno de la rueda. 118
4.47. Ecuaciones empleadas en el diseño del engrane interno de la rueda. 119
4.48. Rueda mecanum final. (a) vista isométrica de rueda en configuración A; (b) vista isométrica de rueda en configuración B;(c) vista isométrica explosionada de una rueda. 119
4.49. Diseño del rin. (a) vista lateral izquierda; (b) vista isométrica. 120
4.50. Ensamble del rin con su componentes. (a) vista isométrica frontal; (b) vista isométrica posterior;(c) vista isométrica explosionada. 121
4.51. Ensamble de la rueda mecanum. (a) vista isométrica en configuración A; (b) vista isométrica en configuración B;(c) vista en corte lateral para apreciar el sistema de transmisión. 122
4.52. Masa preliminar del ensamble de la rueda. 123
4.53. Vistas del funcionamiento del mecanismo de bloqueo/liberación del rodillo. (a) mecanismo de bloqueo activado; (b) mecanismo de bloqueo liberado. 123

4.54. Diagramas de cuerpo libre para el diseño de los eslabones en las articulaciones. 125
4.55. Extremidad como mecanismo de locomoción, ajuste de altura, suspensión y reconfiguración. (a) vista explosionada de los subensambles de la extremidad; (b) vista isométrica de los diversos mecanismos de locomoción; (c) longitudes de inicio en las extremidades H_{FE} y K_{FE}; (d) longitudes de inicio en las extremidades H_{AA} y A_{IE}; (e) longitudes en las extremidades H_{AA}, H_{FE}, K_{FE} y A_{IE}; (f) servomotor digital Hiwonder. 128
4.56. Bases para el chasis preliminar del prototipo. (a) base central para albergar el sistema electrónico; (b) base inferior para baterías y protección de hélices fijas; (c) base superior para colocación de sensores exteroceptivos. 129
4.57. Ensamble mecánico del robot. (a) vista isométrica del ensamble del chasis; (b) vista isométrica del ensamblaje del sistema mecánico del robot en modo terrestre; (c) vista isométrica del ensamblaje del sistema mecánico del robot en modo aéreo. 129
4.58. Diagrama de cuerpo libre para determinar el par de torsión de las ruedas en configuración péndulo invertido sobre ruedas. 130
4.59. Sistema electrónico del robot móvil. 139
4.60. Escala de dureza shore. 144
4.61. Rediseño de las bases que conforman el chasis del prototipo. (a) Prototipo en modo terrestre con distribución de componentes; (b) Prototipo en modo aéreo con distribución de componentes; (c) Base central para albergar el sistema electrónico; (d) Base inferior para baterías, sensores ultrasónicos y protección de hélices fijas; (e) Base superior para colocación de sensores exteroceptivos; (f) Vista de corte dimétrica para apreciar la distribución de los componentes electrónicos en el chasis. 148
4.62. Propiedades físicas del chasis con componentes y su versión simplificada. . . . 149
4.63. Propiedades físicas de las ruedas mecanum A y B a detalle. 149
4.64. Propiedades físicas del prototipo de robot móvil en ambas configuraciones. . . 150
4.65. Prototipo final del robot. (a) Vista lateral en modo terrestre; (b) Vista frontal en modo terrestre; (c) Vista superior en modo terrestre; (d) Vista isométrica en modo aéreo; (e) Vista lateral en modo aéreo; (f) Vista frontal en modo aéreo; (g) Vista superior en modo aéreo; (h) Vista isométrica en modo aéreo. 151

5.1. Marcos de referencia global y local para el esquema simplificado del robot en modo cuadrúpedo. 156
5.2. Análisis geométrico de la extremidad. (a) vista isométrica de una extremidad junto a sus marcos de referencia, en configuración rodilla arriba; (b) plano $x_0 - y_0$ de la extremidad para la determinación del ángulo θ_1; (c) plano $z_0 - x_1$ de la extremidad para la determinación de los ángulos θ_2 y θ_3. 161
5.3. Marcos de referencia global y local para el robot móvil con ruedas mecanum. . 166
5.4. Velocidades resultantes del cuerpo del robot con base en las diversas velocidades angulares de cada rueda. 175

5.5. Marcos de referencia global en tierra $\{S_E\}$ y local en el cuerpo $\{S_B\}$ del hexacóptero. . . . 176
5.6. Configuraciones de fuselaje y arreglo en rotores para hexacópteros. (a) Configuraciones Hexa+, HexaX y Y6 (coaxial); (b) Configuración Hexa+ y arreglo PNPNPN y PPNNPN. . . . 177

6.1. Configuración para el análisis de la base de la rueda. . . . 182
6.2. Propiedades de la malla aplicada al análisis de la base de la rueda. . . . 183
6.3. Factor de seguridad en la base de la rueda. (a) Factor de seguridad con material ABS; (b) Factor de seguridad con material PEEK. . . . 184
6.4. Configuración para el análisis de la base de los rodillos. . . . 185
6.5. Propiedades de la malla aplicada al análisis de la base de los rodillos. . . . 186
6.6. Materiales asignados a los elementos de los soportes de los rodillos. . . . 186
6.7. Resultados del análisis estático al ensamble del soporte de los rodillos. (a) Factor de seguridad del ensamble; (b) Factor de seguridad de los rodillos; (c) Factor de seguridad del eje. . . . 187
6.8. Resultados del análisis estático al ensamble del soporte de los rodillos tras los cambios. (a) Factor de seguridad del ensamble; (b) Factor de seguridad de los rodillos; (c) Factor de seguridad del eje; (d) Factor de seguridad de las bases de los rodillos; (e) Factor de seguridad de las bases del soporte; (f) Factor de seguridad de los rodamientos del eje. . . . 189
6.9. Configuración y ejecución del análisis de caída libre en el chasis del robot. (a) Configuración del estudio de caída libre; (b) Parámetros del mallado del chasis; (c) Mallado y localización de la tensión máxima de Von Mises; (d) Fuerzas de contacto resultantes sobre la base del chasis. . . . 191
6.10. Esfuerzos y desplazamientos en el chasis del robot durante una caída libre de 10 m. (a) Esfuerzo de Von Mises a los 16.23 μs; (b) Esfuerzo de Von Mises a los 406 μs; (c) Desplazamiento vertical en vista lateral; (d) Desplazamiento vertical en vista inferior. . . . 192
6.11. Ensamble del robot sobre una superficie de prueba. . . . 193
6.12. Palets para superficies de prueba. (a) Palet de OSB comercial 1.2m x 1.2m x 0.1m; (b) Superficie de pruebas realizada con palets individuales. . . . 194
6.13. Elementos configurados para el estudio de movimiento en Solidworks. (a) Motor de las articulaciones; (b) Motor de las ruedas; (c) Motor de las hélices; (d) Torsión aplicado a las ruedas; (e) Fuerza aplicada a las hélices; (f) Fuerzas de contacto entre elementos. . . . 195
6.14. Elementos de movimiento, pares de torsión, fuerzas y contactos añadidos al robot en Solidworks para su análisis de movimiento. . . . 196
6.15. Estudio de movimiento en Solidworks finalizado. (a) Exportación del modelo a un conjunto de archivo de datos .cmd; (b) Grados de libertad y redundancias en el modelo. . . . 197
6.16. Importación del modelo dentro del software ADAMS/View. . . . 197

6.17. Visualización del marcador y elementos importados desde Solidworks. (a) Motor de las articulaciones; (b) Motor de las ruedas; (c) Motor de las hélices; (d) Torsión aplicado a las ruedas; (e) Fuerza aplicada a las hélices; (f) Fuerzas de contacto entre rodillo y suelo. 198
6.18. Topología gráfica de los elementos asociados al suelo y al chasis del robot. (a) Relaciones del suelo; (b) Relaciones del chasis; (c) Relaciones del ensamble de rodillo; (d) Relaciones de un elemento interno creado para las relaciones de tipo engranaje. 199
6.19. Modelo del robot en ADAMS. (a) Elementos de movimiento, fuerzas y marcadores; (b) Verificación del modelo en ADAMS. 200
6.20. Configuración de algunas mediciones empleando marcadores en ADAMS. (a) Posición angular sobre el eje Z; (b) Velocidad lineal en el eje X; (c) Par torsional aplicado por el motor; (d) Fuerza de empuje generado por la hélice. 200
6.21. Conjunto de mediciones configuradas en ADAMS. (a) Relaciones del suelo; (b) Relaciones del chasis. 201
6.22. Función escalón unitario aplicada a los movimientos de los actuadores y fuerzas en ADAMS. 202
6.23. Configuración de algunas funciones para el movimiento del robot. (a) Función para motor de la rueda 1A; (b) Función para movimiento de la articulación 1 (cadera-flexión/extensión); (c) Función para rotación de la hélice 1 en sentido horario; (d) Fuerza de empuje generado por la hélice. 203
6.24. Configuración del control de simulación. 204
6.25. Mensaje de error del integrador durante la simulación. 205
6.26. Desplazamientos y velocidades del robot. (a) Postura del robot; (b) Orientaciones del robot; (c) velocidades del robot. 207
6.27. Velocidades angulares y pares de torsión en las ruedas. (a) Velocidades angulares en las ruedas; (b) Pares de torsión en la salida del reductor. 208
6.28. Rotaciones angulares de las extremidades 1 a 4. (a) Ángulos de los servomotores de la extremidad 1; (b) Ángulos de los servomotores de la extremidad 2. (c) Ángulos de los servomotores de la extremidad 3; (d) Ángulos de los servomotores de la extremidad 4. 209
6.29. Pares de torsión de las extremidades 1 a 4. (a) Pares en los servomotores de la extremidad 1; (b) Pares en los servomotores de la extremidad 2. (c) Pares en los servomotores de la extremidad 3; (d) Pares en los servomotores de la extremidad 4. 210
6.30. Fuerzas de sustentación en las hélices. 211
6.31. Fuerza de contacto entre la base del chasis y el suelo. 211
6.32. Posición y orientación predeterminada del robot en SolidWorks. 213
6.33. Posición y orientación deseadas para la configuración aérea 1 en Adams/view. 216
6.34. Posición y orientación deseadas para la configuración aérea 2 en ADAMS/View. 218

6.35. Posición y orientación deseadas para una configuración terrestre en ADAMS/-View. (a) Posición y orientación del marco de referencia en el centro del rin $\{S_{LX_4}\}$ con respecto al marco de referencia del suelo $\{S_F\}$; (b) Posición y orientación del marco de referencia en el chasis del robot $\{S_R\}$ con respecto al marco de referencia del suelo S_F. 221
6.36. Comprobación de la cinemática diferencial del robot. 223
6.37. Dimensiones predeterminadas del robot en modo terrestre-omnidireccional y aéreo. (a) Vista superior terrestre-omnidireccional; (b) Vista lateral izquierda terrestre-omnidireccional; (c) Vista frontal terrestre-omnidireccional; (d) Dimensiones del robot en modo aéreo. 224
6.38. Diversos modos de operación posibles en el robot. 225
6.39. Secuencia reconfiguración de 4 ruedas a dos ruedas (péndulo invertido sobre ruedas). 225
6.40. Obstáculos en modo terrestre. (a) Escalón con altura máxima de 250 mm; (b) Pendiente con inclinación de 40°. 226
6.41. Vistas del prototipo final. (a) Isométrico del modo de operación en tierra; (b) Isométrico del modo de operación en aire. 227

A1.1. QR para el video de la simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 1. 245
A1.2. QR para el video de la simulación del mecanismo de reconfiguración en la rueda del diseño 2. 245
A1.3. QR para el video de la simulación de la reconfiguración entre modo aéreo y terrestre del diseño 2. 246
A1.4. QR para el video de la simulación de movimiento omnidireccional del diseño 2. 246
A1.5. QR para el video de la Simulación del funcionamiento del sistema de bloqueo liberación de los rodillos en el diseño 3. 247
A1.6. QR para el video de la simulación de funcionamiento del ensamble de la rueda completa bajo acción de la gravedad y contacto entre elementos del diseño 3. 247
A1.7. QR para el video de la simulación de movimiento omnidireccional del diseño 3. 248
A1.8. QR para el video de la simulación de movimiento aéreo del diseño 3. 248
A1.9. QR para el video de la simulación de secuencias de movimiento omnidireccional, extremidades y aéreo para el diseño final. 249
A1.10. QR para la carpeta con los reportes de análisis estructurales. 249
A.1. QR para la carpeta con la base de datos de materiales de Granta EduPack®. 272

Índice de tablas

2.1. Descripción de las características consideradas en la comparación de los sistemas de locomoción. 51
2.2. Comparativa de las características de los sistemas de locomoción. 52
2.3. Estimación de las características de los sistemas de locomoción basados en su nivel de madurez tecnológico y comercial. 53

4.1. Descomposición funcional del sistema de locomoción del robot. 76
4.2. Descomposición funcional del sistema de acoplamiento y reconfiguración del robot. 92
4.3. Tabla de parámetros de los actuadores empleados en el prototipo. 132
4.4. Tabla de los controladores empleados en el prototipo. 133
4.5. Tabla de los sensores empleados en el prototipo. 135
4.6. Tabla de parámetros de los elementos de alimentación para el prototipo. . . . 138
4.7. Propiedades físicas y mecánicas de los termoplásticos de ingeniería. 141
4.8. Propiedades térmicas, de procesamiento y durabilidad de los termoplásticos de ingeniería. 142
4.9. Propiedades físicas y mecánicas de los termoestables para rodillos. 145
4.10. Propiedades térmicas, de procesamiento y durabilidad de los termoestables para rodillos. 146

5.1. Tabla de parámetros físicos del robot. 154
5.2. Tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg para las extremidades del robot. . 155
5.3. Tabla de parámetros del robot con ruedas mecanum. 173

6.1. Resultados de materiales sometidos a una fuerza de 150 N. 183
6.2. Resultados del análisis estático aplicado al soporte de los rodillos. 190
6.3. Comparación entre las velocidades de rotación en las ruedas y las velocidades en el cuerpo del robot, calculadas analíticamente y obtenidas mediante simulación en ADAMS/View. 222
6.4. Tabla de las características estructurales del robot. 228
6.5. Tabla de las capacidades funcionales del robot. 230
6.6. Tabla de los pesos correspondientes a la evaluación de la versatilidad del robot. 233

6.7. Tabla de los resultados obtenidos en el desarrollo del robot que atienden a los requerimientos del cliente. 236

Capítulo 1

Introducción

A través de los años, la humanidad se ha visto inmersa en una gran cantidad de desastres. En [1] se define un desastre como un suceso repentino y catastrófico que altera significativamente el funcionamiento de una comunidad o sociedad y genera pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, las cuales exceden la capacidad de la comunidad o sociedad para hacer frente a la situación utilizando sus propios recursos. Los desastres se clasifican principalmente en dos tipos: los desastres naturales (terremotos, tsunamis, huracanes, deslaves, etc.), y los desastres antrópicos u ocasionados por la acción humana o relacionados con la tecnología (bombardeos, incendios, derrames químicos, etc.).

En el 2023, la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT) registró un total de 399 desastres relacionados con desastres naturales, un valor arriba del promedio de 369 reportados entre 2003 y 2022 [2]. Así también, se reportaron 86,473 decesos y 93.1 millones de personas afectadas. Entre los desastres con mayor incidencia se encuentran 164 eventos de inundaciones, 139 tormentas y 32 terremotos. Sin embargo, los terremotos registraron en 2023 un total de 62,451 muertes, muy por arriba del promedio de 35,124 registrados entre 2003 y 2022, principalmente debido al terremoto de Turquía, por su parte, las tormentas registraron 14,666 muertes y las inundaciones un total de 7,763. Las zonas urbanas son las más afectadas en términos de muertes e impacto económico. A partir de análisis en diversos eventos, se ha determinado que tan sólo una pequeña fracción de las víctimas atrapadas sobreviven a un incidente urbano. El 80 % de los sobrevivientes de desastres urbanos se consideran víctimas superficiales; es decir, personas que permanecen en la superficie de los escombros o se encuentran en zonas visibles para los rescatistas, mientras el 20 % de los sobrevivientes de desastres urbanos provienen del interior de los escombros, siendo en estos interiores donde se encuentran la mayoría de las víctimas. Estas víctimas enterradas o atrapadas bajo los escombros suelen encontrarse en condiciones de salud relativamente aceptables o con ciertas necesidades de atención médica. Sin embargo, un hecho alarmante es que, la tasa de mortalidad aumenta conforme transcurre el tiempo, alcanzando su pico después de las primeras 48 horas, por lo que si los sobrevivientes no son extraídos o puestos a salvo durante las primeras 48 horas después del desastre, estos tienen pocas probabilidades de sobrevivir más allá de un par de semanas en el hospital [3, 4].

Es así, como diversos equipos y organizaciones de rescatistas dentro del campo de Búsqueda y Rescate Urbano (USAR, *Urban Search And Rescue*, por sus siglas en inglés), donde el término "Urbano" hace énfasis en que dicha actividad usualmente toma lugar en ciudades o sitios poblados; requieren de tiempos rápidos de acción para dar respuesta y manejar la etapa de rescate durante el ciclo de vida de un desastre: *preparación, prevención, rescate* y *recuperación*. El término rescate (frecuentemente intercambiable con el término *búsqueda y rescate*) suele utilizarse para referirse a las actividades inmediatas después de un suceso crítico y que trata directamente la situación de los afectados: localización (*búsqueda*), evaluación de estado de salud, estabilización y extracción (*rescate*). Sin embargo, aunque el principal motivo de estos equipos de rescate es el de salvar la mayor cantidad de vidas posible, existen condiciones no favorables en el entorno de operación para la intervención de un ser humano o animales entrenados, o donde los tiempos de acción que se requieren son muy cortos. Por este motivo, el uso de robots como herramienta y extensión de las capacidades de los rescatistas ha ganado gran aceptación en los últimos años, siendo el año de 1995 el punto de partida de esta nueva área en la robótica [3].

Los diversos entornos de operación y las tareas propuestas hasta el momento para la incursión de los robots de rescate, influyen directamente en su diseño y capacidades: búsqueda, reconocimiento y mapeo del entorno, remoción de escombros, inspección de estructuras, asistencia e intervención médica en el sitio, evacuación de víctimas, faro móvil, repetidor de señales, sustitución como algún miembro del equipo, refuerzo de estructuras, apoyo logístico, entre otras [3, 4]. A pesar de esto, diversos retos fundamentales se han presentado en los requerimientos principales de un robot de rescate: movilidad, sistema sensorial, fuente de energía, sistemas de comunicación, control e interacción humano-robot [3]. Dentro de estos requerimientos, la movilidad del robot sigue siendo el reto mayor para todas las modalidades de robots de rescate, esto debido a la complejidad de los entornos de operación, los cuales se definen como entornos no estructurados.

Esta tesis se enfoca exclusivamente en abordar el problema principal de la movilidad en robots de rescate, debido a que en los últimos años esta área emergente de la robótica ha ganado popularidad y aceptación por parte de rescatistas, y se ha impulsado su investigación en la comunidad científica. Por lo que se propone el desarrollo de un prototipo virtual de un robot móvil, el cual sea reconfigurable y se adapte a diversos entornos de operación, con el que se espera proponer un diseño base o referente para futuras mejoras y ofrecer una solución al problema de movilidad.

1.1. Antecedentes

Diversos desastres han ocurrido a través de los años y muchos más seguirán ocurriendo, es por esto que, las actividades relacionadas en el manejo del ciclo de vida de un desastre son fundamentales. En especial las actividades que se realizan inmediatamente ocurrido el desastre, relacionadas a la Búsqueda y Rescate Urbano (USAR). Dichas actividades son una carrera contra el tiempo, a fin de salvar la mayor cantidad de víctimas posibles, sin exponer

a nuevos peligros tanto a las víctimas como a los equipos de rescate. Es así como se ha incrementado el empleo de robots para realizar tareas relacionadas a la USAR, a fin de extender y mejorar las habilidades de los rescatistas; realización de búsquedas y localizaciones rápidas, estabilización y extracción de víctimas quienes no son fácilmente alcanzables, recopilación de datos del entorno, entre otras.

1.1.1. Impulso de la robótica de rescate

Históricamente, el impulso para lo que se conoce como robótica de rescate se derivó de dos eventos trágicos ocurridos en el año de 1995 [3–5]. El primer acontecimiento sucedió el 17 de Enero de 1995, donde el terremoto *Hanshin-Awaji* de 7.2 de magnitud en la escala de Ritcher afectó a la ciudad de Kobe Japón, como se aprecia en la Figura 1.1(a), matando a unas 5,100 personas y afectando a unas 26,800 [5]. Este desastre natural motivó al grupo del Prof. Satoshi Takokoro de la Universidad de Kobe en Japón, a fundar el Instituto Internacional de Sistemas de Rescate (IRS, *International Rescue System*, por sus siglas en inglés) [4]. El segundo acontecimiento sucedió tan solo cuatro meses después, el 19 de Abril de 1995 se llevó a cabo un bombardeo al Edificio Federal Alfred P. Murrah en la ciudad de Oklahoma, como se aprecia en la Figura 1.1(b), donde 168 personas fallecieron y más de 500 resultaron afectadas [5]. Por su parte, este desastre antrópico motivó al programa de Robótica Táctica Móvil (TMR, *Tactical Mobile Robots*, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA, *Defense Advanced Research Projects Agency*, por sus siglas en inglés), a impulsar la búsqueda y rescate urbano [5], colaborando posteriormente con el recientemente creado Centro para la Búsqueda y Rescate Asistido por Robots (CRASAR, Center for Robot-Assisted Search and Rescue, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas [4].



(a) (b)

Figura 1.1: Acontecimientos que impulsaron el uso de robots en situaciones de desastre. (a)Fotografía del desastre ocurrido en el terremoto de Kobe, Japón 1995; (b) Fotografía del bombardeo realizado al Edificio Federal Alfred P. Murrah en Oklahoma 1995.

Sin embargo, las tragedias no han sido los únicos motivadores para el avance de la robótica de rescate. Poco tiempo después de estos eventos trágicos, dos competencias de robot móviles surgieron con la finalidad de enganchar en la investigación y desarrollo de la robótica de rescate a la comunidad científica, estudiantes y aficionados a la robótica [3–5]: La competencia de robots móviles por parte de la Asociación para el Avance de la Inteligencia Artificial (AAAI, *Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, por sus siglas en inglés), y la categoría dentro de la Copa Mundial de Fútbol Robótico (RoboCup, *Robot Soccer World Cup*, por su contracción en inglés) denominada Liga Internacional RoboCup Rescue (Figura 1.2). Siendo esta última competencia la que aún sigue vigente [4].



(a) (b)

Figura 1.2: Organizaciones de competencias en robótica. (a) Logo de la AAAI; (b) Logo de la RoboCup Rescue.

1.1.2. ¿Qué es un robot de rescate? y ¿qué tareas realiza?

En [4] definen como robots de rescate, a robots móviles o robots construidos para sensar y actuar en un entorno. Lo que diferencía a los robots de rescate frente a robots industriales o manipuladores, es que mientras los segundos realizan tareas repetitivas y dentro de un espacio de trabajo delimitado, los primeros deben ser capaces de desplazarse en entornos impredecibles y no estructurados. Además, estos robots deben de ser conscientes del entorno donde operan, esto con el fin de no provocar derrumbes secundarios y poner en riesgo la vida de víctimas y rescatistas.

Un robot de rescate frecuentemente realiza tareas semejantes a las tareas militares, por lo que un robot militar podría ser adaptado. Sin embargo, algunas otras tareas de rescate son muy diferentes que su contraparte militar, y en otras ocasiones completamente únicas. Por lo que se resume que un robot de rescate puede ser diseñado de manera diferente a un robot militar, cumpliendo tres limitantes de diseño [4]:

- Adecuado para terrenos extremos y condiciones de operación que afectan en su tamaño, desempeño de sensores, supervivencia general del robot.
- Habilidad para operar en entornos privados de comunicaciones GPS o inalámbricas.
- Provisión de una interfaz apropiada Hombre-Robot para interactuar tanto con los operadores, como con las víctimas.

El conjunto de tareas que los robots de rescate deben realizar aún se encuentra incompleta debido a que es un campo nuevo y en constante evolución, además, recientes despliegues de robots en zonas de desastre sugieren que los robots diseñados para rescate, también pueden y deben ser empleados en las etapas de prevención, preparación y recuperación; a esta última tendencia en desarrollo de robots se le denomina robótica de desastres, aunque los términos como robot de rescate, robot de búsqueda y rescate, y robot de desastres, son intercambiables. A continuación, se describen algunas tareas propuestas a realizar por parte de los robots de rescate [3, 4, 6]:

- **La búsqueda**, cuya actividad se concentra en interiores de estructuras tales como cuevas, túneles, edificios colapsados y cuyo objetivo es analizar el área en búsqueda de víctimas a fin de extraerlas, o analizar algún tipo de peligro potencial. Para esto se requiere que la tarea se complete en un tiempo rápido y sin comprometer la integridad de las potenciales víctimas o equipos de rescate.
- **El reconocimiento y mapeo**, cuya actividad es más amplia que la búsqueda, debido a que se debe proporcionar una respuesta a los especialistas que les permita tomar conciencia de las condiciones del entorno que se monitorea, nuevamente en un tiempo rápido y que cubra la mayor parte del entorno con una apropiada resolución.
- **La remoción de escombros**, esta actividad se centra en realizar de manera más rápida las actividades típicas de una grúa y que por cuestiones de tamaño no pueda acceder a determinadas zonas, por ejemplo, maquinaria robótica y exoesqueletos del tamaño de una persona o más pequeña.
- **La inspección estructural**, esta actividad se desarrolla tanto en interiores como en exteriores, para auxiliar a los rescatistas determinando si las estructuras son seguras para ingresar o aquellas que potencialmente puedan sufrir un segundo derrumbe, esto mediante el uso de sensores estructurales y técnicas de visión que permitan diversos ángulos de vista.
- **La evaluación médica en el sitio e intervención**, esta actividad permite a través de robots operados por médicos especialistas, evaluar mediante sensores de diagnóstico las condiciones en que se encuentran las víctimas y proporcionar medicamentos, líquidos o asistencia médica en el lugar.
- **La ampliación de cobertura**, los robots se emplean como repetidores de señal para ampliar los rangos de comunicación inalámbrica necesarios para la comunicación y coordinación de los equipos de rescate.
- **Sustituto de un miembro del equipo**, en esta actividad el robot trabaja lado a lado con los equipos de rescate, sustituyendo a un oficial de seguridad, o personal de logística, con el objetivo de acelerar el flujo de trabajo y realizar tareas que representen una amenaza para la vida humana.
- **Un reforzamiento adaptable**, para reforzar escombros inestables y permitir el proceso de extracción de víctimas, con el objetivo de evitar generar un segundo colapso sin mapear la estructura completa.

- **Proporcionando soporte logístico**, mediante esta actividad se automatiza el transporte de equipo o suministros de las áreas de almacenamiento a los equipos o puntos de distribución dentro de la zona de operación, el objetivo es reducir el número de personal dentro de la zona de operación y que realiza tareas de rutina.

Debido a la diversidad de tareas que se han propuesto y las que aún se plantean, se espera que los robots de rescate sean reconfigurables y reutilizables.

1.1.3. Clasificación de los robots de rescate

Se presentan inicialmente los diversos tipos de desastre y cómo las características de estos influyen en el diseño y carga de trabajo de los robots. Los desastres se clasifican principalmente en dos tipos: los desastres naturales (terremotos, tsunamis, huracanes, avalanchas, inundaciones, incendios forestales, deslaves, etc.), y los desastres antrópicos u ocasionados por la acción humana o relacionados con la tecnología (bombardeos, incendios, descarrilamientos, derrames químicos, derrumbe de puentes, etc.).

Los desastres naturales, como se muestra en la Figura 1.3(a), usualmente generan daños en áreas geográficas extensas, abarcando un radio aproximado de 200km al rededor del epicentro del desastre. Impactando principalmente a residencias, pequeños edificios comerciales, diques y canales, así como los sistemas de comunicación y transporte. Lo que implica una gran cantidad de sitios para realizar operaciones de búsqueda, propiciando así, que una vista aérea sea un requisito para tomar conciencia acerca de la situación de áreas determinadas o individuos que necesiten asistencia y evacuación inmediata. Los desastres antrópicos en cambio, como se muestra en la Figura 1.3(b), suelen ocurrir en pequeñas zonas concentradas. El reto por lo tanto, es tener acceso a las zonas que no son visibles y que son de difícil acceso debido a su entorno no estructurado, o que presentan cierto peligro para los rescatistas.

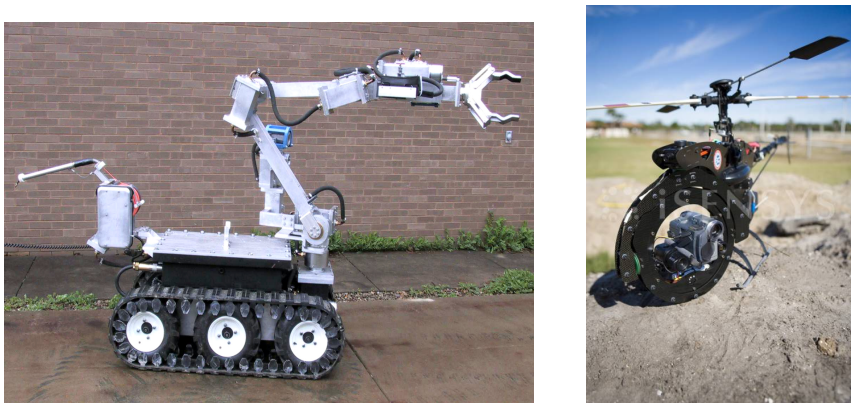


(a) (b)

Figura 1.3: Ejemplos de desastre natural y antrópico. (a) Tsunami en Natori, Japón 2011; (b) Bombardeo en Israel.

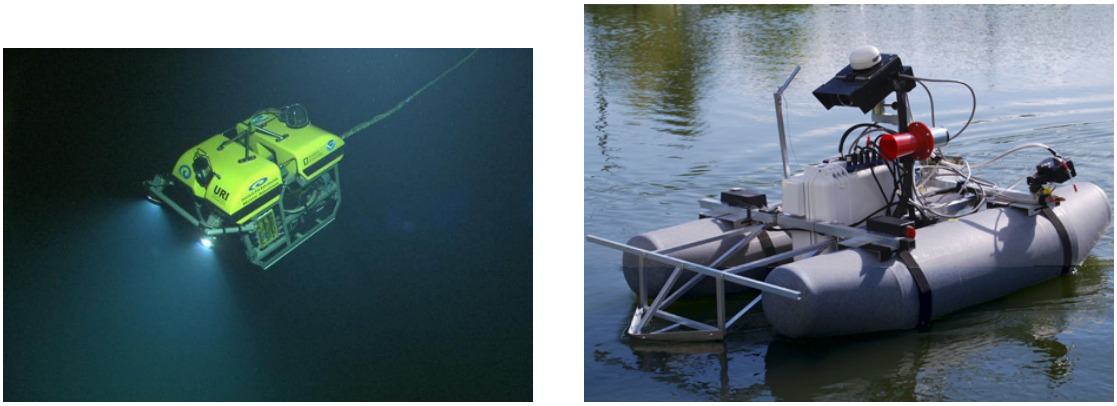
Los robots de rescate pueden ser clasificados principalmente en función de su modalidad y tamaño [3]. Existiendo cuatro modalidades de robots: vehículos terrestres no tripulados (UGV,

Unmanned Ground Vehicles, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 1.4(a), vehículos aéreos no tripulados (UAV, Unmanned Aerial Vehicles, por sus siglas en inglés), como se muestra en la Figura 1.4(b), vehículos submarinos no tripulados (UUV, Unmanned Underwater Vehicles, por sus siglas en inglés), vehículos de aguas superficiales no tripulados (USV, Unmanned Surface Vehicles, por sus siglas en inglés). Cada una de estas modalidades a su vez se divide en 3 tamaños, como se muestra en la Figura 1.6: *man-packable* (es decir, que pueda ser transportado justo después del desastre y quepa en máximo dos maletas), *man-portable* (es decir, que pueda ser transportado mediante un equipo todo terreno ligero a la zona del desastre y operado a lo máximo por dos personas), *maxi* (es decir, que para su transporte sea necesario emplear trailers o alguna logística de transporte especial).



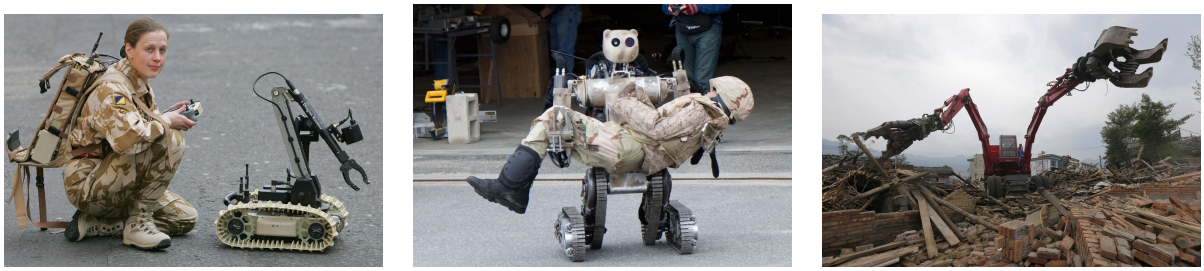
(a) (b)

Figura 1.4: (a) Ejemplo de Vehículo Autónomo Terrestre UGV; (b) Ejemplo de Vehículo Autónomo Aéreo UAV.



(a) (b)

Figura 1.5: (a) Ejemplo de Vehículo Autónomo Submarino UUV; (b) Ejemplo de Vehículo Autónomo de Aguas Superficiales USV.



(a) (b) (c)

Figura 1.6: Ejemplos de la clasificación de los robots en cuanto a tamaño. (a) Robot de tamaño *Man-Packable*; (b) Robot de tamaño *Man-Portable*; (c) Robot de tamaño *Maxi-Sized*.

Por lo anterior, los robots más adecuados para atender desastres naturales son los de tipo UAV, en sus categorías *man-packable* y *man-portable*; los cuales pueden ser de ala fija tipo avión, o de ala rotatoria tipo helicóptero. Esto debido a que las misiones requieren cubrir zonas extensas, recopilando la mayor cantidad de información en tiempo real para tomar una conciencia de la gravedad del desastre. Sin embargo, los robots USV han demostrado ser más benéficos que los UVV para inspeccionar estructuras cercanas a zonas de agua. Mientras el uso de los robots tipo UGV se presenta una mayor cantidad de veces en los desastres antrópicos, esto debido a la naturaleza que presentan los entornos no estructurados y de díficil acceso, así como la maniobrabilidad que se requiere, por lo que el tamaño ideal sería *man-packable* para ingresar a zonas estrechas y *man-portable* para ayudar en la remoción de escombros [3].

1.1.4. Diseños y conceptos en los robots de rescate

Las diversas características que presentan los tipos de desastre, así como las tareas propuestas a realizar por parte de los robots de rescate, son los factores principales que influyen en el diseño específico de un robot. A pesar de que diversos diseños especulativos para vehículos no tripulados, tanto de tierra como aéreos han sido propuestos, muy pocos robots de rescate han sido desplegados en las zonas de desastre, hasta el 2014, solo 34 despliegues de robots han sido reportados y analizados en profundidad [4], de los cuales solo 29 veces se emplearon en el incidente, mientras las otras 5 veces se desplegaron robots pero no se utilizaron. Este estudio muestra que debido a la diversidad de despliegues realizados, al momento ningún tipo, ni tamaño de robot se ha adaptado a todas las misiones.

Algunos diseños se han basado principalmente en mejoras en el sistema de locomoción empleado por el robot, mientras otros presentan combinaciones con manipuladores o entre sistemas de locomoción, por ejemplo: robots con ruedas [7–9], robots con orugas [10–14], extremidades (piernas), extremidades con ruedas [15], ruedas con extremidades [16], ruedas con orugas [17–20], ruedas con orugas y extremidades [21], y terrestres-aéreos [22–24].

1.1.5. Problemas fundamentales y retos en la robótica de rescate

Al ser la robótica de rescate, un campo emergente en los últimos años, se han comenzado a establecer algunos estándares para medir el grado de éxito en las tareas que desempeñan los robots, e incluso proponer los requerimientos mínimos en el diseño de los mismos. A pesar de que estas contribuciones se han realizado en escenarios simulados o competencias de robots, así como en robots que inicialmente no fueron diseñados para tales fines, mediante el análisis de los diversos despliegues realizados al momento, los investigadores concluyen o sugieren que los retos fundamentales a resolver en el campo de la robótica de desastre son [3, 25]:

- **Movilidad**: Se considera el mayor problema para la categoría de robots terrestres, debido a las condiciones inciertas y no estructuradas del terreno, la existencia de obstáculos o escombro, la capacidad de escalar o subir escaleras, así como pasar dentro de las estructuras colapsadas. Por lo que la adaptabilidad del robot a estas condiciones es un verdadero tema a tratar. En cuanto a los vehículos aéreos, las condiciones de viento son un problema a considerar, así como la cercanía a líneas de tensión eléctrica o árboles de gran tamaño que pueden interferir con su funcionamiento. Para el caso de robots submarinos y aguas superficiales, el peligro de que cables de tensión caigan en aguas cercanas es un gran riesgo que se debe evaluar.

- **Sistemas de comunicación**: Se requiere que dichas comunicaciones sean en tiempo real para permitir a los operadores y equipo de rescate visualizar lo que ve el robot en ese momento. Sin embargo, la mayoría de las infraestructuras de comunicación se ven perjudicadas en dicho desastre, a la vez que las que se encuentran saturadas. Una solución que se plantea es usar a otros robots móviles como repetidores de señal.

- **Control del robot**: Suele dividirse en dos partes, el control de la plataforma, relacionado a la teoría de control y estructura del robot, y el control de actividad relacionada a la inteligencia artificial. Esto con el fin de dotar de autonomía total a los robots sin necesidad de un operador.

- **Sistema sensorial**: La etapa de sensado y monitoreo se considera de gran importancia debido a que sin mediciones buenas y precisas, el robot se puede localizar en un área de interés pero no será capaz de dar una respuesta de si encuentra a una víctima potencial o de las condiciones en las que se encuentra el área explorada.

- **Fuente de alimentación**: El consumo energético ha sido uno de los inconvenientes en cuanto a la estructura y autonomía de los robots. Por razones de seguridad y espacio, es preferible emplear baterías en lugar de sistemas de combustión. La desventaja es que estas baterías incrementan el peso del robot y su carga es muy limitada, sobre todo en los vehículos aéreos.

1.2. Planteamiento del problema

La robótica de rescate, como campo emergente de la robótica móvil, ha mostrado una gran aceptación como herramienta en la mitigación de los daños producidos en un desastre.

Al mismo tiempo, su investigación y desarrollo se ha visto impulsado dentro de la comunidad científica; esto debido a eventos como la competencia internacional para robots de búsqueda y rescate (*RoboCup Rescue Robot League*) [3–5]. Sin embargo, la incursión de la robótica de rescate aún presenta diversos retos fundamentales a resolver, a fin de realizar diseños de robots que se adecuen a las condiciones del entorno y tareas a realizar: movilidad, sistema sensorial, fuente de energía, sistemas de comunicación, control e interacción humano-robot [3].

Entre estos retos, la movilidad ha sido el reto mayor de todas las modalidades de robots de rescate, especialmente para los robots de tierra, debido a que operan en entornos no estructurados y de difícil acceso para los rescatistas. Siendo debajo de los escombros donde se localizan la mayor cantidad de víctimas, por lo cual, al no ser capaz de ingresar y recolectar información en estas zonas dentro de las primeras 48 horas, la probabilidad de supervivencia de las víctimas decrece [3, 4].

Por lo anterior, se abordará el reto de la movilidad en robots de rescate, basándose en las últimas tendencias en desarrollo de sistemas de locomoción en robots móviles. Para esto, se plantea desarrollar un prototipo virtual de un robot móvil con un sistema de locomoción híbrida para aplicaciones inmediatas de búsqueda y rescate urbano. Dicho sistema de locomoción, mediante su reconfiguración, permitirá al robot adaptarse a diversos entornos no estructurados, tanto en tierra como en el aire. Se propone también, evaluar el comportamiento y desempeño del prototipo en un entorno de simulación, a fin de determinar si el prototipo es viable para su desarrollo y construcción con fines comerciales (lo cual no se contempla dentro de los alcances de este trabajo). La metodología que se propone para satisfacer todos los requerimientos es: el uso de la Ingeniería del Diseño basado en la Ingeniería Concurrente [26, 27], auxiliándose del Diseño Mecánico Inteligente [28], y empleando paquetes computacionales durante el prototipado virtual [29–31].

1.3. Justificación

En la actualidad, la incursión de la robótica de rescate para la mitigación de los daños producidos en un desastre ha ganado gran popularidad, sin embargo, hasta la fecha solo pocos despliegues de ciertos tipos de robots en zonas de desastre se han registrado y analizado en profundidad [4]. Así también, un sólo tipo de robot no ha sido capaz de cumplir con la mayoría de requisitos que demandan las diversas tareas de rescate. Dado que el tiempo y la movilidad del robot juegan un rol importante en la ejecución de las tareas, se requieren diseñar robots capaces de adaptar su movilidad a diversos entornos no estructurados y de difícil acceso para los equipos de rescate.

Realizar una investigación sobre las ventajas y desventajas de movilidad en los sistemas de locomoción de robots móviles actuales y la tendencia en el diseño de sistemas de locomoción híbridos, es de gran interés para determinar qué tipos de robots móviles pudieran ser implementados dentro de las tareas de búsqueda y rescate. Posteriormente, esto permitirá proponer y evaluar alternativas de diseño, y desarrollar un prototipo novedoso de robot móvil

virtual capaz de adaptarse a diversos entornos no estructurados tanto en tierra como en el aire, mediante la reconfiguración de su sistema de locomoción, no limitándose, al uso exclusivo en aplicaciones de búsqueda y rescate urbano, pero sí con aplicaciones inmediatas en este campo. Esto con el fin de brindar una mejor herramienta a los equipos de rescate en la mitigación de daños causados en un desastre. Con el desarrollo de este proyecto, además, se impulsará la investigación en este campo emergente de la robótica dentro de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, esto debido al impacto que pudieran llegar a tener sus potenciales aplicaciones. Se espera, que el prototipo virtual obtenido como resultado de este trabajo pueda servir para futuros análisis con el objetivo de mejorar su desempeño o adaptarlo a nuevas aplicaciones. Los alcances de este trabajo de investigación se delimitan al desarrollo de un prototipo virtual, debido a las limitaciones en costo que se tienen para desarrollar el prototipo físico y la implementación de diversos entornos de desastre físicos para su prueba y evaluación. Además, se enfocan los esfuerzos en la generación de un modelo funcional, validado mediante el uso de herramientas computacionales en cada etapa del desarrollo, cumpliendo con los procedimientos establecidos por la metodología de ingeniería concurrente.

1.4. Hipótesis

El diseño de un prototipo virtual de robot móvil con un mecanismo de locomoción híbrida, capaz de operar tanto en tierra como en el aire, permitirá desarrollar un sistema robótico portable, fiable, versátil y de fácil mantenimiento para aplicaciones de búsqueda y rescate en entornos no estructurados.

1.5. Objetivos

Los objetivos de este trabajo de investigación se describen a continuación.

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar y evaluar el desempeño de un prototipo virtual de robot móvil con un sistema de locomoción híbrida, capaz de adaptarse a entornos no estructurados tanto en tierra como en el aire, con el fin de mejorar su movilidad en aplicaciones de búsqueda y rescate urbano. Validar su desempeño funcional en entornos de simulación para determinar la viabilidad de su construcción o establecer propuestas de mejora.

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir los tipos de entorno en los que operará el robot, así como sus principales características, que permitan seleccionar los mecanismos de locomoción adecuados.

- Seleccionar la combinación adecuada de mecanismos de locomoción mediante un análisis comparativo basado en la revisión de la literatura.

- Diseñar y ensamblar el prototipo conceptual en el software de dibujo asistido por computador SolidWorks.
- Exportar el modelo al software de análisis y simulación de sistemas multicuerpos ADAMS/View para validar el funcionamiento entre los elementos del sistema de locomoción híbrido.
- Determinar los parámetros dimensionales, tipos de actuadores, sensores, y propiedades estructurales.
- Simular el comportamiento del robot en entornos no estructurados para analizar su desempeño funcional.
- Evaluar y determinar su viabilidad para construcción o establecer ajustes necesarios para futuras versiones.

1.6. Limitantes

Las limitantes en el desarrollo del presente trabajo de investigación son:

- La duración del trabajo de investigación limita el tiempo disponible para el desarrollo, análisis y validación de las distintas configuraciones de locomoción, especialmente considerando los ciclos iterativos de rediseño propios del desarrollo de un producto.
- Las capacidades y restricciones de los entornos de simulación empleados pueden afectar la precisión con la que se realizan las interacciones entre el robot y su entorno de operación.

1.7. Delimitantes

Las delimitantes elegidas en el desarrollo del presente trabajo son:

- Los entornos de operación considerados son únicamente en tierra y en aire.
- No se abordan sistemas de locomoción bioinspirados.
- El desarrollo del robot se enfocará en el aspecto de movilidad para aplicaciones inmediatas de búsqueda y rescate urbano.
- La validación se realizará únicamente mediante simulaciones correspondientes a un prototipo virtual, es decir, no se contemplan pruebas físicas o el uso de hardware real.
- Las validaciones se enfocarán principalmente en la viabilidad de operación mecánica, interacción con su entorno y construcción del prototipo.

1.8. Metodología de desarrollo

Para el desarrollo del presente proyecto se propone la siguiente metodología basada en la Ingeniería Concurrente [26, 27, 29–31]:

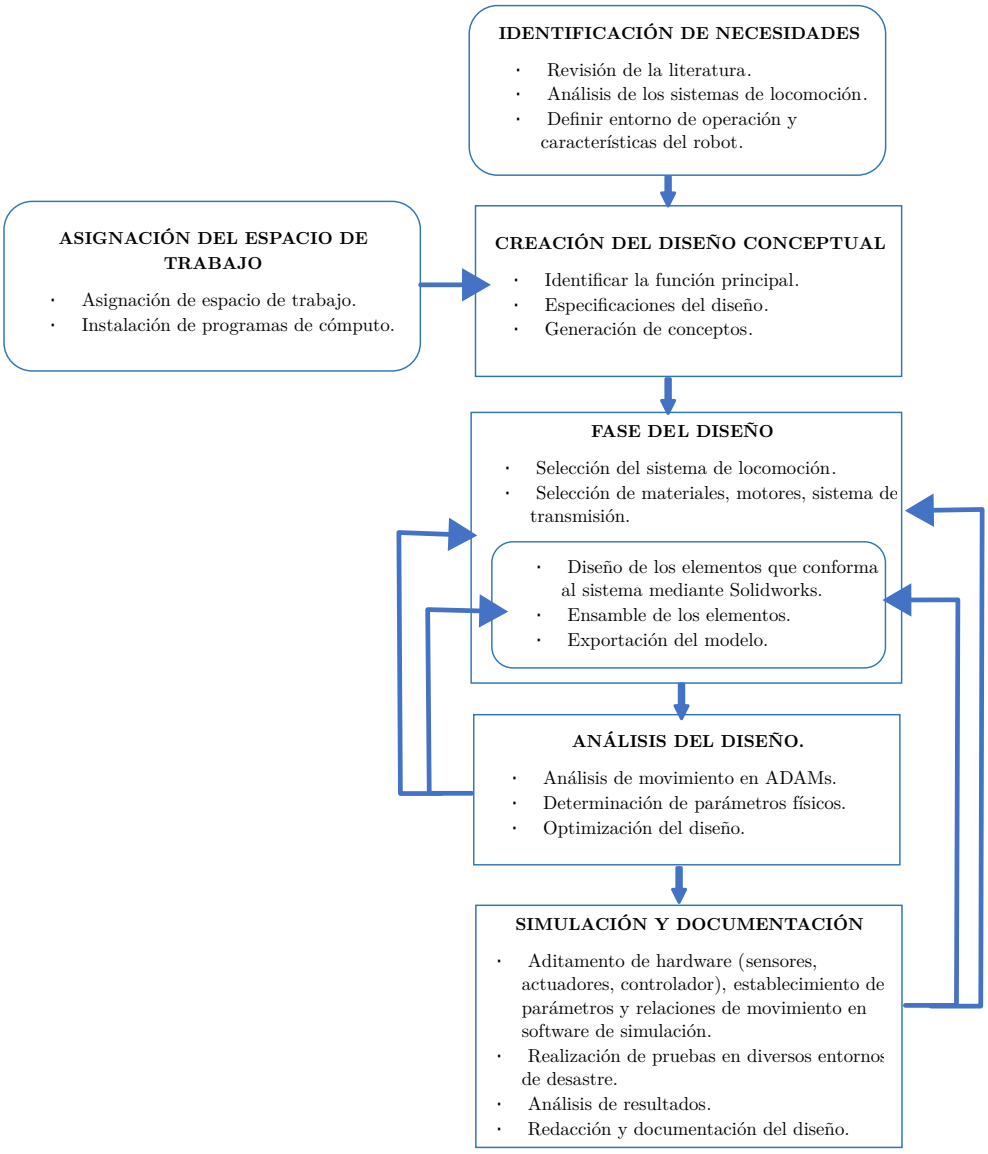


Figura 1.7: Metodología a emplear durante el desarrollo del trabajo de investigación.

1.9. Estructura de la tesis

El presente trabajo se encuentra estructurado en siete capítulos. En el Capítulo 1 se presenta la introducción al tema, incluyendo los antecedentes, la problemática a resolver, la justificación del estudio, así como los objetivos generales y específicos. El Capítulo 2 describe los principales sistemas de locomoción en robots móviles, haciendo énfasis en soluciones multimodales aplicadas a entornos terrestres y aéreos, así como las propuestas de guías normativas y no estandarizadas para la evaluación de movilidad. El Capítulo 3 expone la metodología de diseño empleada y las herramientas computacionales utilizadas para el desarrollo del prototipo virtual. En el Capítulo 4 se detalla el diseño conceptual y a nivel de detalle de los componentes del robot propuesto, incluyendo las sucesivas iteraciones del sistema mecánico, selección de los sistemas electrónico y de control, así como la integración de los distintos modos de locomoción. El Capítulo 5 aborda el modelado matemático del prototipo, desglosando las configuraciones terrestre, aérea y cuadrúpeda, con sus respectivas formulaciones de cinemática directa e inversa. El Capítulo 6 presenta los resultados obtenidos mediante análisis de esfuerzos, simulaciones de movimiento y validación de las formulaciones cinemáticas mediante los softwares de SolidWorks y Adams View, las cuales permitieron evaluar el cumplimiento de los requisitos de diseño. Finalmente, en el Capítulo 7 se exponen las conclusiones por etapas de desarrollo así como las conclusiones generales del trabajo y se indican líneas de investigación futura.

Capítulo 2

Robots móviles

A diferencia de los robots manipuladores industriales, los cuales por lo regular operan dentro de un espacio de trabajo definido y estacionario, los robots móviles tienen la capacidad de operar en algunos de los siguientes entornos [32, 33]: interiores, exteriores, estructurados, no estructurados, terrestres, aéreos o acuáticos. Estos entornos y sus características clasificadas en la Figura 2.1 condicionan la movilidad y el sistema de locomoción empleado durante el diseño de robots móviles, por lo cual, un sistema de locomoción que le permita al robot adaptar su movilidad en diversos entornos complejos, se convierte en una gran característica del robot para su uso en diversas aplicaciones, por ejemplo, en la industria de servicio, militar, manufacturera, limpieza, entretenimiento y exploración; en especial, realizando tareas las cuales presenten un riesgo para la vida de seres humanos, como lo son, las tareas de búsqueda y rescate urbano.

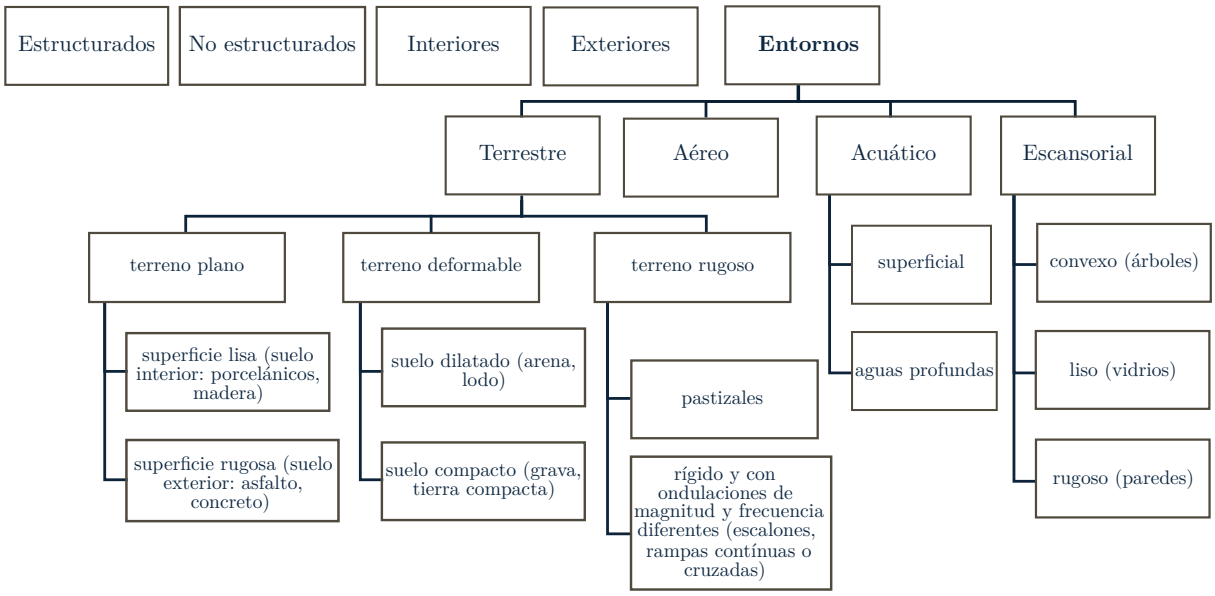


Figura 2.1: Clasificación de los entornos de operación para robots móviles.



a) b) c)

Figura 2.2: Robots móviles con diversos sistemas de locomoción: a) ruedas, b) orugas, c) extremidades.

2.1. Sistemas de locomoción

2.1.1. Locomoción terrestre

Los principales sistemas de locomoción en robots móviles terrestres UGV son 3: ruedas, orugas y extremidades, como se muestran en la Figura 2.2.

2.1.1.1. Robots móviles con ruedas

Los robots móviles con ruedas (WMR, Wheeled Mobile Robots, por sus siglás en inglés) presentan un mejor desempeño en cuanto a consumo energético y velocidad, así como su fácil diseño mecánico y de control, estos robots presentan un equilibrio estable siempre y cuando su diseño garantice un mínimo de tres ruedas en contacto permanente con el terreno y que su centro de masa se encuentre contenido dentro del triángulo formado por estos puntos de contacto, en caso de emplear más de tres ruedas, la naturaleza hiperestática de la geometría requiere de un sistema de suspensión que asegure el contacto contínuo entre todas las ruedas y un terreno con ligeras irregularidades. Es posible emplear únicamente dos ruedas en modo diferencial, aunque se requiere de un equilibrio diñamico en caso de que el centro de gravedad del robot se encuentre por arriba del eje de las ruedas.

En la Figura 2.3 se muestran los 4 tipos básicos de ruedas [34–36]. El primer tipo de rueda (estándar), se caracteriza por tener un solo grado de libertad en caso de que su orientación permanezca fija con respecto al chasis del sistema robótico, girando solamente alrededor del eje de la rueda, en el caso de que su orientación sea variable, se añade un grado de libertad cuyo eje de rotación pasa a través del punto de contacto entre la rueda y el terreno. En el segundo caso, la rueda de castor presenta dos grados de libertad, el giro alrededor del eje de la rueda y un giro de orientación cuyo eje se localiza descentrado con respecto al punto de contacto entre la rueda y el terreno. El tercer caso, se conoce como una rueda omnidireccional al ser capaz de desplazarse en cualquier dirección, esta cuenta con dos grados de libertad, el giro alrededor del eje de la rueda actuada, y el originado en el punto de contacto entre el suelo y los rodillos pasivos colocados en la periferia de la rueda, los cuales típicamente suelen estar orientados a 90° (Omni-wheel) o 45° (Mecanum), permitiendo así un desplazamiento con baja fricción en diversas trayectorias. Por último, la bola o esfera es una variante de rueda omnidireccional,

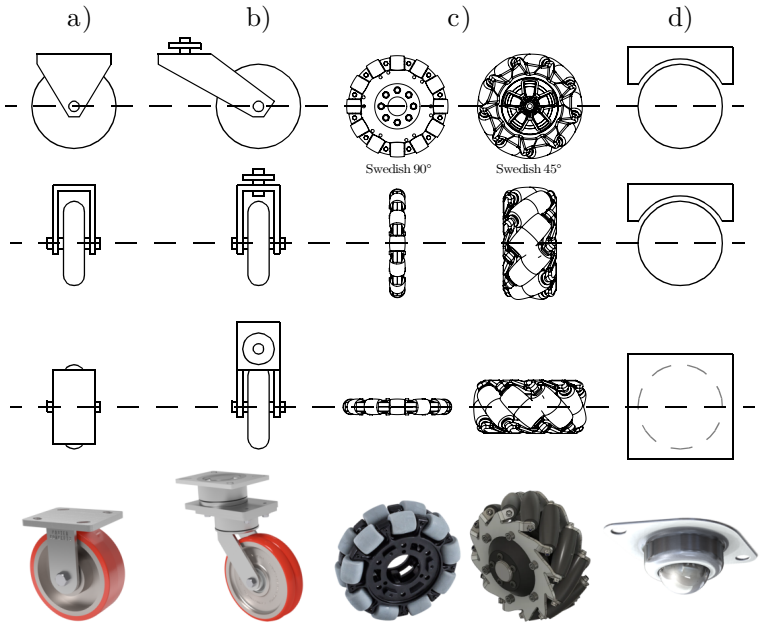
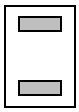
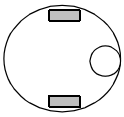
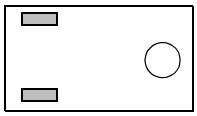
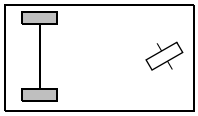
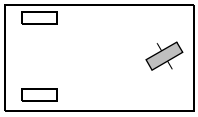
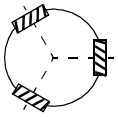
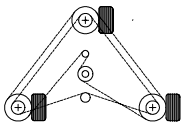


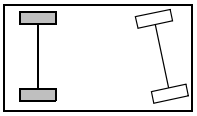
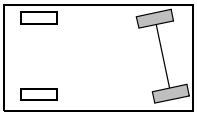
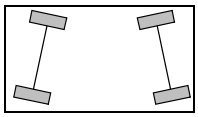
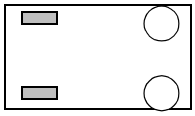
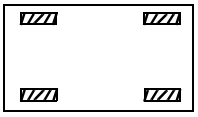
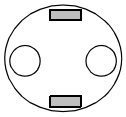
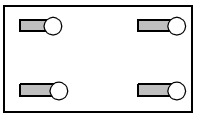
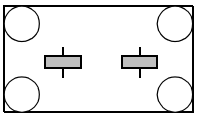
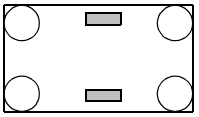
Figura 2.3: Cuatro tipo de ruedas básicas [35]; (a) rueda estándar; (b) rueda de castor; (c) rueda sueca; (d) rueda esférica.

en este caso, puede no presentar el uso de algún actuador para su movimiento, por lo que se le denomina rueda libre o loca, o implementar un mecanismo de actuación indirecta a través de diversos rodillos o ruedas actuadas, de manera que se produzca un movimiento análogo al mecanismo de un mouse de computadora [37].

En la Figura 2.4 se muestran algunas descripciones de las configuraciones basadas en el número, arreglo y tipos de ruedas implementadas. Estas configuraciones muestran que las ruedas independientemente de su localización en el chasis del robot, pueden ser fijas, orientables, no actuadas o actuadas, por lo cual, constituyen a su vez en los sistemas de tracción y dirección del robot, clasificándose dentro de uno de los siguientes tres casos: 1) tracción y dirección en ejes independientes, 2) tracción y dirección en un mismo eje, y 3) tracción y dirección sobre todos los ejes. Además de que estas configuraciones influyen en la estabilidad, maniobrabilidad y controlabilidad del robot, imponen restricciones holonómicas y no holonómicas, es decir, aquellas donde los grados de libertad están desacoplados y acoplados, respectivamente; otra manera de abordar este concepto es que un robot holonómico puede moverse de manera instantánea en cualquier dirección sin tener que modificar la orientación de su chasis previamente, mientras que un robot no holonómico requiere reposicionarse antes de moverse hacia su siguiente objetivo, además de que no todas las trayectorias son posibles. La Figura 2.5 muestra algunos ejemplos de las configuraciones más implementadas.

El inconveniente principal de estos robots es que presentan dificultades cuando operan en terrenos muy irregulares, es decir, con obstáculos, escalones, superficies discontinuas, entre otras [38, 39].

#de ruedas	Arreglo	Descripción
2		Una rueda delantera orientable, una rueda trasera de tracción.
		Tracción diferencial en dos ruedas con el centro de masa (COM) por debajo del eje.
3		Tracción diferencial en dos ruedas centradas con un tercer punto de contacto.
		Dos ruedas actuadas de manera independiente en la parte trasera/delantera, 1 rueda omnidireccional no motorizada en la parte delantera/trasera.
		Dos ruedas de tracción conectadas (diferencial) en la parte trasera, 1 rueda libre orientable en la parte delantera.
		Dos ruedas libres en la parte trasera, 1 rueda de tracción orientable en la parte delantera.
		Tres ruedas suecas o esféricas motorizadas dispuestas en un triángulo; Es posible el movimiento omnidireccional.
		Tres ruedas motorizadas y orientables de manera sincróna; La orientación no es controlable.

#de ruedas	Arreglo	Descripción
4		Dos ruedas traseras motorizadas, 2 ruedas delanteras orientables; la dirección tiene que ser diferente para las 2 ruedas para evitar deslizamientos/derrapes.
		Dos ruedas delanteras motorizadas orientables, 2 ruedas traseras libres; La dirección tiene que ser diferente para las 2 ruedas para evitar deslizamientos/derrapes.
		Cuatro ruedas orientables y motorizadas.
		Dos ruedas de tracción (diferencial) en la parte trasera/delantera, 2 ruedas omnidireccionales en la parte delantera/trasera.
		Cuatro ruedas omnidireccionales.
		Tracción diferencial en dos ruedas con dos puntos de contacto adicionales.
		Cuatro ruedas motorizadas y orientables tipo castor.
6		Dos ruedas motorizadas y orientables alineadas en el centro, 1 rueda omnidireccional en cada esquina.
		Dos ruedas de tracción (diferencial) en el centro, 1 rueda omnidireccional en cada esquina.

Iconos para cada tipo de rueda son los siguientes:

 rueda estándar no motorizada;

 rueda estándar motorizada;

 rueda de castor motorizada y orientable;

 rueda estándar orientable;

 ruedas conectadas;

 rueda sueca motorizada (rueda Stanford);

 rueda omnidireccional no motorizada (esférica, giratoria, sueca);

Figura 2.4: Configuraciones de ruedas con base en el número, tipo y arreglo de ruedas [35].

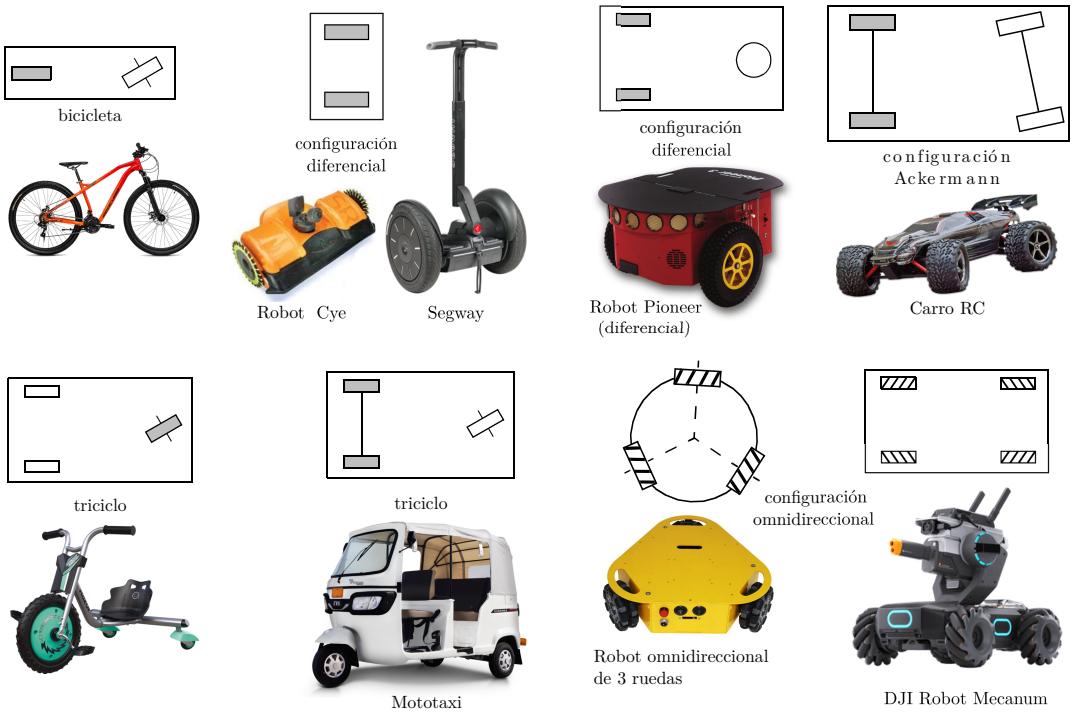


Figura 2.5: Ejemplos de configuraciones de ruedas.

2.1.1.2. Robots móviles con orugas

Para abordar los inconvenientes de los robots con ruedas en terrenos blandos y con irregularidades considerables, los robots con orugas (TMR, Tracked Mobile Robots, por sus siglas en inglés) han sido los más adecuados al poseer una superficie de contacto mayor con el terreno, manteniendo una estructura mecánica y de control simple a diferencia de los robots con extremidades (piernas), ya que cualquier cambio de dirección requiere de la actuación relativa entre las orugas. Sin embargo, a diferencia de los robots con ruedas, la velocidad es limitada y el consumo energético es mayor debido a pérdidas por fricción.

En [40] se ha realizado una extensa revisión y clasificación de este tipo de sistemas, entre los cuales se incluyen algunas estructuras híbridas (extremidades, ruedas, extremidades-ruedas) que permiten ampliar su operación en tareas de búsqueda y rescate. La clasificación estructural se realiza en torno a tres aspectos independientes:

- **Arquitectura del cuerpo**:
  - Cuerpo no articulado (TGMRs-NA, *Tracked Ground Mobile Robot-Non Articulated Body*, por sus siglas en inglés): son los más comunes y presentan una estructura rígida con dos orugas para dirección diferencial.
  - Cuerpo articulado (TGMRs-A, *Tracked Ground Mobile Robot-Articulated Body*, por sus siglas en inglés): dependiendo de las articulaciones en su cuerpo se dividen en:
    - Articulaciones completamente pasivas (TGMRs-A-P).

  - Articulaciones activas/pasivas (TGMRs-A-AP).
  - Articulaciones completamente activas (TGMRs-A-A).

- **Perfil de la oruga**:
  - Perfil constante (TGMRs-CP): mantienen una forma fija, optimizando tracción y estabilidad.
  - Perfil deformable pasivamente (TGMRs-PDP): se ajustan al terreno mediante mecanismos de suspensión.
  - Perfil deformable activamente (TGMRs-ADP): modifican su forma mediante actuadores para mejorar la movilidad en obstáculos.
- **Tipo de oruga**:
  - Orugas continuas (TGMRs-CT): fabricadas como una sola entidad en material de caucho o materiales compuestos, ofrecen alta resistencia y tracción.
  - Orugas modulares (TGMRs-MT): compuestas por segmentos individuales conectados, permiten mayor eficiencia energética.
  - Orugas omnidireccionales (TGMRs-OT): incorporan mecanismos que facilitan el movimiento lateral, mejorando su maniobrabilidad.

En la Figura 2.6 se muestran algunos robots con locomoción mediante orugas basados en esta clasificación.

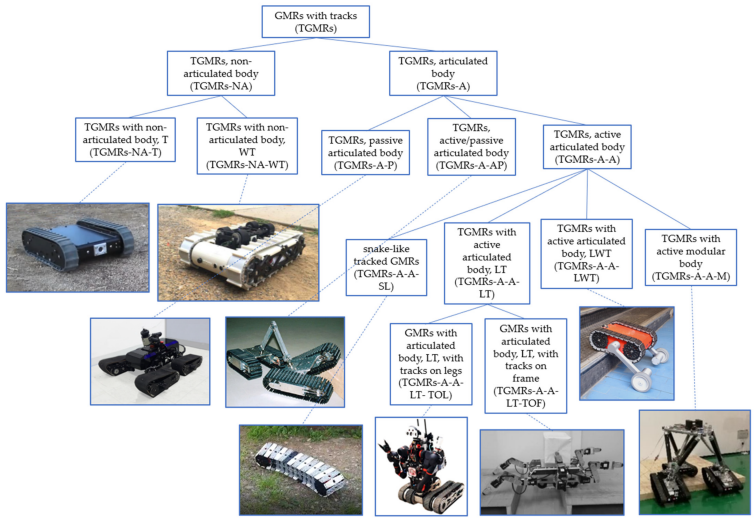
2.1.1.3. Robots móviles con extremidades

Las extremidades o piernas constituyen un sistema de locomoción inspirado principalmente en la biomecánica de animales, tales como aves o el ser humano en el desarrollo de robots bípedos; mamíferos o reptiles en los robots cuadrúpedos; y artrópodos en robots hexápodos o con más de seis extremidades. Incluso se han desarrollado robots con una sola extremidad, denominados saltadores. En la Figura 2.7 se muestran algunos de estos tipos de locomoción.

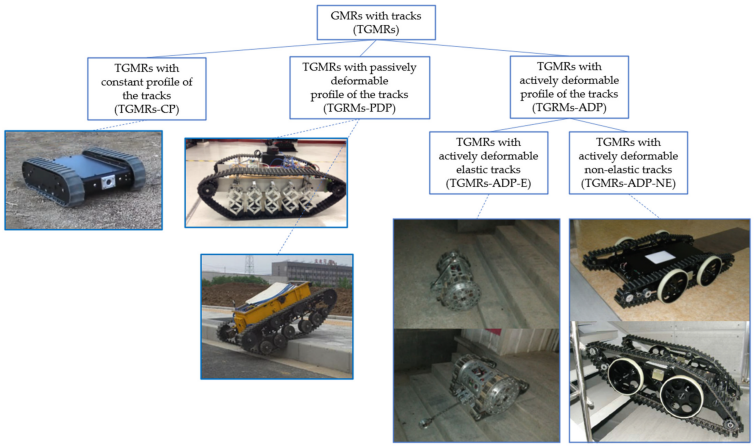
Este tipo de locomoción ofrece una alta movilidad y adaptabilidad tanto en entornos estructurados como no estructurados. Su capacidad de desacoplar la trayectoria del cuerpo del robot respecto a las trayectorias de sus extremidades, permite mantener su postura corporal mientras modifica la extensión de sus extremidades. Esto le permite ajustar su centro de gravedad, evitar su volcadura y adaptarse a las irregularidades del terreno. Además, pueden modificar la rigidez de sus extremidades y amortiguar los impactos, actuando como una suspensión activa, siempre y cuando dispongan de una percepción adecuada de su entorno [41–43].

A diferencia de los robots con ruedas u orugas, las extremidades generan un contacto puntual con el suelo durante su desplazamiento, causando menos daño en la superficie. Sin embargo, entre sus inconvenientes se encuentran una alta complejidad mecánica y de control, movimientos lentos y un elevado consumo energético.

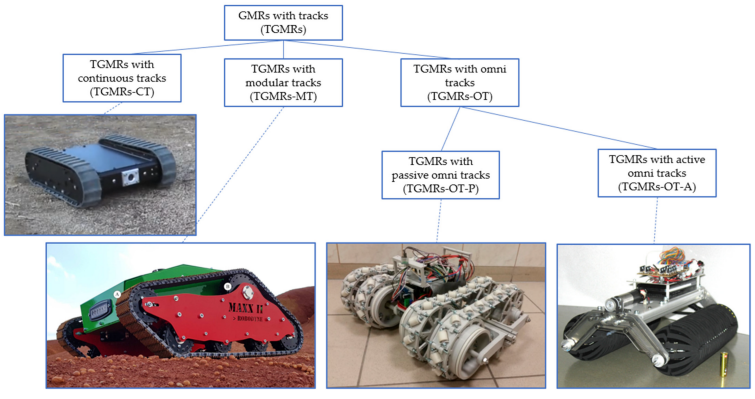
Conforme se incrementa el número de extremidades, también lo hace la complejidad para sincronizar su marcha, mantener el equilibrio y el alto consumo energético que esto implica.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.6: Ejemplos de clasificaciones de robots con orugas [40]. (a) Respecto a la arquitectura del cuerpo; (b) Respecto al perfil de la oruga; (c) Respecto al tipo de oruga.



(a) (b) (c) (d)

Figura 2.7: Ejemplos de robots con locomoción con extremidades. (a) robot de una sola pierna o saltador; (b) robot bípedo; (c) robot cuadrúpedo; (d) robot hexápodo.

Aunque los robots con seis o más piernas ofrecen una mejor estabilidad estática debido a su amplio polígono de soporte y son capaces de operar inclusive si fallan algunas de sus extremidades, los robots cuadrúpedos representan un equilibrio entre la complejidad mecánica, estabilidad, capacidad de carga, consumo energético y esfuerzo de control requerido [41,44–46].

En el desarrollo de robots cuadrúpedos intervienen diversos factores en la clasificación de su estructura [42,45–47]:

- **Estructura corporal del torso**: rígido, articulado, con resorte o de material flexible.
- **Estructura mecánica de las extremidades**: mecanismos de línea recta o prismáticos, articulados o de tipo pantógrafo (paralelos).
- **Tipo de actuadores**: hidráulicos, neumáticos o eléctricos.

No obstante, la estabilidad, movilidad, flexibilidad y singularidad de los cuadrúpedos quedan determinadas por su estructura topológica, es decir, la disposición y configuración de sus articulaciones en la extremidad. En primer lugar se tiene la forma estructural de sus articulaciones:

- **Articulaciones de rodilla**: se caracterizan por disponer su eje de articulación perpendicular al plano sagital, permiten un movimiento de cabeceo y desplazamientos longitudinales, similar a las rodillas humanas.
- **Articulaciones de codo**: se caracterizan por que su eje de articulación es paralelo al plano sagital, permiten movimientos de balanceo y desplazamientos laterales.

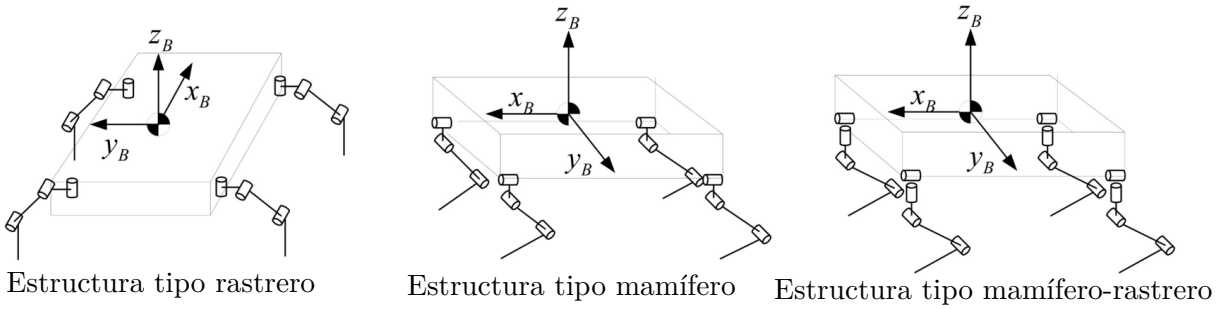


Figura 2.8: Estructuras topológicas para cuadrúpedos [45].

La combinación de estas articulaciones da lugar a tres estructuras topológicas en las extremidades: tipo artrópodo, reptil o mamífero. Las primeras dos presentan una postura rastrera, lo que mejora su estabilidad estática al permitirles bajar su centro de gravedad y presentar un amplio polígono de soporte. Estas extremidades disponen de su primer segmento en posición horizontal, extendiéndose hacia el exterior y un segundo segmento vertical, lo cual reduce la posibilidad de interferencia entre sus extremidades y maximiza su espacio de trabajo, como se muestra en la Figura 2.8. No obstante, realizan principalmente marchas estáticas, por lo cual, sus movimientos son lentos. Asimismo, requieren pares de torsión elevados para mantener su equilibrio corporal y presentan un alto consumo energético en su patrón de marcha.

En contraste, las estructuras tipo mamífero presentan una velocidad de marcha más rápida, mayor capacidad de carga, un par de torsión más bajo y un recorrido de pierna menor. Esto al disponer sus segmentos de extremidad de manera vertical desde la articulación de la cadera, lo que facilita el desplazamiento entre espacios estrechos. Su principal desventaja radica en la necesidad de un control dinámico para garantizar su estabilidad.

Las extremidades de la estructura tipo mamífero suelen disponerse mediante una simetría bilateral respecto al torso, permitiendo diversas configuraciones clasificadas como se muestra en la Figura 2.9. Si bien estas configuraciones no afectan el movimiento de las extremidades, si influyen en la interacción del robot con su entorno [45, 46]:

- **Postura 1 - Rodilla frontal y codo posterior**: Esta disposición totalmente simétrica es adecuada para un entorno exterior, ya que la posición frontal de la rodilla o la posición posterior del codo durante un movimiento hacia adelante o atrás, respectivamente, permiten al robot escalar obstáculos verticales sin interferencias significativas.

- **Postura 2 - Codo frontal y rodilla posterior**: Se trata de una disposición simétrica opuesta a la postura 1. Su estructura compacta permite, entre otras ventajas, la colocación eficiente de sensores en sus pies para la detección de obstáculos durante su movimiento.

- **Postura 3 - Codo completo**: En terrenos con pendientes pronunciadas o en presencia de escaleras, la postura con rodillas frontales (como en la postura 1) puede reducir el espacio libre bajo el abdomen, afectando su estabilidad en el movimiento. La postura

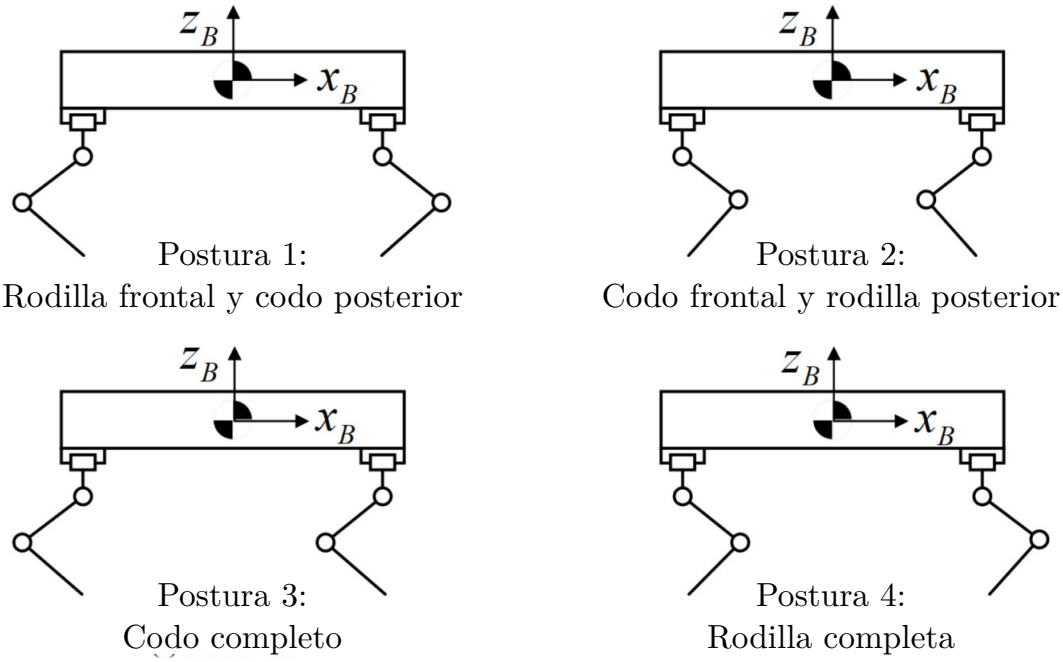


Figura 2.9: Configuración de las articulaciones de las extremidades [45].

3, con articulaciones de codo orientadas hacia atrás, soluciona este problema y se recomienda principalmente para ambientes interiores o urbanos con obstáculos verticales bajos o escaleras continuas.

- **Postura 4 - rodilla completa**: Esta disposición simétrica a la postura 3 es raramente implementada en la práctica.

Finalmente, en [44] se presenta una revisión acerca de la evolución en el diseño estructural de robots cuadrúpedos, analizando los tipos de marcha, actuación y aspectos de rendimiento. En [45] se revisa el desarrollo de robots cuadrúpedos centrándose en la configuración de articulaciones, control dinámico de la locomoción y enfoques de manipulación móvil.

2.1.1.4. Robots móviles con locomoción híbrida

Los robots móviles terrestres reconfigurables con ruedas [8, 9], como se muestra en la Figura 2.10, así como aquellos reconfigurables con orugas [10, 12–14], como se muestra en la Figura 2.11, han sido diseñados para operar en entornos irregulares y con presencia de pequeños obstáculos. No obstante, en los últimos años se ha incrementado el interés por integrar dos o más sistemas de locomoción, con el objetivo de brindar una mayor adaptabilidad y maniobrabilidad del robot en entornos irregulares y no estructurados.

Estos sistemas, conocidos como locomoción híbrida, pueden clasificarse a partir de la combinación de los tres modos de locomoción previamente mencionados (ruedas, orugas y extremidades). Como se muestra en la Figura 2.12, esta clasificación da lugar a cuatro categorías de locomoción terrestre:

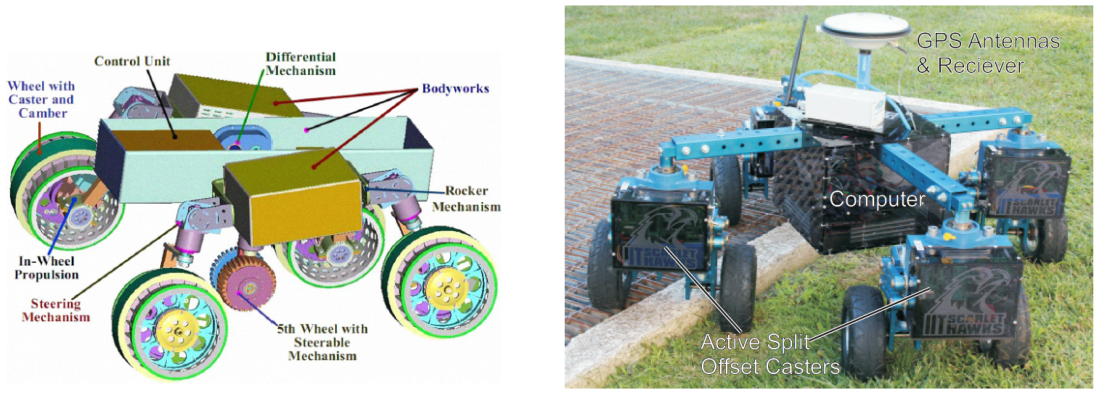


Figura 2.10: Ejemplos de robots con ruedas reconfigurables.

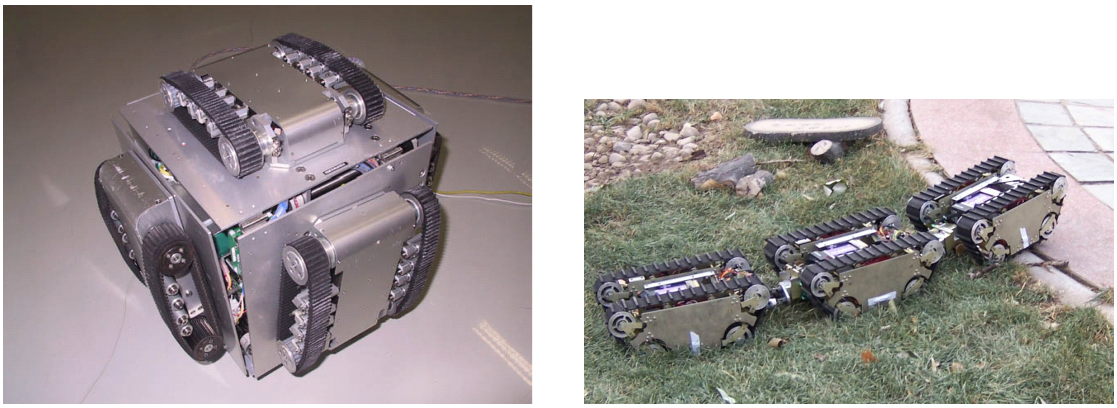


Figura 2.11: Ejemplos de robots reconfigurables con orugas.

- **Legs-Wheels (L-W)**: combinación de extremidades con ruedas [15, 16].
- **Legs-Tracks (L-T)**: combinación de extremidades con orugas.
- **Wheels-Tracks (W-T)**: combinación de ruedas con orugas [17–20].
- **Legs-Wheels-Tracks (L-W-T)**: combinación de extremidades con ruedas y orugas [21, 48].

Es importante señalar que esta clasificación no distingue jerárquicamente cuál es el sistema de locomoción principal. Es decir, es indistinto L-W o W-L. Algunos robots representativos con estos sistemas de locomoción se muestran en la Figura 2.13.

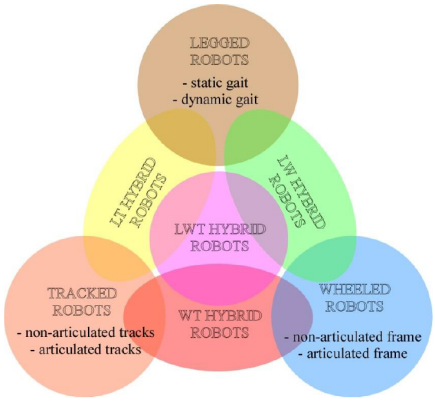
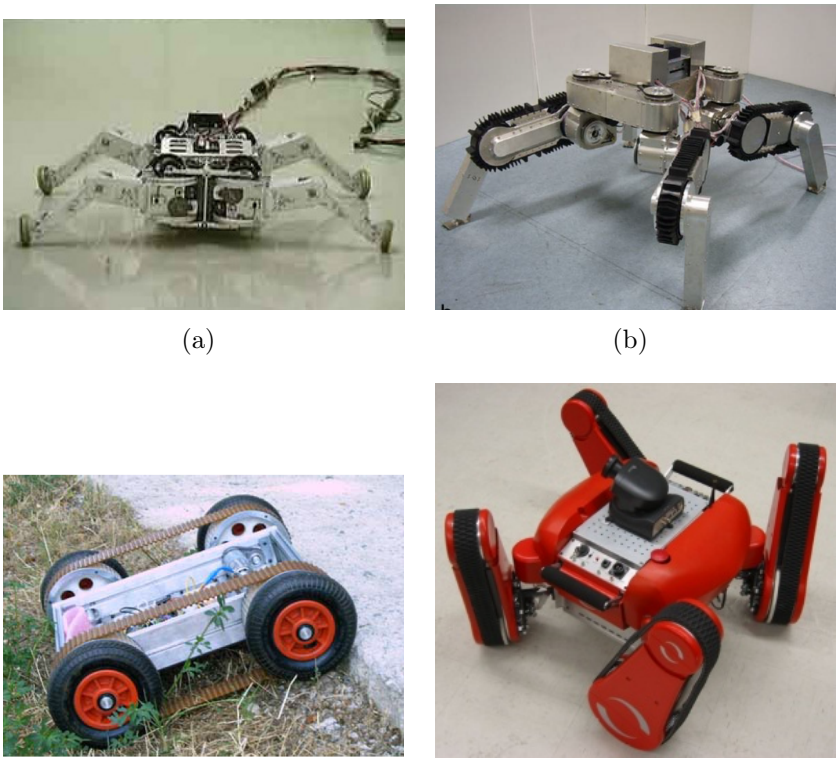


Figura 2.12: Categorías de los sistemas de locomoción para robots terrestres.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 2.13: Ejemplos de robots con sistema de locomoción híbrido. (a) locomoción híbrida Extremidades con Ruedas (L-W); (b) locomoción híbrida Extremidades con Orugas (L-T); (c) locomoción híbrida Ruedas con Orugas (W-T); (d) locomoción híbrida Extremidades con Ruedas y Orugas (L-W-T) [21, 48].

2.1.2. Locomoción aérea

La aplicación de los robots aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*, por sus siglas en inglés) o sistemas aéreos no tripulados (UAS, *Unmanned Aerial Systems*, por sus siglas en inglés) se ha dado en diversos contextos, tanto militares, civiles, investigación, entretenimiento, monitoreo de incendios, aplicaciones de cultivo, y operaciones de búsqueda y rescate entre otras. Si bien estos sistemas pueden clasificarse en torno al sistema de propulsión empleado (propulsión, combustión interna, cohete, y eléctrica), aplicaciones, tipo de sistemas de control, autonomía, alturas de vuelo, tamaño y peso, etc. [49], la clasificación que permite tener un conocimiento más acorde a su modo de locomoción es basada en su arquitectura, como se indica a continuación [50, 51]:

- **Ala fija**: presentan alas fijas similares a las de un avión, por lo cual, requieren de la necesidad de un flujo de aire constante a través de sus alas para proporcionar una adecuada fuerza de sustentación, así como una distancia considerable para realizar su despegue/aterrizaje. Sin embargo, son muy eficientes energéticamente durante el planeado y viaje en largas distancias.
- **Ala rotativa (hélices)**: emplean el giro de una o múltiples hélices para lograr operaciones como despegue/aterrizaje y control de vuelo. Según el número de rotores-hélices, estos se pueden clasificar como:
  - Un solo rotor o helicóptero: el despegue y aterrizaje vertical lo realiza mediante un rotor principal con el cual también controla su orientación, mientras que en el caso del helicóptero emplea un rotor auxiliar para controlar la dirección. Entre sus ventajas destaca su maniobrabilidad y navegación a baja altura, sin embargo, uno de sus inconvenientes es que navegan a bajas velocidades y presentan mecanismos complejos.
  - Multirotor (multicóptero): estos vehículos contienen más de dos rotores, y aseguran un despegue/aterrizaje vertical, así como una gran maniobrabilidad en espacios confinados, esto debido a que el control de su movimiento lo realiza conforme a un desequilibrio en las velocidades de sus rotores, mientras que su debilidad es la duración del tiempo de vuelo debido a la alimentación de los diversos rotores. Con base en el número de rotores, estos se denominan bicóptero (dos rotores) aunque también existe una modalidad de helicóptero con dos rotores tandem, tricóptero (tres rotores), cuadricóptero (cuatro rotores), hexacóptero (seis rotores), octocóptero (ocho rotores). En cuanto a la distribución de los rotores-hélices, esta puede darse de manera individual en un brazo o de manera doble (coaxial). Esta última distribución permite reducir el tamaño de la estructura y en los últimos años se han desarrollado motores coaxiales tal que solamente se requiera un rotor por ambas hélices permitiendo aumentar la relación tamaño/capacidad de carga.
- **Híbrida**: estos vehículos pueden adoptar la versatilidad del despegue vertical de los multirotores, al mismo tiempo que emplean la eficiencia en vuelos largos de los vehículos de ala fija, entre los más conocidos se tiene el giroplano y el convertiplano o helicóptero con rotores basculantes.

- **Dirigibles, globos y aerostatos**: este tipo de vehículos son plataformas sostenidas por grandes cavidades llenas de gas menos denso que el aire, como el helio. Su principal ventaja es el bajo consumo de energía y la baja perturbación del ruido.
- **Alas batientes o tipo aves**: son plataformas inspiradas en la dinámica del movimiento biológico de la naturaleza, como aves e insectos, los cuales mueven activamente sus alas para producir sustentación y empuje. Sin embargo, su mecánica y control es compleja.

En la Figura 2.14 se muestran algunos ejemplos de estos vehículos aéreos no tripulados.

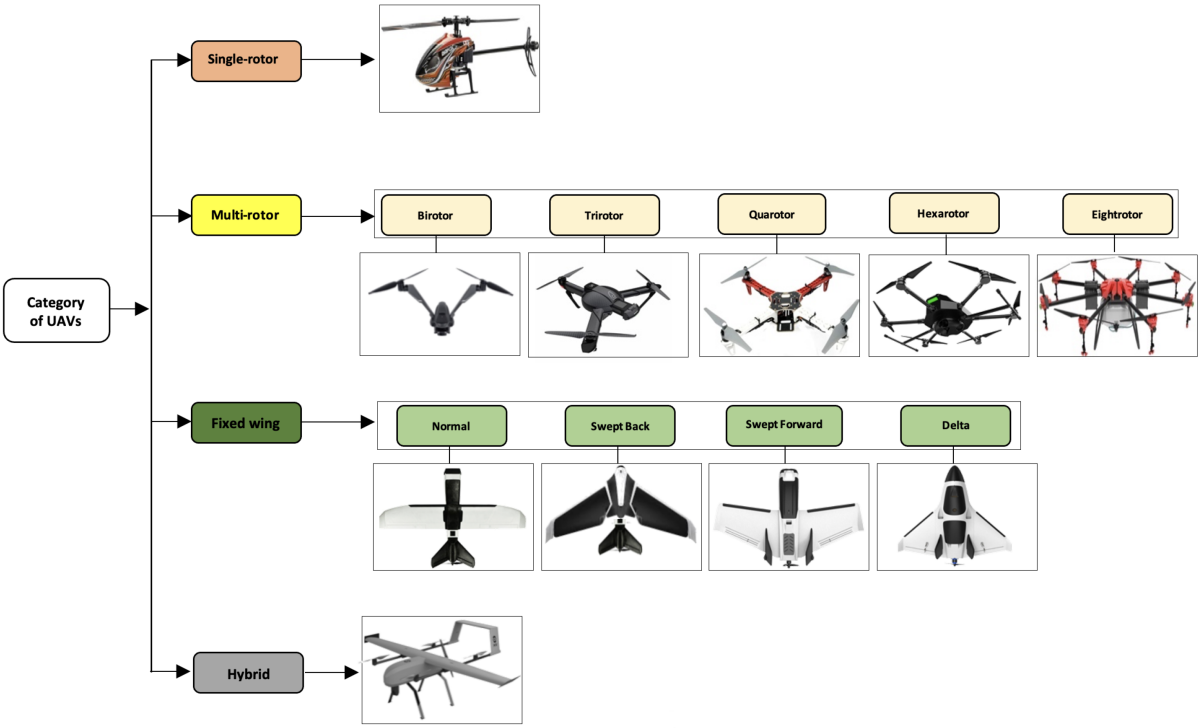


Figura 2.14: Clasificación de los vehículos aéreos no tripulados [51].

En [52] se analizan distintas arquitecturas de vehículos aéreos, incluyendo ala fija, helicópteros con rotor de cola, rotor coaxial tipo helicóptero, multirotores (cuadricópteros), dirigibles o globos, y sistemas inspirados en aves. A partir de estudios empíricos, el análisis cuantitativo destaca al sistema multirotor (cuadricóptero) como la opción más eficiente, esto debido a sus características de simpleza mecánica, fácil modelado matemático, buena maniobrabilidad y controlabilidad, alta relación de carga de trabajo y capacidad de despegue vertical. Sin embargo, el desarrollo y aplicación de estos vehículos ha impulsado la aparición de Nuevos Tipos de Robots Aéreos (NTARs, *New Types of Aerial Robots*, por sus siglas en inglés) [53,54]. Estos nuevos robots presentan características innovadoras como la capacidad de transformación en su estructura (morfología adaptativa), permitiendo cambio en la orientación de sus rotores o el despliegue de sus brazos/alas [55], la biomimética para mejorar la eficiencia aerodinámica presente en aves, la locomoción multimodal y su adaptación entre entornos aéreos y terrestres o acuáticos, así como la manipulación aérea.

2.2. Robots multimodales

Los robots móviles con locomoción multimodal son una categoría de robots móviles que poseen al menos dos métodos de locomoción distintos, así como presentan una amplia gama de aplicaciones en dos o más entornos de operación. Estos han ganado popularidad debido a la movilidad, adaptabilidad y versatilidad que poseen. Debido a que este comportamiento multimodal se encuentra presente en diversos animales que pueden arrastrarse, correr, saltar, flotar, planear, volar, etc., se ha comenzado a estudiar y desarrollar robots biológicamente inspirados o imitadores (bioinspirados, biomimetismo) [56–58], abarcando áreas desde el diseño estructural, sistema sensorial, sistema neuronal, sistemas de control, etc. Esto en parte debido a que en su evolución, ya sea con fines de alimentación, reproducción o ponerse a salvo de sus depredadores, ha llevado a los animales a adaptarse y moverse a través de terrenos no estructurados o variados, reduciendo el costo energético en su locomoción [33]. Dada la característica de poder operar en diversos entornos a través de una sola plataforma robótica, este enfoque de locomoción apunta a ser una solución económicamente ventajosa en aquellas aplicaciones donde robots con modos de locomoción convencionales presentan limitaciones.

La clasificación de la locomoción multimodal puede agruparse principalmente en dos conceptos [59–62]:

- **Enfoque en el diseño de la estructura**: se hace un énfasis en cómo interactuan y se implementan los diversos modos/sistemas de locomoción, así como el impacto que tienen en su estructura. La Figura 2.15 muestra algunas ideas de estas estructuras, entre las cuales se pueden distinguir tres tipos de enfoques de diseño:
  - **Diseño aditivo**: el diseño principalmente consiste en añadir diversos sistemas de locomoción dentro de una sola entidad, por lo cual, la estructura (morfología) del robot permanece sin cambios cuando el robot se mueve de un entorno a otro, pudiendo emplear sistemas de actuación independientes o en conjunto para lograr el movimiento en ambos entornos. En el caso de robots que operan en entornos de aire y tierra, algunos diseños aditivos emplean combinaciones de planeo y caminata en combinación con ruedas-extremidades, o planeo y escalada, otros más hacen énfasis en el uso de piernas (extremidades) con sustentación en el aire a través de múltiples rotores-hélices, multirotores con ruedas pasivas o activas, o multirotores dentro de jaulas esféricas, cilíndricas o toroidales.
  - **Diseño adaptativo**: el diseño consiste en integrar dentro de una sola estructura diversos sistemas de locomoción, y a través de la reconfiguración de su estructura (morfología), transicionar de un modo de locomoción a otro, pudiendo compartir o no sus elementos de actuación. Así como su reconfiguración puede llevarse de manera autónoma o asistida por un operario.
  - **Diseño de múltiples vehículos**: el diseño implica el uso de múltiples vehículos que trabajan juntos para lograr funcionalidad multimodal.
- **Entorno de operación**: se hace énfasis en los diversos entornos de operación en los cuales el robot puede desplazarse. Entre los más usuales se encuentran: terrestre-acuático,

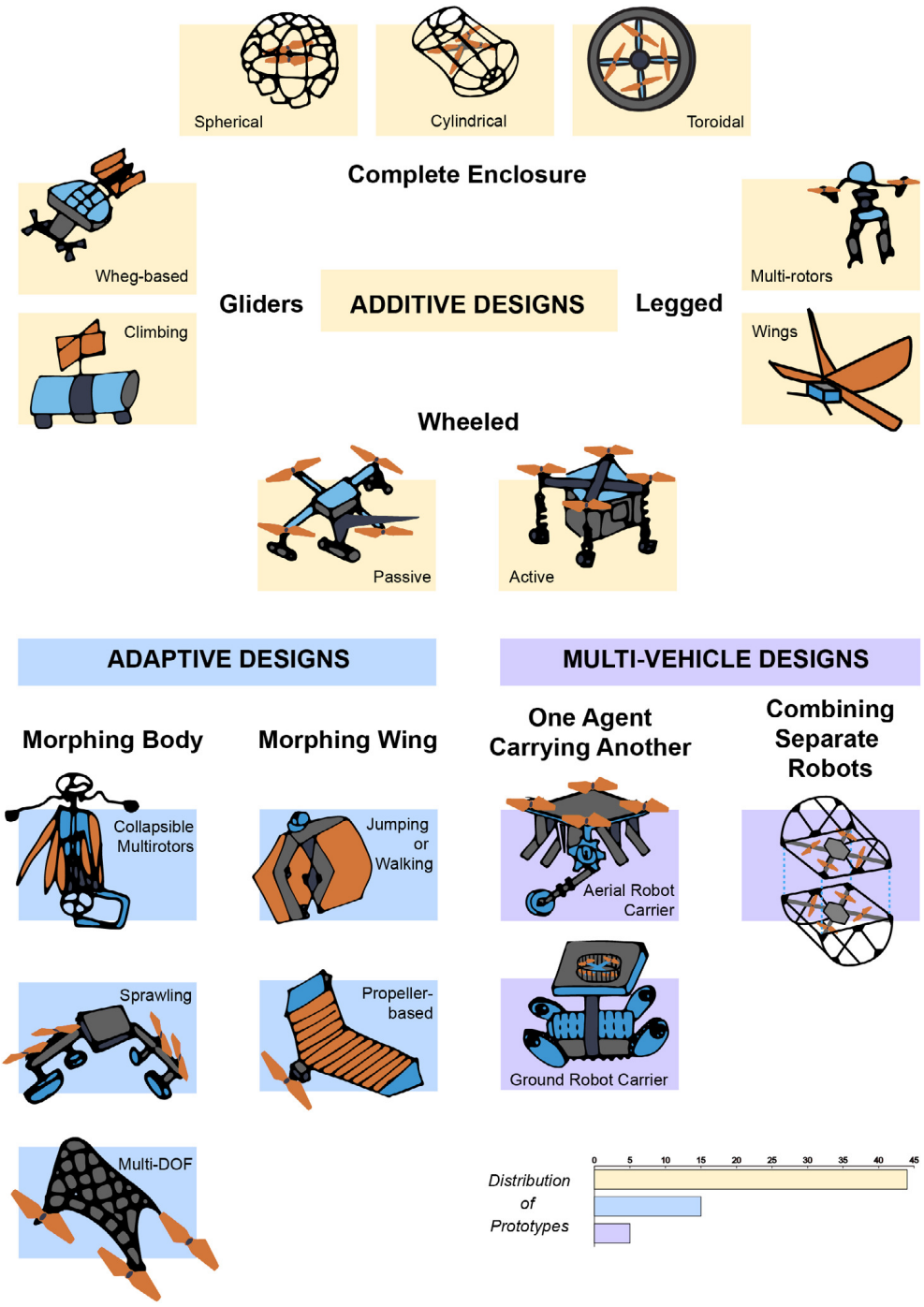


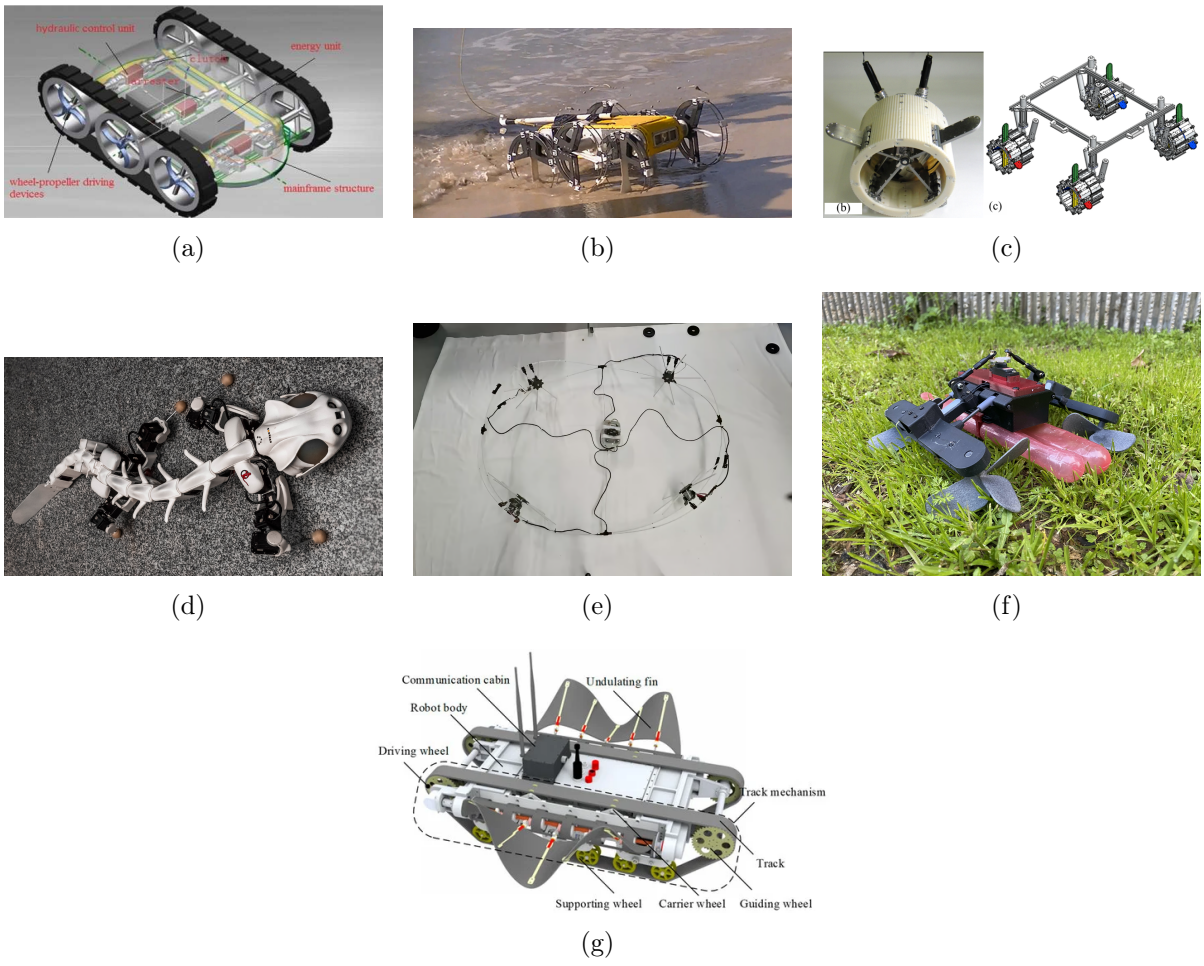
Figura 2.15: Enfoques de diseño para sistemas multimodal: diseño aditivo, adaptativo y múltiples vehículos [61].

aéreo-acuático, aéreo-terrestres, aéreo-acuático-terrestre y terrestres(con más de un modo de locomoción o híbridos).

2.2.1. Entornos terrestres-acuáticos

Se han desarrollado diversas propuestas de robots anfibios con mecanismos innovadores para desplazarse en entornos terrestres y acuáticos. Entre ellos:

- **Robot anfibio con ruedas, orugas y hélices internas** [63]: Este diseño integra ruedas con orugas y hélices desplegables dentro de las ruedas, permitiendo una transición eficiente entre tierra y agua, como se muestra en la Figura 2.16(a).
- **Ninja Legs** [64]: Utiliza seis extremidades con una estructura circular tipo jaula para proteger las aletas del exterior. Su locomoción se basa en la rotación de ruedas descentradas, facilitando el movimiento en ambos medios, dicho diseño se muestra en la Figura 2.16(b).
- **Robot con mecanismo ePaddle excéntrico** [65]: Implementa palas excéntricas, ofreciendo cinco modos de desplazamiento: ruedas, patas, ruedas-patas y palas (remos) oscilantes o rotacionales, como se muestra en la Figura 2.16(c).
- **Pleurobot** [66]: Inspirado en la salamandra *Pleurodeles Waltl*, este biorobot impreso en 3D y actuado por servomotores replica su locomoción terrestre y acuática. La Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL, *École polytechnique fédérale de Lausanne*, por sus siglas en francés) en Suiza empleó análisis de rayos X y algoritmos genéticos con el fin de optimizar la mecánica de su esqueleto, este diseño se muestra en la Figura 2.16(d).
- **GOAT (Good Over All Terrains)** [67]: Un robot bioinspirado multimodal con capacidad de alterar su morfología para mejorar la locomoción en terrenos irregulares y no estructurados. Desarrollado igualmente en la EPFL, utiliza ruedas sin rin, fibra de vidrio para reducir peso y cables accionados para ajustar su estructura simétrica. Se inspira en el comportamiento de los erizos y la rodadura de plantas a través del viento, su diseño se muestra en la Figura 2.16(e).
- **AmphiSTAR** [68]: Es un pequeño robot anfibio del tamaño de la palma de la mano, el cual cuenta con tanques de aire y hélices inferiores para flotación y movimiento en agua. En tierra, emplea un mecanismo expandible de arrastre para su desplazamiento, el diseño se muestra en la Figura 2.16(f).
- **AmphiFinbot-II** [69]: Incorpora orugas y estructuras de aleta ondulada, permitiéndole operar eficazmente en entornos terrestres y acuáticos, su diseño se muestra en la Figura 2.16(g).



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

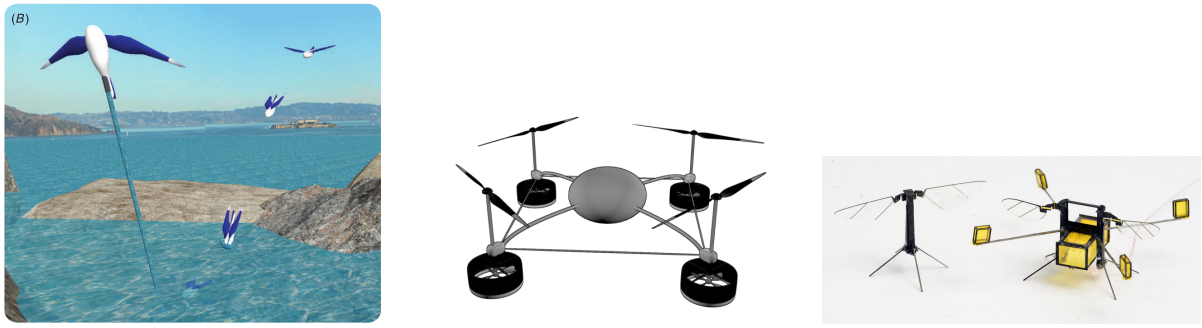
(g)

Figura 2.16: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-acuáticos. (a) robot con locomoción compuesta de ruedas-orugas y hélices [63]; (b) robot ((Ninja Legs)) con locomoción compuesta de extremidades-ruedas y aletas [64]; (c) robot con locomoción compuesta de ruedas y palas excéntricas [65]; (d) robot (Pleurobot) con locomoción compuesta de extremidades y columna vertebral [66]; (e) robot (GOAT) con locomoción compuesta de ruedas con rayos sin rin y cables tensores [67]; (f) robot (AmphiSTAR) con locomoción compuesta de apéndices de arrastre, hélices y tanques de aire [68]; (g) robot (AmphiFinbot-II) con locomoción compuesta de orugas y aletas onduladas [69].

2.2.2. Entornos acuáticos-aéreos

En cuanto a operaciones en agua y aire, se tienen los siguientes robots:

- **AquaMAV** [70]: Vehículo aéreo microacuático diseñado para volar, sumergirse, bucear y despegar mediante un sistema de propulsión a chorro de agua, lo que permite una transición eficiente entre ambos medios, como se muestra en la Figura 2.17(a).
- **HUAUV** [50]: Vehículo aéreo submarino híbrido que combina funcionalidades de un cuadricóptero con capacidades de inmersión y navegación subacuática, facilitando la



(a) (b) (c)

Figura 2.17: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos acuáticos-aéreos. (a) robot (AquaMAV) con locomoción compuesta de alas plegables y sistema de propulsión a chorro [70]; (b) robot (HUAUV) con locomoción compuesta de rotores con hélices acuáticas y aéreas [50]; (c) robot (RoboBee) con locomoción compuesta de mini alas plegables [71, 72].

exploración de entornos acuáticos con maniobrabilidad aérea, su diseño se muestra en la Figura 2.17(b).

- **RoboBee** [71, 72]: Microrobot con un peso de solo 175 mg, capaz de ejecutar múltiples modos de locomoción, incluyendo vuelo, natación, buceo y saltos en el agua, su diseño se muestra en la Figura 2.17(c).

2.2.3. Entornos terrestres-aéreos

Diversos animales, como insectos, murciélagos y aves, poseen la capacidad de desplazarse en entornos terrestres y aéreos. Inspirados en estos mecanismos naturales, se han desarrollado diversos robots que combinan distintas estrategias de locomoción. A continuación, se agrupan algunos robots conforme a los sistemas de locomoción que más destacan en su estructura más que si pertenecen a algún enfoque de diseño en su estructura.

Sistemas de locomoción que emplean alas

- **MultiMo-Bat** [73]: Robot con alas plegables que imitan el movimiento de los murciélagos. Su diseño permite saltar y planear, optimizando la distribución de masa de cada sistema de locomoción en un 70 % para mejorar la integración entre los sistemas de actuación, su diseño se muestra en 2.18(a).

- **Robot inspirado en el saltamontes y murciélago** [74]: Robot de apenas 10g de peso, el cual integra principios de locomoción de la langosta y el murciélago, combinando el salto con planeo. Almacena energía en sus extremidades para impulsarse y utiliza sus alas para planear, lo cual permite un desplazamiento energéticamente eficiente, en la Figura 2.18(b) se muestra su diseño.

- **DALER v11** [75]: Este robot reemplaza las piernas por dos pares de rotor-hélice, lo que le permite un despegue vertical y hacer el planeo con sus alas plegables, las cuales también le permiten desplazarse en el suelo mediante su arrastre, este diseño se muestra en la Figura 2.18(c).

- **Robot inspirado en la ardilla voladora** [76]: Este diseño inspirado en la ardilla voladora *Pteromyini* emplea extremidades de arrastre y membranas flexibles para desplazarse mediante caminata, arrastre y planeo, en la Figura 2.18(d) se muestra dicho diseño.

- **UniCore** [77]: Una plataforma de actuación unificada en miniatura capaz de volar, nadar y correr, utilizando apéndices modulares (alas plegables para vuelo y nado, extremidades para movimiento en tierra). Su configuración mecánica simplificada favorece la versatilidad, aunque la reconfiguración debe realizarse manualmente, dicho diseño se muestra en la Figura 2.18(e).

Sistemas de locomoción que emplean rotores con ruedas o jaulas

- **HyTAQ (Hybrid Terrestrial and Aerial Quadrotor)** [23]: Robot con configuración de cuadricóptero para vuelo y su chasis unido a una jaula rodante para desplazamiento terrestre. Su diseño reduce el consumo energético ya que para rodar requiere que las hélices generen una fuerza mayor a la de fricción entre el suelo y la jaula, en lugar de mayor a la del peso del robot, el vuelo le permite superar obstáculos, el diseño se muestra en la Figura 2.19(a).

- **WAMORN (WAseda MOnitoring dRoNe)** [78]: Cuadricóptero con dos ruedas activas independientes, unidas al chasis mediante ejes. Incorpora un estabilizador para corregir inversiones (volcados) y modificar el centro de gravedad, su diseño se muestra en la Figura 2.19(b).

- **Robot para inspección de puentes** [79]: Combina la estructura cuadricóptera con ruedas pasivas sin radios con movimientos independientes, montadas fuera de una jaula, lo que mejora la estabilidad y movilidad en estructuras elevadas, el diseño se muestra en la Figura 2.19(c).

- **TIE** [80]: Microcuadricóptero con dos ruedas pasivas conectadas por un eje en la base. Su diseño compacto mejora el tiempo de operación y facilita la integración de componentes de sensado y procesamiento avanzados, el diseño se muestra en la Figura 2.19(d).

- **Quadroller** [81]: Cuadricóptero equipado con tres pares de ruedas pasivas con rodamientos de baja fricción. La disposición de las ruedas se da a lo largo de un brazo y en cuyo centro las ruedas se encuentran a mayor altura, esto le permite generar una inclinación para el desplazamiento hacia adelante o atrás, mientras que las ruedas extremas tienen un mecanismo de dirección similar a las patinetas controlado por los rotores laterales (brazo opuesto), el diseño se muestra en la Figura 2.19(e).

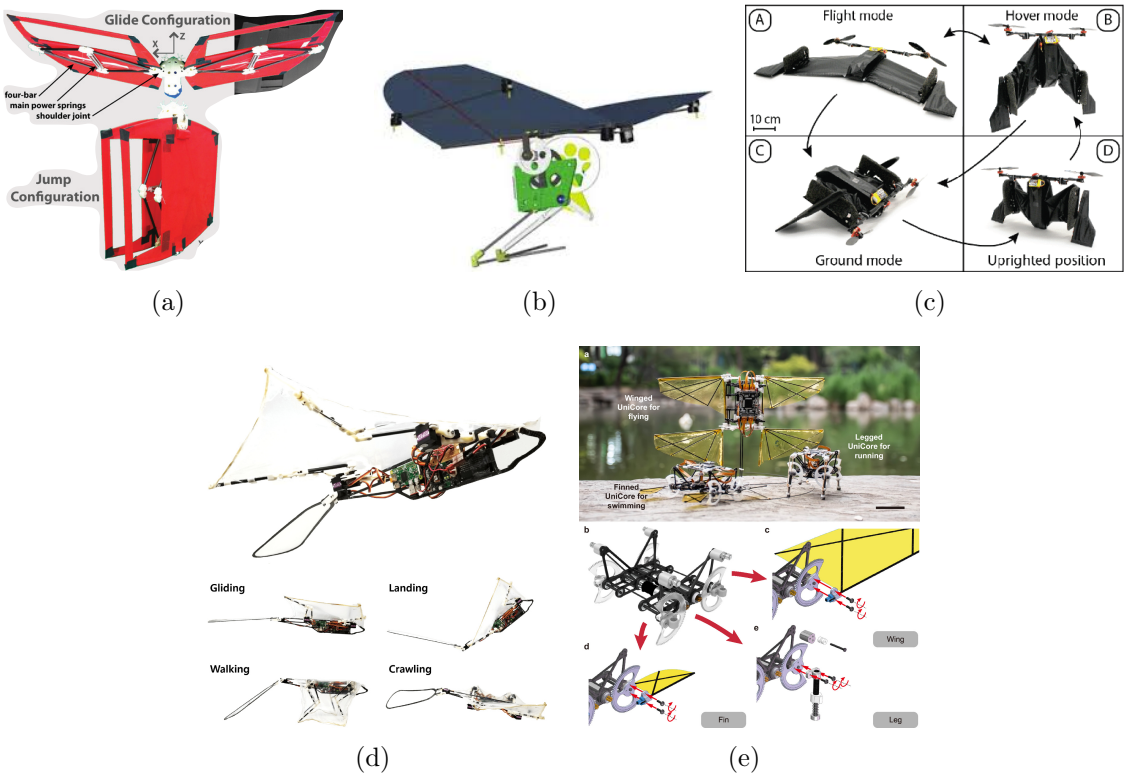
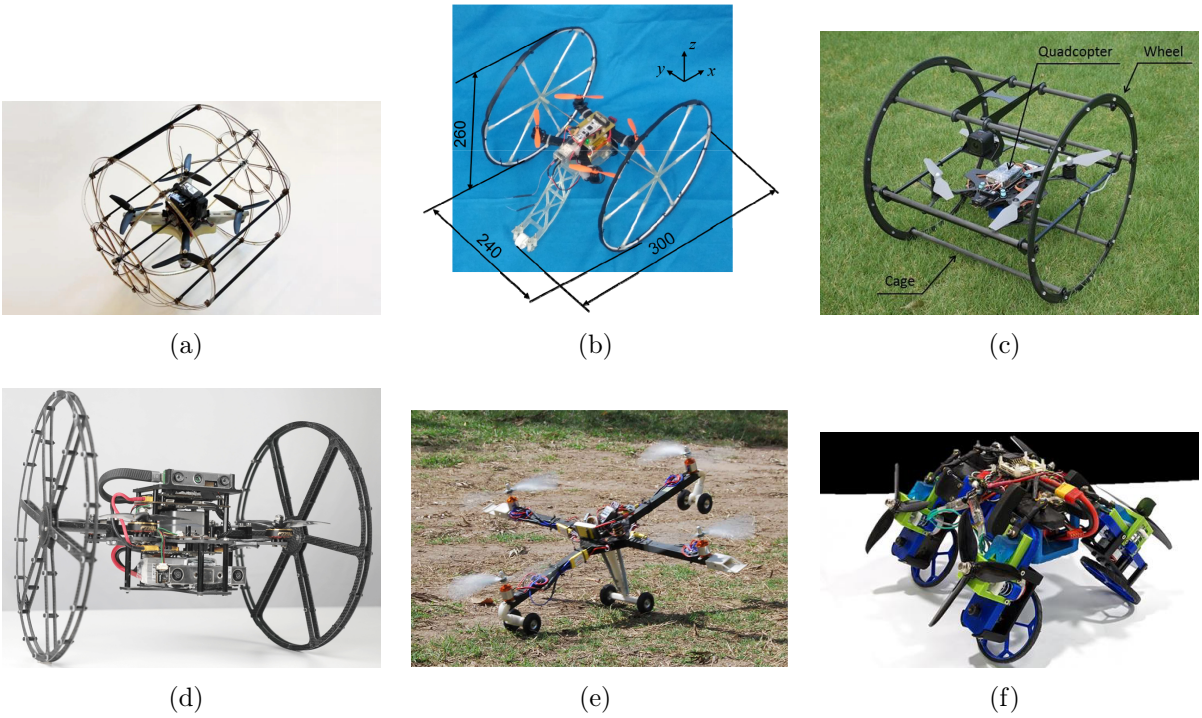


Figura 2.18: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean alas. (a) robot (MultiMo-Bat) con locomoción compuesta de alas plegables [73]; (b) robot inspirado en la langosta y murciélago con locomoción compuesta de alas plegables y extremidades [74]; (c) robot (DALER v11) con locomoción compuesta de alas plegables y rotores-hélices [75]; (d) robot inspirado en la ardilla voladora con locomoción compuesta de extremidades de arrastre y membranas flexibles [76]; (e) robot (UniCore) con locomoción compuesta de alas plegables y extremidades [77].

- **FSTAR2** [82]: Robot con apéndices extensibles, operando como cuadricóptero en vuelo y moviéndose sobre ruedas cuando sus apéndices están replegados. Usa embragues mecánicos para desacoplar la actuación de hélices y motores de conducción, reduciendo el consumo energético, el diseño se muestra en la Figura 2.19(f). Este robot a lo largo del tiempo ha tenido diversas variaciones:

  - STAR [83]: Primer diseño terrestre, con seis extremidades tipo rueda sin rin y ángulo de extensión variable.
  - Flying STAR [84]: Versión aérea con estructura cuadricóptera y capacidad de desplazamiento terrestre. Sin embargo, las hélices y ruedas compartían actuadores, provocando una actuación simultánea.
  - FCSTAR [85]: Variante voladora y trepadora, capaz de sostenerse en superficies inclinadas gracias a la inversión de las hélices, que generan un empuje adicional.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 2.19: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean rotores y ruedas o jaulas. (a) robot (HyTAQ) con locomoción compuesta de un cuadricóptero y jaula rodante [23]; (b) robot (WAMORN) con locomoción compuesta de un cuadricóptero y jaula con ruedas activas [78]; (c) robot aéreo para inspección de puentes con locomoción compuesta de un cuadricóptero y jaula con ruedas pasivas [79]; (d) robot (TIE) con locomoción compuesta de un micro cuadricóptero y ruedas pasivas [80]; (e) robot (Quadroller) con locomoción compuesta de un cuadricóptero y ruedas pasivas con rodamientos de baja fricción tipo patineta [81]; (f) robot (FSTAR2) con locomoción compuesta de un cuadricóptero con apéndices extensibles y ruedas [82].

Sistemas de locomoción que emplean dos rotores y ruedas

Diversos diseños de robots han incorporado la combinación de bicópteros y ruedas, ya que estos poseen una estructura más compacta a comparación de los cuadricópteros y permiten tener mayor eficiencia energética.

- **MTABot** [86]: Integra dos apéndices con ruedas transformables sin rin, dentro de las cuales se alojan los rotores-hélices. En modo terrestre, se desplaza mediante rodadura y escalado, mientras que en modo aéreo opera como un bicóptero, su diseño se muestra en la Figura 2.20(a).

- **Skater** [87]: Emplea ruedas pasivas con rin en los extremos para el movimiento terrestre, facilitando desplazamientos en terrenos variados, su diseño se muestra en la Figura 2.20(b).

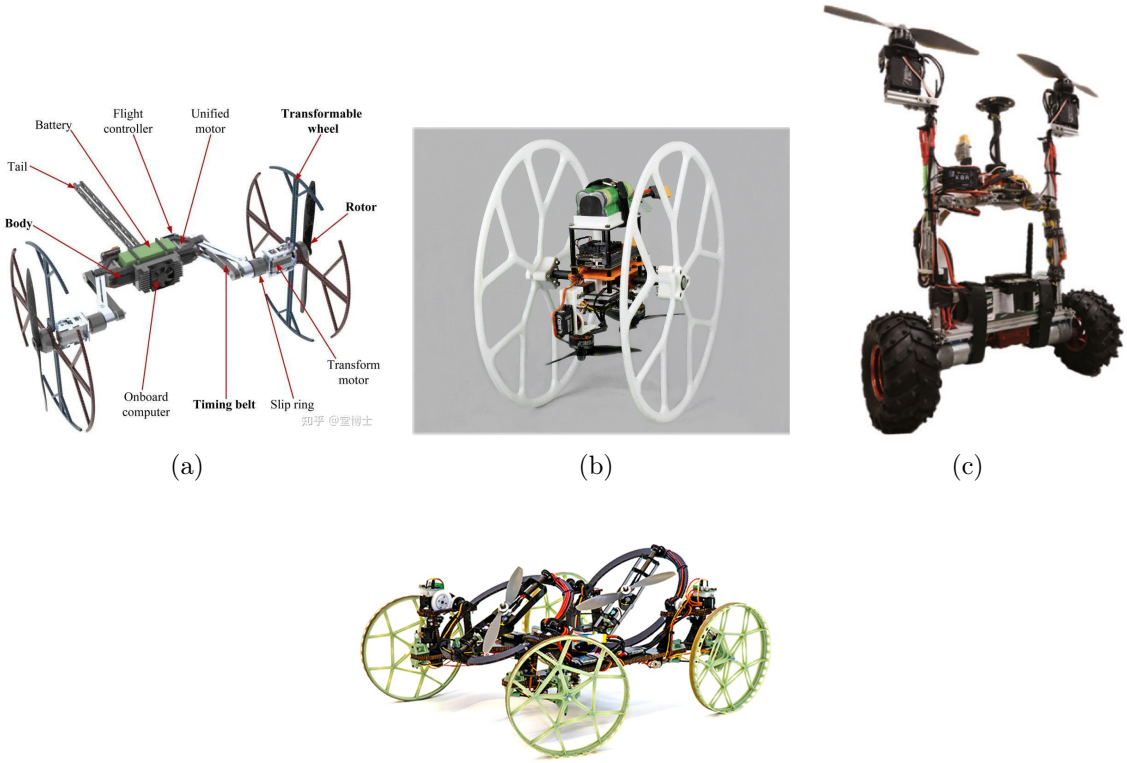


Figura 2.20: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean dos rotores y ruedas. (a) robot (MTA-Bot) con locomoción compuesta de dos ruedas transformables sin rin y en su interior un par rotor-hélice [86]; (b) robot (Skater) con locomoción compuesta de dos rotores-hélices y dos ruedas pasivas [87]; (c) robot (DoubleBee) con locomoción compuesta de dos rotores-hélices con ajuste de inclinación y ruedas activas [88]; (d) robot (VertiGo) con locomoción compuesta de dos rotores-hélices inclinables y ruedas pasivas-direccionables [89].

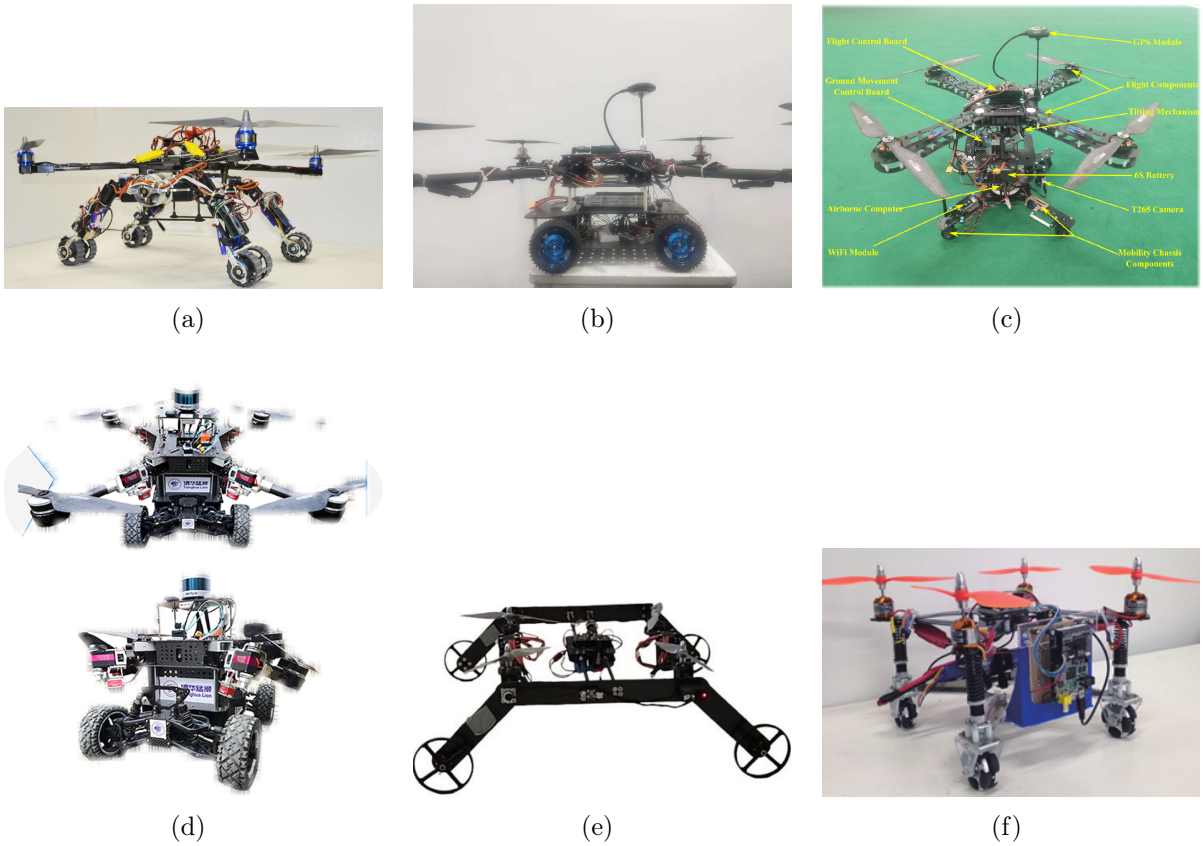
- **DoubleBee** [88]: Bicóptero con ruedas activas y un sistema de servomotores que ajusta la orientación de los rotores. Su estructura permite un comportamiento de péndulo invertido, utilizando las hélices como propulsión adicional, su diseño se muestra en la Figura 2.20(c).

- **VertiGo** [89]: Robot desarrollado por Disney en colaboración con la Universidad de Zurich ETH, consta de una estructura con cuatro ruedas, de las cuales dos son direccionables, mientras el movimiento se genera mediante dos rotores inclinables. Este diseño le permite rodar sobre el suelo y desplazarse verticalmente en paredes con gran agilidad, su diseño se muestra en la Figura 2.20(d).

Sistemas de locomoción que emplean múltiples rotores y bases móviles

Entre los diseños que combinan multirotores y bases móviles se tiene:

- **HERALD (Hybrid Exploration Robot for Air and Land Deployment)** [90]: Sistema híbrido que combina tres robots ligeros independientes en uno, incluyendo dos mecanismos de locomoción terrestre tipo serpiente con ruedas y un cuadricóptero. Este diseño permite operaciones tanto en aire como en tierra, con la capacidad de desacoplar sus módulos y operar de manera independiente. Su aplicación principal es en misiones de búsqueda y rescate, el diseño se muestra en la Figura 2.21(a).
- **Cuadricóptero y base móvil con dirección Ackerman** [91]: Desarrollado para independizar la actuación en la locomoción aérea y terrestre, emplea una base con dirección Ackerman y ruedas traseras activas, mejorando la estabilidad y maniobrabilidad, el diseño se muestra en la Figura 2.21(b).
- **AQT-HR (Autonomous Quadrotor Hybrid Robot)** [92]: Robot híbrido autónomo con un mecanismo de inclinación, que permite que el cuadricóptero genere una fuerza de empuje para mover la base con ruedas en cualquier dirección. Su locomoción terrestre utiliza dos ruedas fijas pasivas y dos orientables, facilitando movimientos precisos mediante un enfoque de locomoción acoplada, el diseño se muestra en la Figura 2.21(c).
- **Cuadricóptero con brazos expandibles/retráctiles** [93]: Diseñado con hélices de 26 pulgadas y brazos plegables que le permiten reducir su área en un 79 % al cambiar a modo terrestre. En dicho modo se compone de una base móvil con tracción trasera, dirección Ackerman y suspensión MacPherson, ideal para desplazamientos en terrenos irregulares, el diseño se muestra en la Figura 2.21(d).
- **BogieCopter** [94]: Robot con ruedas pasivas e inclinación variable de rotores. Su diseño optimiza la orientación de fuerzas de empuje, asegurando que siempre sean paralelas a la superficie de rodamiento, mejorando el desplazamiento y estabilidad, el diseño se muestra en la Figura 2.21(e).
- **Cuadricóptero con omniwheels** [95]: Es un cuadricóptero que utiliza ruedas omnidireccionales pasivas (omniwheels) para mejorar el movimiento en tierra. Además, incorpora sistemas de resorte-amortiguador para garantizar el contacto eficiente con la superficie y reducir impactos en el chasis, el diseño se muestra en la Figura 2.21(f).



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 2.21: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean múltiples rotores y bases móviles. (a) robot (HERALD) con locomoción compuesta de tres robots independientes (dos serpientes con ruedas y cuadricóptero) [90]; (b) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero y base móvil con dirección Ackerman [91]; (c) robot (AQT-HR) con locomoción compuesta de un cuadricóptero con sistema de inclinación y base móvil con ruedas orientables [92]; (d) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero con brazos expandibles/retráctiles y una base móvil con tracción trasera, dirección Ackerman y suspensión MacPherson [93]; (e) robot (BogieCopter) con locomoción compuesta de un cuadricóptero con inclinación en sus rotores y una base móvil con ruedas pasivas [94]; (f) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero y ruedas omniwheels con sistema resorte-amortiguador [95].

Sistemas de locomoción que emplean múltiples rotores y extremidades

Diseños que han optado por emplear extremidades en lugar de ruedas son:

- **Robot con cuatro piernas y arquitectura cuadricóptera** [96]: Este diseño integra piernas con actuación lineal y configuración paralela para desplazamiento terrestre. Para superar obstáculos, emplea un sistema de vuelo temporal basado en una arquitectura cuadricóptera en la parte superior, su diseño se muestra en la Figura 2.22(a).
- **Hexápodo reconfigurable a cuadricóptero** [97]: Posee seis extremidades, de las

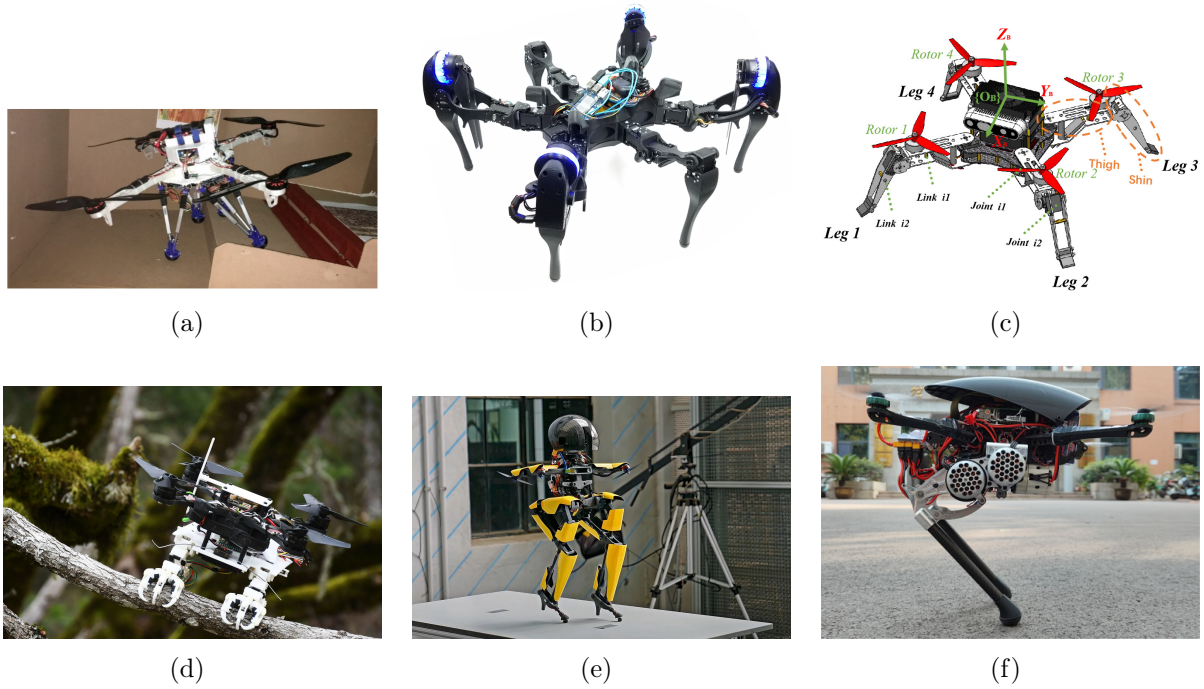
cuales cuatro se encuentran equipadas con rotores-hélices plegables de 17 pulgadas. Los pares rotor-hélice se almacenan en el segmento de la tibia y quedan protegidas por el fémur, permitiendo así una transición eficiente entre la locomoción terrestre y aérea, su diseño se muestra en la Figura 2.22(b).

- **QQR (Quadruped Quadrotor Robot)** [98]: Robot cuadrúpedo con rotor-hélices colocadas en la parte superior de sus extremidades y expuestas al exterior. La disposición de los rotores en las extremidades le permite modificar su estructura aérea para ingresar a espacios estrechos, su diseño se muestra en la Figura 2.22(c).
- **SNAG (Stereotyped Nature-Inspired Aerial Grasper)** [99]: Robot bípedo con garras y estructura cuadricóptera, inspirado en el comportamiento de las aves. Puede caminar, saltar, despegar, aterrizar, manipular objetos en el aire y sujetarse en ramas o superficies complejas, disipando las fuerzas de aterrizaje, su diseño se muestra en la Figura 2.22(d).
- **LEONARDO (LEgs ONboARd DrOne)** [100]: Robot bípedo ligero con cuatro rotores-hélices inclinables que usa como propulsores y se colocan en la cadera. Su diseño permite compensar movimientos de caminata, realizar saltos y volar para superar obstáculos, optimizando así el consumo energético, su diseño se muestra en la Figura 2.22(e).
- **KUO-III** [101]: Robot bípedo con estructura de cuadricóptero, capaz de caminar, correr y saltar. Sus rotores se utilizan principalmente para compensar movimientos y reducir el consumo de energía en las extremidades, su diseño se muestra en la Figura 2.22(f).

Sistemas de locomoción con alta integración

Entre los diseños más novedosos y que principalmente emplean una transformación/reconfiguración de su estructura además de compartir apéndices entre sus modos de locomoción (diseño adaptativo), se encuentran lo siguientes:

- **Robot con cuatro ruedas y sistema de reconfiguración aérea** [102]: Integra cuatro ruedas (dos actuadas y dos de dirección), en cuyo interior se alojan un par rotor-hélice. Mediante un servomotor en cada rueda, el robot puede transformarse en un cuadricóptero, facilitando la superación de obstáculos y terrenos complejos, el diseño se muestra en la Figura 2.23(a).
- **Robot híbrido con ruedas omnidireccionales y capacidad de escalada** [103]: Utiliza Omniwheels, dentro de las cuales se aloja un par rotor-hélice. La reorientación de extremidades y el giro del rotor permiten operar en aire, tierra y superficies verticales, reduciendo peso y consumo energético, el diseño se muestra en la Figura 2.23(b).
- **M4 (Multi-Modal Mobility Morphobot)** [104]: Desarrollado en el Laboratorio de Propulsión a chorro (JPL, *Jet Propulsion Laboratory*, por sus siglas en inglés) del Instituto de Tecnología de California (Caltech, *California Institute of Technology*, por sus siglas



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 2.22: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción que emplean rotores y extremidades. (a) robot con locomoción compuesta de cuatro piernas con actuación lineal y arquitectura cuadricóptera [96]; (b) robot con locomoción compuesta de seis piernas (hexápodo) transfigurable a modo cuadricóptero [97]; (c) robot (QQR) con locomoción compuesta de un cuadrúpedo en cuyas extremidades se monta un cuadricóptero [98]; (d) robot (SNAG) con locomoción compuesta de dos piernas con garras y una arquitectura cuadricóptera [99]; (e) robot (LEONARDO) con locomoción compuesta de dos piernas ligeras y un sistema de propulsión compuesta de cuatros rotores-hélices [100]; (f) robot (KUO-III) con locomoción compuesta de dos piernas ligeras y una estructura cuadricóptera [101].

en inglés), este robot está inspirado en estrategias de locomoción animal, sin replicar su morfología. Su diseño reutiliza apéndices para compartir el peso de los componentes, evitando incrementos innecesarios. Sus modos de locomoción incluyen:

- Vehículo terrestre no tripulado (UGV)
- Péndulo invertido móvil (MIP)
- Péndulo invertido móvil asistido por propulsor
- Sistema aéreo no tripulado (UAS)
- Balanceo de extremidades y manipulación en modo MIP.

Su versatilidad lo hace ideal para búsqueda y rescate, el diseño se muestra en la Figura 2.23(c).

- **ATMO (Aerially Transforming Morphobot)** [105]: Robot desarrollado en el Centro para Sistemas y Tecnologías Autónomas (CAST, *Center for Autonomous Systems and*

Technologies, por sus siglas en inglés) perteneciente a Caltech, presenta en su estructura cuatro hélices para vuelo en modo cuadricóptero. Sus protectores de hélices se convierten en ruedas, permitiendo una transición fluida entre locomoción aérea y terrestre, el diseño se muestra en la Figura 2.23(d).

- **Robot con mecanismo de reconfiguración tipo paraguas** [106]: En modo aéreo, adopta una configuración cuadricóptera. En modo terrestre, las hélices se repliegan dentro de la estructura, mientras que dos ruedas independientes en los extremos de su cuerpo cilíndrico permiten el desplazamiento, el diseño se muestra en la Figura 2.23(e).

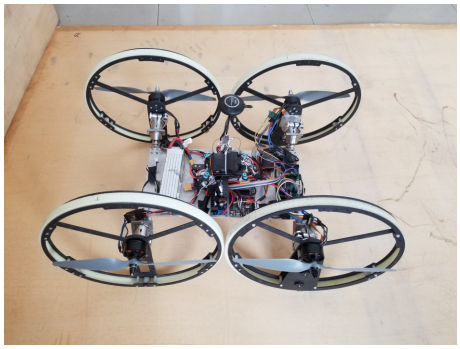
Conforme a la revisión en el desarrollo de robots con locomoción multimodal, La locomoción terrestre-aérea muestra un gran interés en el desarrollo de robots que ofrecen una gran ventaja para operar en entornos de desastre y su potencial aplicación en tareas de búsqueda y rescate. Además, esta locomoción bimodal se presenta en animales que van desde insectos, murciélagos y aves, lo cual aporta elementos de estudio para su análisis e implementación en sistemas robóticos. Si bien existen robots que operan predominantemente en aire y de manera secundaria en tierra, o viceversa, algunos más han optado por emplear la capacidad de movimiento aéreo tan sólo para superar obstáculos que representarían un gasto energético mayor para un sistema de locomoción terrestre.

2.3. Guías de diseño y evaluación del desempeño de robots móviles para búsqueda y rescate

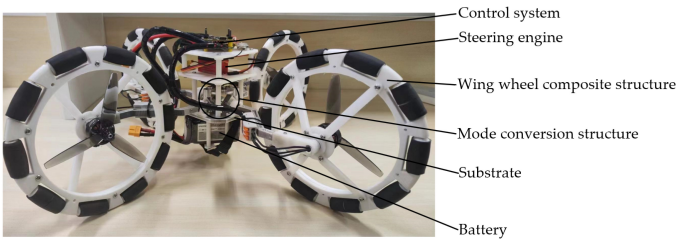
Las operaciones de búsqueda y rescate urbano principalmente tienen lugar en entornos no estructurados, dinámicos, de alto peligro y con tiempos de respuesta críticos. Si bien se han presentado diversas arquitecturas de robots móviles que son capaces de operar en múltiples entornos debido a la combinación e integración de diversos modos de locomoción, estas principalmente son adaptaciones de prototipos existentes o que solamente buscan explorar nuevas arquitecturas de locomoción, entre las cuales, la movilidad obtenida tenga como aplicación potencial tareas de búsqueda y rescate humano [60]. Sin embargo, el desarrollo para tales arquitecturas siguen líneas de diseño que no precisamente son orientadas a los requerimientos inmediatos de un robot para búsqueda y rescate, por lo cual, a continuación se enlistan algunas líneas de diseño que han sido reportadas en el ámbito de aplicaciones de búsqueda y rescate [3, 4, 107–115]:

- Las tareas de detección de víctimas requieren de priorizar velocidad y adaptabilidad a las condiciones del terreno después de un desastre.

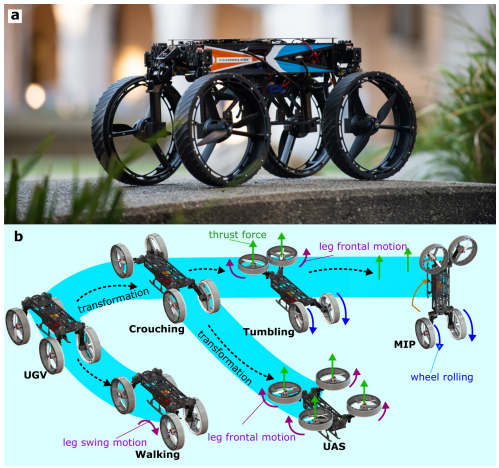
- La evaluación de la condición de la víctima y la zona en donde se encuentra requiere de cámaras de alta resolución, iluminación ajustable, dispositivos acústicos, geolocalización y sensores láser que permitan un adecuado mapeo del entorno y evaluación de las condiciones de las estructuras en tiempo real antes del ingreso de los rescatistas, así como de micrófonos/altavoces para una comunicación audiovisual bidireccional con las víctimas.



(a)



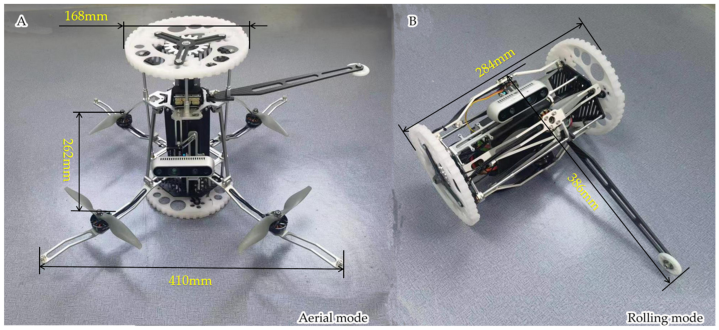
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.23: Ejemplos de robots con locomoción multimodal para operación en entornos terrestres-aéreos, con sistemas de locomoción altamente integrados. (a) robot con locomoción compuesta de cuatro ruedas y sistema de reconfiguración aérea [102]; (b) robot con locomoción compuesta de cuatro ruedas omnidireccionales en cuyo interior se alojan un par rotor-hélice [103]; (c) robot (M4) con locomoción compuesta de diversos apéndices (ruedas, rotor-hélice, extremidades) [104]; (d) robot (ATMO) con locomoción compuesta de rotores-hélices en configuración cuadricóptera y cuyos marcos de protección se comportan como ruedas [105]; (e) robot con locomoción compuesta de un cuadricóptero plegable y ruedas en estructura tipo jaula [106].

- En cuestión de asistencia a las víctimas se sugiere una capacidad de carga ligera para transporte de insumos, medicamentos o kit de primeros auxilios.
- La estructura del robot debe ser robusta y resistente ante las condiciones del entorno, preferentemente con protección de ingreso de sólidos y líquidos.
- El robot debe ser lo suficientemente ligero para poder ser manipulable por una sola persona, así como transportarlo a la zona de operación, lo que impacta en el tiempo de despliegue.
- Poseer una interfaz intuitiva para combinar o atender de manera simultánea y fácil, la navegación y búsqueda de víctimas.
- El nivel de autonomía en el robot sea mixta, con capacidad de elegir entre modos de operación manual, semi-autónomo o autónomo.
- Información de los estados de operación y postura del robot.
- Control intuitivo, preferiblemente a nivel de cuerpo entero del robot, en lugar de control por extremidades para minimizar la formación/capacitación de uso inicial.
- Minimizar el costo, ya que el robot no será rescatado si se atasca o se entierra.

Por otro lado, algunas de las recomendaciones o deseos de los miembros de equipos de búsqueda y rescate han sido los siguientes

- Capacidad de elevarse para superar obstáculos.
- Poseer detectores de vida (por ejemplo, sensores de dióxido de carbono o acústicos).
- Incorporar un sensor de calidad del aire.
- Poseer equipamiento para poder "ver" a través de paredes, humo, escombros u obstáculos.

Así también, se han realizado caracterizaciones de los robots para búsqueda y rescate a través de ontologías o representaciones del conocimiento [109, 116, 117], abarcando categorías de información principales como:

- **Características estructurales**: Describen los aspectos físicos y estructurales del robot. Entre los cuales se encuentran el tamaño, peso, conexión con cordón o inalámbrica, fuente de alimentación, mecanismo de locomoción, sensores, procesadores, etc.
- **Capacidades funcionales**: Describen las características de comportamiento del robot. Entre los cuales se destacan las capacidades de locomoción (velocidad máxima, pendiente de inclinación máxima, máximo tamaño de escalones, etc.), capacidades sensoriales (capacidad de mapeo, auto localización, condiciones de visibilidad, estado del robot, etc.), capacidades de operación (tiempo de operación, tiempo de configuración, fuerza

de empuje, tiempo medio entre fallos, etc.), resistencia al ambiente (temperatura máxima, nivel de sumergibilidad, etc.), grado de autonomía (nivel de articulaciones, nivel de cuerpo, navegación, etc.), compatibilidad de operación en escombros, comunicaciones (medios de comunicación, frecuencias de comunicación, estándares, cifrado, etc.).

- **Consideraciones operativas**: Describe las interacciones del robot con el operario y la interoperabilidad con otros robots. Entre los cuales se encuentran el factor humano (número de operadores, entrenamiento o capacitación inicial, usabilidad, etc.), interacción intra-grupal (interacción con otros robots similares), interacción inter-grupal (interacción con robots o computadoras de terceros).

En cuanto a los sensores requeridos para robots que desempeñen tareas de búsqueda y rescate se encuentran [118]:

- **Sensores de localización**: Su empleo es exclusivamente para localizar al robot en su entorno y proporcionar una posición precisa (relativa o absoluta) del robot. Dicha información resulta útil para tareas de navegación y planificación de rutas.
  - **Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)**: Basados en la comunicacion con diversos satélites y triangulación de señales para la determinación de la posición absoluta del robot. Existe una diversidad de estos sistemas como el GPS, GLONASS, BDS, QZSS, GALILEO, entre otros. Si bien son muy precisos ante líneas de visión despejadas con los satélites, presentan limitaciones de desempeño en interiores.
  - **Unidad de Medición Inercial (IMU)**: Se compone de tres elementos, un acelerómetro, un magnetómetro y un giroscopio, se emplea para determinar el rumbo, la actitud y posición de un robot. Es susceptible a interferencias electrónicas, pero permite operar con cierta autonomía en entornos sin señal satelital.
  - **Codificadores Rotatorios (Encoders)**: Permiten cuantificar el desplazamiento de las ruedas, lo que en condiciones ideales sin deslizamiento, permite convertir dicha información en posiciones o velocidad. Proveen de una redundancia ante fallos del GNSS.
- **Sensores de percepción**: Se emplean para recopilar información del entorno y mejorar la conciencia y comprensión del mismo, lo que permite facilitar la toma de decisiones.
  - **Detección y Medición de Distancias por Luz (LiDAR)**: Emplea láseres infrarrojos (IR) como fuente de luz para medir distancias y movimientos precisos en un entorno en tiempo real. Esta tecnología es conocida por su alta resolución y rentabilidad, sin embargo, presenta afectaciones en la contaminación de sus lentes y ante neblina o lluvia intensa.
  - **Detección y Medición por Ondas de Radio (Radar)**: En este caso se emplean ondas de radio para la determinación de distancias, es robusto en condiciones adversas, pero posee una baja resolución.

- **Cámaras**: Permiten una percepción ambiental integral. Para superar escenarios de falta de iluminación, se sugiere el uso de cámaras de profundidad y térmicas o infrarrojas.
- **Micrófonos y Localización de Fuentes Sonoras (SSL)**: Útiles en condiciones de cero visibilidad y para la detección de señales de vida en diversas direcciones.

Estos sensores permiten implementar tareas de percepción y reconocimiento del entorno como la reconstrucción 3D, localización y mapeo simultáneo (SLAM), navegación mediante estimación, etc.

2.3.1. Normas de evaluación por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM)

El Departamento de Seguridad Nacional (DHS, *Department of Homeland Security*, por sus siglas en inglés), la Agencia de Administración de emergencias Federal (FEMA, *Federal Emergency Management Agency*, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional de Justicia (NIJ, *National Institute of Justice*, por sus siglas en inglés) han unido esfuerzos por identificar y definir los requisitos funcionales en el desarrollo de nuevos y/o mejores tecnologías que satisfagan las necesidades de los equipos de búsqueda y rescate urbano. Por lo que mediante el patrocinio al Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST, *National Institute of Standars and Technology*, por sus siglas en inglés) se han desarrollado y propuesto metodologías de evaluación para el desempeño de la respuesta de robots en conjunto con agencias gubernamentales, fabricantes de robots y equipos de respuesta a emergencias [108,110,113,119–123].

La metodología adoptada por la DHS y NIST se basa en un enfoque iterativo orientado en el usuario, para el desarrollo de normas de evaluación del desempeño de robots, cómo se muestra en la Figura 2.24. El proceso comienza con la colección de requerimientos operacionales, los cuales son definidos por los equipo de rescate. El objetivo es que el robot pueda cumplir con las tareas requeridas. Los métodos de prueba involucran aparatos, métricas, y procedimientos, cómo se muestran en la Figura 2.24. Los métodos de prueba propuestos han evolucionado a través de diversos procesos de validación los cuales son aplicados a los robots candidatos para observar su efectividad. Las validaciones son llevadas a cabo en ejercicios de campo o en competencias, donde una vez alcanzado su nivel de madurez, los métodos son sometidos a una normalización.

El equipo del NIST junto a la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, *American Society for Testing and Materials*, por sus siglas en inglés) han desarrollado los procedimientos de normas, métodos de prueba y métricas para robots de rescate, a través del comité de normas internacionales de la ASTM sobre aplicaciones de seguridad nacional, equipo operacional, robots E54.08.01 y descritas en el libro de normas volumen 15.08. Para esto se requieren los siguientes pasos:

- **Prototipo**: Cuando un procedimiento de prueba y aparatos son llevados a cabo y sometidos a un proceso de evalución.

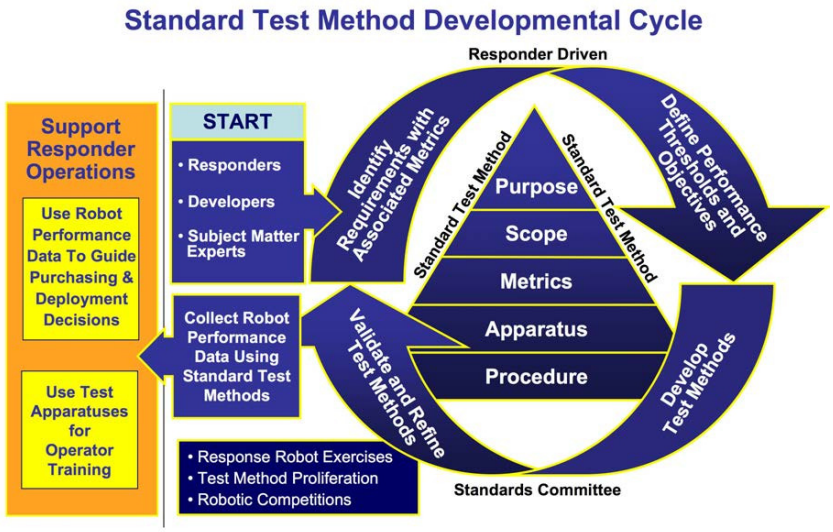


Figura 2.24: Ciclo de desarrollo de métodos de prueba.

- **Validación**: Cuando un prototipo ha progresado suficiente después de diversas pruebas en robots.
- **Prácticas normalizadas**: Son sometidas a votación y aprobación los procedimientos de prueba.
- **Métodos de pruebas normalizadas**: Se demuestran rendimiento, repetibilidad, métricas y un formulario de evaluación.

A continuación, se presentan algunas definiciones involucradas en los métodos de normalización:

- **Métrica**: Identificacioón de características para medir el aspecto de un robot particular.
- **Aparatos**: Miden el rendimiento, asociados a los desafíos del método de prueba, además de facilitar la comparación directa de los diversos modelos de robots.
- **Procedimiento**: Se genera en base al aparato y cómo se desea ejercer el indicador para medir el desempeño.

Entre la diversas áreas críticas que se evalúan en dichos métodos se encuentran:

- **Movilidad**: Capacidad del robot para negociar y navegar en terrenos irregulares y obstáculos, así como recuperarse de una volcadura.
- **Sensores**: Eficacia de los sistemas de detección para identificar víctimas y peligros.
- **Comunicación**: Fiabilidad de las transmisiones de datos entre el robot y los operadores.

- **Interacción Humano-Robot**: Facilidad de uso y control del robot por parte de los operadores.
- **Fuente de alimentación**: Cantidad de tiempo que el robot puede permanecer en modo de espera y fuentes de energía para el chasis y otros componentes abordo del robot.

Debido a que en este trabajo se hace énfasis en la movilidad del robot, se enlistan los métodos reportados al momento:

- ASTM E2801 [124]: Cruzar brechas horizontales en locales cerrados, Figura 2.25.
- ASTM E2802 [125]: Atravesar obstáculos verticales en locales cerrados, Figura 2.26.
- ASTM E2803 [126]: Atravesar planos inclinados en locales cerrados, Figura 2.27.
- ASTM E2804 [127]: Atravesar escaleras con aterrizajes en locales cerrados, Figura 2.28.
- ASTM E2826 [128]: Atravesar terreno complejo compuesto por rampas contínuas, Figura 2.29.
- ASTM E2827 [129]: Atravesar terreno complejo compuesto por peldaños simétricos, Figura 2.30.

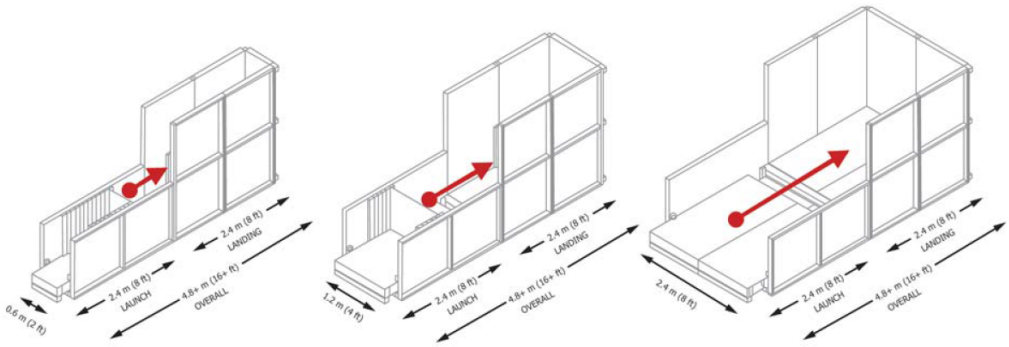


Figura 2.25: Método E2801 para cruzar brechas horizontales en locales cerrados.

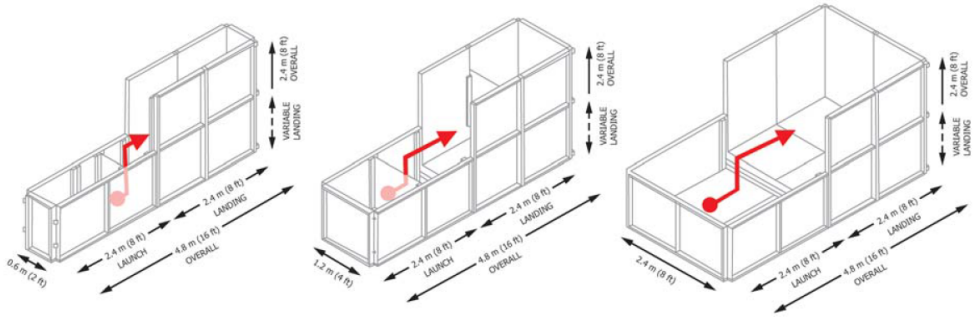


Figura 2.26: Método de E2802 para atravesar obstáculos verticales en locales cerrados.

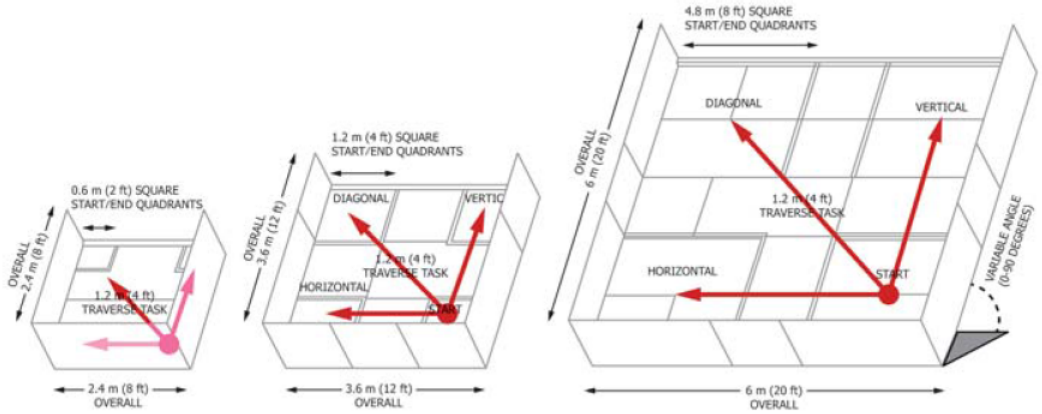


Figura 2.27: Método E2803 para atravesar planos inclinados en locales cerrados.

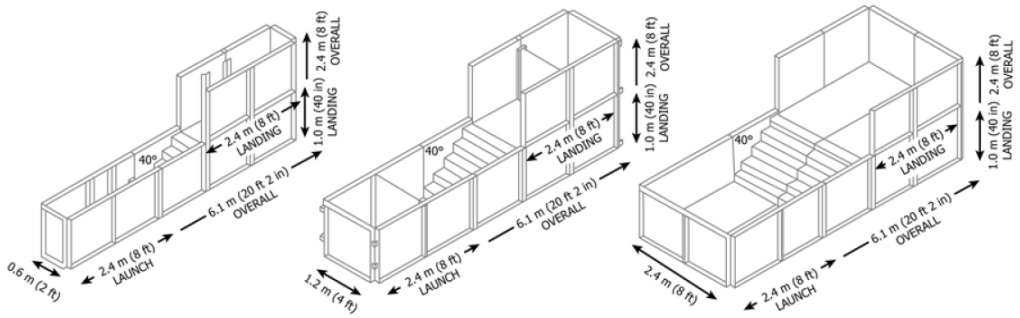


Figura 2.28: Método E2804 para atravesar escaleras con aterrizajes en locales cerrados.

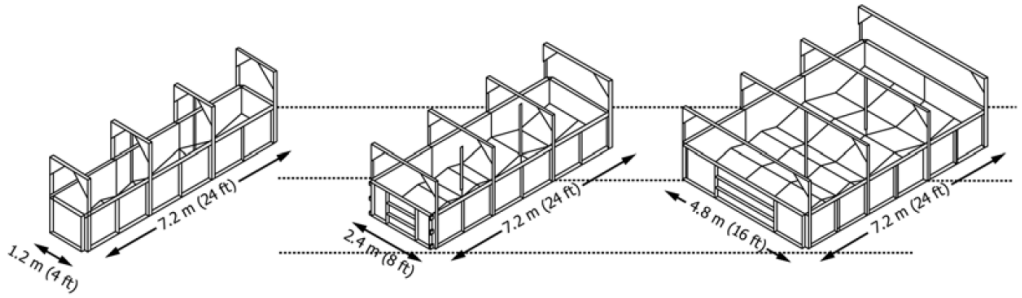


Figura 2.29: Método E2826 para atravesar terreno complejo compuesto por rampas contínuas.

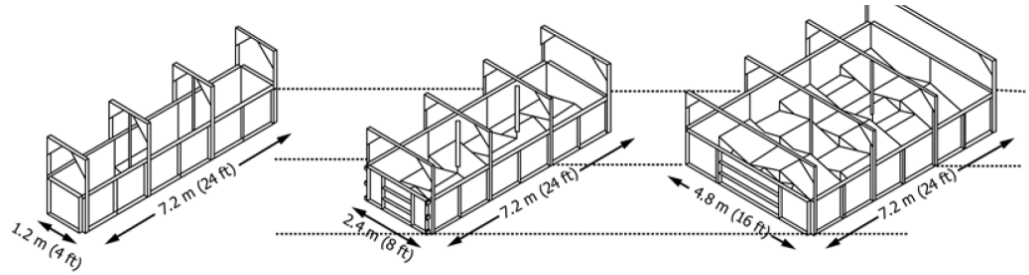


Figura 2.30: Método E2827 para atravesar terreno complejo compuesto por peldaños simétricos.

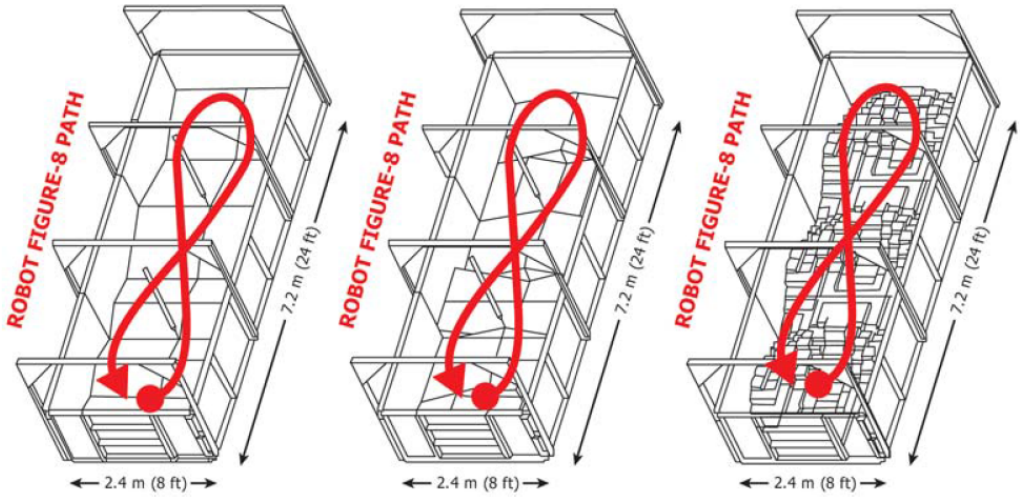


Figura 2.31: Método E2828 para atravesar terreno complejo compuesto por peldaños simétricos en locales cerrados.

- ASTM E2828 [130]: Atravesar terreno complejo compuesto por peldaños simétricos en locales cerrados, Figura 2.31.
- ASTM E2829 [131]: Maniobra de velocidad sostenida en superficies pavimentadas.
- ASTM E2830 [132]: Capacidad de remolque en una superficie plana y pavimentada.

Actualmente, continúan desarrollándose y actualizándose nuevos métodos para el diseño y evaluación de sistemas robóticos. Paralelamente, diversos trabajos han propuesto guías de diseño enfocadas en aspectos clave como los modos de operación, estrategias de entrenamiento, teleoperación, interfaces de usuario, y coordinación en enjambres de robots, tanto para aplicaciones generales como para misiones específicas de búsqueda y rescate urbano [116,117,133–141].

No obstante, en lo que respecta a los resultados de las evaluaciones normalizadas por el NIST-ASTM, estos no son de acceso público. Solamente en la guía para la evaluación, compra y capacitación con robots de respuesta utilizando métodos de prueba estándar internacionales DHS-NIST-ASTM [142] se hace mención que hasta el 2015, se habían evaluado 100 robots dentro de dichos métodos. No obstante, sólo se presentan algunas características generales en las clasificaciones de peso y velocidad de 8 robots. Por lo cual, no se dispone de un documento oficial que compile y difunda todos los robots evaluados y sus respectivos desempeños. Esta información se comunica principalmente a los patrocinadores de dichas pruebas y a los equipos colaboradores involucrados en el desarrollo de los prototipos.

Por otro lado, diversos estudios han analizado las características de movilidad en sistemas de locomoción terrestre. Entre ellos, se encuentran revisiones específicas sobre robots con ruedas [143], con extremidades [144], comparativas entre ruedas y orugas [145], así como entre extremidades y ruedas [146]. De forma complementaria, también se han abordado revisiones centradas en sistemas de locomoción híbrida [39,147,148].

Particularmente, en [38] se presenta una comparativa exhaustiva de los sistemas de locomoción mostrados en la Figura 2.12, en la cual se definen diez características clave para su evaluación, como se detalla en la Tabla 2.1. Las primeras siete características son cuantitativas y se relacionan directamente con el rendimiento del sistema (como eficiencia energética, velocidad, capacidad de superación de obstáculos, entre otras), mientras que las tres restantes se vinculan con la complejidad mecánica, de control y de implementación del sistema.

Los resultados de dicha evaluación comparativa se resumen en la Tabla 2.2 y constituyen una referencia valiosa para investigadores interesados en mejorar el rendimiento de plataformas existentes o en diseñar nuevos sistemas de locomoción.

Tabla 2.1: Descripción de las características consideradas en la comparación de los sistemas de locomoción [38].

Características	**Definición**
Velocidad máxima	Velocidad máxima en superficies planas en ausencia de obstáculos.
Capacidad de cruce de obstáculos	Capacidad de cruzar obstáculos con formas aleatorias en entornos no estructurados.
Capacidad de subir peldaños/escaleras	Capacidad de subir peldaños individuales y escaleras en entornos estructurados para los seres humanos.
Capacidad de escalar pendientes	Capacidad de escalar pendientes con un coeficiente de fricción mayor a 0.5.
Capacidad de operación en terrenos suaves	Capacidad de operar en terrenos suaves (e.g. arena).
Capacidad de operación en terrenos irregulares	Capacidad de operar en terrenos irregulares (e.g. terreno con hierba, terreno rocoso).
Eficiencia energética	Eficiencia energética en condiciones normales de operación, en terrenos planos y compactos.
Complejidad mecánica	Nivel de complejidad de la arquitectura mecánica.
Complejidad de control	Nivel de complejidad del sistema de control (Hardware y Software).
Disposición de tecnología	Nivel de madurez en las tecnologías empleadas para la realización del sistema.

Tabla 2.2: Comparativa de las características de los sistemas de locomoción [38].

Locomoción / Características	**Ruedas**	**Orugas**	**Extremidades**	**Híbrido L-W**	**Híbrido L-T**	**Híbrido W-T**	**Híbrido L-W-T**
Velocidad máxima	Alta	Mediana–Alta	Baja (caminata estática) a mediana (caminata dinámica)	Mediana–Alta	Mediana	Mediana–Alta	Mediana–Alta
Capacidad de cruce de obstáculos	Baja	Mediana–Alta	Alta	Mediana–Alta	Alta	Mediana	Alta
Capacidad de subir peldaños/escaleras	Baja	Mediana	Alta	Alta	Alta	Mediana	Alta
Capacidad de escalar pendientes	Baja–Mediana	Alta	Mediana–Alta	Mediana–Alta	Alta	Mediana–Alta	Alta
Capacidad de operación en terrenos suaves	Baja	Alta	Baja–Mediana	Baja–Mediana	Mediana–Alta	Alta	Mediana–Alta
Capacidad de operación en terrenos irregulares	Baja	Mediana–Alta	Alta	Alta	Alta	Mediana–Alta	Alta
Eficiencia energética	Alta	Mediana	Baja (caminada estática) a mediana (caminata dinámica)	Mediana–Alta	Mediana	Mediana–Alta	Mediana–Alta
Complejidad mecánica	Baja	Baja	Alta	Mediana–Alta	Mediana–Alta	Baja–Mediana	Alta
Complejidad de control	Baja	Baja	Alta	Mediana–Alta	Mediana–Alta	Mediana–Alta	Alta
Disposición de tecnología	Completa	Completa	Completa para caminata estática; en progreso para caminata dinámica	Completa (usualmente caminata estática)	Completa (usualmente caminata estática)	Completa	Completa (usualmente caminata estática)

Por su parte, en [60] se hace mención a la falta de métricas o índices de desempeño para la evaluación en el rendimiento general de robots híbridos (consumo de energía, eficiencia, etc.), lo cual complica comparar robots con distintos sistemas de locomoción a pesar de operar en los mismos entornos. Otro aspecto que se resalta en dicha literatura es el Nivel de Madurez Tecnológico (TRL, *Technology Readiness Level*, por sus siglas en inglés) y el Índice de Madurez Comercial (CRI, *Commercial Readiness Index*, por sus siglas en inglés) de los diversos sistemas de locomoción desarrollados, como se muestra en la Tabla 2.3. Estos datos muestran que el promedio de los sistemas de locomoción implementados se encuentra entre los niveles TRL3 y TRL6, lo que indica que se encuentran en niveles de conceptos experimentales y demostrados en ambientes relevantes. Así también, se muestra que los sistemas basados en ruedas, orugas, piernas y hélices, presentan un nivel TRL9 y CRI4, indicando que actualmente se han probado en ambientes operacionales y son ampliamente comerciales, salvo las piernas que se encuentran en pruebas y ampliación comercial en los últimos años. Mientras que los sistemas bioinspirados deben escalar más niveles para ser rentables comercialmente en un futuro cercano.

Tabla 2.3: Estimación de las características de los sistemas de locomoción basados en su nivel de madurez tecnológico y comercial [60].

Entornos	**Tipos**	**Modos**	**TRL**	**CRI**
Acuáticos	Natación	Aletas	1–6	–
		Movimiento ondulatorio	1–6	–
		Propulsión a chorro	7–9	–
		Hélices	7–9	1–2
	Bentónico	Piernas	1–3	–
		Ventosas	1–3	–
		Arrastre	1–3	–
		Rodante	1–3	–
	Superficie	Vela	1–6	–
		Aletas	1–6	–
		Hélices	1–6	1–2
		Propulsión a chorro	1–6	–
		Zancadas superficiales	1–3	–
Aéreos	Vuelo activo	Alas de insectos	1–3	–
		Alas de pájaro	1–3	–
		Hélices	7–9	3–4

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 2.3

Entornos	**Tipos**	**Modos**	**TRL**	**CRI**
		Propulsión a chorro	7–9	3–4
	Planeo	Superficies de planeo	1–3	–
	Globos	Globos	1–3	–
Terrestres	Caminar/correr/saltar	Piernas	4–9	1–2
	Deslizante–corredizo	Patines	1–3	–
	Arrastre	Peristalsis	1–4	–
		Deslizándose	1–4	–
	Escalada	Adherencia superficial	1–3	–
		Braquiación–balanceo de brazos	1–3	–
	Rotación	Ruedas	7–9	3–4
		Orugas	7–9	3–4

2.3.2. Versatilidad y complejidad en el diseño de robots con alta movilidad

La versatilidad en la movilidad de los robots con locomoción híbrida suele implicar una elevada complejidad mecánica en su diseño. Esta complejidad abarca la selección y combinación de distintos tipos de actuadores, la cantidad y disposición de las articulaciones, así como las configuraciones cinemáticas correspondientes. Además, se requiere una alta integración de sensores que faciliten una percepción más precisa del entorno. Por otra parte, los algoritmos y sistemas de control deben operar de forma coordinada para procesar la información del entorno y reconfigurar el sistema de locomoción, permitiendo transiciones eficientes entre distintos entornos de operación.

En [32] se evalúa la movilidad de un robot móvil en torno a una clasificación de los diversos tipos de obstáculos que pueden presentarse en su entorno, y se establece una métrica para cuantificar la versatilidad y complejidad del sistema robótico. Dicha métrica permite comparar diferentes robots en función de sus entornos de operación, la capacidad para superar obstáculos y su maniobrabilidad en el espacio de trabajo. En la Figura 2.32 se muestran las geometrías de los distintos tipos de obstáculos, en función de las dimensiones de la estructura general del robot.

Esta Figura permite identificar cinco segmentos de superficie con distintos tipos de obstáculos:

- **Terreno plano**: la superficie no presenta ningún tipo de obstáculo.

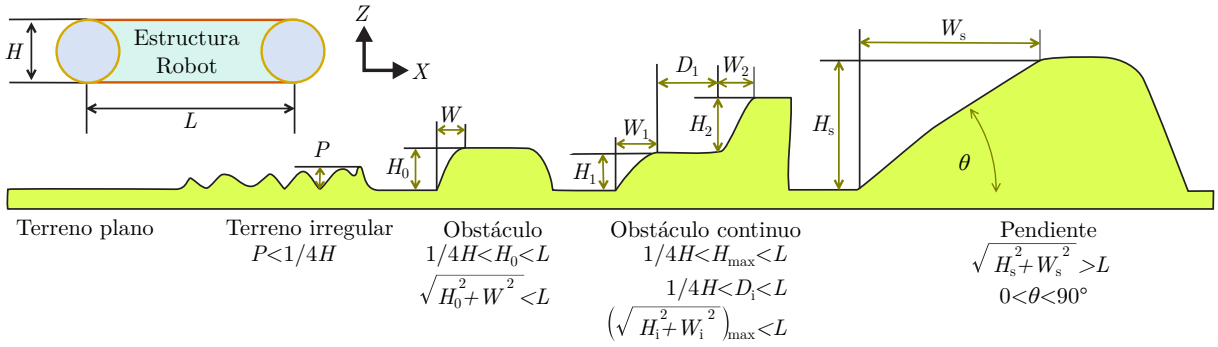


Figura 2.32: Clasificación de obstáculos basados en el tamaño relativo de la estructura general de un robot [32].

- **Terreno irregular**: presenta obstáculos continuos de baja altura con respecto al terreno plano, cuya magnitud máxima está representada por la variable P, la cual es inferior a una cuarta parte de la altura corporal del robot.

- **Obstáculo individual**: se caracteriza por la presencia de un solo obstáculo en la superficie, cuya altura está representada por la variable H_0, la cual se encuentra entre un cuarto de la altura corporal y la longitud corporal del robot. La distancia horizontal de separación de la cima está representada por la variable W. Estas dos variables forman una pendiente cuya longitud es menor que la longitud corporal del robot.

- **Obstáculos continuos**: consisten en una sucesión de obstáculos con alturas H_i y distancias de separación horizontales de la cima W_i. La altura máxima $H_{\text{máx}}$ se encuentra entre un cuarto de la altura corporal y la longitud corporal del robot, mientras que las distancias entre obstáculos están dadas por D_i. La longitud de la pendiente más pronunciada debe ser menor a la longitud corporal del robot.

- **Pendientes**: se definen por un ángulo de inclinación entre 0° y 90°. En este caso, la longitud de la pendiente es mayor que la longitud corporal del robot, y sus dimensiones de altura y distancia de separación horizontal de la cima están dadas por las variables H_s y W_s, respectivamente.

Por su parte, la Figura 2.33 muestra la clasificación de estos tipo de obstáculo en función de las dimensiones del robot.

La métrica utilizada para evaluar la versatilidad de un robot consiste en asignar pesos relativos a diversos factores que influyen en su movilidad. Esta métrica considera los siguientes componentes:

- **Peso de los dominios de operación (entornos) $\mathbf{w_l}$**: se consideran cinco dominios o entornos: terrestre, aéreo, acuático, escansorial y de transición. Cada dominio posee un peso relativo de 0.2.

- **Peso de los subdominios $\mathbf{w_j}$**: tres de los cinco dominios presentan subdivisiones:

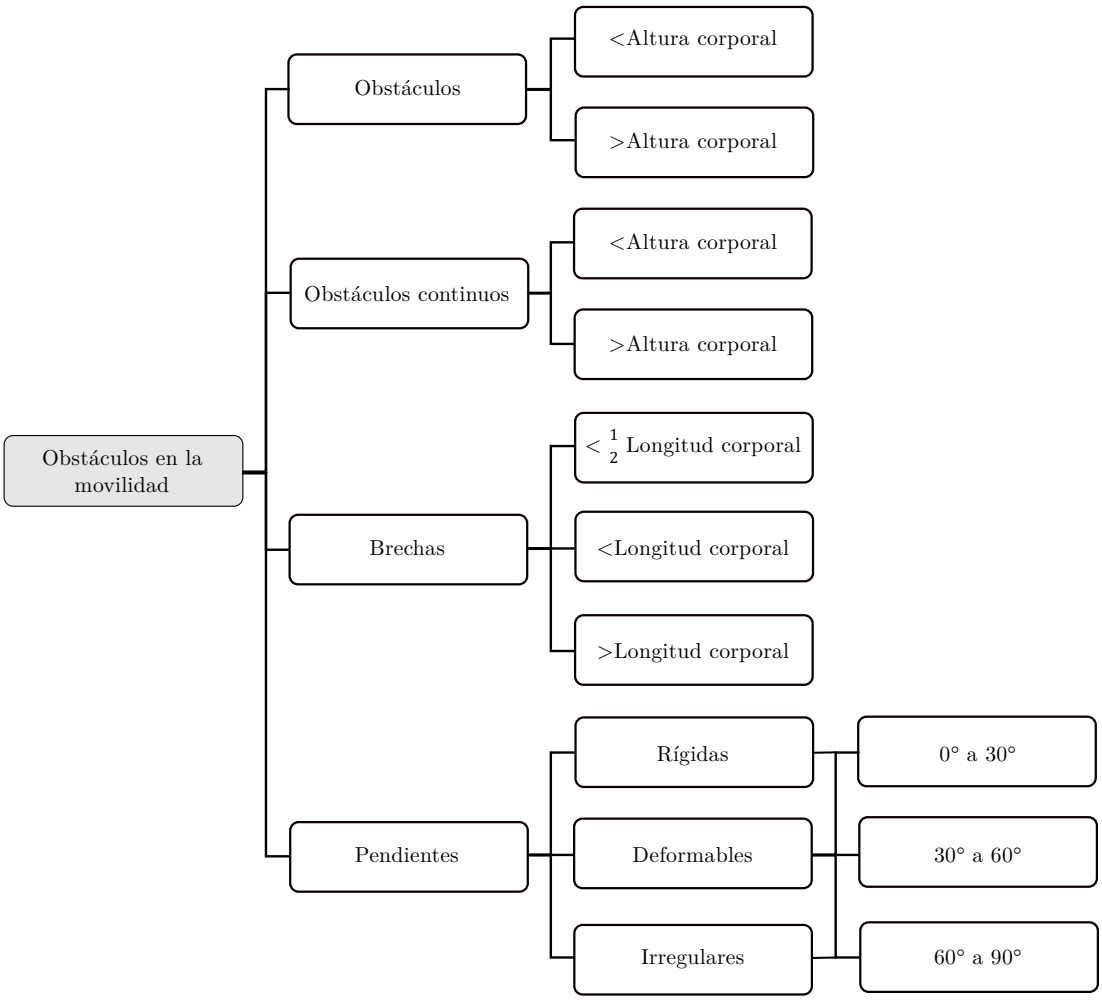


Figura 2.33: Clasificación de cada tipo de obstáculo [32].

- **Dominio terrestre**: se consideran superficies planas, irregulares y deformables, con un peso de 0.33 cada una para la maniobrabilidad, y de 0.25 en relación a movilidad en obstáculos.
- **Dominio Acuático**: se presentan solo dos subdominios, la navegación superficial y subacuática. Cada uno con un peso de 0.5.
- **Dominio Escansorial**: comprende superficies planas, irregulares, invertidas y curvadas, con pesos respectivos de 0.25, 0.3, 0.25 y 0.2.

- **Peso del tipo de movilidad o maniobrabilidad $\mathbf{w_k}$**: la maniobrabilidad contempla 6 grados de libertad en el espacio y la capacidad de flotar, mientras que la movilidad frente a obstáculos se refiere a la capacidad de negociar obstáculos acorde a las geometrías de la estructura del robot. Estos pesos varían según el dominio de operación.

- **Peso específico del tipo de movilidad $\mathbf{w_i}$**: se asigna a cada movimiento o capacidad de negociar obstáculos, de acuerdo con el dominio y subdominio correspondiente.

- **Peso de puntuación en el desempeño s_i**: califica la capacidad del robot para moverse, negociar obstáculos o transitar de un entorno a otro. Se asigna una puntuación de 0 si el robot no es capaz de cumplir con la tarea asignada, 1 si lo hace de manera rudimentaria, y 2 si muestra ser muy competente en la realización de la tarea.

Esta métrica se compone de un total de 103 elementos, cuya puntuación se normaliza a uno. La fórmula para calcular la versatilidad total de un robot se describe mediante:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{103} w_l \cdot w_k \cdot w_j \cdot w_i \cdot s_i \tag{2.3.1}$$

En cuanto a la complejidad, se considera únicamente la complejidad mecánica del diseño, definida por el número de actuadores (N_A) y de articulaciones (N_J), mediante la siguiente ecuación:

$$C = N_A \cdot N_J \tag{2.3.2}$$

La Figura 2.34 muestra los valores límite superior de versatilidad frente a complejidad a los que tiende cada tipo de sistema de locomoción, incluyendo ruedas, orugas, extremidades, estructuras modulares e híbridas. Por su parte, la Figura 2.35 muestra una comparativa en la relación versatilidad–complejidad de 85 sistemas evaluados, principalmente en los dominios terrestres y escansoriales. Estas evaluaciones se llevaron a cabo por diversas personas para asegurar una consistencia en sus puntuaciones. Esto debido a valores subjetivos respecto a la información proporcionada en los artículos de revisión, así como material audiovisual disponible en algunos casos.

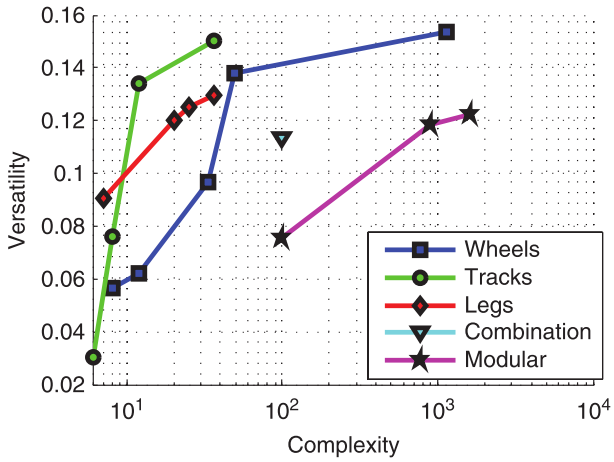


Figura 2.34: Gráfica de límite superior de versatilidad frente a complejidad categorizado por modo de locomoción [32].

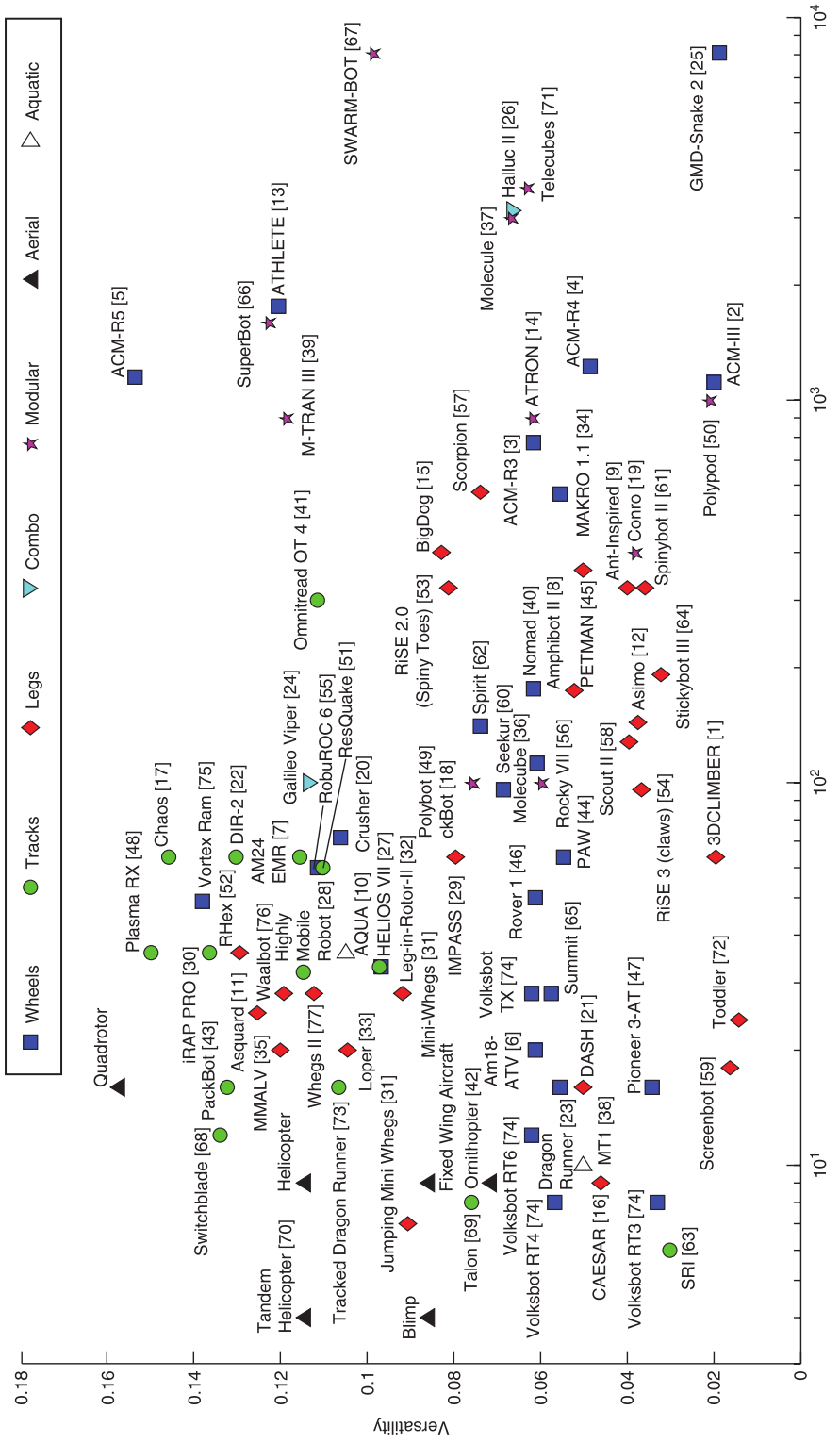


Figura 2.35: Gráfica comparativa entre versatilidad y complejidad de sistemas robóticos [32].

2.4. Empleo de robots en operaciones de búsqueda y rescate

El primer despliegue que se reconoce por haber empleado robots para aplicaciones de búsqueda y rescate fue durante el colapso del World Trade Center en Septiembre del 2001 [149]. En [4] se describen 34 despliegues de robots desde el 2001 hasta el 2013, de ellos solamente en 29 ocasiones se emplearon en el incidente, por lo cual, dicha literatura se centra en las características que favorecieron o impidieron la utilización de las plataformas desplegadas, así como de manera general los requerimientos que deberían tener los robots para tales aplicaciones. Así también, actualmente se han reportado despliegues en casos de terremoto, colapsos estructurales, incendios industriales y urbanos, así como inundaciones. Sin embargo, en estos casos se ha hecho un uso de manera integral de diversas plataformas terrestres, aéreas y submarinas, permitiendo desarrollar protocolos operativos e implementar tareas de mapeo 3D, inspección estructural y evaluación de riesgos [150–153].

En cuanto a revisiones del empleo de robots en tareas de búsqueda y rescate o como respuesta ante desastres, estas se han realizado en torno al análisis de características como: los grados de libertad, fuente de energía, manipulación, sistema de control y estructura de los robots [154]. Otros han analizado el funcionamiento de sistemas de control, planeado de trayectorias, percepción del entorno, cooperación entre robots. Esto en diversos robots diseñados para tales aplicaciones, pero empleados únicamente en competencias o en pruebas experimentales de laboratorio [155]. Otros más se han enfocado en los requerimientos de software y hardware [118, 156]. En [157] se menciona la integración de inteligencia artificial e internet de las cosas como un marco de trabajo para proponer áreas de mejora y aplicaciones futuras. Por su parte, la movilidad, flexibilidad y accesibilidad de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) ha mostrado ser un recurso inmediato para atención a desastres como huracanes, terremotos, deslaves e inundaciones, así como incendios forestales e industriales/estructurales, principalmente para tareas de búsqueda, recopilación de evidencias, análisis estructural, tareas tácticas, extinción de incendios [158–165]. La revisión más completa en cuanto a los diversos temas relacionados con la robótica de rescate como lo son las morfologías, tipos de locomoción, algoritmos de percepción y control, interfaces humano-robot, autonomía, así como presenta opiniones de expertos en dicha área acerca de las tendencias para el futuro se puede encontrar en [166].

Por lo cual, la literatura que reporte específicamente las métricas de desempeño en movilidad durante el despliegue e implementación de robots para tareas de búsqueda y rescate en situaciones reales es casi nula. Por el contrario, se han desarrollado proyectos y competencias de robótica en donde se centran en la implementación y evaluación de nuevos algoritmos para sensado, mapeo, manipulación y navegación. Una de las competencias más relevantes fue la DARPA Robotics Challenge (DRC), organizada entre 2012 y 2015. Esta competencia fue motivada por el desastre nuclear de Fukushima, Japón (2011) [167]. Su objetivo era desarrollar robots capaces de operar en entornos de desastre, enfrentando desafíos como:

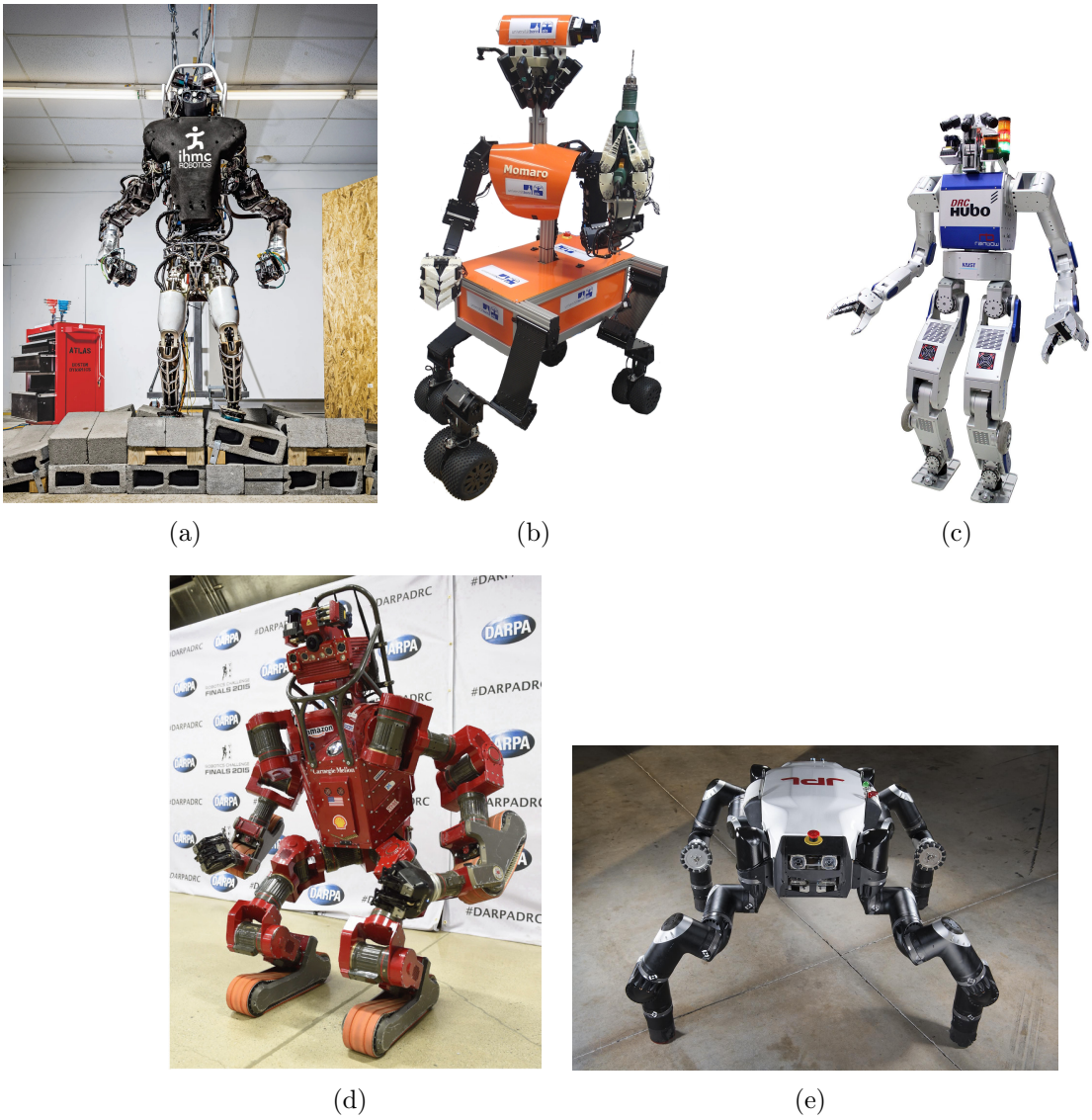
- Desplazamiento en terrenos no estructurados (escombros).

- Ascenso y descenso de escaleras y peldaños.
- Manipulación de vehículos, válvulas, herramientas y apertura de puertas.

Entre los robots más destacados y con diseños innovadores se enlistan los siguientes:

1. **ATLAS** (Boston Dynamics, IHMC Team) [168]: Es un robot humanoide bípedo con actuación hidráulica diseñado para movilidad en terrenos difíciles y manipulación avanzada. Su diseño se muestra en la Figura 2.36(a).
2. **Momaro** (NimbRo Rescue Team) [169]: Robot con locomoción híbrida compuesta por cuatro extremidades articuladas y en cuyos extremos finales presenta ruedas orientables de accionamiento directo para un movimiento omnidireccional. Además, incorpora dos brazos manipuladores con 7 grados de libertad. Su diseño se muestra en la Figura 2.36(b).
3. **DRC-Hubo+** (KAIST Team) [170]: Robot humanoide bípedo con capacidad de modificar su postura y arrodillarse para poder cambiar su modo de locomoción mediante las ruedas colocadas en sus pies y rodillas. Su diseño se muestra en la Figura 2.36(c).
4. **CHIMP** (Carnegie Mellon Team) [171]: Orugas motorizadas en extremidades superiores e inferiores. Puede desplazarse o reposar sobre extremidades inferiores mientras usa pinzas colocadas en sus extremidades superiores para manipulación. Su diseño se muestra en la Figura 2.36(d).
5. **RoboSimian** (JPL-NASA Team) [172]: Su estructura presenta cuatro extremidades articuladas, con locomoción no basada en cuadrúpedos convencionales, al retraer sus extremidades traseras puede apoyarse sobre un par de ruedas actuadas directamente localizadas en el borde de su chasis, así como asegurar su estabilidad estática mediante otras dos ruedas omnidireccionales colocadas entre sus eslabones de las extremidades traseras. Sus extremidades frontales pueden ser usados como brazos. Su diseño se muestra en la Figura 2.36(e).

Por su parte, la RoboCup Rescue [173] es una competencia dentro del evento RoboCup, la liga internacional de robótica, que busca probar y mejorar robots autónomos para la detección de víctimas en ambientes que simulan entornos de desastres, incentivando la transferencia tecnológica de los laboratorios al mundo real. En Japón, entre el 2014 al 2018 se llevó a cabo el Tough Robotics Challenge [174], un programa orientado a desarrollar robots más resistentes y capaces de operar en entornos extremos, con estructuras colapsadas, zonas de alta temperatura o contaminación química, capaces de atender las fases de respuesta a desastres, recuperación y prevención. Entre sus resultados se crearon robots bionspirados en forma de serpientes, perros de rescate cibernéticos, robots con extremidades, aéreos y de construcción, así como el estudio de nuevos materiales. Por su parte, el programa UAViators es una iniciativa internacional para estandarizar y coordinar el uso de drones en situaciones de desastre, proporcionando protocolos de operación y facilitando el intercambio de datos [175]. Por último, el proyecto ICARUS (*Integrated Components for Assisted Rescue and Unmanned Search operations*, por sus siglas en inglés) en Europa de 2012 a 2016 [176,177], fue un esfuerzo para integrar vehículos no tripulados (terrestres, aéreos y marítimos) en las operaciones de búsqueda y rescate, su



(a) (b) (c)

(d) (e)

Figura 2.36: Robots con diseño innovador empleados en la DARPA Robotics Challenge (DRC). (a) robot ATLAS de Boston Dynamics IHMC Team [168]; (b) robot Momaro de NimbRo Rescue Team [169]; (c) robot DRC-Hubo+ de KAIST Team [170]; (d) robot CHIMP de Carnegie Mellon Team [171]; (e) robot ROBOSIMIAN de JPL-NASA Team [172].

enfoque principal fue mejorar la autonomía de los robots, su interoperabilidad e integración con sistemas de comando y control para equipos de emergencia, todo esto a fín de aumentar el conocimiento de la situación y realizar operaciones más rápidas, seguras y eficientes. Otros proyectos con objetivos similares se pueden encontrar resumidos en [150].

Capítulo 3

Diseño y desarrollo de productos

El desarrollo de un prototipo es un proceso vital para la creación de un producto que satisfaga los requerimientos de diseño de un cliente o mercado. Se han propuesto diversos métodos de diseño con el objetivo de reducir el costo y el tiempo que implica el ciclo de diseño convencional (*diseñar-construir-evaluar*), sin embargo, el desarrollo de un prototipo físico no siempre es factible debido a restricciones en el tiempo y costo de manufactura, la cantidad de pruebas a realizar, así como las condiciones en las que se deben llevar a cabo las diversas pruebas. Por lo que en su lugar, el desarrollo de un prototipo virtual, es considerado como una solución viable en las etapas iterativas de rediseño.

A continuación, se presentan algunas definiciones clave que se mencionarán en las secciones siguientes [29]:

- **Prototipo**: Un primer modelo funcional a escala real de un nuevo tipo de producto o diseño de una construcción.
- **Virtual**: Semejante en características o efecto, pero no en forma real.
- **Realidad**: La calidad o hecho de ser real.
- **Prototipo virtual**: Una simulación basada en computadora de un prototipo de sistema o subsistema con un alto grado de realismo funcional que es comparable con su contraparte, un prototipo físico.

3.1. Ingeniería del diseño

Con el fin de resolver un problema o alguna necesidad mediante la creación de nuevos productos, diversos métodos de ingenería del diseño han sido propuestos para reducir los tiempos y/o costos que se generan en el desarrollo del proceso [27]. La metodología de Ingeniería Concurrente ha sido utilizada en el proceso de diseño de sistemas robóticos [21,26], así mismo, esta metodología ha servido de base para un nuevo paradigma denominado *e-Design* (Ingeniería de Diseño Asistido por Computadora) [31], el cual hace uso de herramientas computacionales

como: Diseño Asistido por Computadora (CAD, *Computer Aided Design*, por sus siglas en inglés), Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, *Computer Aided Engineering*, por sus siglas en inglés), Manufactura Asistida por Computadora (CAM, *Computer Aided Manufacturing*, por sus siglas en inglés), herramientas que han demostrado ser de gran utilidad durante el prototipado virtual. De manera general, el proceso de ingeniería del diseño puede ser dividido en distintas etapas [30]:

- Identificación de los requerimientos del cliente.
- Conversión de los requerimientos del cliente a especificaciones para el diseño del producto.
- Diseño de ingeniería.
- Prototipado del producto para la evaluación de conceptos.

Diversos métodos y herramientas se han propuesto para llevar a cabo las diferentes etapas de la ingeniería del diseño: Despliegue de la Función de Calidad (QFD, *Quality Function Deployment*, por sus siglas en inglés), generación de conceptos mediante lluvia de ideas, selección de los mejores conceptos de diseño mediante análisis costo-beneficio, evaluación y rediseño, diseño axiomático, entre otros [27]. Sin embargo, dentro de la generación de conceptos relacionados con diseños mecánicos y en específico con robots móviles autónomos, la mayoría se han generado mediante ingenio y experiencia. Es por eso que en [28], se propone una nueva metodología denominada "Mecha-Telligence Methodology (MTM)" la cual pretende asistir al diseñador, creando diseños simples y suficientes soluciones mecánicas para problemas con un alto grado de complejidad. Para esto se requiere tomar en consideración: las tareas del robot, su comportamiento, la morfología y análisis de el entorno, así como las restricciones físicas-morfológicas dentro del proceso de diseño. Así también, con la finalidad de obtener un prototipo en el cual su dinámica no complique demasiado la etapa de control, en [178] se proponen algunas directrices a tomar en cuenta en el desarrollo de un sistema mecánico: alineación de componentes, reducción de fricción, cancelación de fricción, cancelación de efecto cantilever, reducción del juego mecánico en engranes, así como una adecuada síntesis del mecanismo entre otros.

3.1.1. Definición del producto

La definición de un producto más allá del proceso de traducir las necesidades del cliente dentro de las especificaciones de diseño del producto, involucra la ingeniería concurrente de diversas actividades cómo: Identificación del cliente, identificación de las necesidades del cliente, definición del problema, diseño conceptual, diseño para ensamble (DFA), diseño para manufactura (DFM), y el prototipado del producto para evaluación de conceptos, entre otras actividades que permitan llevar por buen camino el éxito del producto.

El primer paso para el desarrollo de un producto es identificar claramente una oportunidad y conocer a los potenciales clientes. Una oportunidad en el contexto de desarrollo de productos es la idea o descripción temprana de un artículo nuevo, o una correspondencia inicial entre una

necesidad y una posible solución. En la Figura 3.1 se muestra una clasificación de 3 niveles u horizontes de oportunidad con base en dos dimensiones: 1) el conocimiento que se tiene de la solución o tecnología a implementar y 2) el conocimiento de la necesidad o mercado a atender. En síntesis, las oportunidades Horizonte 1 consisten en mejoras, extensiones, variantes y reducciones de costo de productos existentes en mercados existentes ya atendidos, y cuyo riesgo de abordaje es relativamente bajo; las oportunidades Horizonte 2 consisten ya sea en atender un mercado actual a través de una solución existente pero aún sin aplicación en dicho mercado, así como emplear soluciones existentes o sin aplicar dentro de un segmento de mercado no abordado, requiriendo un riesgo medio; por último, las oportunidades Horizonte 3 representan grandes retos en los cuales se exploran nuevos planteamientos y soluciones tanto para mercados nuevos como los ya existentes, creando así una nueva categoría de productos, involucrando un alto riesgo durante su desarrollo.

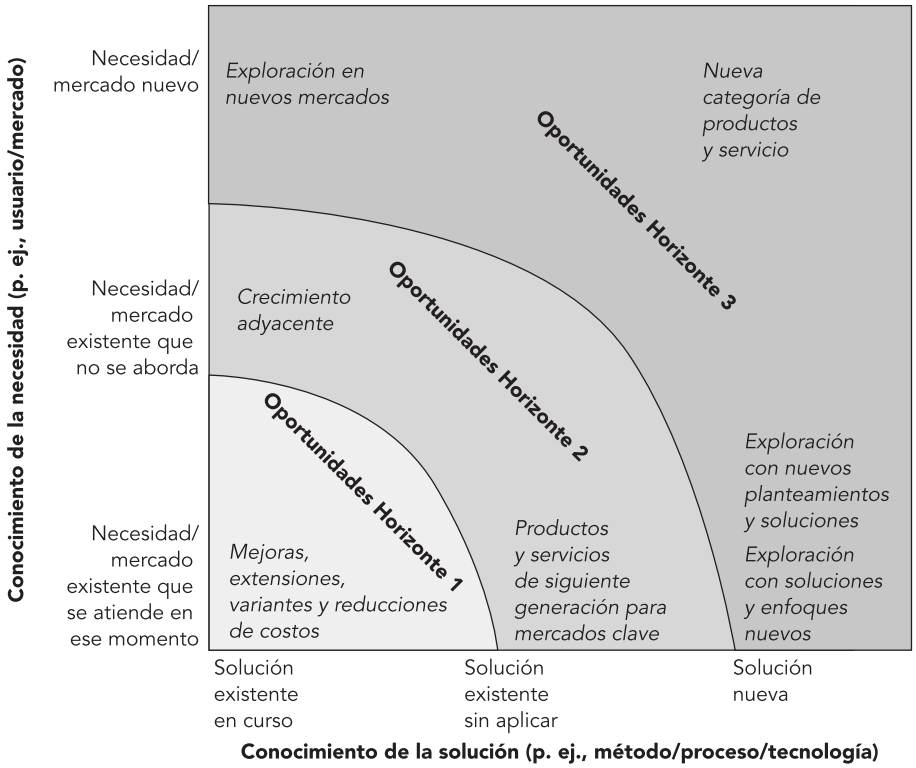


Figura 3.1: Tipos de oportunidades. Los horizontes 1, 2 y 3 representan los niveles crecientes del riesgo que reflejan diversos tipos de incertidumbre [179].

3.1.1.1. Despliegue de la Función de Calidad QFD

El QFD es relacionado comúnmente con "la voz de los clientes", o con "la casa de la calidad". QFD es un proceso que asegura que los deseos y requerimientos de los clientes sean traducidos en características técnicas. QFD utiliza un método gráfico en el que se expresan relaciones entre los requerimientos de los clientes y las características del diseño.

El desarrollo del QFD consta de cuatro matrices:

- **Casa de la calidad**: Relaciona los requerimientos del cliente con las características técnicas que pueden satisfacer dichos requerimientos.
- **Matriz de producto-proceso**: Relaciona cada una de las características técnicas con los procesos específicos que intervienen en su elaboración.
- **Matriz proceso-subproceso**: Relaciona cada uno de los procesos que aseguran el cumplimiento de las características técnicas con sus subprocesos.
- **Matriz de subproceso-función**: Determina en qué grado se están alcanzando los requerimientos del cliente de acuerdo al rendimiento de los subprocesos.

Beneficios

- Menor tiempo de desarrollo desde el concepto hasta la producción.
- Pocos cambios de ingeniería con el producto en producción.
- Diseño congruente con las necesidades y expectativas del cliente, a través de equipos multidisciplinarios.
- Traduce los requerimientos del cliente desde un lenguaje ambiguo a los requerimientos de diseño específicos para el desarrollo del producto y su manufactura.
- En la planeación de productos y procesos operativos, ayuda a disminuir, e incluso a eliminar, las iteraciones de rediseño que se realizan en los métodos tradicionales ya que incorpora desde el principio los diferentes enfoques que intervienen en la definición de las características de productos y procesos.

En ocasiones, únicamente se hace uso de la primer matriz o matriz de calidad, la cual enlista los requerimientos de los clientes "**qués**" o "atributos" comparándolos con las "características técnicas" "**cómos**", incluyendo en el caso de que haya otros competidores en el mercado, una comparativa con sus productos similares. Las expectativas y requerimientos de los clientes son recolectados idealmente mediante técnicas de investigación de mercados: entrevistas, encuestas, exposiciones, etc.

3.2. Herramientas para prototipado virtual

Dentro de las actividades en el desarrollo de un producto, el prototipado del producto es una actividad considerada como el cuello de botella del proceso, por lo cual, el uso de tecnologías de prototipado rápido y virtual permiten acelerar este proceso. La creación de un prototipo virtual a menudo comienza con un modelo sólido que define la geometría del producto mediante el uso de herramientas CAD. Este mismo modelo CAD es utilizado para otros análisis, incluyendo Análisis de Elemento Finito (FEA, *Finite Element Analysis*, por sus siglas en inglés), prototipado rápido, CAM, etc.

Parametrizado de modelos CAD Un modelo parametrizado del producto en CAD permite explorar alternativas de diseño en la etapa de diseño del producto. El modelo CAD es parametrizado mediante la definición de las dimensiones que rigen la geometría de las piezas a través de características geométricas y mediante el establecimiento de relaciones entre dimensiones de las piezas. Mediante estas dimensiones y relaciones, se pueden llevar a cabo cambios simplemente modificando unos pocos valores dimensionales y propagarse automáticamente en todo el modelo CAD.

Análisis de modelos El análisis estructural del producto es llevado a cabo mediante el análisis de elementos finitos (FEA) mediante herramientas CAE. Además de la geometría estructural, cargas, condiciones de contorno y propiedades de material son convenientemente definidas en el modelo CAD. Con estos parámetros, el cálculo de momentos de inercia, propiedades de masa, análisis estáticos y dinámicos (lineales y no lineales), y análisis de fatiga pueden ser llevados a cabo antes de su fabricación.

Simulación de movimientos La generación de modelos de simulación de movimientos consiste en reagrupar las piezas y subconjuntos del sistema mecánico en CAD como cuerpos y frecuentemente introduciendo componentes no-CAD para apoyar una dinámica multi cuerpo. Esto mediante la definición de las articulaciones o conexiones de fuerza entre los diversos cuerpos, incluyendo el tipo de articulación y las coordenadas de referencia. Un error común en la creación de modelos de simulación de movimientos es la selección de articulaciones inapropiadas para conectar cuerpos, lo que genera un modelo inválido o inexacto que no simula el comportamiento real del sistema mecánico.

3.2.1. Herramientas computacionales para prototipado virtual

SolidWorks® En la industria de CAD, el programa computacional SolidWorks (Figura 3.2), es una solución de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable.



Figura 3.2: Pantalla de inicio del programa SolidWorks® 2015.

SolidWorks se caracteriza por su entorno intuitivo y por disponer de herramientas de diseño fáciles de utilizar. Todo integrado en un único programa de diseño con más de 45 aplicaciones complementarias para facilitar el desarrollo de proyectos. La característica que hace que SolidWorks sea una herramienta competitiva, ágil y versátil es su capacidad de ser paramétrico, variacional y asociativo, además de usar las Funciones Geométricas Inteligentes y emplear un Gestor de Diseño (FeatureManager) que permite visualizar, editar, eliminar y actualizar cualquier operación realizada en una pieza de forma bidireccional entre todos los documentos asociados.

ADAMS/View® En la industria de CAE, el programa computacional ADAMS (*Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems*, por su contracción en inglés), cómo se muestra en la Figura 3.3, es el más utilizado en el análisis de movimiento y dinámica de sistemas multicuerpo.



Figura 3.3: Pantalla de inicio del programa ADAMS/view® 2015.

ADAMS mejora la eficiencia de la ingeniería y reduce los costes de desarrollo de productos al permitir la validación temprana del diseño a nivel sistema. Los ingenieros pueden evaluar y manejar las complejas interacciones entre disciplinas, incluyendo el movimiento, estructuras, accionamientos y controles para optimizar mejor el diseño de productos para el rendimiento, la seguridad y el confort.

Utilizando la tecnología de dinámica de sistemas multicuerpo (colección de cuerpos rígidos unidos entre sí mediante elementos restrictivos), ADAMS ejecuta dinámicas no lineales en una fracción del tiempo requerido por las soluciones mediante FEA. Cargas y fuerzas calculadas por simulaciones de ADAMS mejoran la precisión de FEA, proporcionando una mejor evaluación de la forma en que varían a lo largo de una amplia gama de movimientos y entornos de operación. Otra de las ventajas de ADAMS/View® es que durante la ejecución de la simulación del modelo, se realiza el cálculo de todo tipo de resultados, por lo cual, posteriormente se pueden obtener una diversidad de datos del modelo (gráficas, tablas, animaciones, etc.).

Capítulo 4

Diseño del robot

En este capítulo se presenta la definición del producto y la generación de alternativas de diseño, las cuales serán posteriormente evaluadas y refinadas hasta alcanzar un diseño detallado.

4.1. Definición del producto

Tras una revisión de la literatura, se describen a continuación los elementos clave del proceso de ingeniería de diseño que guiaron el desarrollo de este proyecto:

Descripción:

- Prototipo virtual de un robot móvil con sistema de locomoción híbrido, orientado a aplicaciones de búsqueda y rescate en entornos urbanos no estructurados.

Propósito/Objetivo:

- Desarrollar y evaluar un prototipo virtual de robot móvil con un sistema de locomoción híbrido que le permita adaptarse a diversos entornos no estructurados, tanto terrestres como aéreos, mejorando así su capacidad de movilidad para aplicaciones inmediatas en misiones de búsqueda y rescate urbano.

Identificación del cliente y tipo de oportunidad: Con base en la literatura revisada, los clientes potenciales de este desarrollo son:

- Equipos de búsqueda y rescate urbano.
- Investigadores en el área de robótica móvil.

Conforme al espacio de horizontes de oportunidad mostrado en la Figura 3.1, se propone atender el mercado de robots orientados a aplicaciones de búsqueda y rescate urbano. Aunque este mercado ya cuenta con soluciones disponibles, muchas de ellas aún presentan limitaciones

significativas en cuanto a movilidad, como se detalla en [4]. Además, si bien existen diversos prototipos con sistemas de locomoción híbridos, no todos han sido diseñados específicamente para operar en entornos urbanos no estructurados con fines de búsqueda y rescate.

En este contexto, el presente proyecto se establece como una oportunidad de Horizonte 2, lo que representa un nivel de riesgo intermedio. No obstante, debido a la incorporación de nuevos enfoques en el diseño y planteamientos de soluciones, existe la posibilidad de transitar hacia una oportunidad de Horizonte 3, asociada a un riesgo tecnológico más elevado.

- Oportunidad Horizonte 2-3 con nivel de riesgo medio-alto.

Identificación de los requerimientos del cliente: Los requerimientos de los clientes potenciales, definidos a partir de la revisión de literatura especializada en el desarrollo de robots móviles para búsqueda y rescate urbano [3, 4, 107, 111, 112, 114], se resumen a continuación:

- **Alta movilidad**: capacidad de desplazamiento y maniobrabilidad del robot en entornos de desastre, incluyendo superficies irregulares, escaleras, rampas inclinadas, rutas no convencionales, y superación o evasión de obstáculos.
- **Versatilidad**: capacidad de adaptación para operar y transitar eficazmente entre distintos tipos de terreno o ambientes.
- **Tracción adecuada**: habilidad para mantener contacto constante con el suelo en terrenos con irregularidades.
- **Robustez estructural**: resistencia mecánica ante condiciones físicas derivadas de desastres naturales o de origen antrópico.
- **Estructura sellada/hermética**: protección contra agentes contaminantes presentes en los entornos de operación.
- **Tiempo de operación contínua**: suficiente para completar las tareas asignadas.
- **Retroalimentación del entorno**: disponibilidad de datos del entorno para navegación, mapeo o toma de decisiones.
- **Facilidad de mantenimiento**: diseño que facilite reparaciones rápidas en caso de fallas.
- **Capacidad incremental de hardware**: posibilidad de integrar elementos adicionales como tarjetas de control, sensores, cámaras o actuadores según el tipo de misión.

Restricciones de diseño: A continuación, se presentan las restricciones técnicas establecidas con base en literatura especializada [3, 4, 6, 149] y criterios propios del proyecto:

- Operación híbrida en entornos terrestres y aéreos.
- Funcionalidad orientada a tareas relacionadas con movilidad, como:
  - Búsqueda

    - Reconocimiento y mapeo
    - Ampliación de cobertura en comunicaciones.

- Dimensiones compatibles con la categoría *man-packable*: máximo 90 x 90 x 60 cm, conforme al promedio de las distancias laterales mínimas de los aparatos de medición propuestas por la ASTM (60-120 cm).
- Peso máximo de 15 kg, de acuerdo con el artículo 8.5, inciso e de la NOM-006-STPS-2017 [180].
- Capacidad de carga ligera de 2 kg, incluida en el peso máximo.
- Estructuras rígidas, con articulaciones que permitan flexibilidad de movimiento, sin adoptar un enfoque de robótica blanda ("soft robots").
- Autonomía operativa entre 15 y 30 minutos, orientado a la fase inicial de búsqueda.
- Velocidad máxima de desplazamiento: 0.5 m/s.
- Control mediante teleoperación.
- Tiempo total de desarrollo y pruebas de 6 meses.
- Resultados limitados por las capacidades de software-hardware utilizados.
- Consumo energético moderado.
- Costo reducido en comparación con la adquisición de múltiples robots especializados para diversos entornos.

Requerimientos funcionales del producto: A partir del análisis de los requerimientos del cliente, de analogías con proyectos similares y de una lluvia de ideas, se definen los siguientes requerimientos funcionales que deberá cumplir el robot:

- Sistema de locomoción híbrido (capaz de operar tanto en tierra como en aire).
- Sistema de acoplamiento para transición entre modos de locomoción.
- Sistema de suspensión que asegure tracción constante sobre el terreno.
- Sistema de ajuste de altura para adaptar el perfil del robot al entorno.
- Sistema de comunicación remota para control y transmisión de datos.
- Sistema electrónico y de control especializado para tareas robóticas.
- Estabilidad estática en modo terrestre.
- Estructura simétrica para favorecer el equilibrio, reconfiguración, movimiento omnidireccional e inversión (volcado) de la estructura.

- Fuente de alimentación portátil y adecuada para misiones de corta duración.
- Protección hermética contra sólidos y partículas en sensores, actuadores y estructura.
- Reconfiguración independiente y autónoma de la morfología del robot.
- Materiales ligeros, resistentes y no corrosivos.

Casa de la calidad: En la Figura 4.1 se presenta la primera matriz conocida como Casa de la Calidad, correspondiente a la metodología QFD aplicada al diseño del producto. Esta herramienta permite evaluar en qué medida los requerimientos funcionales definidos satisfacen las necesidades del cliente identificadas previamente.

En este caso, no se realiza una comparación directa con productos existentes debido a la escasa disponibilidad de información detallada sobre prototipos similares utilizados en operaciones de búsqueda y rescate urbano. En particular, no se cuenta con registros documentados ni hojas de evaluación estandarizadas por parte de la ASTM relacionadas con robots de locomoción híbrida (terrestre y aérea).

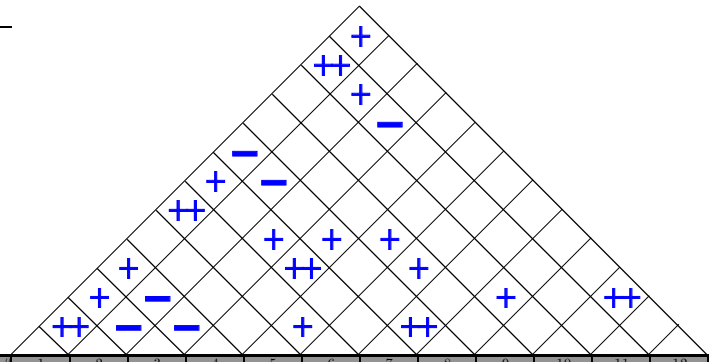
Un aspecto relevante de la matriz es que, con excepción del requerimiento de estabilidad estática, todos los requerimientos funcionales muestran una fuerte relación con al menos un requerimiento del cliente. Otro aspecto a destacar es que el sistema de comunicación remota se vincula exclusivamente con el requerimiento de retroalimentación del entorno, mientras que el sistema de locomoción híbrido y la estructura simétrica presentan relación directa con seis requerimientos del cliente.

Los pesos relativos obtenidos permiten priorizar los requerimientos funcionales en el siguiente orden de atención:

1. Sistema de locomoción híbrido
2. Estructura simétrica
3. Sistema de ajuste de altura
4. Materiales ligeros, resistentes y no corrosivos
5. Sistema de acoplamiento de locomoción
6. Reconfiguración independiente y autónoma
7. Estructura, sensores y actuadores herméticos
8. Sistema de suspensión
9. Sistema electrónico y de control especializado
10. Estabilidad estática en modo terrestre
11. Fuente de alimentación portátil
12. Sistema de comunicación remota

Title: Casa de Calidad Prototipo Virtual Robot Móvil
Author: Rafael Adrian García García
Date: 20/06/2016
Notes:

Legend		
Θ	Strong Relationship	9
O	Moderate Relationship	3
▲	Weak Relationship	1
++	Strong Positive Correlation	
+	Positive Correlation	
−	Negative Correlation	
▼	Strong Negative Correlation	
▼	Objective Is To Minimize	
▲	Objective Is To Maximize	
x	Objective Is To Hit Target	



Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight /Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") / Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	1 Sistema de locomoción híbrido	2 Sistema de acoplamiento de locomoción	3 Sistema de suspensión	4 Sistema de ajuste de altura	5 Sistema de comunicación remota	6 Sistema electrónico/control especializado	7 Estabilidad estática en modo terrestre	8 Estructura simétrica	9 Fuente de alimentación portátil	10 Estructura,sensores/actuadores herméticos	11 Reconfigurabilidad independiente/autónoma	12 Materiales ligeros, resistentes y no corrosivos
				Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)	x	x	▲	▲				x		▲	x	▲
1	9	15.8	9.0	Alta movilidad	Θ	Θ	O	Θ		O	O	Θ	O	▲	Θ	O
2	9	15.8	9.0	Versatilidad	Θ	Θ	O	Θ			O	Θ		O	Θ	O
3	9	15.8	9.0	Tracción	▲		Θ	▲			O					
4	9	10.5	6.0	Robustez estructural	▲									Θ		Θ
5	9	10.5	6.0	Estructura hermética								▲		Θ		Θ
6	9	10.5	6.0	Tiempo de operación contínua	▲					O			Θ			
7	9	10.5	6.0	Retroalimentación del entorno					Θ	O		▲				
8	3	5.3	3.0	Fácil mantenimiento y reparación.								▲		O		O
9	9	5.3	3.0	Capacidad incremental de hardware						Θ		▲				
10																
				Target or Limit Value	2-terrestre/aéreo	Mecanismo independiente	Aseguramiento de contacto con el suelo	Hasta dos veces la altura del robot	Rango de alcance 100m-1km	Sistema operativo a bordo	Mínimo 3 puntos de contacto	Estructura cuadrada/redonda	20Ah	Protección IP65 mínimo	Teleoperado o mediante información abordo	plásticos/elastómeros/aleaciones
				Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	10	8	8	8	3	3	6	4	3	6	8	6
				Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	3	9	9	9	9	9
				Weight /Importance	321.1	284.2	236.8	300.0	94.7	157.9	142.1	315.8	142.1	268.4	284.2	300.0
				Relative Weight	11.3	10.0	8.3	10.5	3.3	5.5	5.0	11.1	5.0	9.4	10.0	10.5

Figura 4.1: Matriz de calidad QFD que relaciona que tanto los requerimientos funcionales satisfacen los requerimientos del cliente, así como indica los requerimientos funcionales primordiales a trabajar.

4.2. Desarrollo del producto

En esta sección se desarrolla el concepto de solución para el diseño del prototipo virtual de robot móvil con sistema de locomoción híbrida. Dado que 9 de los 12 requerimientos funcionales están relacionados con el sistema mecánico, se puso especial atención en la generación y evaluación de alternativas específicas para dicho sistema, priorizando el desarrollo conforme a la jerarquía obtenida de cada requerimiento.

Como punto de partida, se realizó una descomposición funcional de los sistemas mecánico y electrónico. Aunque la configuración mecánica de un robot móvil depende de su entorno operativo y aplicación, generalmente está conformada por los subsistemas de locomoción, actuación, dirección, transmisión, articulación y suspensión. Adicionalmente, los requerimientos funcionales indican la necesidad de incluir mecanismos de ajuste de altura, desacoplamiento y reconfiguración. Sin embargo, dado que estos últimos tienen como propósito permitir un movimiento relativo entre componentes, se integran conceptualmente dentro del subsistema de articulación.

Por otro lado, los subsistemas de actuación, dirección y transmisión se consideran dependientes del tipo de locomoción implementado, por lo que se integran como elementos condicionales dentro de la selección entre las alternativas de diseño. En cuanto al sistema electrónico, este se compone de los subsistemas de alimentación, adquisición de datos, procesamiento y control, así como comunicación. La Figura 4.2 muestra los principales sistemas y subsistemas que conforman el prototipo propuesto.

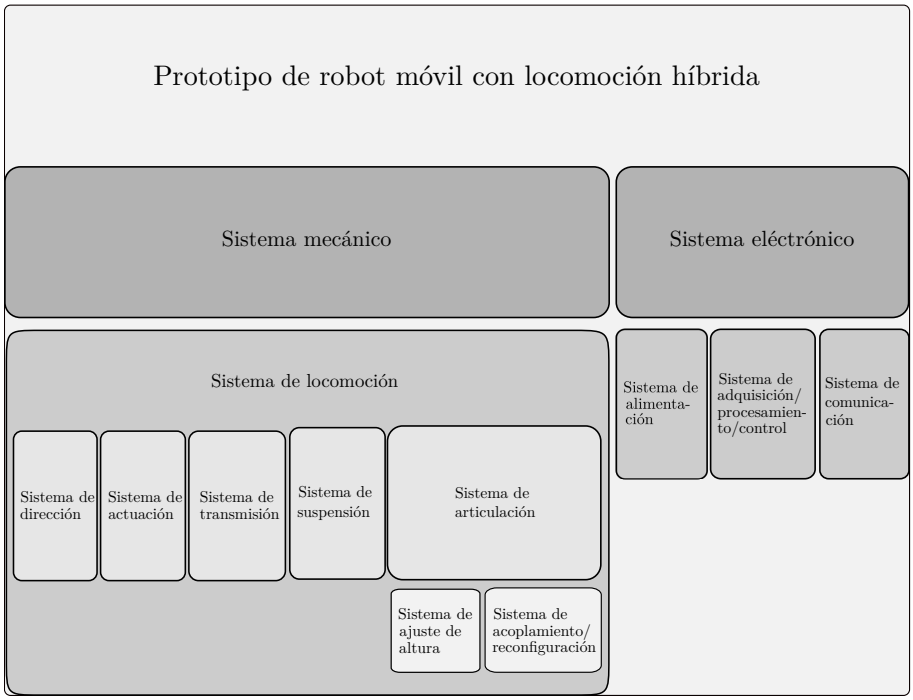


Figura 4.2: Principales sistemas y subsistemas del robot móvil.

4.2.1. Diseño del sistema mecánico

El desarrollo inicia con la descomposición funcional del sistema de locomoción híbrida, dado que constituye el requerimiento funcional prioritario y abarca la mayoría de los requerimientos mecánicos asociados. La Tabla 4.1 muestra dicha descomposición funcional, junto con las características clave y las alternativas de solución consideradas para su posterior evaluación.

4.2.1.1. Locomoción terrestre: Sistema de tracción y dirección

La Figura 4.3 muestra las alternativas de tracción y dirección consideradas para el sistema de locomoción terrestre del robot móvil. Inicialmente, con base en el análisis comparativo de los sistemas presentados en la Tabla 2.2, se descartaron las configuraciones híbridas terrestres, ya que el objetivo es implementar al menos dos sistemas de locomoción independientes: uno terrestre y otro aéreo. Por tanto, se consideraron únicamente las opciones de ruedas, orugas y extremidades por separado.

Debido a las restricciones de peso del prototipo, se descartó el uso de orugas, dado el elevado número de componentes mecánicos que requieren y su limitada capacidad de desplazamiento omnidireccional. Si bien las extremidades ofrecen versatilidad en terrenos irregulares, su alta complejidad mecánica y de control motivó su descarte en esta fase de diseño.

La locomoción por ruedas, en cambio, ofrece alta eficiencia energética y configuraciones con buena maniobrabilidad. Diversos estudios [181–184] comparan distintos tipos de ruedas con capacidad omnidireccional, como las ruedas omnidireccionales universales (omni-wheel), mecanum, orientables actuadas, ortogonales, y de bola o esfera. De estas, las ruedas orientables actuadas, ortogonales y de esfera tienden a ser voluminosas y mecánicamente complejas. En contraste, las ruedas omni-wheel y mecanum se caracterizan por un diseño compacto, disponibilidad comercial y capacidad holonómica. No obstante, presentan contacto discontínuo con el suelo debido a su huella de rodadura y bajo desempeño en superficies irregulares o suaves.

A pesar de estas características, estudios como [185] han demostrado que las ruedas mecanum pueden operar en terrenos irregulares y suaves, como los utilizados en exploración planetaria. Adicionalmente, en [186] se proponen mejoras al diseño, como rodillos segmentados en dos o tres partes y montados de forma central para evitar interferencias entre el borde del rin y superficies inclinadas, así como mecanismos que permitan ajustar la orientación de los rodillos entre 0° y 135°, o bloquearlos durante movimientos hacia adelante y atrás para reducir pérdidas de energía. Otras investigaciones [187] proponen variaciones en la geometría de las ruedas mecanum, permitiendo superar obstáculos con alturas de entre el 35 % y el 75 % del diámetro de la rueda en movimientos laterales. Estos conceptos de rueda se muestran en la Figura 4.4. A su vez, en estudios adicionales [188–190] incorporan sistemas de suspensión y mejoras en la relación entre el diámetro, número de rodillos y curvatura de la rueda, lo que aumenta el contacto continuo con el suelo y reduce vibraciones.

Tabla 4.1: Descomposición funcional del sistema de locomoción del robot.

Requerimiento Funcional	**Sub-funciones primarias**	**Sub-funciones secundarias**	**Sub-funciones terciarias**	**Características**	**Alternativas generales de solución**	**Alternativas específicas de solución**
Sistema de locomoción híbrido	Sistema de locomoción terrestre	Proveer un alto grado de maniobrabilidad	Proveer tracción y dirección	Tracción y dirección en ejes independientes	▪ Configuración Ackerman ▪ Configuración triciclo	Rueda convencional
				Tracción y dirección en un mismo eje	▪ Configuración diferencial ▪ Configuración síncrona	▪ Rueda convencional ▪ Rueda orientable (castor)
				Tracción y dirección sobre todos los ejes	▪ Orugas ▪ Ruedas omnidireccionales ▪ Extremidades	▪ Correa ▪ Cadena ▪ Eslabones ▪ Rueda omnidireccional–omniwheel ángulo 90° ▪ Rueda omnidireccional–mecanum ángulo 45° ▪ Rueda esférica ▪ Rueda ortogonal
			Evadir, superar o atravesar obstáculos	Ajustar altura	Eslabones articulados	▪ Mecanismo barras ▪ Eslabones articulados ▪ Actuador directo
			Adaptarse a diversos entornos	Reconfiguración de locomoción	*Dirigirse a sistema de acoplamiento–reconfiguración*	
		Asegurar contacto continuo con el suelo	Asegurar la estabilidad	Estabilidad estática	Mecanismo con 3 puntos de contacto como mínimo	Arreglo triangular

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 4.1

Requerimiento Funcional	**Sub-funciones primarias**	**Sub-funciones secundarias**	**Sub-funciones terciarias**	**Características**	**Alternativas generales de solución**	**Alternativas específicas de solución**
				Estabilidad dinámica	Mecanismo con más de 3 puntos de contacto	▪ Suspensión resorte–amortiguador ▪ Suspensión articulada
			Absorber las irregularidades del suelo	Suspensión	▪ Activa ▪ Semipasiva ▪ Pasiva	▪ Actuador neumático ▪ Actuador hidráulico ▪ Actuador eléctrico ▪ Actuador electromagnético ▪ Amortiguador magnetorreológico ▪ Amortiguador electrorreológico ▪ Amortiguador de fricción seca ▪ Suspensión resorte–amortiguador ▪ Suspensión articulada
	Sistema de locomoción aérea	Generar empuje para despegue vertical		Propulsión	Reactores	▪ Turbina de gas ▪ Motor de reacción ▪ Propulsor iónico
				Rotores	▪ Simple ▪ Birotor ▪ Multirotor	▪ Helicóptero ▪ Rotores tandem ▪ Cuadricóptero ▪ Hexacóptero
		Generar orientación		Rotación de alas–hélices		▪ Rotor de cola ▪ Convertiplano ▪ Giroplano

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 4.1

Requerimiento Funcional	**Sub-funciones primarias**	**Sub-funciones secundarias**	**Sub-funciones terciarias**	**CaracterísticasAlternativas generales de solución**	**Alternativas específicas de solución**
				Velocidad diferencial	Multirotor

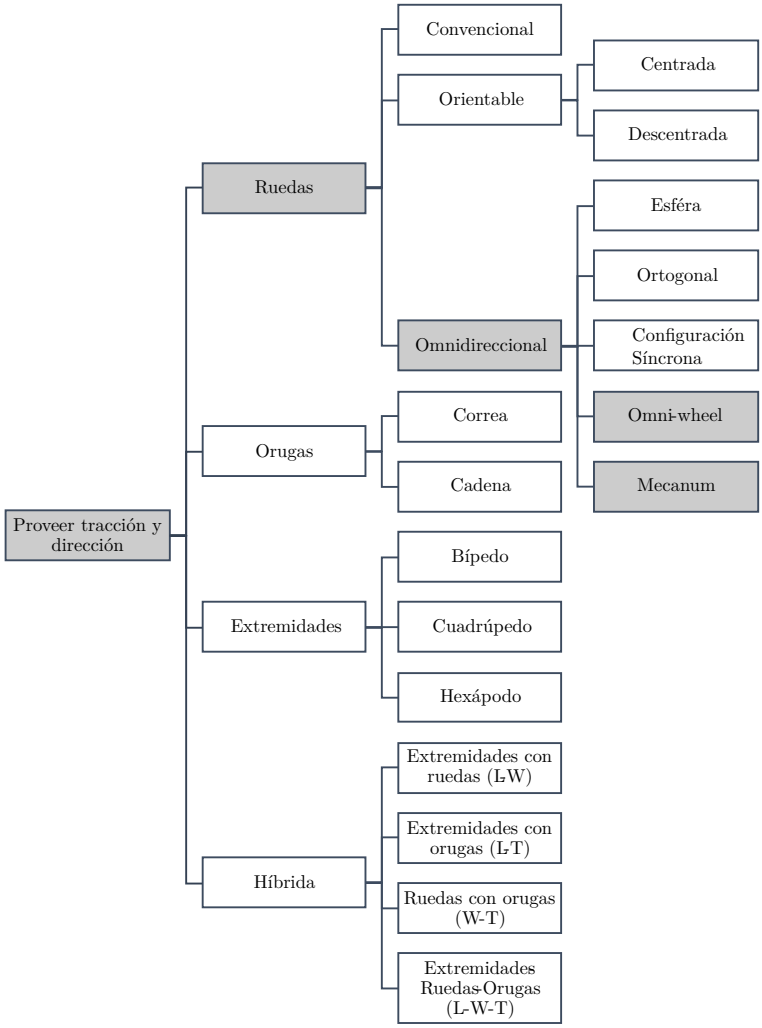


Figura 4.3: Árbol de clasificación de conceptos para la locomocion terrestre, resaltando las alternativas seleccionadas para su evaluación.

En caso de que las condiciones del terreno no sean adecuadas para las ruedas mecanum u omni-wheel, el sistema puede reconfigurarse hacia el modo aéreo como estrategia de movilidad. Por lo tanto, se seleccionan ambas configuraciones (omni-wheel y mecanum) como base para las alternativas de solución en el sistema de locomoción terrestre.

Generación de alternativas

La Figura 4.5(a) muestra el primer diseño de la rueda realizado en SolidWorks. Se trata de una rueda tipo omni-wheel con doble marco y ocho rodillos periféricos dispuestos de forma desfasada, lo que mejora la capacidad de carga y el contacto con el suelo. El diseño inicial presenta un diámetro de 200 mm y un ancho de 30 mm. Posteriormente, como se muestra en la Figura 4.5(b), se diseñó y ensambló el rin de soporte, incrementando a 12 el número de rodillos para optimizar el contacto con el terreno y reducir su tamaño. Las dimensiones del

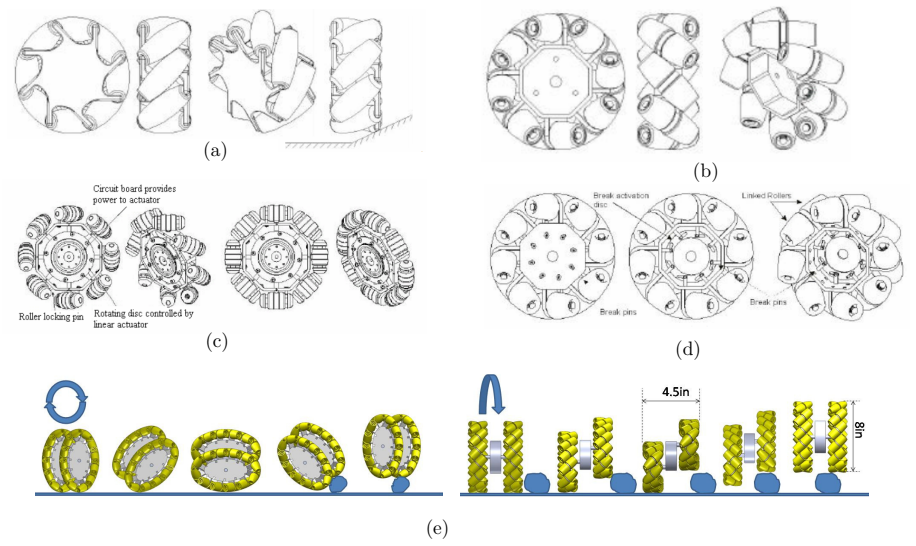


Figura 4.4: Variaciones de la rueda mecanum; a) rueda mecanum convencional, b) rueda mecanum con soporte y montaje central, c) rueda mecanum con orientación de rodillos, d) rueda mecanum con bloqueo de rodillos, e) modificación geométrica para superar pequeños obstáculos.



(a) (b) (c)

Figura 4.5: Primer prototipo de rueda tipo omni-wheel; (a) doble rueda omniwheel sin marco de 8 rodillos y engrane interno; (b) doble rueda omni-wheel sin marco de 12 rodillos con rin de soporte; (c) doble rueda omni-wheel sin marco de 12 rodillos con rin de soporte transparente;

rodillo se muestran en la Figura 4.6.

El diseño incorpora un interior hueco en los rodillos para implementar el concepto de rueda sin marco (*hubless*) [191], inspirado en los prototipos mostrados en la Figura 4.7. Esta configuración permite reducir tanto la masa total como la inercia rotacional, mientras que el engrane interno incrementa el par de torsión transmitido por el actuador.

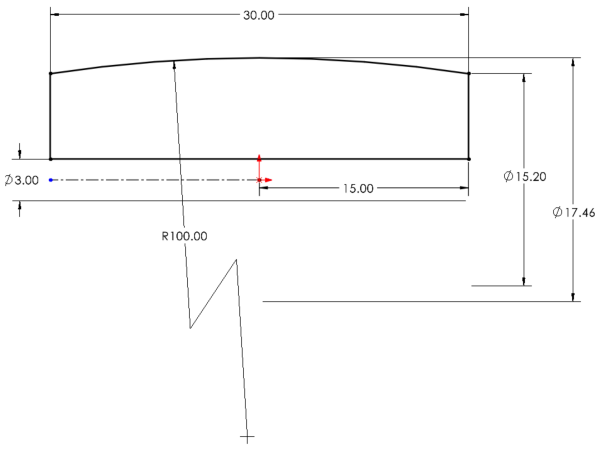


Figura 4.6: Dimensiones en mm del rodillo de la rueda omniwheel con 12 rodillos.

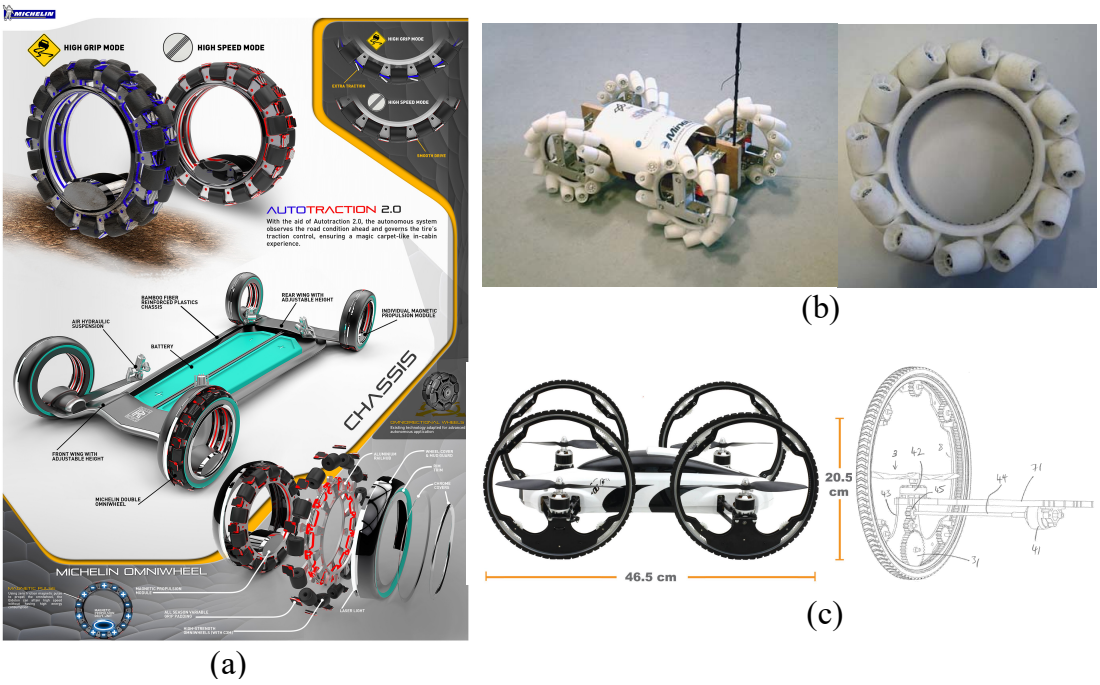
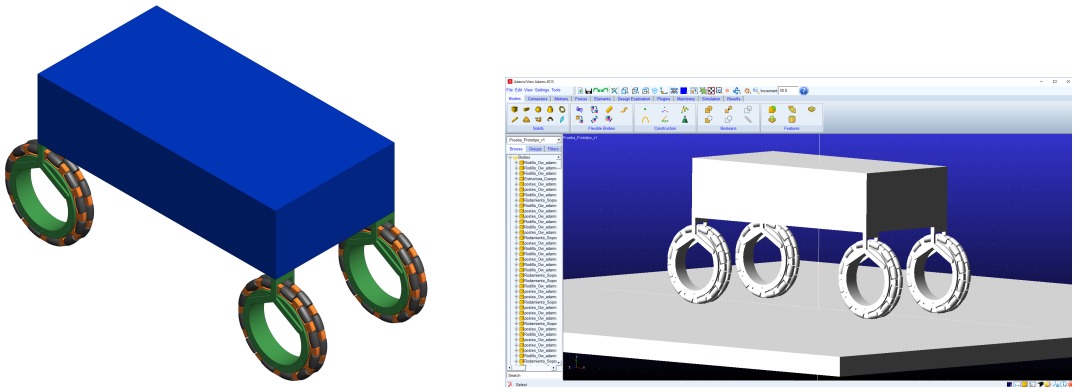


Figura 4.7: Prototipos de inspiración para el empleo de ruedas sin marco.

A continuación, se realizó un ensamble preliminar en SolidWorks con cuatro ruedas y una base genérica de chasis (Figura 4.8(a)), el cual fue exportado al software de simulación ADAMS/View (Figura 4.8(b)). Durante las pruebas de movilidad, sin considerar los subsistemas de actuación y transmisión, se observó deslizamiento horizontal como consecuencia de la orientación de los rodillos. Para corregir este efecto, se determinó que las ruedas debían colocarse a 45° en las esquinas del chasis. Sin embargo, dicha configuración podría interferir con los sistemas de suspensión y reconfiguración, por lo que esta alternativa fue descartada, optándose en su lugar por un diseño basado en ruedas tipo mecanum.



(a) (b)

Figura 4.8: (a) Ensamble en Solidworks del prototipo de rueda como tracción y dirección del robot; (b) Ensamble en Adams View del prototipo de rueda como tracción y dirección del robot.

En este nuevo enfoque, el diseño de los rodillos adquiere relevancia, ya que definen la geometría circular de la rueda y su desempeño en términos de movilidad y control [192]. Existe un compromiso entre el diámetro total de la rueda y el número mínimo de rodillos requeridos. Como se muestra en la Figura 4.9(a), cuanto mayor sea la distancia del eje del rodillo al centro de rotación de la rueda, menor será el tamaño de los rodillos y el ancho de la rueda, aunque se requerirá un mayor número de rodillos. Además, para garantizar un contacto continuo con el suelo, el número de rodillos para un diámetro específico de rueda, definen la longitud y el diámetro en los extremos de los mismos (Figura 4.9(b)).

Otro factor relevante es el tipo de montaje de los rodillos, que puede realizarse en los extremos o en la parte central del rodillo, como se ilustra en la Figura 4.9(c).

Diversos métodos han sido propuestos para definir el perfil de los rodillos [181, 190, 193–198], incluyendo aproximaciones simples al diámetro de la rueda, cortes diagonales a 45° de la rueda, elipse paramétrica derivada del corte, y trayectorias helicoidales, tórica o por optimización paramétrica. Para este primer diseño, se empleó el método basado en el corte diagonal desde el plano axial de la rueda (Figura 4.10). El diseño conceptual resultante, mostrado en la Figura 4.11, mantiene el enfoque de rueda sin marco, incluye un rin de soporte y 24 rodillos con montaje central, tal como se recomienda en [186] para mejorar el desempeño en superficies inclinadas. Finalmente, la Figura 4.12 muestra una vista frontal de la rueda, en la que se aprecia con mayor detalle el perfil circular obtenido. Para el diseño final, se plantea utilizar el método de elipse parametrizada derivada del corte diagonal, con el fin de mejorar el control dimensional del rodillo.

Las dimensiones para este diseño de rueda son:

- Diámetro del contorno de la rueda: 200 mm
- Diámetro interno de la rueda: 155 mm

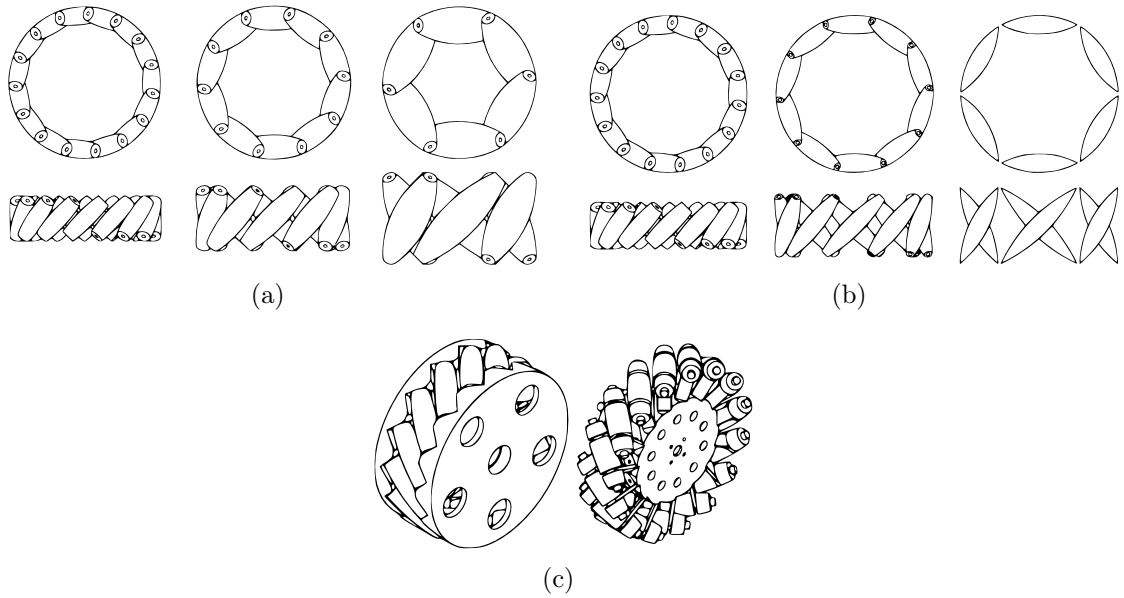


Figura 4.9: Influencia de los rodillos en el diseño de ruedas mecanum [192]. (a) distancia entre el eje de los rodillos al eje central de la rueda;(b) longitud y diámetro de extremos conforme al número de rodillos para un mismo diámetro de rueda; (c) montaje en extremos o parte central.

- Diámetro interno del rin: 132 mm
- Ancho total de la rueda: 40 mm
- Ancho de la rueda sin rodillos: 35 mm
- Número de dientes del engrane interno: 150
- Diámetro de paso: 150 mm
- Módulo: 1
- Ángulo de presión de los dientes del engrane interno: 20°
- Ancho del engrane interno: 10 mm
- Número de rodillos: 24
- Ángulo de orientación de los rodillos: 45°.

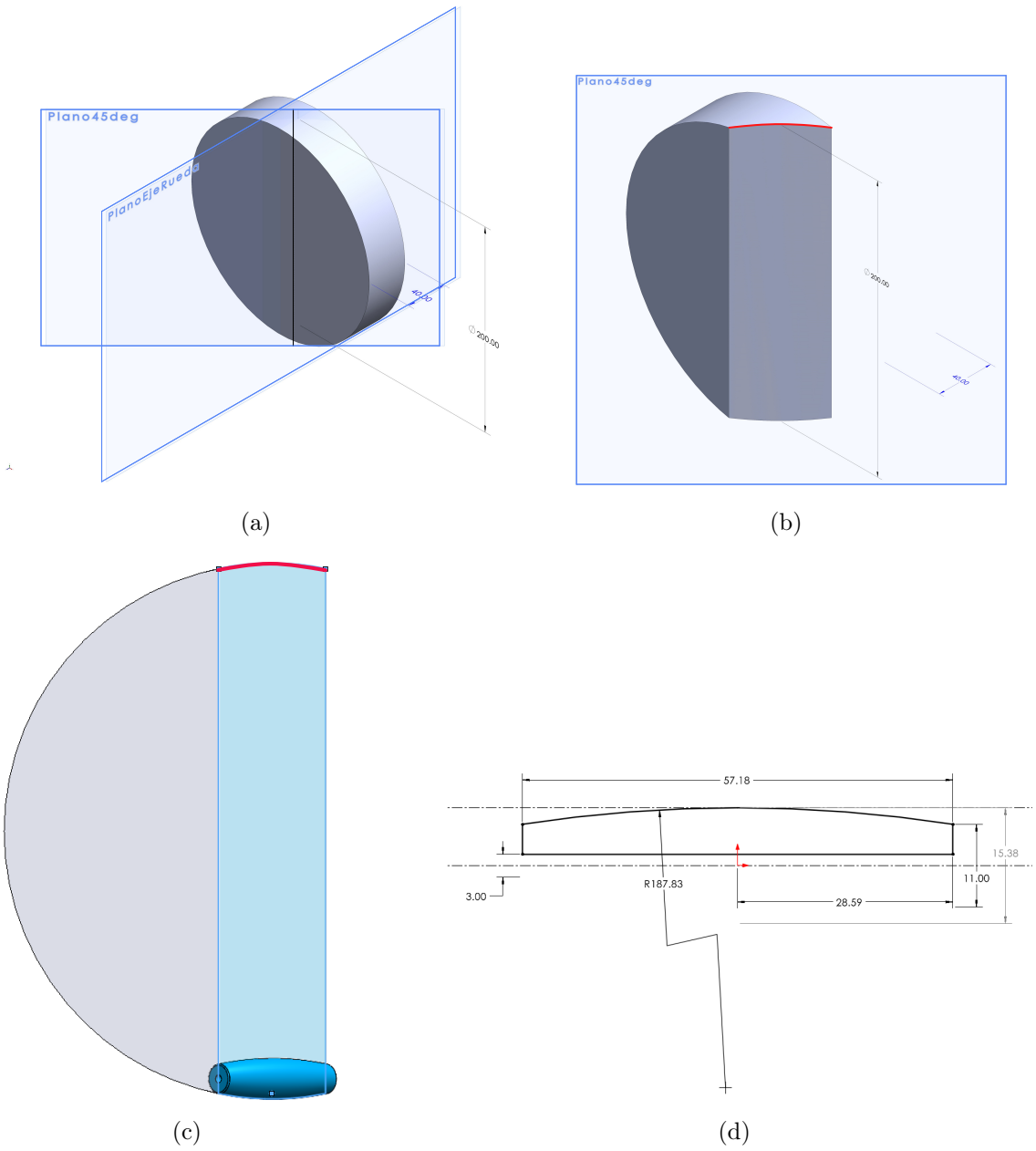
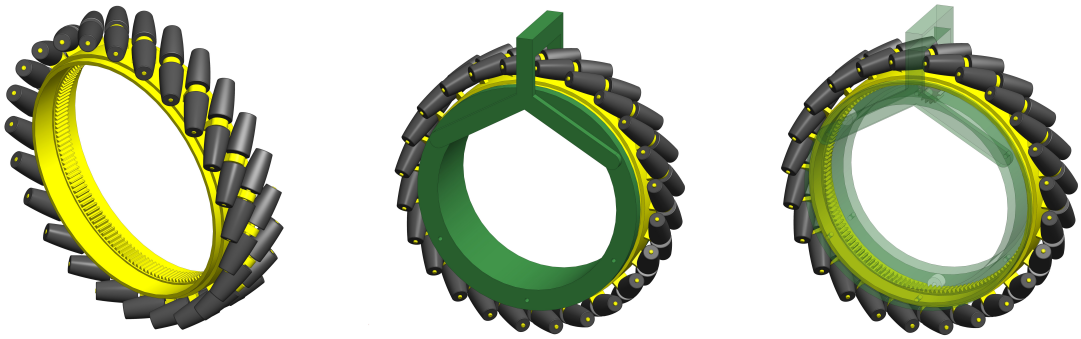
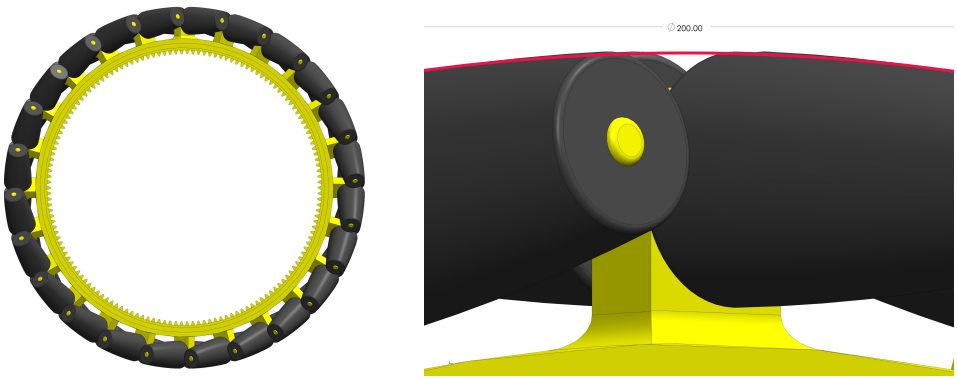


Figura 4.10: Perfil de rodillo para rueda tipo mecanum como aproximación a la silueta.



(a) (b) (c)

Figura 4.11: Segundo prototipo de rueda tipo mecanum; (a) rueda mecanum sin marco de 24 rodillos y engrane interno;(b) rueda mecanum sin marco de 24 rodillos con rin de soporte; (c) rueda mecanum sin marco de 24 rodillos con rin de soporte transparente.



(a) (b)

Figura 4.12: Perfil circular de la rueda empleando una aproximación geométrica.

4.2.1.2. Locomoción aérea: Sistema de despegue vertical y orientación

Una vez definido el sistema de locomoción terrestre, se procede a seleccionar el tipo de locomoción aérea. Las Figuras 4.13 y 4.14 muestran los árboles de clasificación conceptual para los requerimientos funcionales asociados a la generación de empuje vertical y a la orientación durante el vuelo, respectivamente.

Dado que ambos requerimientos deben integrarse de forma coherente dentro del diseño, y que las soluciones basadas en propulsión no son viables para plataformas de pequeño tamaño, se opta por un sistema de locomoción aérea mediante multirrotores. Inicialmente, se selecciona una configuración de tipo cuadricóptero, con el fin de mantener correspondencia con el número de ruedas establecido para el sistema terrestre y permitir, idealmente, la utilización compartida del sistema de actuación entre ambos modos de locomoción.

Generación de alternativas

Para la selección de las hélices del sistema cuadricóptero, se consideraron variables clave como el material, el tamaño, la forma, el paso (*pitch*) y el número de aspas. Con el fin de lograr un diseño adaptativo [61] y aprovechar el espacio interior de cada rueda, las hélices se eligieron en función del diámetro interno del rin y la fuerza de empuje máxima que pueden generar, priorizando configuraciones comerciales disponibles. Los parámetros seleccionados se detallan a continuación:

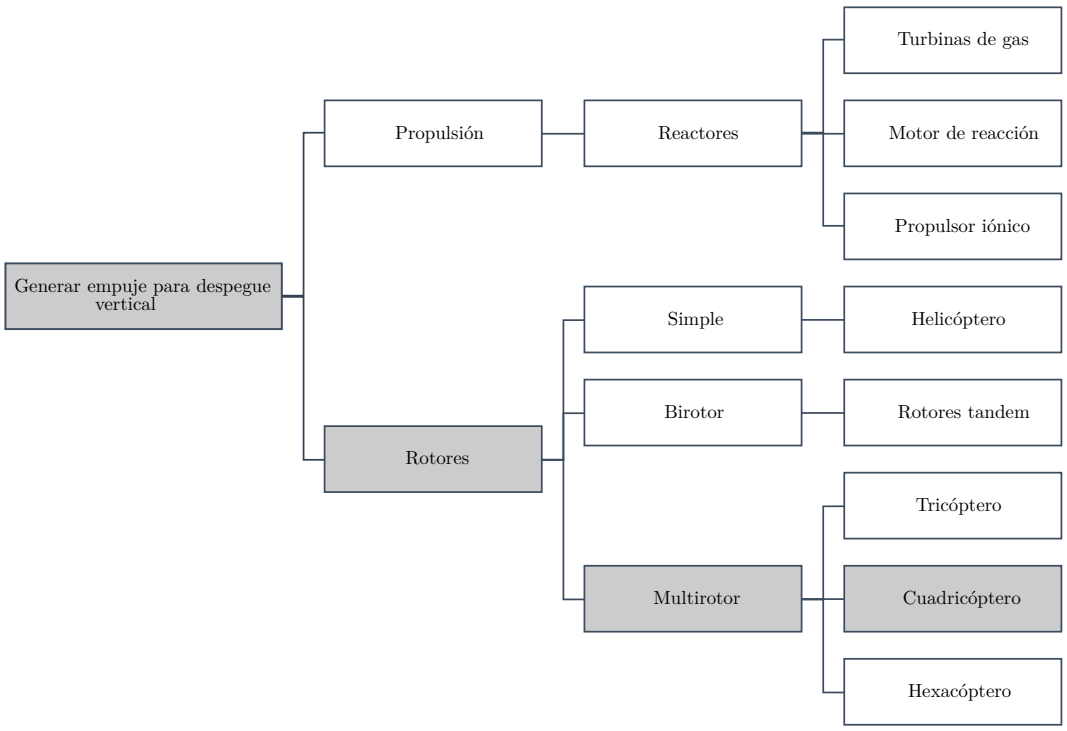


Figura 4.13: Árbol de clasificación de conceptos para el despegue vertical del sistema aéreo.

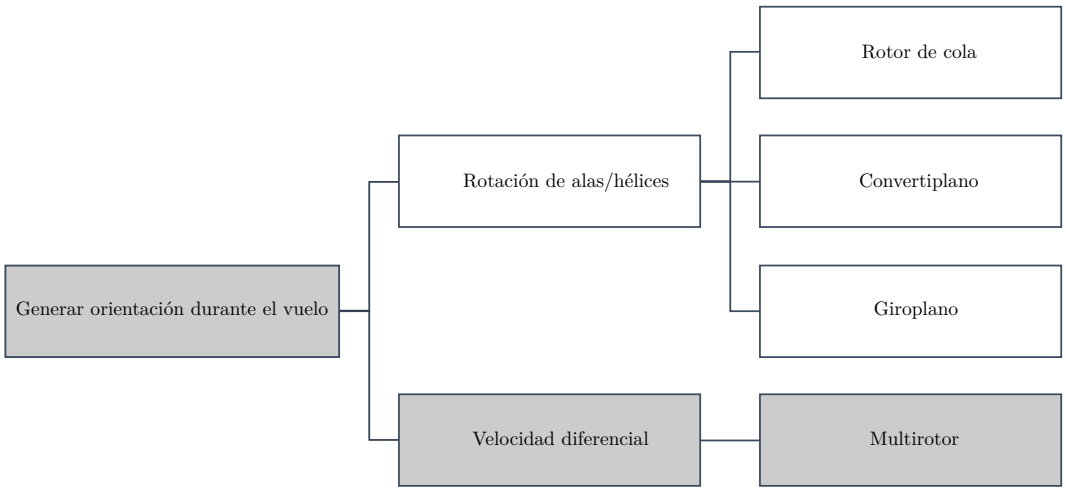


Figura 4.14: Árbol de clasificación de conceptos para la orientación durante el vuelo del sistema aéreo.

- Tamaño de hélice (diámetro): 127 mm (5 pulgadas)
- Material: ABS
- Paso (*pitch*): 4.5 pulgadas
- Diámetro de cubo: 5 mm
- Número de aspas: 3
- Forma: puntiaguda
- Empuje máximo: 1024 g (motor Emax RS2205 2300KV)
- Modelo: Gemfan 5045x3.

La Figura 4.15 muestra una hélice genérica de 5 pulgadas, utilizada durante las simulaciones para validación del modelo. Es importante señalar que la fuerza de empuje combinada de las cuatro hélices es de aproximadamente 4096 g. Por lo tanto, si el peso del prototipo supera este valor, será necesario redimensionar el tamaño de las ruedas o incorporar hélices adicionales al chasis.

Integración y rediseño de los sistemas de locomoción terrestre-aéreo

Previo al desarrollo de los siguientes subsistemas del robot, se integraron los sistemas de locomoción terrestre y aérea, incorporando los rediseños necesarios. En primer lugar, se modificó el rin de la rueda para alojar una hélice en su interior. Aunque el diámetro interno del rin original era de 132 mm, suficiente para hélices de 127 mm (5 pulgadas) de diámetro, en el rediseño se incrementó a 149 mm para mayor holgura e integración estructural.

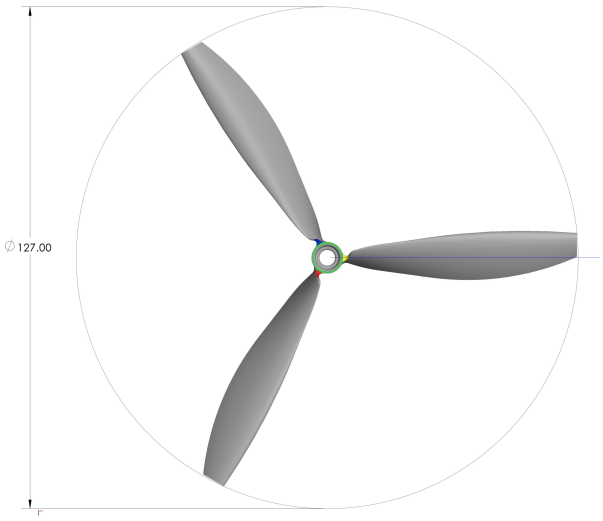


Figura 4.15: Hélice triple de 5 pulgadas para locomoción aérea.

La Figura 4.16 muestra el rediseño del rin, incluyendo una vista explosionada del ensamble con la hélice incorporada. También se visualiza un tren de engranajes encargado de accionar de forma independiente ambos sistemas de locomoción, así como dos engranajes intermedios que actúan como soporte estructural entre el engranaje interno y el rin.

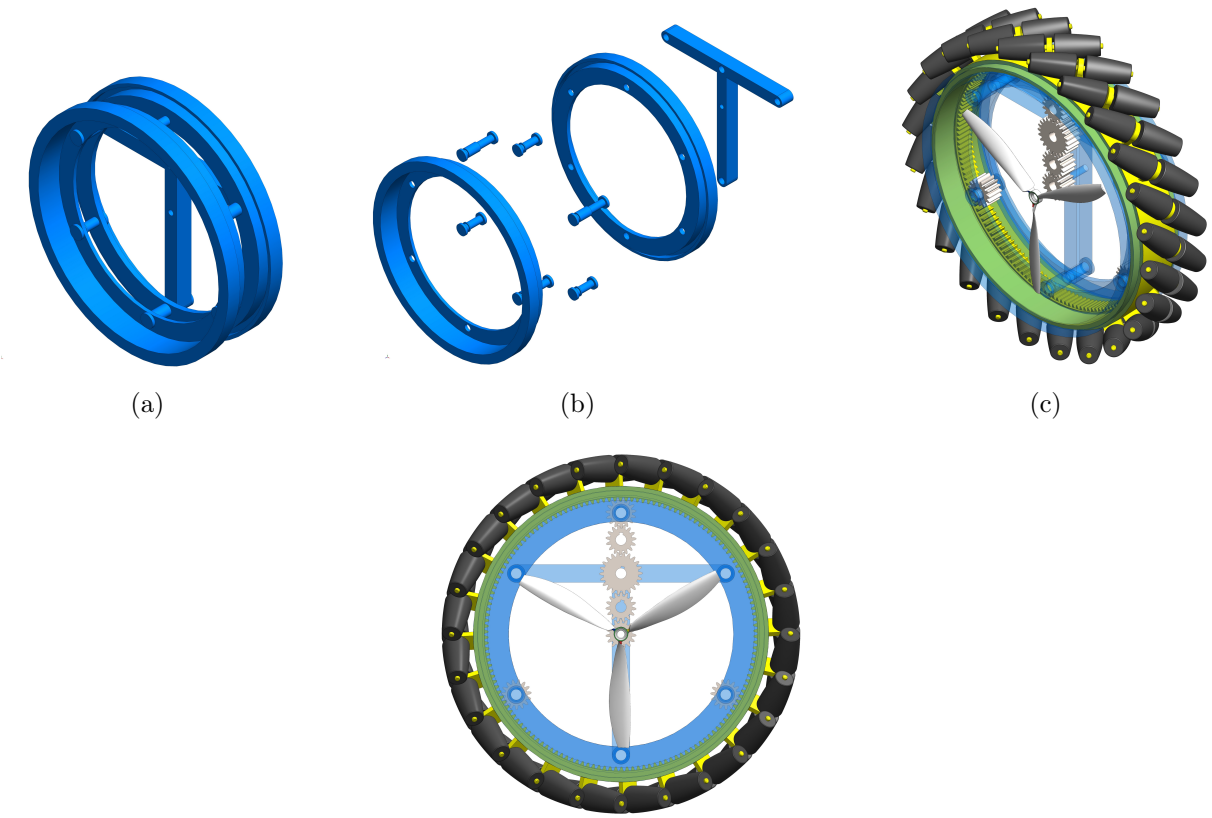
La Figura 4.17 presenta el ensamble completo de la rueda, integrando los conceptos de locomoción terrestre y aérea. Se destaca el diseño de dos pares de ruedas mecanum, cada una con orientación específica de los rodillos para permitir desplazamiento omnidireccional.

Análisis de la dinámica: Concepto preliminar

El ensamble se configuró en SolidWorks mediante un análisis de movimiento, en el cual se definieron relaciones de posición, se aplicó la fuerza de gravedad, y se asignaron movimientos rotacionales directos a cada rueda, sin considerar en esta etapa la ubicación de los actuadores ni los mecanismos de transmisión. Además, se establecieron fuerzas de contacto entre cada rodillo y el suelo.

Posteriormente, el modelo fue exportado a Adams View para realizar el análisis dinámico del prototipo. La Figura 4.18(a) muestra que, a pesar de que el perfil del rodillo corresponde a una aproximación geométrica, el prototipo es capaz de ejecutar los principales movimientos omnidireccionales, hacia adelante, desplazamiento lateral izquierdo, movimiento diagonal y rotación sobre su eje, con ligeras desviaciones en los últimos dos. El video de esta simulación se presenta en el Apéndice A1.1.

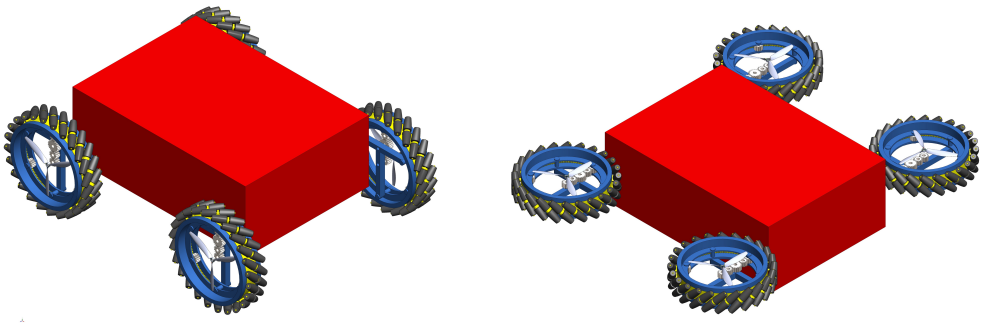
Por su parte, la Figura 4.18(b) muestra que las fuerzas generadas por las hélices son suficientes para lograr un despegue vertical. Por lo tanto, se valida el funcionamiento de ambos sistemas de locomoción, y se procede con el desarrollo de los subsistemas restantes conforme a los requerimientos establecidos.



(a) (b) (c)

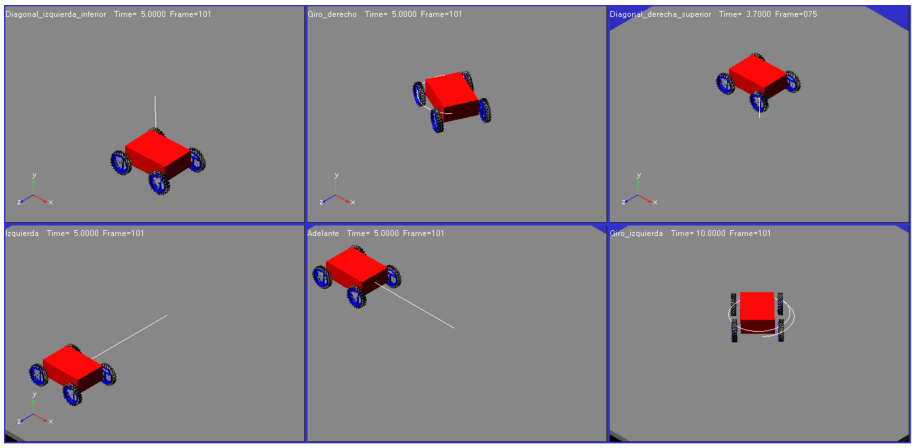
(d)

Figura 4.16: Integración de los sistemas de locomoción terrestre-aéreo. (a) rediseño del rin; (b) vista explosionada de los componentes del rin; (c) vista isométrica de la rueda con ambos módos de locomoción; (d) vista frontal de la rueda con ambos modos de locomoción.

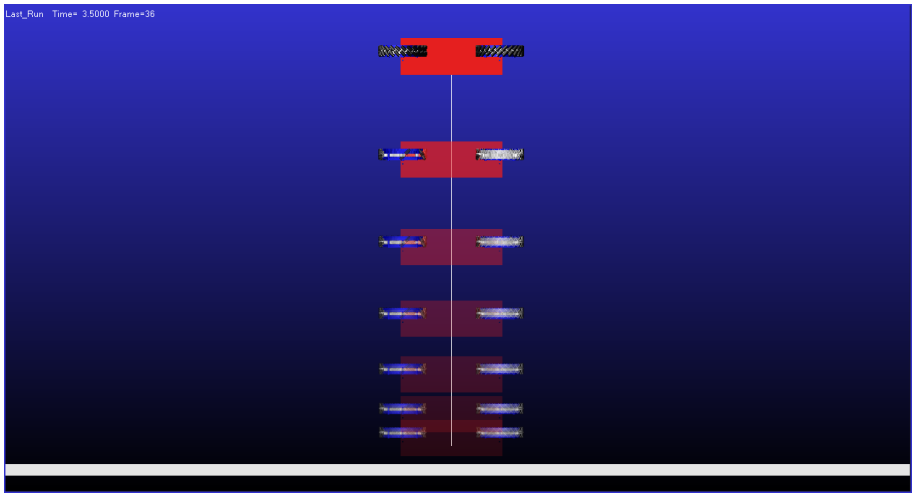


(a) (b)

Figura 4.17: Concepto de robot con sistemas de locomoción terrestre-aérea. (a) modo terrestre; (b) modo aéreo.



(a)

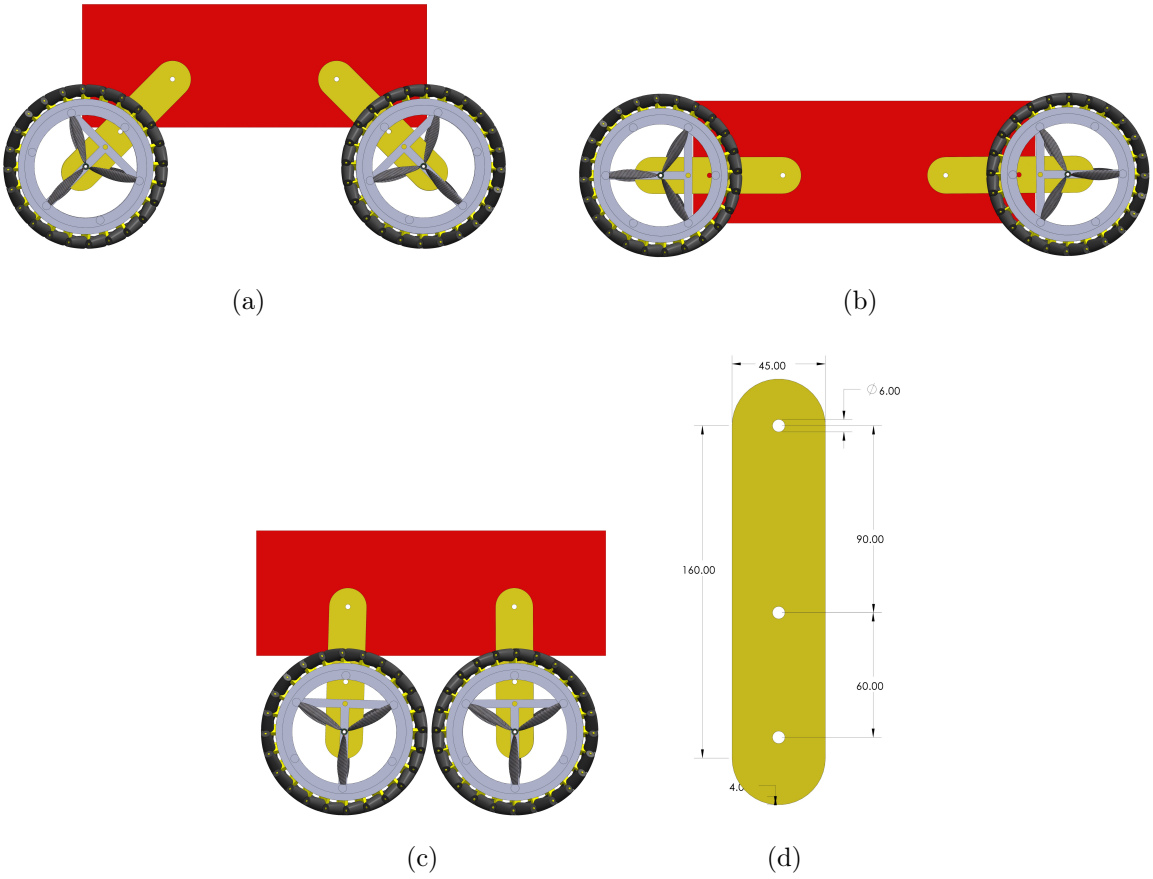


(b)

Figura 4.18: Resultados gráficos de las simulaciones en Adams View; (a) movimientos holonómicos de la locomoción terrestre; (b) capacidad de despegue en locomoción aérea.

4.2.1.3. Sistema de ajuste de altura

Para el sistema de ajuste de altura, se propone el uso de eslabones individuales articulados con el objetivo de mantener una estructura mecánica simple y funcional, como se muestra en la Figura 4.19. Cada eslabón tiene una longitud de 160 mm y permite al robot modificar su altura de forma adaptativa, lo cual le posibilita superar obstáculos de hasta 180 mm de altura y 300 mm de ancho. Asimismo, el sistema permite que el robot se desplace por debajo de estructuras con aberturas mínimas de 210 mm de altura y 500 mm de ancho.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.19: Sistema de ajuste de altura; (a) altura predeterminada; (b) altura mínima; (c) altura máxima; (d) dimensiones del eslabón.

4.2.1.4. Sistema de acoplamiento-transmisión

El sistema de acoplamiento entre los dos modos de locomoción se integra junto con el sistema de transmisión de la actuación. La Tabla 4.2 muestra la descomposición funcional del sistema de acoplamiento y reconfiguración. En esta etapa se aborda únicamente el mecanismo de acoplamiento asociado a la transmisión, dejando el mecanismo de la reconfiguración para una fase posterior, una vez alcanzada una mayor integración funcional entre los sistemas.

Debido a las restricciones geométricas del prototipo, se descartaron las soluciones basadas en ruedas de fricción, poleas con bandas, cadenas y juntas universales. En su lugar, se optó por engranajes como medio para la transmisión y regulación de par, dada su facilidad de integración. Con el objetivo de utilizar un único actuador para ambos modos de locomoción, se propuso el uso de embragues electromagnéticos acoplados a un tren de engranajes, permitiendo la transmisión del par hacia el mecanismo de locomoción conforme al modo de operación del robot. Con esto se buscó un enfoque de diseño adaptativo, que permita una reconfiguración en sus sistemas de locomoción y con actuación dependiente.

Tabla 4.2: Descomposición funcional del sistema de acoplamiento y reconfiguración del robot.

Requerimiento Funcional	**Sub-funciones primarias**	**Sub-funciones secundarias**	**Sub-funciones terciarias**	**Características**	**Alternativas generales de solución**	**Alternativas específicas de solución**
Sistema de acoplamiento–reconfiguración	Acoplar mecanismos de actuación	Transmitir potencia mecánica	Acoplar–desacoplar movimiento del actuador	Accionamiento indirecto	Embrague	▪ Embrague neumático ▪ Embrague hidráulico ▪ Embrague centrífugo ▪ Embrague magnético ▪ Embrague electromagnético
				Accionamiento directo	*Dirigirse a sistema de actuación*	
			Transmitir par desde actuador hasta sistema de locomoción	Acoplamiento rígido Acoplamiento flexible Acoplamiento articulado	▪ Engranajes ▪ Cadenas ▪ Ruedas de fricción ▪ Correas y poleas ▪ Junta universal	▪ Engrane recto ▪ Engrane cónico ▪ Engrane helicoidal ▪ Engrane hipoidal ▪ Piñón cremallera ▪ Tornillo ▪ Juntas cardán
			Variar relación de par entregado por el actuador			
	Acoplar mecanismos de locomoción	Proveer interdependencia entre mecanismos		Altamente dependiente	Estructura compartida	Actuación dependiente
				Relativamente independiente	Estructura compartida	Actuación independiente
					Estructura reconfigurable	▪ Actuación dependiente ▪ Actuación independiente

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 4.2

Requerimiento Funcional	**Sub-funciones primarias**	**Sub-funciones secundarias**	**Sub-funciones terciarias**	**Características**	**Alternativas generales de solución**	**Alternativas específicas de solución**
	Reconfigurar sistemas de locomoción	Determinar cambio en la configuración		Manual	▪ Retorno con operador ▪ Solicitud de asistencia	
				Automática	▪ Mando a distancia ▪ Comando interno	
		Adecuar morfología del robot		Movimiento relativo entre componentes estructurales	▪ Mecanismo barras ▪ Eslabones articulados ▪ Actuador directo	
		Actuar sistema de locomoción			*Dirigirse al sistema de actuación*	

La Figura 4.20(a) muestra la integración de eslabones articulados y trenes de engranajes para transmitir el par desde los actuadores a ubicarse dentro del chasis. También se muestran los embragues electromagnéticos que habilitan o interrumpen la transmisión según el modo de locomoción requerido. Las Figuras 4.20(b) y 4.20(c) presentan el ensamble general del prototipo, incluyendo los sistemas de locomoción, ajuste de altura, transmisión y acoplamiento. Por su parte, la Figura 4.21 muestra los rediseños del rin de la rueda, en los cuales el tren de engranajes ha sido reubicado al interior de los eslabones articulados. Se incluyen vistas isométricas y frontales para mejorar su apreciación.

Una vez establecida esta integración, se procede a detallar el rediseño de la rueda mecanum, cuyo funcionamiento conceptual ha sido validado previamente, aunque aún no se ha abordado su fabricación y ensamble. El rediseño enfatiza la fijación de los rodillos en el soporte central de la rueda. Cada rodillo se ensambla mediante un tornillo de cabeza hueca y dos rodamientos en los extremos, lo que garantiza un giro libre con baja fricción. La Figura 4.22 compara el modelo conceptual con el modelo detallado de la rueda y sus rodillos, mientras que la Figura 4.23 muestra el ensamble completo y una vista explosionada para la identificación de sus componentes.

4.2.1.5. Sistema de suspensión

La Figura 4.24 muestra el árbol de clasificación de conceptos para el sistema de suspensión, cuyo objetivo principal es mantener un contacto continuo entre las ruedas del robot y el terreno. Se descartaron tanto las configuraciones de suspensión activa como semi-activa, debido al peso adicional que implican sus actuadores, sistemas de control de fluido y electrónica asociada. Asimismo, se descartó la suspensión tipo Rocker-Bogie, empleada comúnmente en robots exploradores, ya que no es compatible con la simetría estructural requerida en caso de volcadura, ni con el mecanismo de acoplamiento y reconfiguración del sistema de locomoción terrestre.

Por lo tanto, se seleccionó una suspensión pasiva simple tipo resorte-amortiguador. La Figura 4.25(a) muestra un sistema comercial de suspensión utilizado en vehículos de control remoto a escala. En la Figura 4.25(b) se observa su integración en SolidWorks, utilizando el modelo GMade Zero Shock Red GM20201, cuyas características principales son:

- Materiales: cuerpo de aluminio y resorte de acero inoxidable STS304 (1.159 kg/51.50 mm)
- Longitud en reposo: 104 mm
- Longitud en compresión: 69 mm
- Diámetro de resorte: 19 mm
- Diámetro del cuerpo: 14 mm
- Diámetro del eje: 3.5 mm.

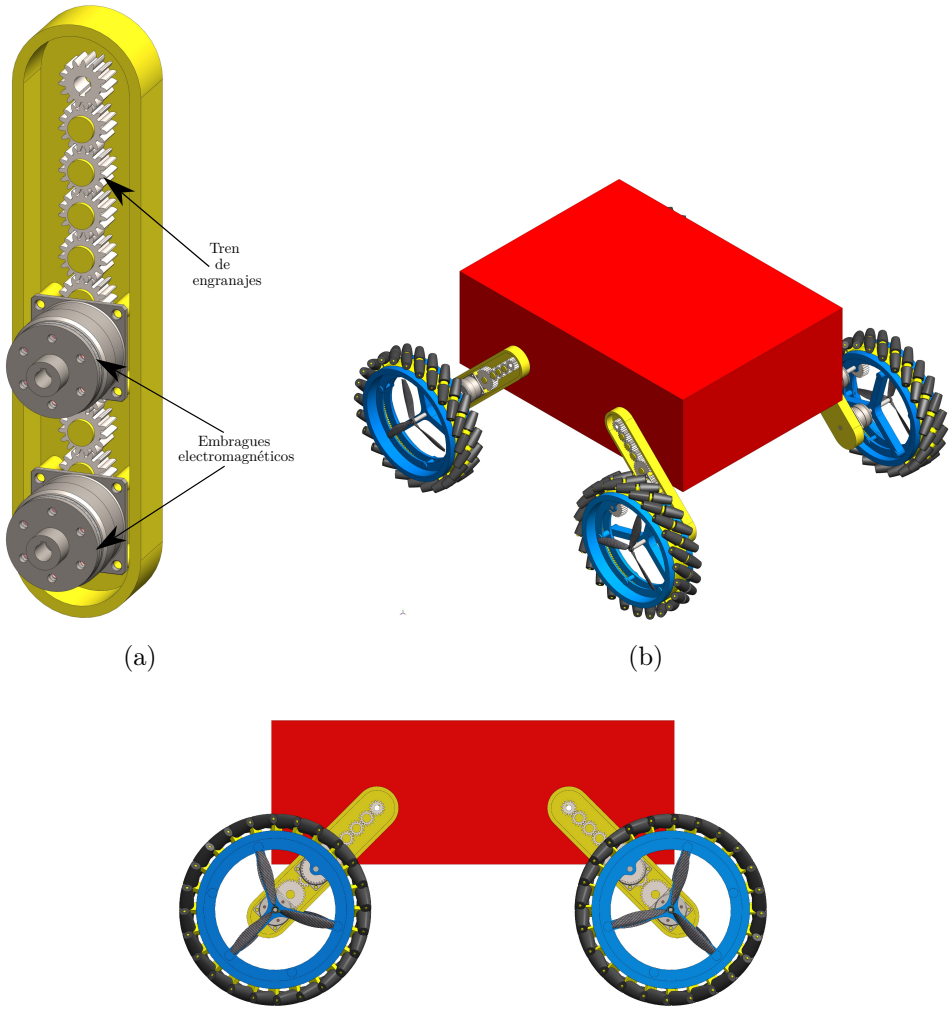
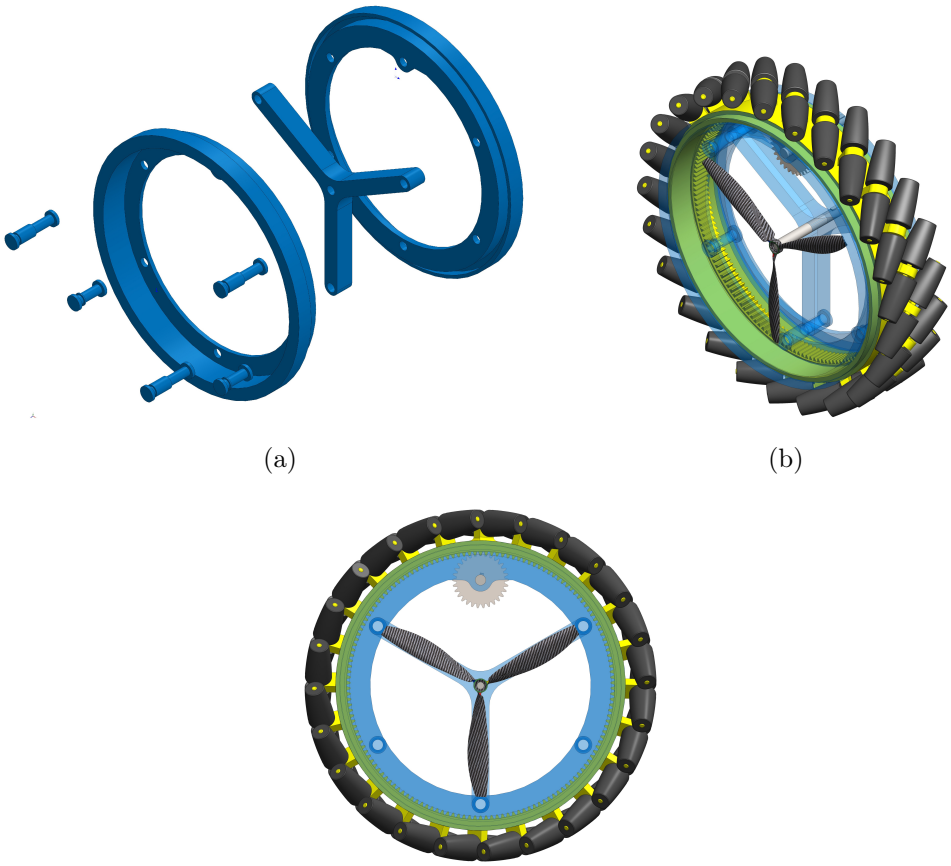


Figura 4.20: Diversos sistemas del robot; (a) sistema de acoplamiento y transmisión; (b) vista isométrica del robot con sistemas de locomoción, ajuste de altura, acoplamiento y transmisión ;(c) vista lateral del robot.

La Figura 4.26 muestra el ensamble completo del prototipo, el cual integra los sistemas de locomoción, ajuste de altura, transmisión, acoplamiento, suspensión y ruedas mecanum. También se aprecia el rediseño del chasis, dividido en tres partes (un cuerpo central y dos tapas laterales) para permitir la reorientación de los eslabones y lograr la alineación horizontal de las hélices.

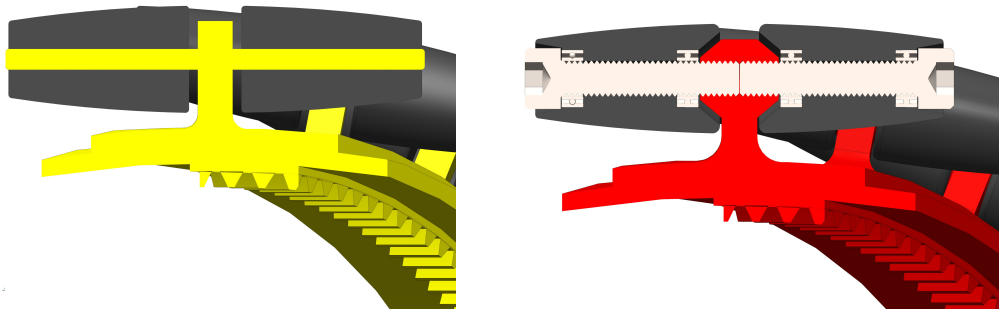
Sin embargo, se identificó una incompatibilidad mecánica entre el sistema de suspensión y el mecanismo de ajuste de altura, lo cual restringe su desplazamiento efectivo. Para solucionar esto, se propuso un nuevo rediseño mostrado en la Figura 4.27, el cual modifica tanto el sistema de ajuste de altura como la disposición del sistema de transmisión. El eslabón se divide en dos partes: la parte superior transmite el par desde el actuador a ubicarse en el interior



(a) (b)

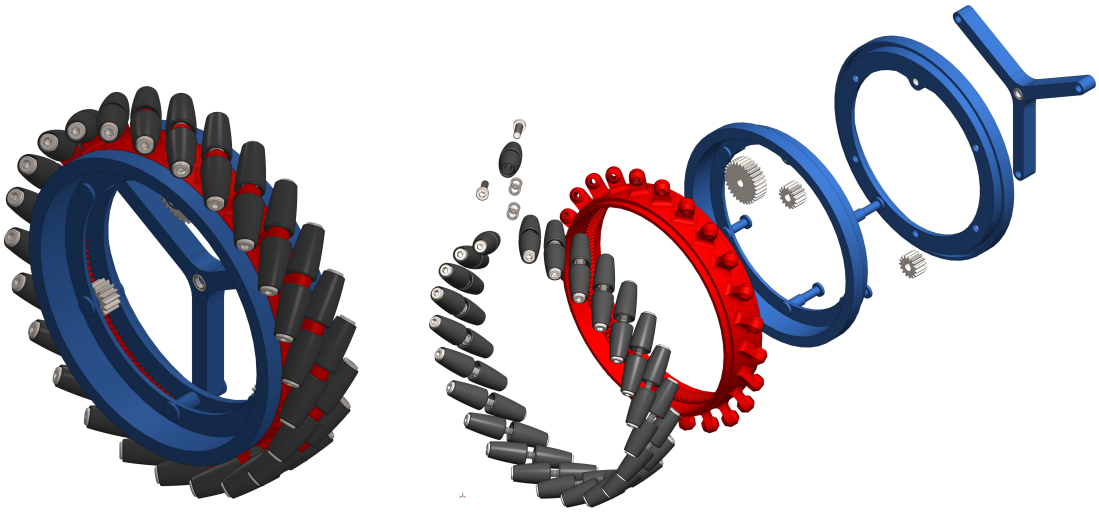
(c)

Figura 4.21: Rediseño del rin de la rueda; (b) vista explosionada de los componentes del rin rediseñado; (c) vista isométrica de la rueda; (d) vista frontal de la rueda.



(a) (b)

Figura 4.22: Comparativa entre el concepto de la rueda y su diseño a detalle. (a) concepto funcional; (b) concepto a detalle.



(a) (b)

Figura 4.23: Rueda mecanum a detalle; (a) vista isométrica; (b) vista explosionada.

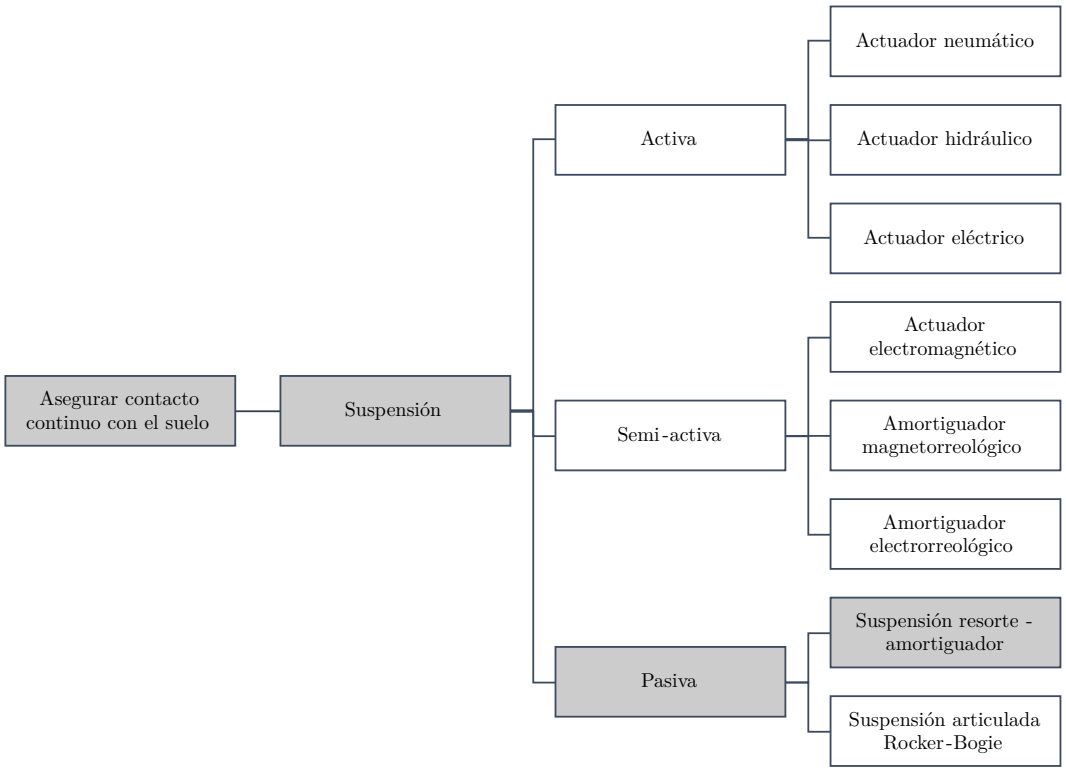
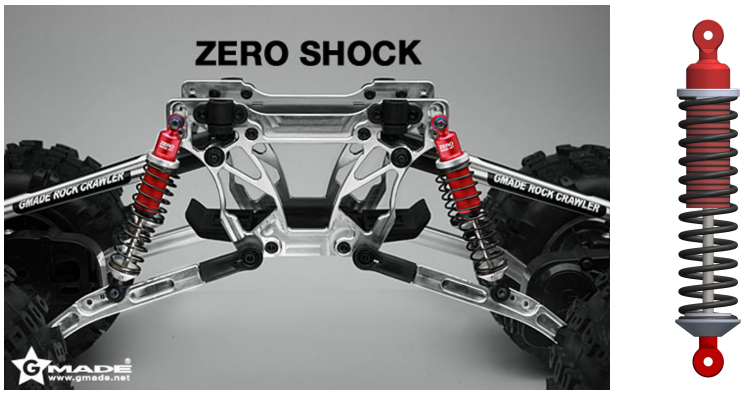


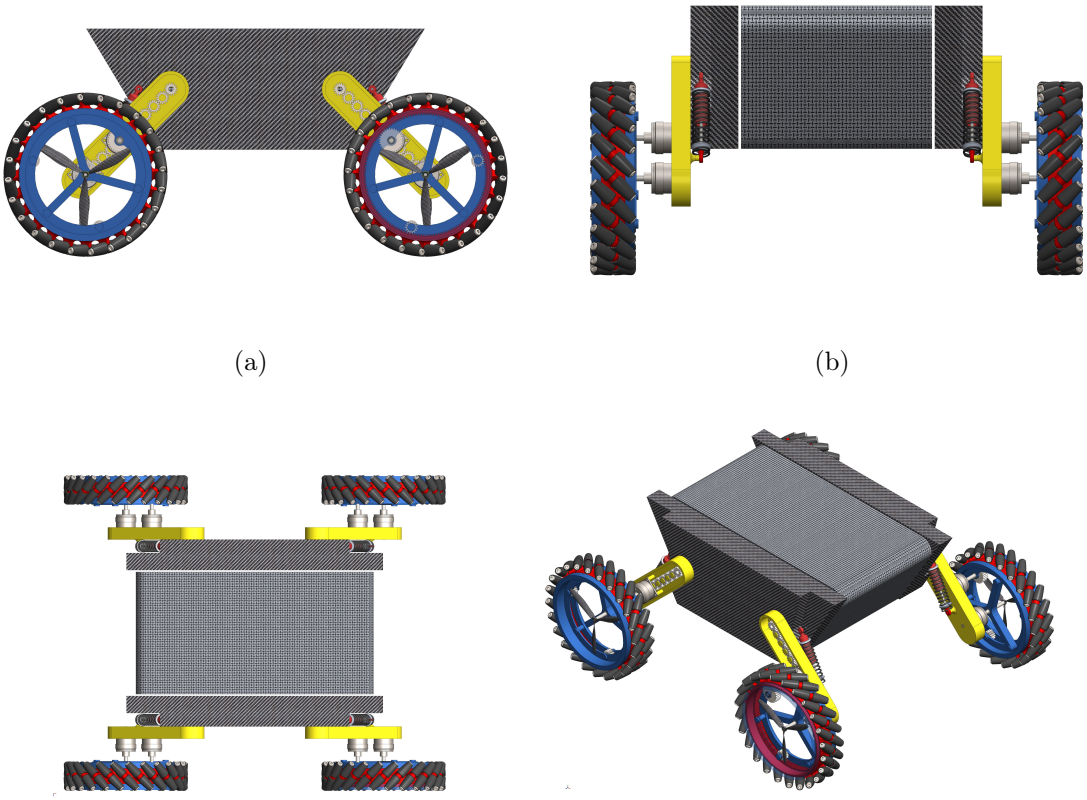
Figura 4.24: Árbol de clasificación de conceptos para el sistema de suspensión.

de la tapa lateral, mediante una caja de engranajes cónicos que redirige el par 90°, y el cual se transmite a través de un acoplamiento de varilla deslizante, permitiendo desplazamientos verticales conforme a las necesidades de la suspensión.



(a) (b)

Figura 4.25: Sistema de suspensión; (a) aplicación típica en autos de radio control; (b) ensamble de la suspensión diseñada en Solidworks.

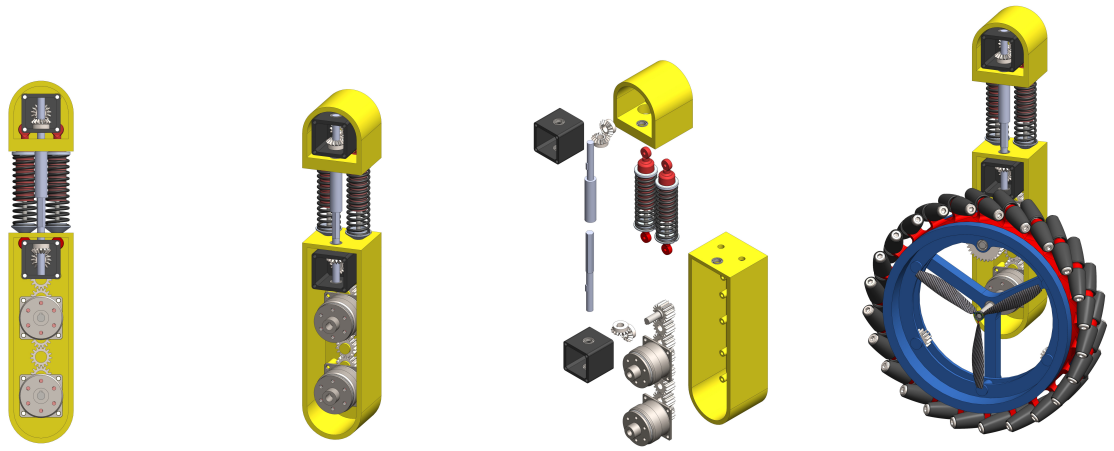


(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.26: Ensamble actualizado con los sistemas de locomoción, ajuste de altura, transmisión, acoplamiento y suspensión; (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista superior; (d) vista isométrica.

La parte inferior incorpora una segunda caja de engranajes cónicos para transmitir el par al tren de engranajes conectado a los embragues electromagnéticos, los cuales se encargan del acoplamiento con cada sistema de locomoción.



(a) (b) (c) (d)

Figura 4.27: Rediseño del sistema de acoplamiento-transmisión-suspensión; (a) vista frontal; (b) vista isométrica; (c) vista isométrica explosionada; (d) vista isométrica con el sistema de locomoción.

4.2.1.6. Sistema de acoplamiento-reconfiguración

El sistema de reconfiguración debe operar de manera autónoma, conforme a los requerimientos funcionales establecidos. Por ello, se propone que la solicitud de modificación morfológica del robot se realice de forma remota por parte del operador. Esta acción desencadena automáticamente un movimiento relativo entre las tapas laterales del chasis, así como el acoplamiento de los mecanismos de locomoción correspondientes mediante embragues electromagnéticos. La Figura 4.28 presenta el árbol de clasificación de conceptos para el movimiento relativo de las tapas laterales.

Inicialmente, se diseñó un mecanismo basado en barras articuladas, como se muestra en la Figura 4.29(a). No obstante, se descartó tras evaluar su complejidad de implementación. Como segunda propuesta, se implementó un actuador lineal eléctrico con una carrera de 50 mm (Figura 4.29(c)), el cual demostró ser adecuado para reorientar el sistema de locomoción aérea. Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran diversas vistas del prototipo operando en sus modos de locomoción terrestre y aérea, respectivamente.

Los subsistemas desarrollados hasta este punto incluyen: locomoción híbrida, ajuste de altura, acoplamiento de la transmisión, reconfiguración estructural y suspensión. A continuación, se asignaron materiales preliminares para la fabricación del prototipo, considerando:

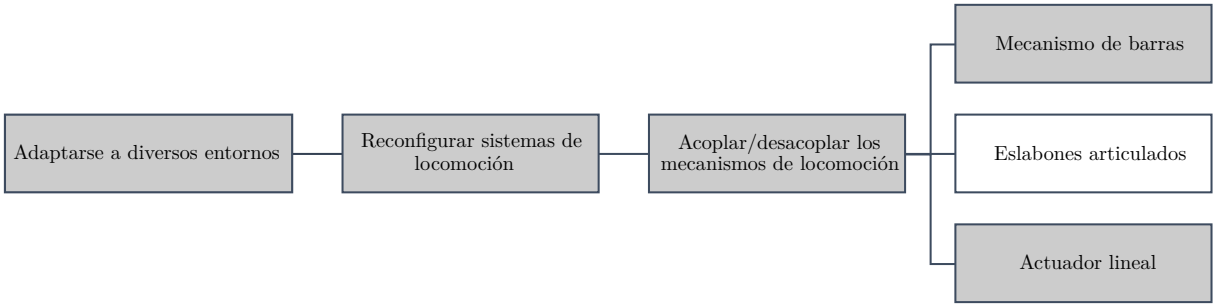


Figura 4.28: Árbol de clasificación de conceptos para el sistema de reconfiguración.

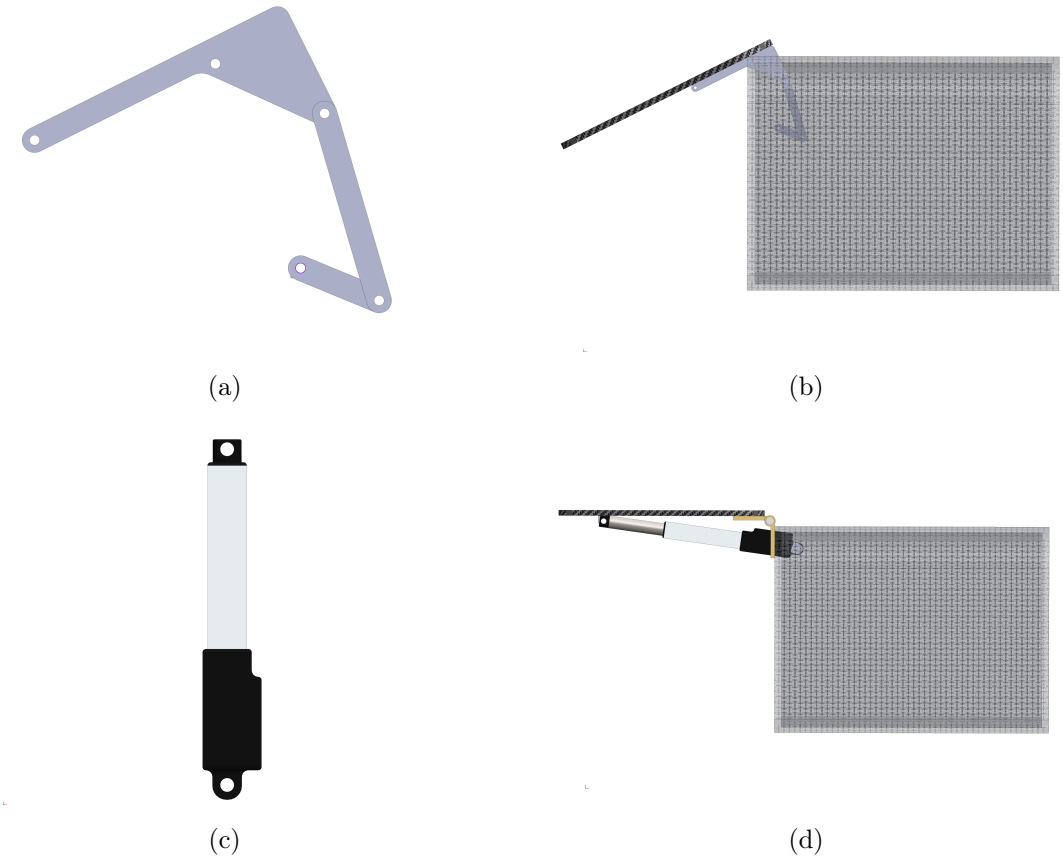
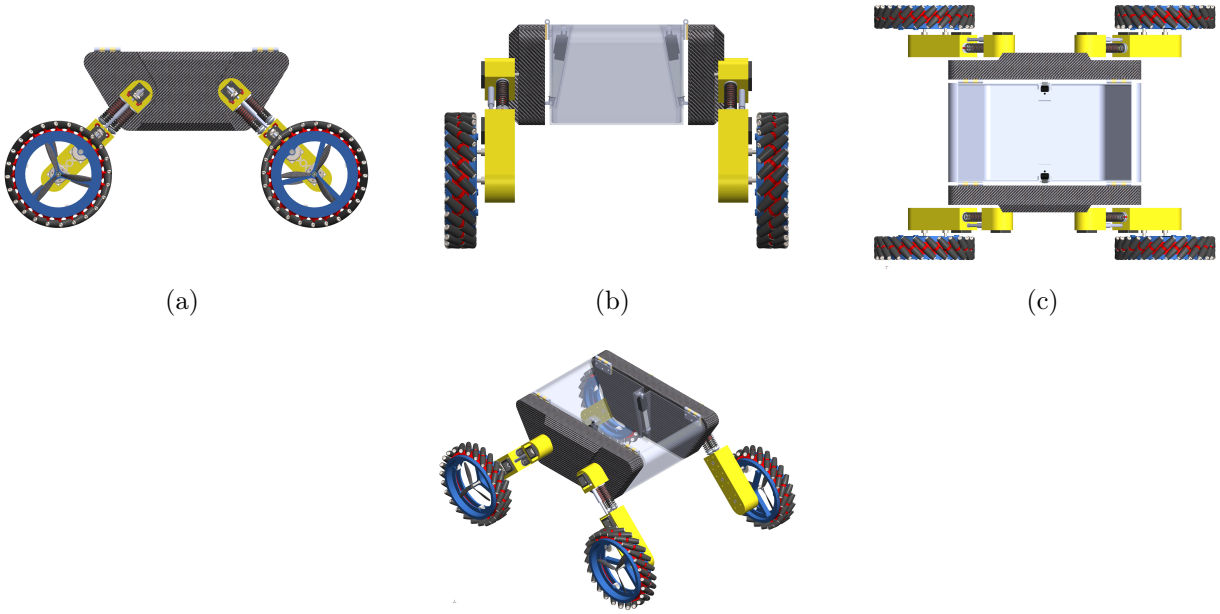


Figura 4.29: Mecanismos de reconfiguración. (a) Mecanismo de 4 barras; (b) funcionamiento del mecanismo de 4 barras; (c) actuador eléctrico lineal de 50mm de carrera; (d) funcionamiento del actuador lineal.

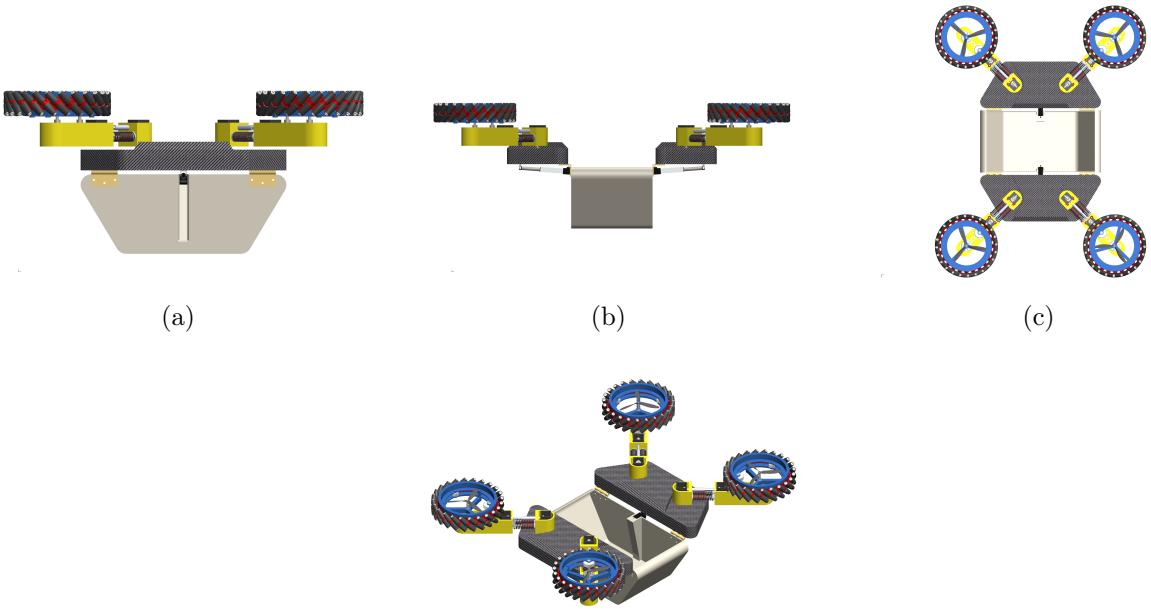
acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), fibra de carbono, policarbonato (PC), acero inoxidable AISI 304, aluminio y caucho de estireno-butadieno (SBR). La masa estimada del prototipo fue de 6.4 kg, sin incluir los actuadores ni la electrónica. Dado que las cuatro hélices disponibles generan una fuerza de empuje total de aproximadamente 4 kg, esta resulta insuficiente, incluso al incorporar dos hélices adicionales en el chasis.



(a) (b) (c)

(d)

Figura 4.30: Prototipo en configuración terrestre; (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista superior; (d) vista isométrica.



(a) (b) (c)

(d)

Figura 4.31: Prototipo en configuración aérea; (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista superior; (d) vista isométrica.

Por este motivo, se identificaron las siguientes líneas de rediseño para mejorar la viabilidad funcional del prototipo:

- Reescalar las dimensiones de la rueda para permitir la colocación de hélices de mayor diámetro.
- Rediseñar el sistema de transmisión para reducir la cantidad de engranajes requeridos.
- Replantear el sistema de acoplamiento en la transmisión debido al peso considerable de los embragues.
- Considerar el peso de los sistemas de actuación en el rediseño de los sistemas de transmisión y acoplamiento.
- Rediseñar el chasis para mejorar la integración del sistema de reconfiguración.
- Rediseñar el sistema de soporte y sujeción de los rodillos, ya que los tornillos representan un peso excesivo.

4.2.2. Primer rediseño del sistema mecánico

En la siguiente versión del prototipo, se mantiene el concepto original del sistema de locomoción, dado que representa una propuesta innovadora y diferenciada frente a los desarrollos actuales en el mercado. No obstante, en lo que respecta a los sistemas de acoplamiento, transmisión y reconfiguración, se opta por una estructura reconfigurable con actuación independiente en cada mecanismo de locomoción, con el objetivo de reducir el peso total asociado al tren de engranajes y a los embragues electromagnéticos.

4.2.2.1. Sistema de actuación para las ruedas

El diseño anterior no contemplaba el tipo ni el peso del actuador asignado a las ruedas, debido a la intención inicial de reutilizar el mismo motor utilizado para las hélices, disminuyendo su velocidad y aumentando el par mediante una serie de engranajes. Sin embargo, en el nuevo diseño, se opta por que cada sistema de locomoción cuente con su propio actuador. Por ello, se presenta el cálculo para dimensionar el actuador de las ruedas, de forma que se cumpla con la velocidad máxima de 0.5 m/s establecida en la definición del producto, considerando además el desplazamiento sobre una pendiente de 45°, como se muestra en la Figura 4.32.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= ma \\ v &= cte \therefore a = 0 \\ F_N &= (F_{N1} + F_{N2} + F_{N3} + F_{N4}) = mg\cos\theta \\ F_R &= (F_{R1} + F_{R2} + F_{R3} + F_{R4}) = \mu_s F_N\end{aligned}$$

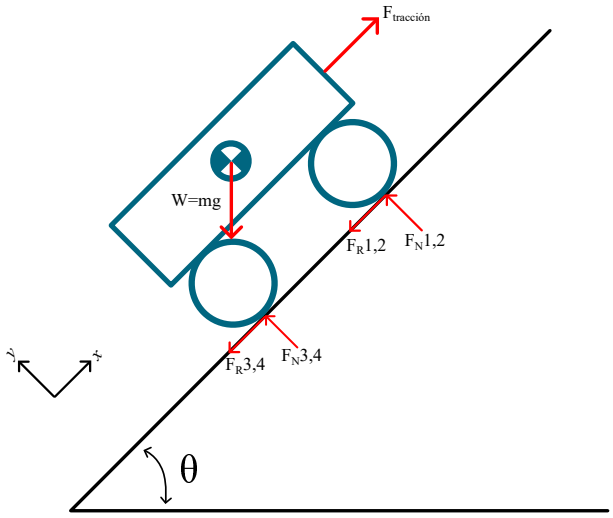


Figura 4.32: Diagrama de cuerpo libre para determinar par de torsión de las ruedas.

$$F_{traccion} = mg\sin\theta + F_R = mg\left(\sin\theta + \mu_s\cos\theta\right)$$

Dado que la inclinación de la superficie es de 45°, que la masa del robot no debe superar los 15 kg y considerando un coeficiente de fricción estático de 1 (para efectos de sobredimensionamiento, mayor a los límites superior entre materiales de caucho–madera y caucho–asfalto [199–201]), se calcula una fuerza total de tracción de $F_{traccin} = 208.1$ N. Para determinar la potencia y el par necesarios, se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} P = FV &= \tau\omega \\ \omega &= \frac{v}{r} \\ \tau &= \frac{P}{\omega} \end{aligned}$$

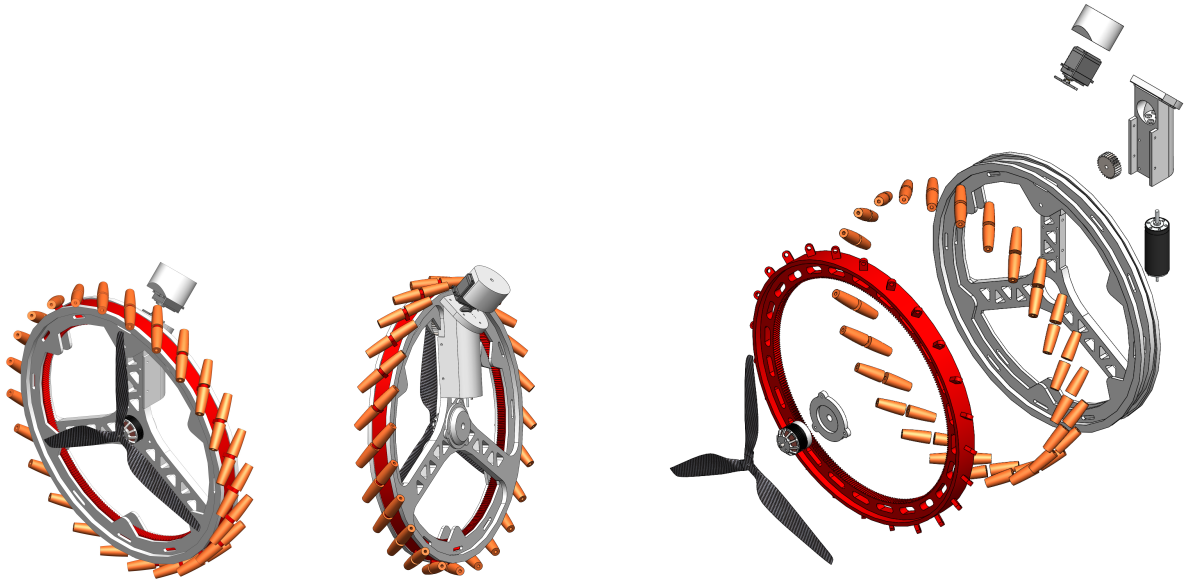
Como la fuerza total corresponde a la suma de las cuatro ruedas, la fuerza individual es $F_w = 52.025$ N. Para evitar operar al límite, se duplica la velocidad objetivo a 1.0 m/s, obteniendo una potencia estimada por rueda de $P_w = 52.025$ W. Considerando que este diseño duplica la dimensión de la rueda para alojar una hélice con mayor fuerza de empuje, el radio de rueda es de 0.2 m, la velocidad angular requerida es $\omega_w = 5$rad/s, y el par resultante $\tau_w = 10.405$ Nm.

Con una relación de transmisión combinada de 150:1 (30:1 del engrane interno y 5:1 del acoplamiento intermedio), el motor debe proporcionar un par de $\tau_m = 0.069$ Nm y una velocidad angular de $\omega_m = 7161.97$ rpm, manteniendo la misma potencia.

El motor seleccionado fue el Maxon RE30 de 60 W, con un par nominal de 75.5 mNm, adecuado para estos requisitos. La Figura 4.33 muestra los elementos principales del rediseño, cuyas especificaciones técnicas se detallan a continuación:

- Rueda:

  - Diámetro exterior: 400 mm
  - Diámetro interno: 345 mm
  - Diámetro interno del rin: 339 mm
  - Ancho total: 61 mm
  - Ancho sin rodillos: 52 mm
  - Número de dientes del engrane interno: 300
  - Diámetro de paso: 300 mm
  - Módulo: 1
  - Ángulo de presión de los dientes del engrane interno: 20°
  - Ancho del engrane interno: 15 mm
  - Número de rodillos: 24
  - Ángulo de orientación de los rodillos: 45°
- Actuador rueda:
  - Tipo: Motor de corriente continua de imanes permanentes
  - Modelo: Maxon Motor RE30
  - Alimentación: 18 V
  - Par nominal: 75.5 mNm
  - Velocidad nominal: 8590 rpm
- Hélice:
  - Diámetro: 317.5 mm (12.5 pulgadas)
  - Material: Fibra de vidrio
  - Paso (*Pitch*): 4.3 pulgadas
  - Diámetro de cubo: 5 mm
  - Número de aspas: 3
  - Forma: Nariz de toro (BN, Bull Noise)
  - Empuje máximo: 2320 g
  - Modelo: KDE-CF125-TP
- Actuador hélice:
  - Tipo: Motor de corriente contínua sin escobillas
  - Modelo: KDEXF2814-775
  - Alimentación: 15.4 V
  - Velocidad nominal: 775 rpm/V



(a) (b) (c)

Figura 4.33: Rediseño de las ruedas; (a) vista isométrica frontal; (b) vista isométrica posterior ; (c) vista isométrica explosionada.

  - Par nominal: 12.3 mNm/A

- Servomotor:

  - Tipo: Controlado por PWM
  - Modelo: Tower pro MG995
  - Alimentación: 4.8 a 6.6 V
  - Ángulo de operación: 180°
  - Par: 9.4 kgcm a 4.8 V y 11 kgcm a 6 V.

Este rediseño duplicó el diámetro de la rueda manteniendo el mismo número de rodillos para reducir masa, así como simplifica la transmisión al usar engranajes cónicos y mejora el acoplamiento mediante actuación independiente. El motor-hélice se colocó dentro de la rueda, y alcanza un empuje máximo de 2.32 kg como se muestra en la Figura 4.34. Por su parte, el motor de la rueda se colocó verticalmente con el fin de optimizar el espacio disponible. En cuanto al servomotor que permite la reconfiguración individual en cada rueda, se acopló a una base diagonal montada en el chasis del robot. La Figura 4.35 muestra el ensamble del prototipo en su configuración terrestre y aérea.

Los videos de las secuencias de movimiento para la reconfiguración de la rueda, reconfiguración entre modos de operación aéreo-terrestre y movimientos omnidireccionales, se encuentran en los Apéndices A1.2, A1.3 y A1.4, respectivamente.

MOTOR VERSION	VOLTAGE LiHV [V]	PROPELLER SIZE	THROTTLE RANGE	AMPERAGE [A] (LOWER IS BETTER)	POWER INPUT [W] (LOWER IS BETTER)	POWER INPUT [hp] (LOWER IS BETTER)	THRUST OUTPUT [g] (HIGHER IS BETTER)	THRUST OUTPUT [N] (HIGHER IS BETTER)	THRUST OUTPUT [lb] (HIGHER IS BETTER)	RPM [rev/min] (HIGHER IS BETTER)	EFFICIENCY [g/W] (HIGHER IS BETTER)	EFFICIENCY [lb/hp] (HIGHER IS BETTER)
KDE2814XF-775 (775Kv) KDEXF-UAS35 S.R. ENABLED	11.6V (3S) 13.1V MAX	12.5" x 4.3 KDE-CF125-DP DUAL-BLADE	25.0%	0.8	9	0.01	130	1.27	0.29	2700	14.44	23.75
			37.5%	1.7	19	0.03	240	2.35	0.53	3680	12.63	20.77
			50.0%	3.1	35	0.05	410	4.02	0.90	4680	11.71	19.26
			62.5%	5.0	58	0.08	600	5.88	1.32	5640	10.34	17.01
			75.0%	7.6	88	0.12	810	7.94	1.79	6600	9.20	15.13
			87.5%	11.0	127	0.17	1060	10.40	2.34	7500	8.35	13.72
			100.0%	14.6	169	0.23	1340	13.14	2.95	8400	7.93	13.04
		12.5" x 4.3 KDE-CF125-TP TRIPLE-BLADE	25.0%	1.0	11	0.01	160	1.57	0.35	2580	14.55	23.91
			37.5%	2.1	24	0.03	290	2.84	0.64	3520	12.08	19.86
			50.0%	3.9	45	0.06	480	4.71	1.06	4480	10.67	17.54
			62.5%	6.5	75	0.10	700	6.86	1.54	5440	9.33	15.34
			75.0%	9.9	114	0.15	950	9.32	2.09	6320	8.33	13.70
			87.5%	14.8	171	0.23	1240	12.16	2.73	7200	7.25	11.92
			100.0%	18.8	218	0.29	1530	15.00	3.37	7880	7.02	11.54
		15.5" x 5.3 KDE-CF155-DP DUAL-BLADE	25.0%	1.5	17	0.02	300	2.94	0.66	2280	17.65	29.01
			37.5%	3.6	41	0.05	570	5.59	1.26	3120	13.90	22.86
			50.0%	6.9	80	0.11	860	8.43	1.90	3900	10.75	17.67
			62.5%	11.7	135	0.18	1230	12.06	2.71	4580	9.11	14.98
			75.0%	17.4	201	0.27	1590	15.59	3.51	5180	7.91	13.00
			87.5%	24.3	281	0.38	1900	18.63	4.19	5640	6.76	11.12
			100.0%	30.3	351	0.47	2240	21.97	4.94	6080	6.38	10.49
	15.4V (4S) 17.4V MAX	12.5" x 4.3 KDE-CF125-DP DUAL-BLADE	25.0%	1.2	18	0.02	230	2.26	0.51	3540	12.78	21.01
			37.5%	2.4	36	0.05	410	4.02	0.90	4740	11.39	18.72
			50.0%	4.6	70	0.09	670	6.57	1.48	6000	9.57	15.74
			62.5%	7.7	118	0.16	970	9.51	2.14	7280	8.22	13.51
			75.0%	11.6	178	0.24	1300	12.75	2.87	8340	7.30	12.01
			87.5%	16.9	260	0.35	1690	16.57	3.73	9480	6.50	10.69
			100.0%	22.3	343	0.46	2110	20.69	4.65	10440	6.15	10.11
		12.5" x 4.3 KDE-CF125-TP TRIPLE-BLADE	25.0%	1.5	23	0.03	280	2.75	0.62	3320	12.17	20.01
			37.5%	3.1	47	0.06	490	4.81	1.08	4580	10.43	17.14
			50.0%	5.6	86	0.12	790	7.75	1.74	5720	9.19	15.10
			62.5%	9.5	146	0.20	1120	10.98	2.47	6880	7.67	12.61
			75.0%	14.9	229	0.31	1490	14.61	3.28	7920	6.51	10.70
			87.5%	21.0	323	0.43	1870	18.34	4.12	8840	5.79	9.52
			100.0%	27.5	423	0.57	2320	22.75	5.11	9640	5.48	9.02

Note *: performance chart provided under the test conditions listed below. Measurements taken under alternate conditions will affect the final results.*
Location *: KDE Direct HQ Dynamometer V2 (Bend, Oregon)*
Altitude *: 3730 ft (1137 m)*
Pressure *: 30.3 inHg (1026 hPa)*
Temperature *: 72 °F (22°C)*
Humidity *: 35% (Relative)*

Figura 4.34: Características de desempeño de las hélices KDE.



(a) (b)

Figura 4.35: Segunda versión del prototipo; (a) vista isométrica en modo terrestre; (b) vista isométrica modo aéreo.

4.2.2.2. Análisis de movimiento

Para evaluar la funcionalidad omnidireccional del diseño con ruedas de mayor diámetro (manteniendo el mismo número de rodillos), se exportó el estudio de movimiento desde SolidWorks hacia el entorno de simulación Adams View. Como se muestra en la Figura 4.36, las trayectorias de avance, retroceso, rotación y movimiento diagonal se ejecutaron satisfactoriamente. Adicionalmente, se implementó una rutina básica de reconfiguración del sistema de locomoción, la cual también mostró resultados positivos, como se muestra en la Figura 4.37.

En esta etapa, el peso estimado del prototipo (sin considerar los sistemas de ajuste de altura, suspensión ni electrónica) era de 8.165 kg, valor cercano a los 9.28 kg de fuerza de empuje generados por las cuatro hélices. Por ello, se analizó la posibilidad de incorporar adicionalmente uno o dos pares rotor-hélice al chasis. Sin embargo, durante el rediseño de los sistemas de ajuste de altura y suspensión, se detectó que al ubicar la base del servomotor en el extremo del eslabón articulado con suspensión, la orientación de la rueda variaba con los cambios de altura, debido a la inclinación de su soporte. El mecanismo del servomotor no fue capaz de reorientar la rueda por sí solo, por lo que se requería un grado de libertad rotacional adicional para acompañar la modificación de altura.

La inclusión de este grado de libertad adicional implicaría un aumento de peso en la estructura, tanto por los actuadores adicionales como por sus mecanismos de fijación, e incrementaría el par necesario en el sistema de reconfiguración. Asimismo, las dimensiones en configuración aérea (estructura extendida) también superaban ligeramente las especificaciones establecidas en la definición del producto para la categoría *"man-packable"*, por lo tanto, la integración de los sistemas de ajuste de altura y supensión desarrollados y escalados sobrepasaría por mucho estas dimensiones. En consecuencia, se procedió a revaluar las dimensiones generales del diseño y a reformular los sistemas de ajuste de altura, suspensión y reconfiguración.

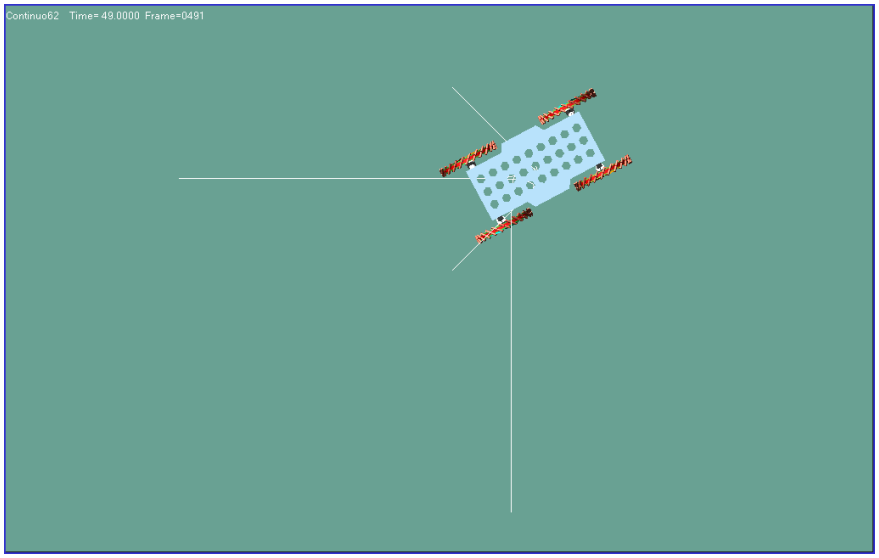


Figura 4.36: Trayectorias de movimiento omnidireccional del segundo prototipo.

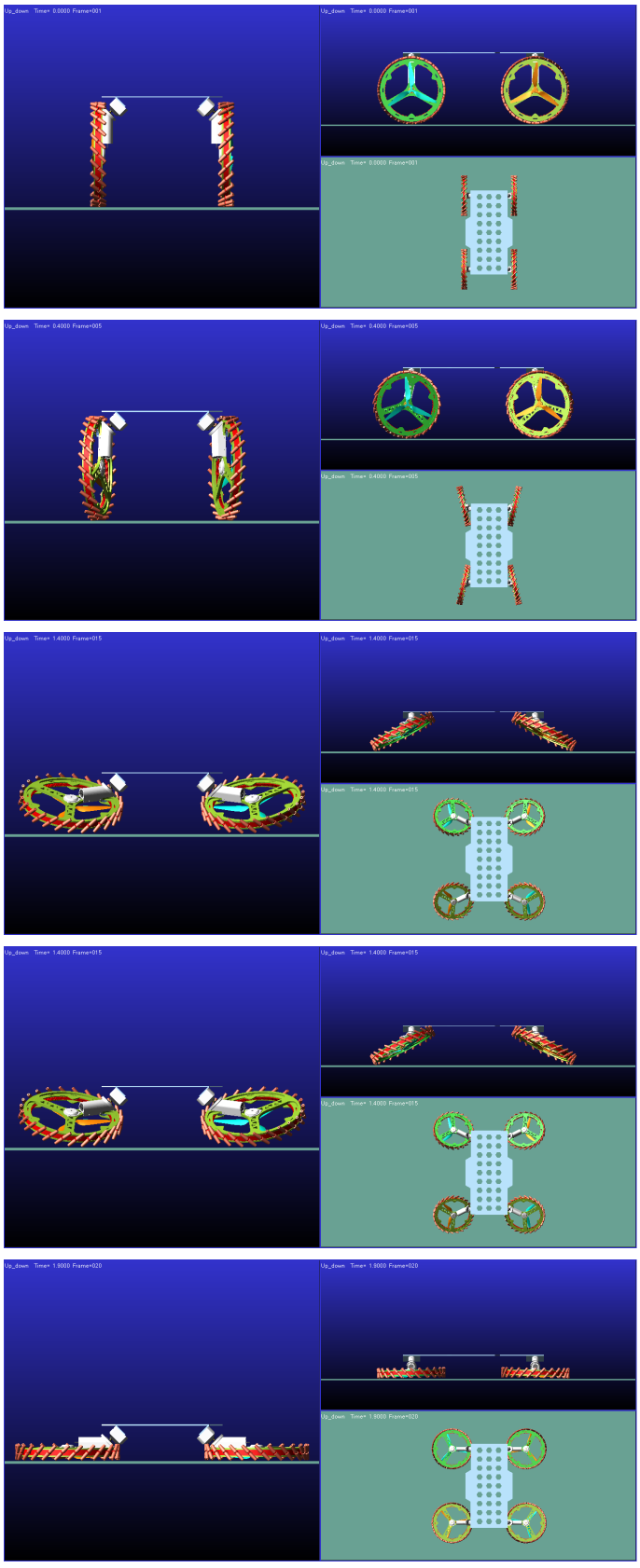


Figura 4.37: Secuencia de reconfiguración realizada en Adams View.

La revisión de los árboles de clasificación de conceptos evidenció que los sistemas de ajuste de altura, suspensión y reconfiguración podían integrarse en un único mecanismo basado en eslabones articulados (extremidades). En consecuencia, esta integración permitiría incorporar el desplazamiento mediante extremidades al sistema de locomoción terrestre, así como una operación en modo péndulo invertido sobre ruedas.

Es importante destacar que, bajo esta nueva configuración, la suspensión dejaría de ser pasiva, requiriendo sensores para percibir el entorno y controlar el movimiento relativo de las extremidades, garantizando estabilidad y contacto continuo con el terreno. En esta etapa, no se contempla el uso de resortes o amortiguadores con el fin de reducir peso, aunque su incorporación será evaluada conforme a los resultados funcionales obtenidos. El desarrollo detallado de este sistema se aborda en la siguiente iteración del prototipo.

4.2.3. Segundo rediseño del sistema mecánico

4.2.3.1. Sistema aéreo

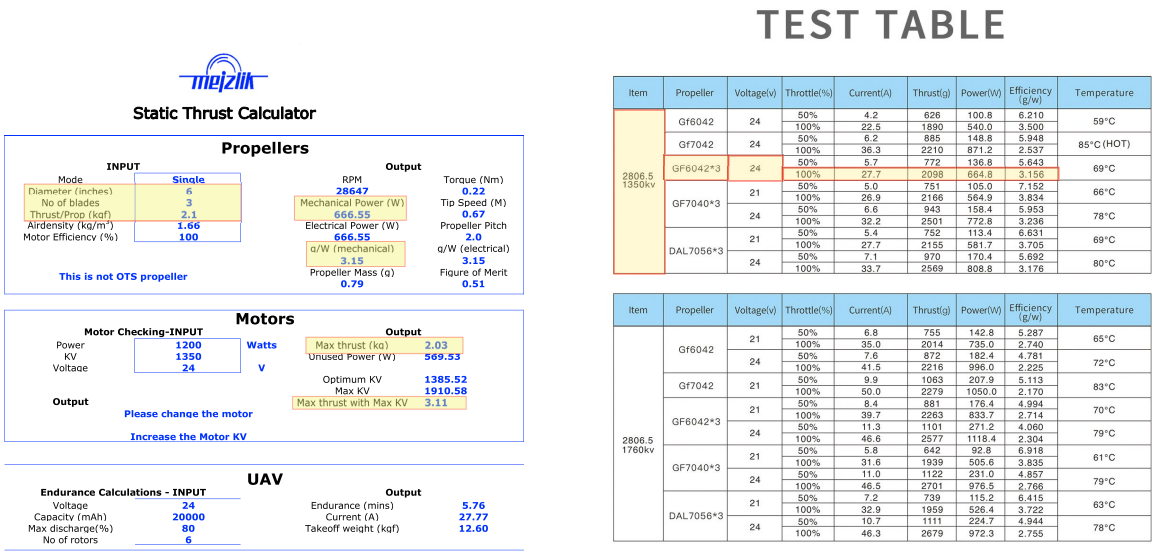
La creciente popularidad e incorporación de multirrotores ("*drones*") en sectores como la agricultura y la cinematografía ha impulsado el desarrollo de componentes compactos, pero con alto rendimiento y eficiencia. La Figura 4.38 muestra un motor sin escobillas diseñado para aplicaciones cinematográficas, capaz de generar una fuerza de empuje de 2.098 kg utilizando una hélice de 6 pulgadas, es decir, con un diámetro menor a la mitad del empleado en el diseño anterior.

Para validar esta información, se utilizó una calculadora en Excel para estimar la fuerza de empuje estática y el desempeño teórico de las hélices, basada en la base de datos proporcionada por [202]. La Figura 4.39 muestra la comparación entre los datos generados por la calculadora y los valores especificados por el fabricante [203], utilizando como referencia una fuerza de empuje requerida de 2.1 kg y los siguientes parámetros del sistema rotor-hélice:

- Actuador:
  - Tipo: Motor de corriente continua sin escobillas
  - Modelo: SPEEDX2 2806.5 1350 KV
  - Alimentación: 24 V
  - Velocidad nominal: 1350 rpm/V (KV)
- Hélice:
  - Diámetro: 152.4 mm (6 pulgadas)
  - Material: Policarbonato (PC)
  - Paso (*Pitch*): 4.2 pulgadas
  - Diámetro de cubo: 5 mm



Figura 4.38: Motor sin escobillas para aplicaciones de cinematografía, modelo SPEEDX2 2806.5 1350KV [203].



(a) (b)

Figura 4.39: Comparativa entre desempeños del motor-hélice. (a) teóricos [202]; (b) proporcionados por el fabricante [203].

- Número de aspas: 3
- Forma: No especificado
- Empuje máximo: 2,098 g (acorde al motor SPEEDX2 2806.5 1350KV)
- Modelo: Gemfan Flash 6042x3

Los resultados obtenidos mostraron una potencia calculada de 666.55 W frente a los 664.8 W reportados, una eficiencia en la relación peso-potencia de 3.15 g/W comparada con 3.156 g/W del fabricante, y una fuerza de empuje de 2.03 kg frente al valor reportado de 2.098 kg. Asimismo, estos resultados indican que el motor se encuentra operando en el límite de su capacidad.

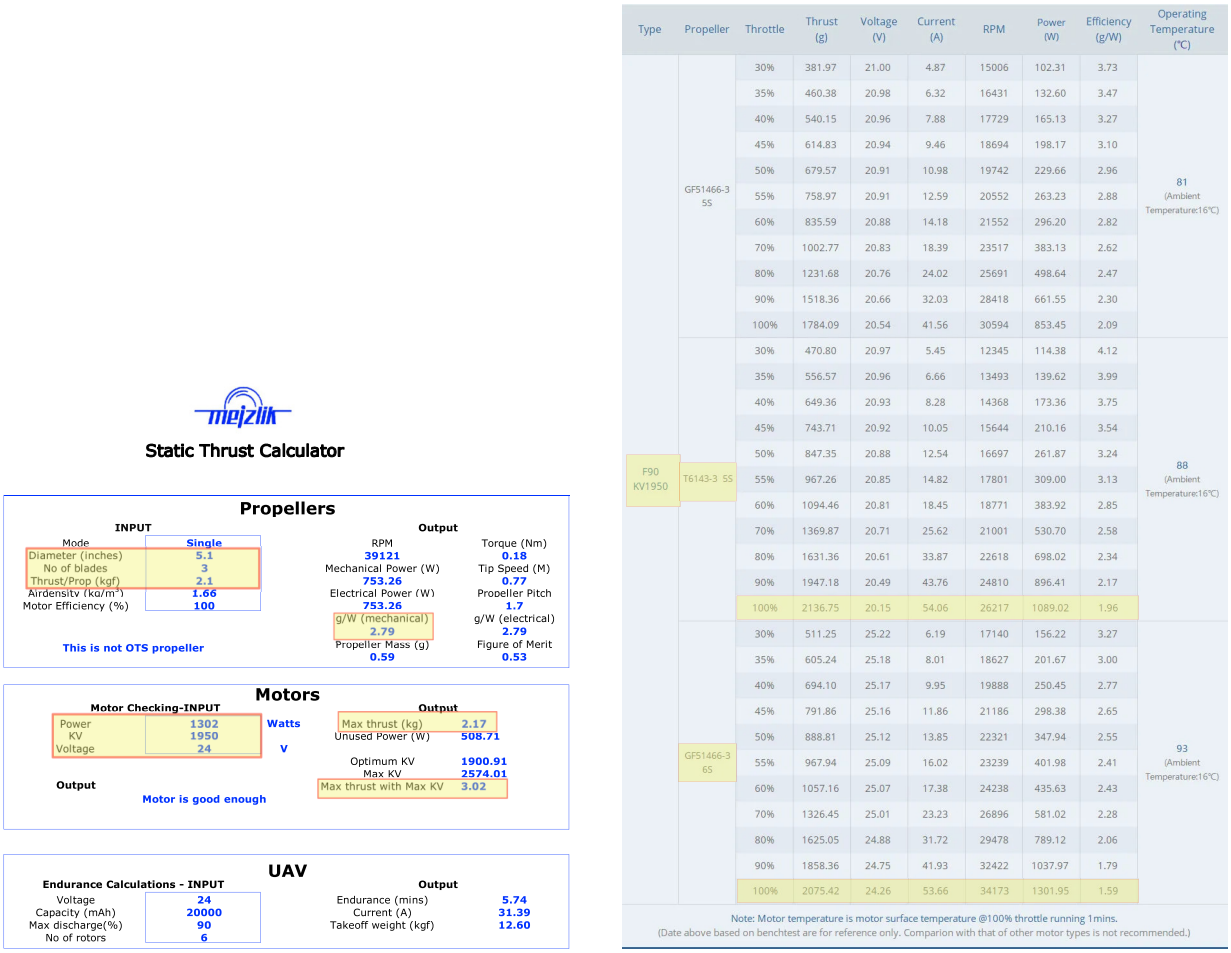
En consecuencia, se exploraron nuevos modelos dentro de la categoría de motores para cinematografía. Se identificó una combinación que permite el uso de hélices de 5.1 o 6.1 pulgadas con un motor de 1950 KV, alcanzando fuerzas de empuje superiores a 2 kg, como se muestra en la Figura 4.40(b).

Dado que la combinación rotor-hélice permite obtener una fuerza de empuje considerable con la mitad del diámetro del diseño anterior, se retomaron las dimensiones iniciales de 200 mm de diámetro para las ruedas. El diámetro interno del rin en el primer diseño era de 149 mm, lo cual impide albergar una hélice de 6.1 pulgadas. Por esta razón, se optó por una configuración que incorpora un motor de 1950 KV con una hélice de 5.1 pulgadas. La Figura 4.40 muestra los valores calculados, así como los proporcionados por el fabricante, en los cuales se valida que esta configuración es capaz de generar una fuerza de empuje de 2075 g.

Si bien existen algoritmos para la selección de motores en configuraciones multirrotor (como hexacópteros y cuadricópteros) [204, 205], en el caso del hexacóptero los parámetros requeridos son complicados de determinar debido al desconocimiento de las de condiciones del entorno y la experiencia limitada en el desarrollo de este tipo de vehículos aéreos, asimismo, el autor emplea una plataforma web de pago para validar que la selección de componentes se asemeje a componentes comercialmente disponibles. Por otro lado, en el caso del cuadricóptero, la selección depende del peso total del vehículo, el tiempo de vuelo estimado y las características de las bases de datos disponibles, las cuales tienden a ser limitadas o poco precisas.

Por este motivo, para este desarrollo se decidió emplear la calculadora en Excel y la hoja de datos del fabricante, con el objetivo de validar la configuración seleccionada. Los parámetros correspondientes se listan a continuación:

- Actuador:
  - Tipo: Motor corriente contínua sin escobillas
  - Modelo: Tmotor F90 2806.5 1950KV
  - Alimentación: 24 V
  - Velocidad nominal: 1950 rpm/V (KV)
- Hélice:
  - Diámetro: 5.1 pulgadas (∼131.8 mm)
  - Material: Policarbonato (PC)
  - Paso (*Pitch*): 3.6 pulgadas
  - Diámetro de cubo: 5 mm
  - Número de aspas: 3
  - Forma: Puntiaguda
  - Empuje máximo: 2075 g (acorde al motor Tmotor F90 2806.5 1950KV)
  - Modelo: Gemfan Hurricane 51466 V2 3-Blade MCK Edition.



(a) (b)

Figura 4.40: Comparativa entre desempeños de la versión final de motor-hélice. (a) teóricos; (b) proporcionados por el fabricante.

Durante este rediseño se conservaron varias de las características validadas previamente mediante simulaciones en Adams View. Por ello, se desarrollaron de forma paralela tanto una versión simplificada (pieza individual sin redondeos ni detalles de manufactura), como una versión detallada (pieza descompuesta en elementos individuales listos para fabricación y ensamble), utilizando la opción de configuraciones en SolidWorks. No obstante, para evitar una extensión excesiva en esta sección, se describen a continuación únicamente los diseños detallados de los diversos componentes.

4.2.3.2. Rodillos

El rediseño del tercer prototipo inicia nuevamente con los rodillos, dado que sus dimensiones y cantidad determinan las características geométricas tanto de la rueda como del rin. En esta iteración, el perfil del rodillo se obtuvo mediante ecuaciones asociadas a la elipse generada

por el corte diagonal de la rueda con un plano inclinado imaginario a un ángulo $\gamma = 45°$, el cual representa la orientación de los ejes de los rodillos respecto al eje axial de la rueda, como se muestra en la Figura 4.41.

El perfil elíptico resultante tiene como eje mayor la relación $a = R/\sin\gamma$, y como eje menor el radio de la rueda $b = R$. Así, el perfil del rodillo satisface la ecuación:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{4.2.1}$$

Los parámetros utilizados para el cálculo del rodillo fueron:

- Radio de la rueda: $R = 100$ mm
- Número de rodillos: $n = 20$
- Orientación de los rodillos: $\gamma = \frac{\pi}{4}$ [rad], $(45°)$
- Ángulo de cobertura del rodillo en la rueda: $\varphi = \frac{2\pi}{n}$ [rad]
- Radio máximo del rodillo: $r_{max} = 8$ mm
- Distancia del centro de la rueda al eje del rodillo: $R - r_{max} = 92$ mm
- Eje del rodillo: 4 mm.

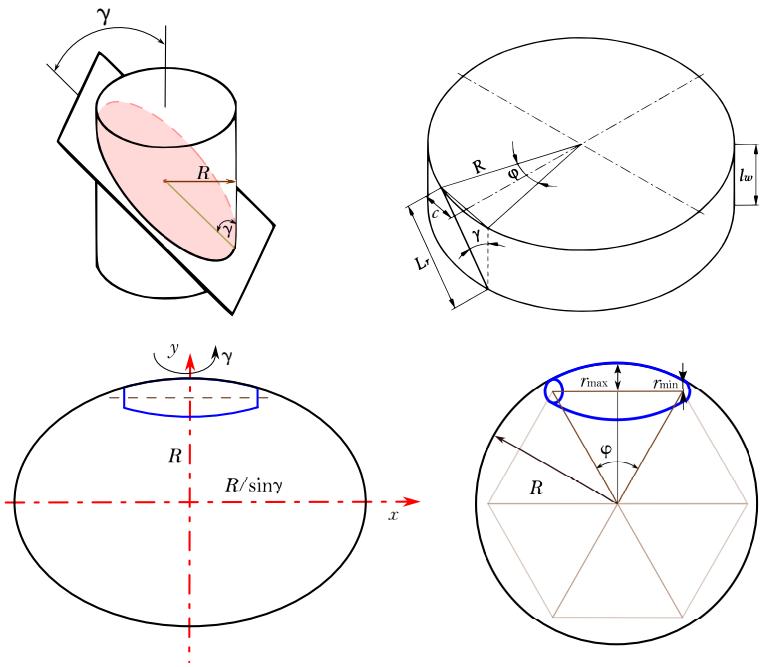


Figura 4.41: Perfil elíptico del rodillo obtenido tras el corte de un plano a un ángulo $\gamma = 45°$ del plano axial de la rueda y tamaño acorde al número de rodillos determinado por φ.

Con estos valores, la longitud del rodillo se determina con:

$$L_r = \frac{2(R - r_{max}) \tan \frac{\varphi}{2}}{\sin \gamma} \tag{4.2.2}$$

El ancho de la rueda queda determinado por:

$$l_w = L_r \cos \gamma \tag{4.2.3}$$

En SolidWorks, se definieron variables globales asociadas a estos parámetros. Posteriormente, dentro de un croquis se insertó una curva conducida por ecuación en su forma paramétrica con: $x(t) = a \cos t$, y $y(t) = b \sin t$, como se muestra en la Figura 4.42. Esto resultó en una longitud de rodillo de 41.21 mm y un ancho de rueda de 29.14 mm.

Dado que se requiere un montaje central, se realizó un corte de 5 mm en el centro del rodillo, generando así las mitades izquierda y derecha. Para proporcionar mayor rigidez y facilitar el montaje, se realizó un corte por revolución para añadir una base entre el rodillo y su eje. Asimismo, se incorporaron cuatro ranuras a lo largo del eje para colocar anillos de retención que aseguren la posición de los rodillos.

En el centro del eje del rodillo se diseñó un saliente con 28 nervaduras que permiten su rotación libre o bloqueo, en conjunto con el mecanismo correspondiente. Este mecanismo de

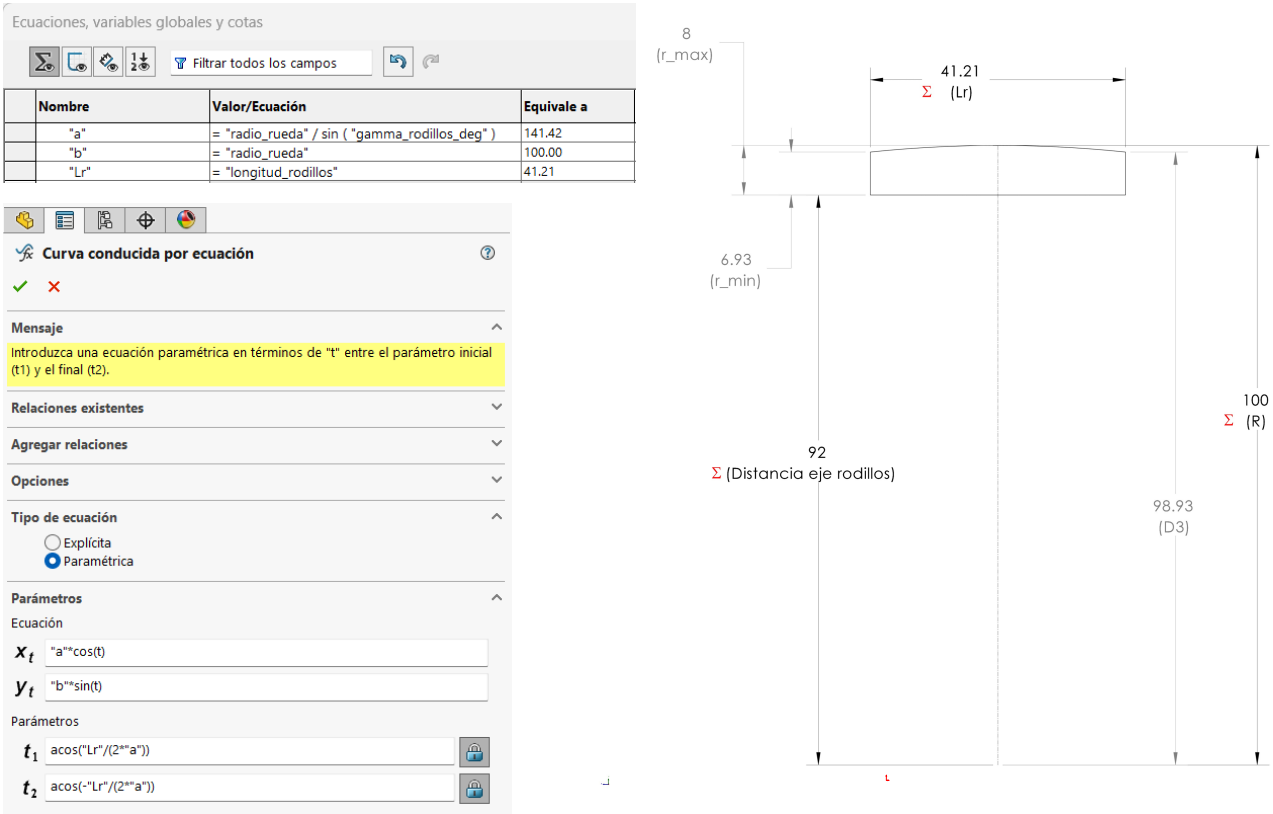
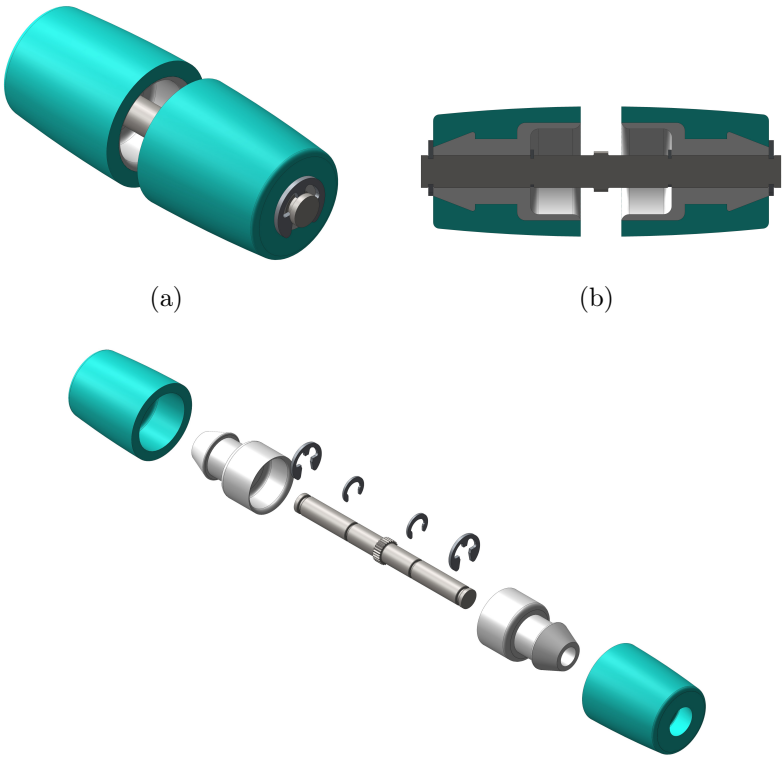


Figura 4.42: Obtención del perfil del rodillo en Solidworks mediante ecuaciones paramétricas.

bloqueo y liberación, propuesto en [186], permite reducir las pérdidas de energía y mejorar la tracción cuando se requiere que la rueda funcione como una rueda convencional. El funcionamiento completo del mecanismo se detalla en la subsección dedicada al soporte del rodillo. El ensamble y la vista explosionada de los componentes del rodillo se muestran en la Figura 4.43.



(a) (b)

(c)

Figura 4.43: Ensamblaje del diseño a detalle del rodillo. (a) vista isométrica; (b) corte en la vista frontal; (c) vista isométrica explosionada.

4.2.3.3. Soporte Rodillos

El soporte central de los rodillos fue diseñado como un componente independiente de la rueda, con el fin de lograr una arquitectura modular que facilite su mantenimiento en caso de fallas, y permita integrar por separado el sistema de bloqueo y liberación de los rodillos. Inicialmente se modeló como una sola pieza, y utilizando las configuraciones de SolidWorks, se dividió en dos partes mediante un corte simétrico. Asimismo, se realiza una operación de vaciado en ambas partes para permitir el acoplamiento y sujeción mediante tornillos, la incorporación de dos rodamientos para proveer mejor soporte y rotación, así como integrar el mecanismo de bloqueo y liberación.

En el mecanismo se integraron dos resortes torsionales y un mecanismo de piñón con doble cremallera, cuya función es bloquear y liberar el giro del eje, similar al mecanismo de una llave de trinquete. El resorte aplica una fuerza ligera entre el seguro y las nervaduras del eje, garantizando el bloqueo de la rotación en ambas direcciones por defecto.

El desbloqueo ocurre únicamente cuando los rodillos se encuentran en una determinada zona inferior del rin, específicamente diseñada para liberar este mecanismo. Por esta razón, la orientación de la rueda resulta determinante para el tipo de locomoción: si la zona del rin diseñada para el desbloqueo está en dirección al suelo, se habilita el movimiento omnidireccional; de lo contrario, la rueda actúa como una rueda convencional.

La operación de liberación se activa mediante el contacto entre el saliente ubicado en la base del rin y una de las cremalleras del mecanismo piñón-doble cremallera. Este contacto provoca el desplazamiento vertical ascendente de la primera cremallera, lo cual a su vez genera el desplazamiento inverso en la segunda cremallera. Como resultado, los seguros se retraen, permitiendo el giro libre del rodillo. La Figura 4.44 muestra el ensamble del soporte con los mecanismos de bloqueo y liberación, mientras que la Figura 4.45 muestra el montaje del rodillo en su soporte y una vista seccionada del mecanismo interno.

El video del funcionamiento de este mecanismo se presenta en el Apéndice A1.5.

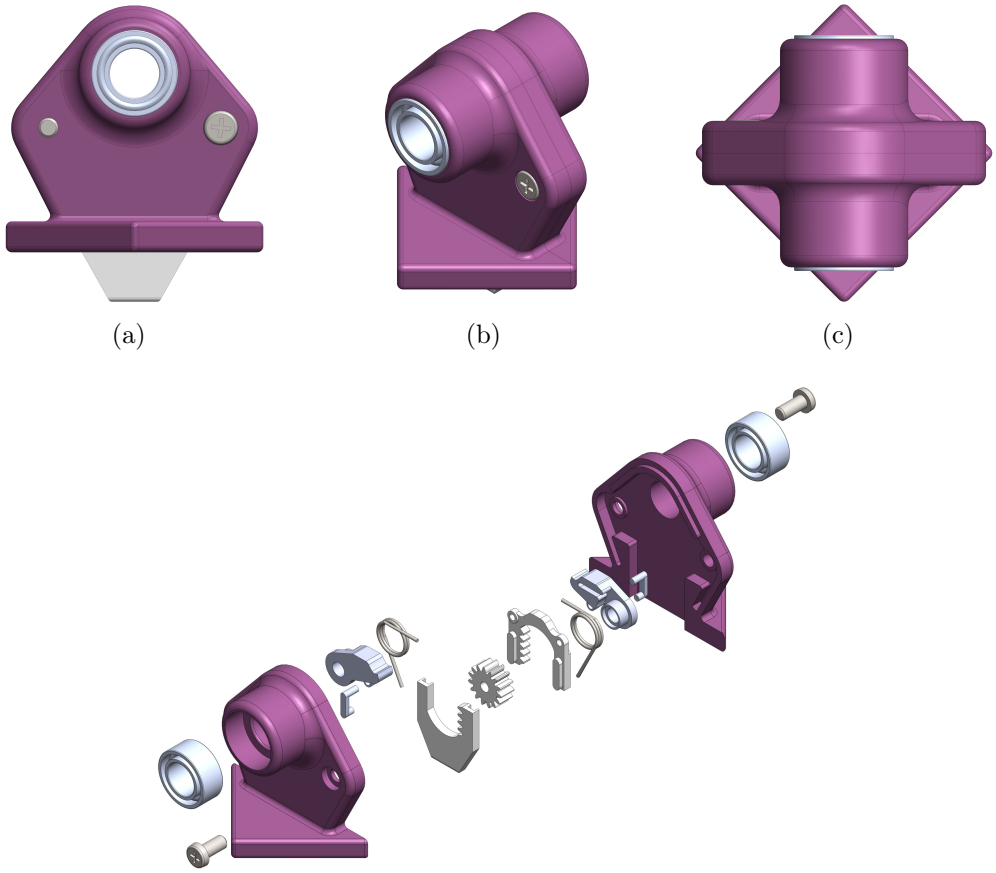
4.2.3.4. Rueda

Una vez definido el diámetro y determinado el ancho de la rueda conforme al diseño de los rodillos, se procedió con su diseño completo para que pueda ensamblarse con los soportes de los rodillos, incorporar un engranaje interno, montarse sobre el rin y alojar en su interior un par rotor-hélice.

Para facilitar variaciones geométricas, se utilizó nuevamente la herramienta de configuraciones de SolidWorks, permitiendo definir dos orientaciones distintas para los soportes de los rodillos, al mismo tiempo que se mantienen constantes las demás características, como se muestra en la Figura 4.46.

En este rediseño, el engranaje interno se modeló mediante ecuaciones basadas en el perfil de involuta, en lugar de la caja de herramientas (toolbox) para engranajes empleada en versiones anteriores, como se muestra en la Figura 4.47. Las especificaciones del engranaje interno son:

- Ancho de la cara: 10 mm
- Diámetro de paso: 150 mm
- Número de dientes: 150
- Módulo: 1
- Ángulo de presión: 20°.



(a) (b) (c)

(d)

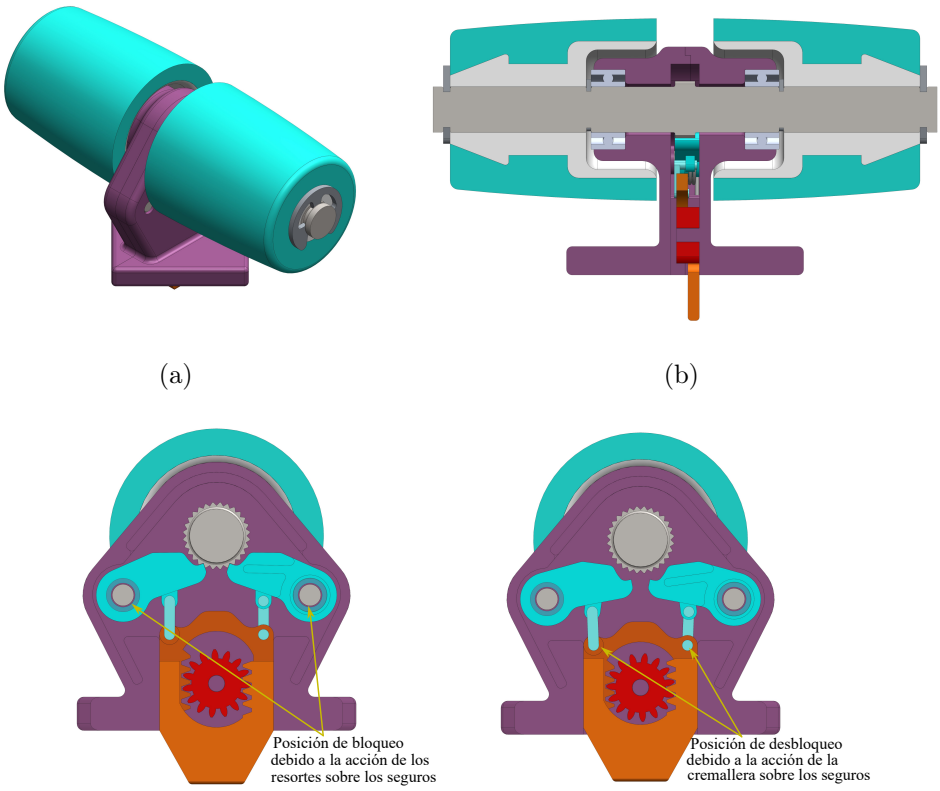
Figura 4.44: Ensamble del soporte para rodillos. (a) vista frontal; (b) vista isométrica; (c) vista superior; (d) vista isométrica explosionada.

Finalmente, el ensamble entre los segmentos de la rueda y los soportes de rodillos se realizó mediante cinco tornillos, como se muestra en la Figura 4.48.

4.2.3.5. Rin

El diseño del rin se realizó de forma que permite alojar rodamientos que actúan como soporte de la rueda, reduciendo al mismo tiempo la fricción durante el giro. El perfil del arco superior fue diseñado completamente liso, mientras que la parte inferior presenta un ligero saliente de 1 mm y una longitud de arco de 114.52 mm, el cual desplaza 0.5 mm la cremallera inferior del mecanismo de liberación del rodillo y permite que la segunda cremallera retire temporalmente los seguros. La Figura 4.49 muestra el diseño resultante del rin, donde el saliente inferior se indica en color verde.

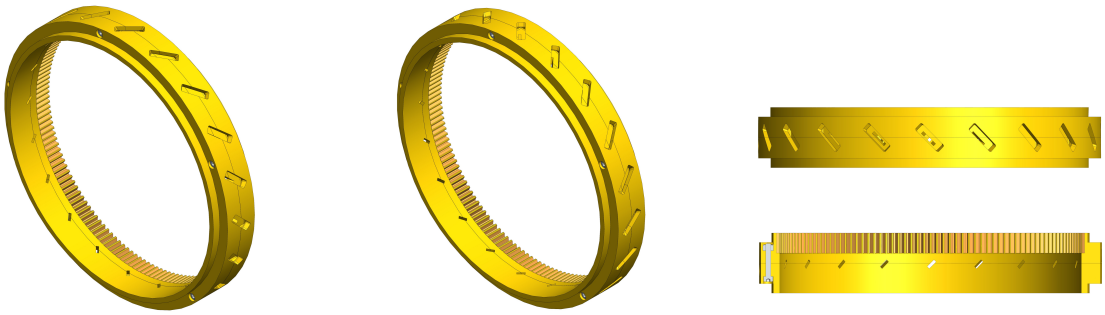
El motor sin escobillas se monta en la parte central del rin, mientras que el motor de corriente continua, la caja reductora integrada y el codificador (encoder) se colocan vertical-



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.45: Ensamblaje del rodillo y soporte. (a) Vista isométrica; (b) corte lateral que muestra los diversos componentes;(c) corte frontal mostrando el sistema de bloqueo activo; (d) corte frontal mostrando el sistema de bloqueo liberado.



(a) (b) (c)

Figura 4.46: Configuraciones de rueda. (b) configuración A; (b) configuración B; (c) corte superior que visualiza el engrane interno de la rueda.

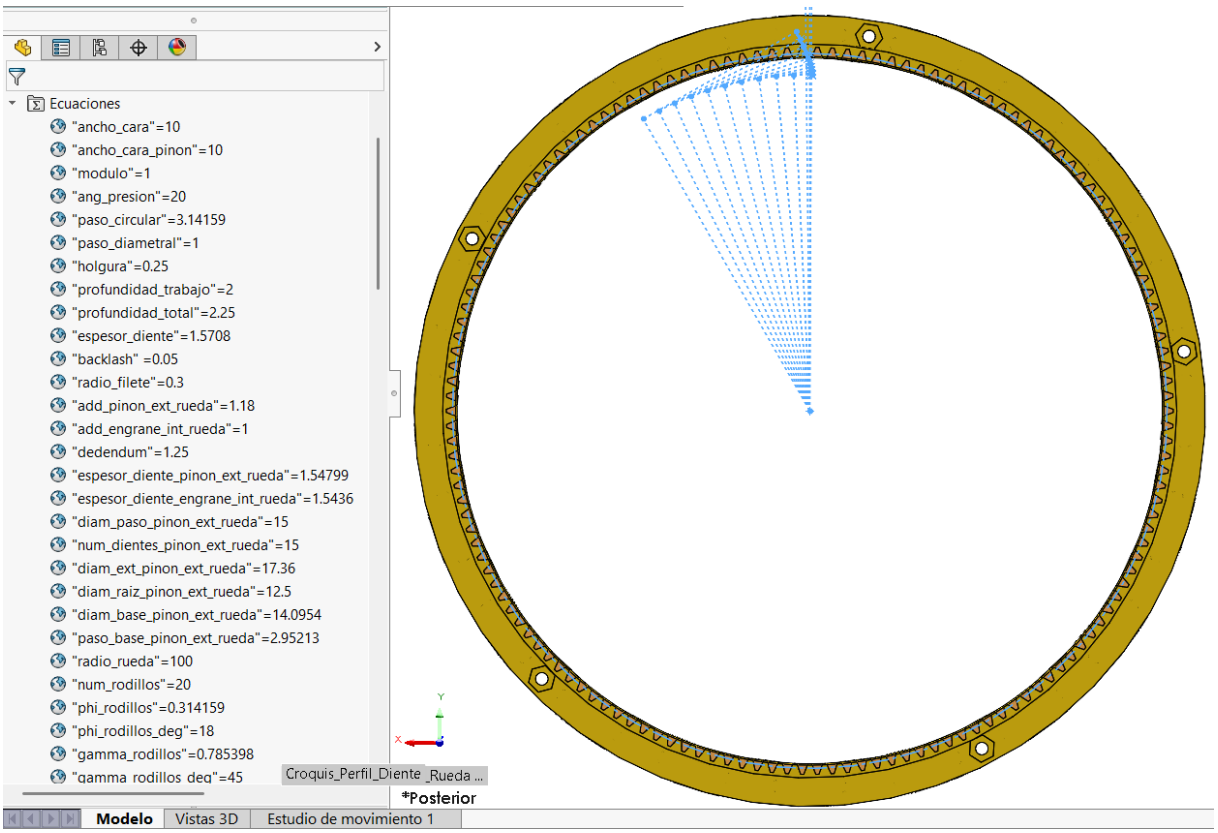
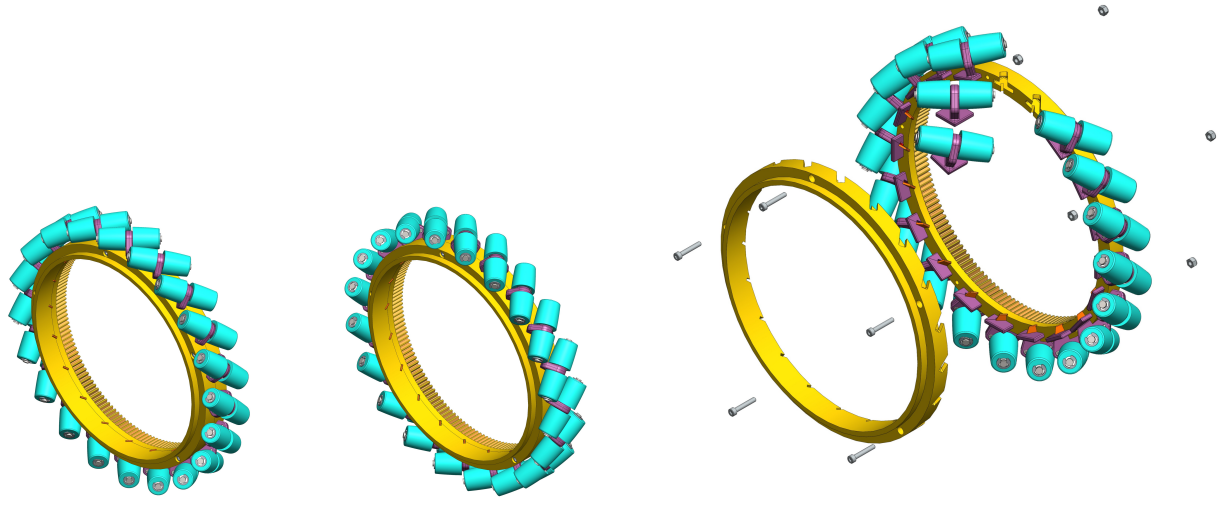
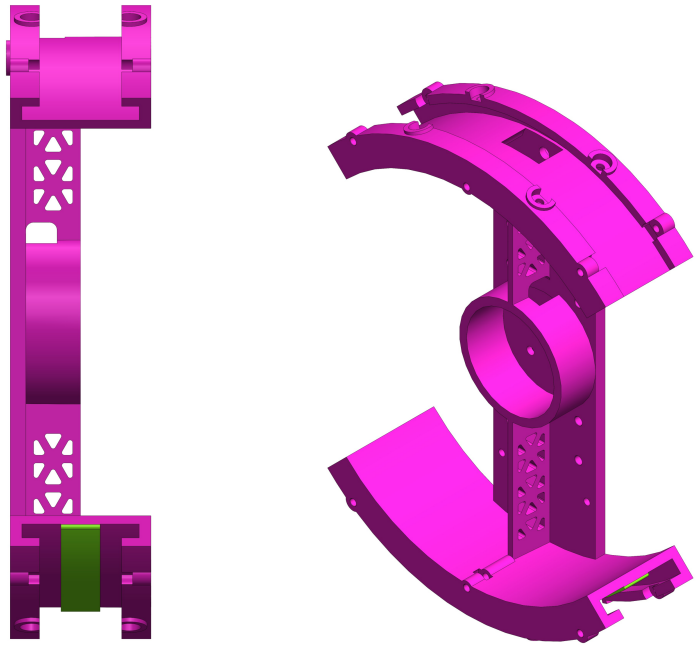


Figura 4.47: Ecuaciones empleadas en el diseño del engrane interno de la rueda.



(a) (b) (c)

Figura 4.48: Rueda mecanum final. (a) vista isométrica de rueda en configuración A; (b) vista isométrica de rueda en configuración B;(c) vista isométrica explosionada de una rueda.



(a) (b)

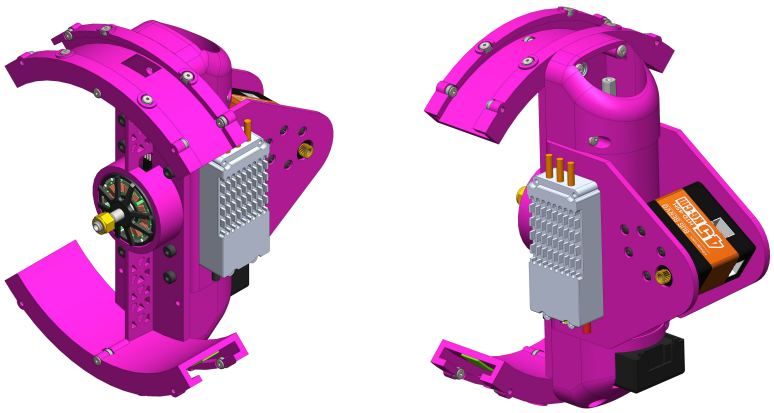
Figura 4.49: Diseño del rin. (a) vista lateral izquierda; (b) vista isométrica.

mente en una tapa superior, donde también se alojan los engranajes cónicos que transmiten el par del motor hacia el engrane recto que actúa como piñón, el cual a su vez acciona el engranaje interno de la rueda. La relación de transmisión entre los engranajes cónicos es de 15:20, y entre los engranajes rectos, de 150:15, lo que da una relación de 7.5:1 entre la rueda y la salida de la caja reductora. Esta última tiene una relación interna de 21:1, por lo cual la relación total desde la rueda hasta el eje del motor es de 157.5:1, valor semejante al de 150:1 presente en diseños anteriores sin caja reductora integrada.

La tapa superior y su contraparte inferior se montan sobre una estructura central fabricada mediante operaciones de chapa metálica, con un espesor de lámina de 3 mm. Esta estructura soldada permite la fijación del controlador electrónico de velocidad (ESC, *Electronic Speed Controller*, por sus siglas en inglés) de los motores sin escobillas, así como uno de los cuatro servomotores que conforman al mecanismo de las extremidades. La Figura 4.50 muestra diferentes vistas del ensamble del rin con sus componentes asociados.

Considerando los elementos de sujeción, como tornillos y rodamientos, se obtuvo un diámetro interno de la rueda de 148 mm, mientras que el del rin es de 140 mm, lo que deja espacio suficiente para alojar una hélice de 5.1 pulgadas, e incluso una de 5.2 pulgadas capaz de generar una fuerza de empuje teórica de 2.28 kg, conforme a los datos proporcionados por la calculadora en Excel. La Figura 4.51 muestra el ensamble completo de la rueda, rodillos, rin y hélice en sus dos configuraciones.

El video del funcionamiento del ensamble completo de la rueda bajo la fuerza de gravedad y contacto entre elementos se presenta en el Apéndice A1.6

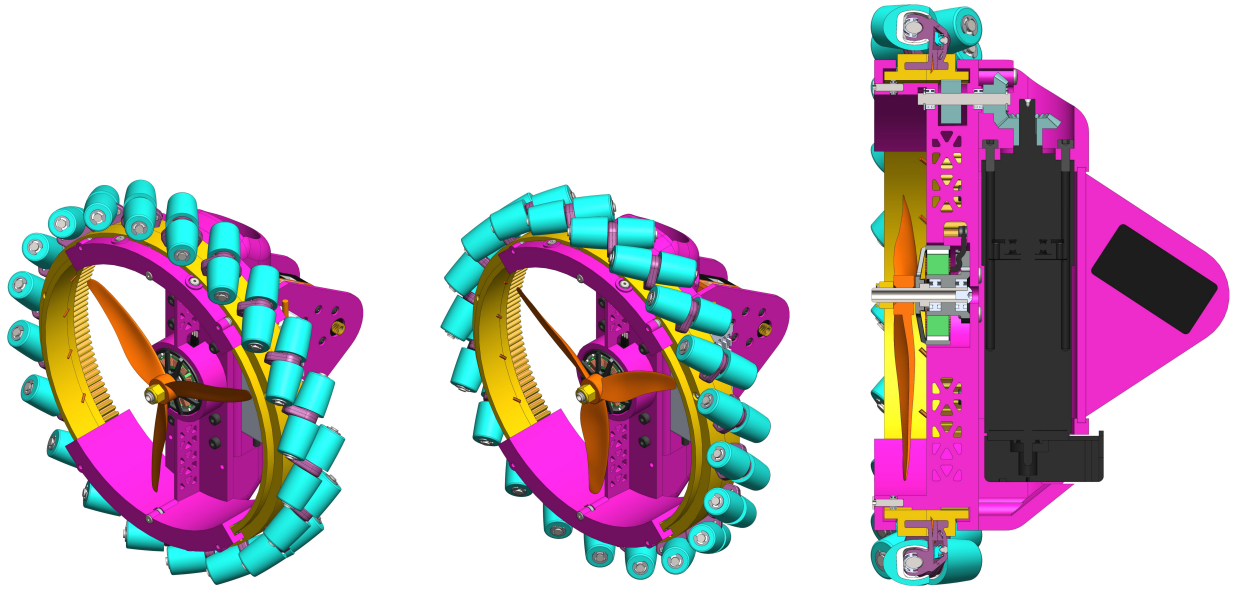


(a) (b)



(c)

Figura 4.50: Ensamble del rin con su componentes. (a) vista isométrica frontal; (b) vista isométrica posterior;(c) vista isométrica explosionada.



(a) (b) (c)

Figura 4.51: Ensamble de la rueda mecanum. (a) vista isométrica en configuración A; (b) vista isométrica en configuración B;(c) vista en corte lateral para apreciar el sistema de transmisión.

Según se muestra en la Figura 4.52, la masa preliminar del ensamble de la rueda es de 1.276 kg, calculada utilizando materiales típicos como ABS, SBR, aluminio 6061, acero AISI 1020, acero inoxidable AISI 304 y policarbonato. La validación final de esta selección de materiales se llevará a cabo una vez completado el prototipo. Actualmente, la masa total del prototipo con cuatro ruedas mecanum es de 5.104 kg, lo que deja disponibles 3.196 kg de los 8.3 kg de empuje total que pueden generar las cuatro hélices instaladas en las ruedas. Por lo tanto, se propone que el chasis incorpore dos pares rotor-hélice de dimensiones similares, capaces de generar una fuerza de empuje combinada de 12.45 kg, permitiendo así una carga útil de hasta 7 kg para el resto de los componentes del robot.

Finalmente, la Figura 4.53 muestra un acercamiento al funcionamiento del mecanismo de bloqueo y liberación de los rodillos, así como la interacción con el saliente ubicado en el arco inferior del rin.

4.2.3.6. Extremidades

Los actuadores seleccionados para las articulaciones son servomotores digitales Hiwonder HTD-45H, los cuales se controlan mediante bus serial. A diferencia de los servomotores analógicos o aquellos que emplean señales PWM, estos dispositivos permiten el intercambio de información en tiempo real como posición, temperatura y ángulo a través de una única cone-

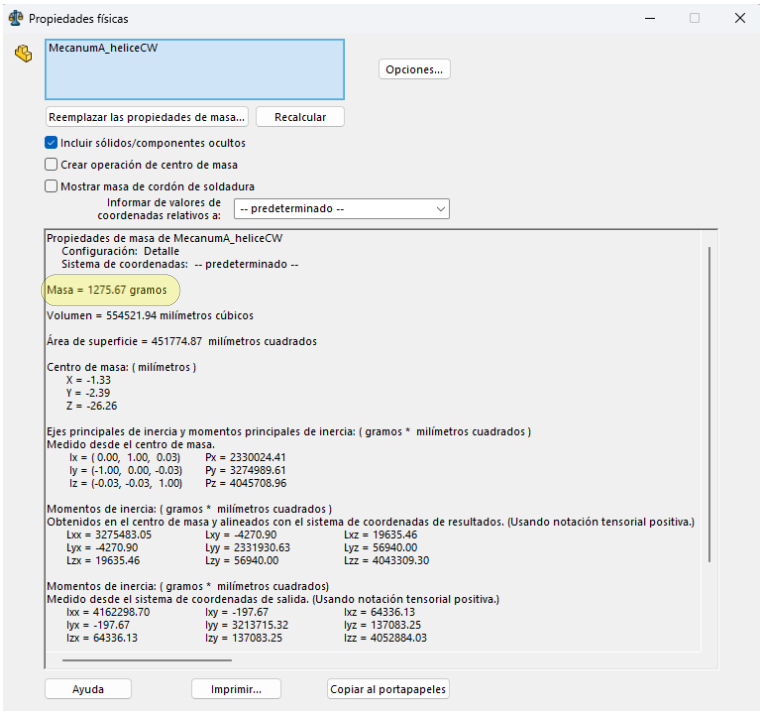
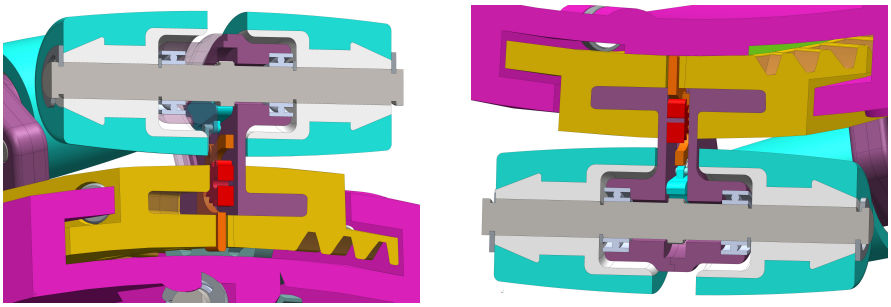


Figura 4.52: Masa preliminar del ensamble de la rueda.



(a) (b)

Figura 4.53: Vistas del funcionamiento del mecanismo de bloqueo/liberación del rodillo. (a) mecanismo de bloqueo activado; (b) mecanismo de bloqueo liberado.

xión. Además, el cableado reducido otorga mayor libertad de movimiento a las articulaciones. Este modelo incorpora engranajes metálicos y un segundo eje fijo que proporciona mayor estabilidad en el movimiento de las articulaciones, además de ser compatible con diversas tarjetas de control. El par de torsión máximo alcanzado por estos servomotores es de 45 kg-cm.

Con base en esta información, y considerando una configuración cuadrúpeda tipo mamífero, se diseñaron los soportes de los servomotores que funcionan como eslabones de las extremidades. Es importante destacar que, según [47], este tipo de configuración requiere al menos tres grados de libertad, ya que no es necesario orientar el extremo final (tobillo) de forma específica. No obstante, el mecanismo híbrido propuesto en este trabajo requiere un grado de libertad adicional, necesario tanto para orientar las hélices horizontalmente como

para mantener la rueda perpendicular a la superficie ante variaciones de altura.

La Figura 4.54 muestra el diagrama de cuerpo libre utilizado para determinar las longitudes iniciales en función del par de torsión disponible. Para una comprensión de las diversas etiquetas asociadas a las articulaciones de las extremidades en dicha figura, estas se describen a continuación:

- H_{AA}: cadera abducción-aducción
- H_{FE}: cadera flexión-extensión
- K_{FE}: rodilla flexión-extensión
- A_{IE}: tobillo inversión-eversión.

En dicho diagrama se identifican varios valores conocidos como la masa del robot de 12 kg (limitada a la fuerza de empuje de las hélices), y la fuerza de empuje por hélice de 2 kgf. Asimismo, se establecen ciertas dimensiones como la distancia d_{y1} entre el centro de la rueda y el eje del servomotor que actúa como articulación del tobillo (A_{IE}) con 0.093 m, el radio de la rueda es de 0.1 m, y el diámetro de las hélices es de 0.12954 m.

Para las variables libres del sistema, se asumieron las siguientes condiciones: se igualaron las longitudes de las extremidades de cadera ($H_{FE} - d_{x2}$) y rodilla ($K_{FE} - d_{x3}$); la separación entre el centro de masas y las articulaciones de cadera ($H_{AA} - d_{x1}$) se estableció como mayor al radio de la rueda (r_w) para evitar interferencias en posición vertical; y la separación en el plano $y - z$ (d_{y3}) se consideró ligeramente superior al radio de la hélice ($\varnothing_H/2$), debido a la ubicación del par rotor-hélice en el chasis. Además, se asumió que las distancias verticales entre las articulaciones de cadera (H_{AA}), el centro de masas y el centro de las ruedas son iguales ($d_{z1} = d_{z2}$).

Estas consideraciones constituyen un punto de partida para dimensionar tanto las extremidades como el chasis del robot. No obstante, la posición final del centro de masas dependerá de la ubicación específica de los componentes electrónicos. Asimismo, las longitudes de las extremidades pueden ajustarse posteriormente para mejorar el rango de movimiento, facilitar la reconfiguración entre modos de operación o variar la disposición de las hélices para el modo hexacóptero.

Dada la simetría del prototipo, se analizó el equilibrio de fuerzas y momentos sobre un cuarto del cuerpo del robot. Bajo condiciones de equilibrio estático, se despreciaron las fuerzas en las direcciones x e y, quedando únicamente el peso actuando en dirección z. Los momentos se generaron respecto a los ejes x e y, pero no en z. El análisis mostró que cada fuerza normal en las ruedas equivale a un cuarto del peso del robot ($F_{Nw} = \frac{W}{4}$). Sin embargo, para simular condiciones dinámicas o de marcha cuadrúpeda, se consideró la distribución del peso en solo dos ruedas, recordando que se requieren tres puntos de contacto necesarios en equilibrio estático y dos en equilibrio dinámico, así como en el caso de operar en modo péndulo invertido sobre ruedas.

El análisis de momentos se realiza respecto al centro de masas. Debido a la variación en la disposición de las ruedas según la configuración, las longitudes de las extremidades

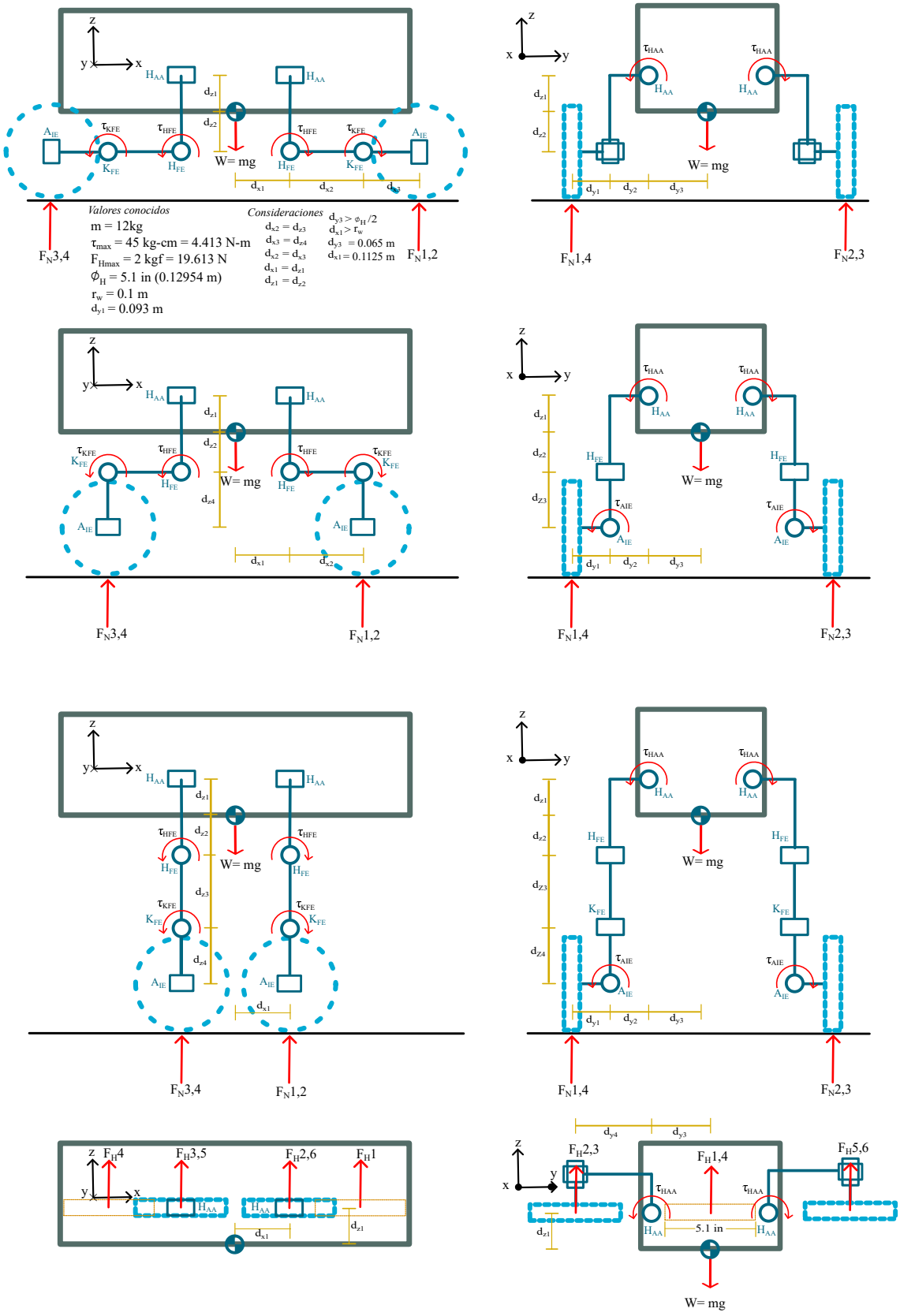


Figura 4.54: Diagramas de cuerpo libre para el diseño de los eslabones en las articulaciones.

se identifican con diferentes nomenclaturas en función del eje considerado. Por ejemplo, la longitud de la articulación K_{FE} se representa como d_{x3} en la configuración 1, y como d_{z4} en las configuraciones 2 y 3.

$$\sum M_{CMy} = 0; \quad (CCW+)$$
$$F_{Nw}\left(d_{x1} + d_{x2} + d_{x3}\right) = \left(\frac{\tau_{HFE}}{d_{x2} + d_{x3}} + \frac{\tau_{KFE}}{d_{x3}}\right)\left(d_{x1} + d_{x2} + d_{x3}\right)$$
$$F_{Nw} = \left(\frac{\tau_{HFE}}{2d_{x3}} + \frac{\tau_{KFE}}{d_{x3}}\right)$$
$$F_{Nw} = \frac{\tau_{HFE} + 2\tau_{KFE}}{2d_{x3}}$$
$$d_{x3} = \frac{\tau_{HFE} + 2\tau_{KFE}}{2F_{Nw}}$$
$$d_{x3} = \frac{4.413Nm + 2(4.413Nm)}{2(58.86N)}$$
$$d_{x2} = d_{x3} = 0.11246m$$

De estos análisis se concluye que para la primer configuración, las longitudes máximas para las extremidades H_{FE} y H_{KE} pueden alcanzar hasta 0.11246 m. Mientras, en configuraciones alternativas, se obtuvo un valor máximo de 0.1499 m. Con el objetivo de mantener compatibilidad en todas las configuraciones, se considera un valor de 0.075 m para ambas extremidades en el diseño inicial.

Para la longitud de la extremidad de cadera H_{AA} se realizó el siguiente análisis.

$$\sum M_{CMx} = 0; \quad (CCW+)$$
$$F_{Nw}\left(d_{y1} + d_{y2} + d_{y3}\right) = \left(\frac{\tau_{HAA}}{d_{y1} + d_{y2}}\right)\left(d_{y1} + d_{y2} + d_{y3}\right)$$
$$F_{Nw} = \frac{\tau_{HAA}}{d_{y1} + d_{y2}}$$
$$d_{y1} + d_{y2} = \frac{\tau_{HAA}}{F_{Nw}}$$
$$d_{y2} = \frac{\tau_{HAA}}{F_{Nw}} - d_{y1}$$
$$d_{y2} = \frac{4.413Nm}{58.86N} - 0.093m$$
$$d_{y2} = -0.0180m$$

El valor obtenido para la variable d_{y2} resultó negativo, lo cual indica que la distancia d_{y1} es mayor que la permitida según las restricciones geométricas del sistema. Esta última distancia está condicionada por el diseño del rin, cuya modificación implicaría un rediseño estructural completo del mismo. Tras analizar la secuencia de marcha, se concluyó que la configuración 1

no es adecuada para la alternancia entre dos puntos de contacto, esto debido a las limitaciones de movimiento en las extremidades. Por esta razón, se realizó un nuevo análisis bajo la modalidad de robot con ruedas, es decir, adoptando una distribución del peso sobre las cuatro ruedas. En dicho análisis, se obtuvo un valor máximo de d_{y2} igual a 0.0569 m.

Retomando el movimiento de marcha, este se evaluó con la configuración 2, en la que la orientación de la rueda y el par generado por el servomotor en la articulación del tobillo (A_{IE}) contribuyen al equilibrio de momentos. Como resultado, se logró una distancia máxima de d_{y2} de 0.2938 m.

A fin de evitar un incremento en la masa total del robot mediante la incorporación de servomotores de mayor par en las articulaciones de cadera (H_{AA}), se decidió conservar el modelo actual de servomotor. No obstante, se reconoce la necesidad de reducir la masa general del robot o, en su defecto, redimensionar el diseño del rin en etapas posteriores del desarrollo.

La Figura 4.55 muestra el modelo de servomotor empleado, su integración con los soportes mecánicos y las dimensiones iniciales consideradas. A continuación, se presentan las principales características del servomotor:

- Tipo: Servomotor digital por bus serial
- Modelo: Hiwonder HTD-45H
- Par de torsión: 45 kg-cm
- Voltaje de operación: 9-12.6 V
- Método de control: Comandos por serie UART
- Rango de rotación: $0° - 240°$
- Precisión en movimiento: $0.2°$.

4.2.3.7. Chasis

Para dar soporte a los sistemas mecánicos y alojar los componentes electrónicos, se diseñó la estructura base del chasis del robot considerando criterios de simetría y espacio suficiente para la instalación de dos motores con hélice. Estos, junto con las cuatro hélices integradas en las ruedas, permiten generar una fuerza de empuje combinada de hasta 12.45 kg durante la maniobra de despegue.

La Figura 4.56 muestra la geometría de las bases del chasis, definida a partir de un hexágono con un círculo inscrito de 400 mm de diámetro y un círculo circunscrito de 461.88 mm. Estas dimensiones se determinaron en función de las longitudes de las extremidades y la simetría requerida tanto en la configuración terrestre como en la aérea. Para esta última, los vértices del hexágono representan las posiciones de los motores con hélice, asegurando así una distribución simétrica.

Debido al rango de movimiento de las extremidades y a la ubicación de los soportes de los servomotores que actúan como articulaciones de cadera, la geometría final adquiere una

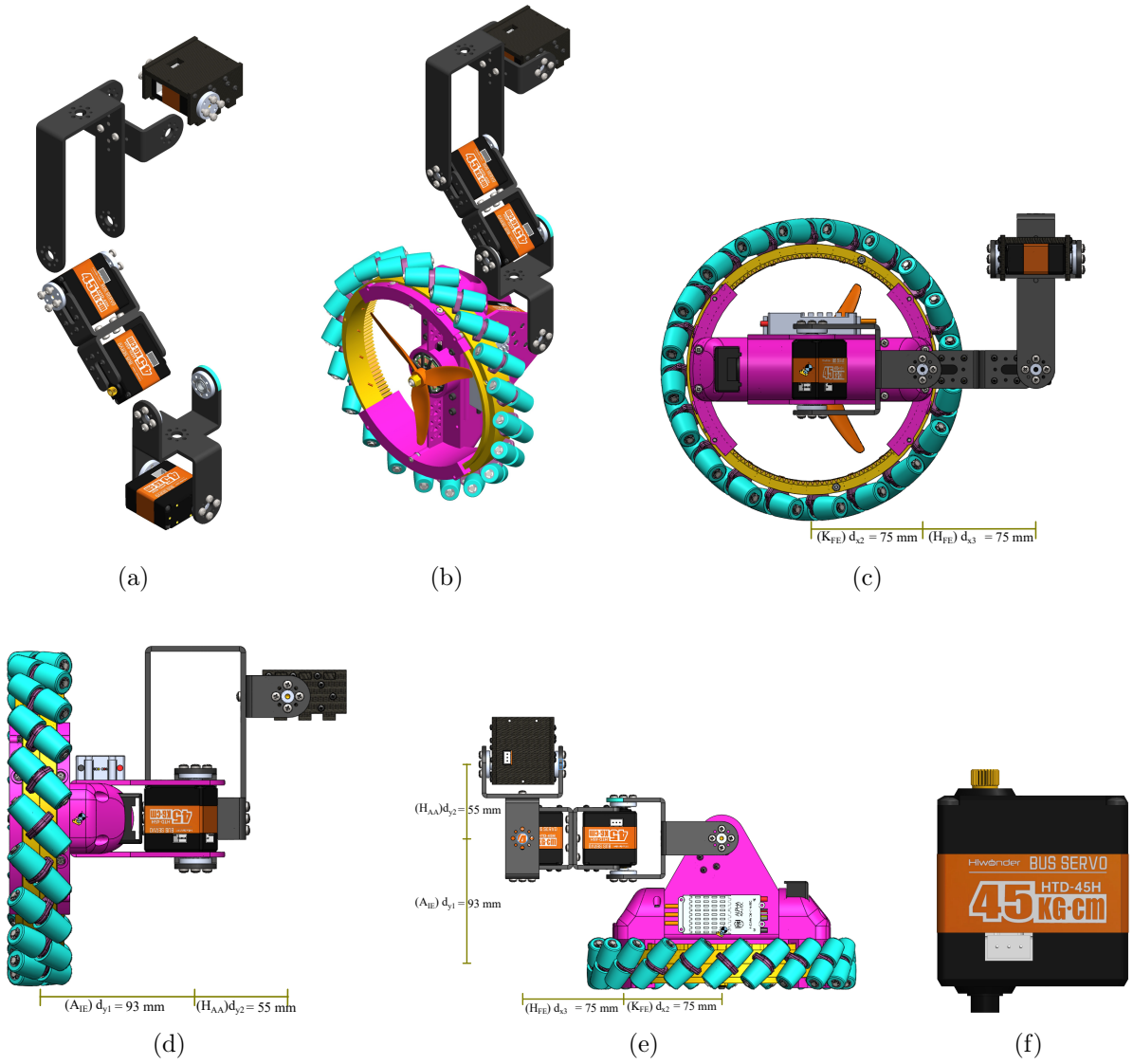
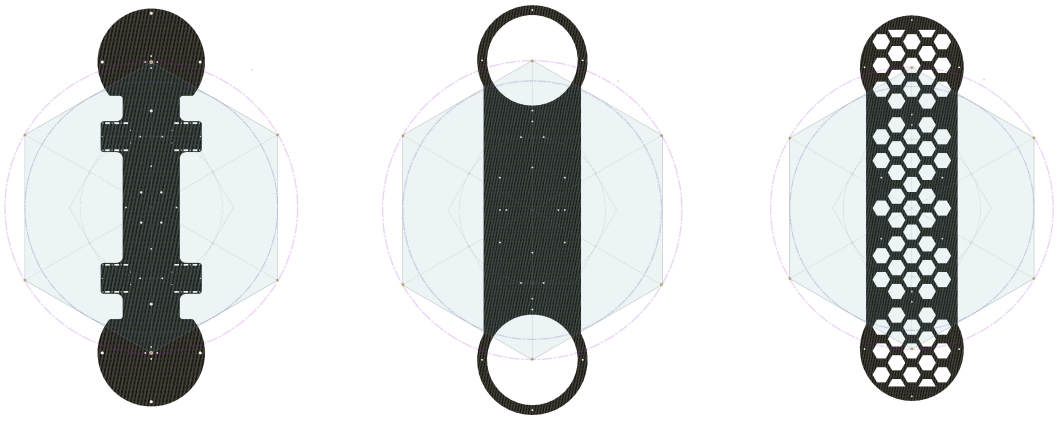


Figura 4.55: Extremidad como mecanismo de locomoción, ajuste de altura, suspensión y reconfiguración. (a) vista explosionada de los subensambles de la extremidad; (b) vista isométrica de los diversos mecanismos de locomoción; (c) longitudes de inicio en las extremidades H_{FE} y K_{FE}; (d) longitudes de inicio en las extremidades H_{AA} y A_{IE}; (e) longitudes en las extremidades H_{AA}, H_{FE}, K_{FE} y A_{IE}; (f) servomotor digital Hiwonder.



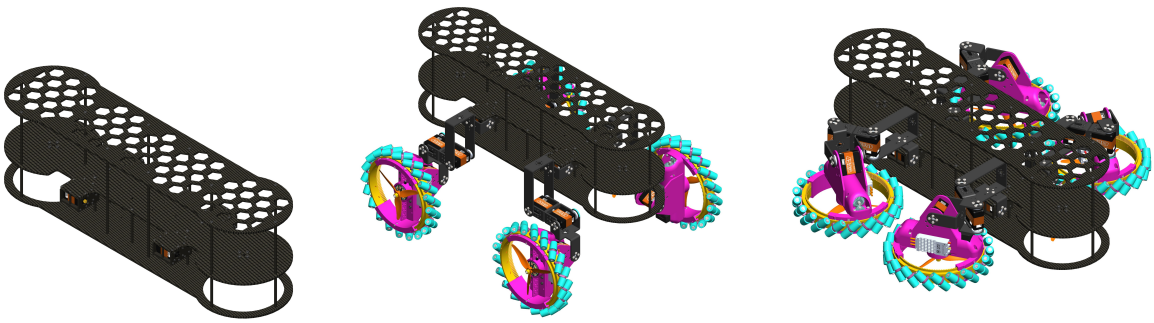
(a) (b) (c)

Figura 4.56: Bases para el chasis preliminar del prototipo. (a) base central para albergar el sistema electrónico; (b) base inferior para baterías y protección de hélices fijas; (c) base superior para colocación de sensores exteroceptivos.

forma ovalada. Además de la base central, destinada a albergar los componentes electrónicos del sistema, se diseñó una base inferior cuya función es proteger las hélices fijas de posibles impactos con el suelo, así como alojar las baterías. Debido a que las baterías representan una masa significativa del robot, estas contribuyen a reducir el centro de gravedad, mejorando la estabilidad general.

Finalmente, con el objetivo de incorporar sensores exteroceptivos que faciliten la interacción con el entorno, se incorporó una base superior destinada para el montaje de los mismos.

El ensamble del chasis con las extremidades se muestra en la Figura 4.57.



(a) (b) (c)

Figura 4.57: Ensamble mecánico del robot. (a) vista isométrica del ensamble del chasis; (b) vista isométrica del ensamblaje del sistema mecánico del robot en modo terrestre; (c) vista isométrica del ensamblaje del sistema mecánico del robot en modo aéreo.

Los videos del funcionamiento en operación terrestre y aéreo se presentan en los Apéndices A1.7 y A1.8, respectivamente.

4.2.4. Sistema electrónico

4.2.4.1. Actuadores

En esta etapa del desarrollo, se dispone de una visión más completa de los componentes que conforman el prototipo final. Para actualizar los actuadores de las ruedas, se parte de las consideraciones más relevantes: la masa máxima estimada del robot de 12 kg en relación con la fuerza de empuje proporcionada por las seis hélices; las modalidades de operación tipo péndulo invertido sobre ruedas o en marcha dinámica (dos ruedas en contacto); una velocidad máxima de 0.5 m/s; y la capacidad de desplazamiento sobre superficies con una inclinación de hasta 45°.

De acuerdo con el diagrama de cuerpo libre representado en la Figura 4.58, el par requerido en las ruedas para estos casos es de $\tau_w = 7.908$ Nm. Considerando una relación de transmisión entre la rueda y el eje que sale del reductor de 7.5:1, se selecciona un motor con reductor integrado y una relación de 23:1, lo cual da como resultado una relación total entre la rueda y el eje del motor de 172.5:1. En consecuencia, el par requerido en el motor es de $\tau_m = 0.0481$ Nm.

La elección de esta relación permitió mantener la compatibilidad con la familia Maxon Motor RE30, seleccionando un modelo con un par nominal de 51.6 mNm que opera a 12 V, a diferencia de otros modelos de la misma serie que trabajan a 18–24 V, aunque comparten dimensiones y masa similares.

$$\sum F_x = ma$$
$$v = cte \therefore a = 0$$

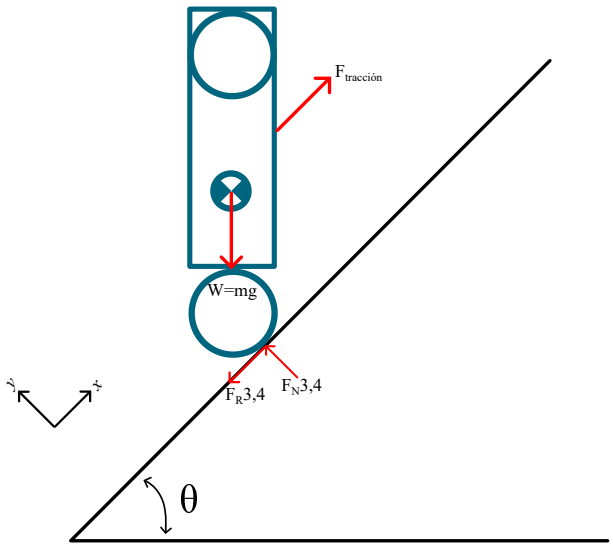


Figura 4.58: Diagrama de cuerpo libre para determinar par de torsión de las ruedas en configuración péndulo invertido sobre ruedas.

$$
\begin{aligned}
F_N = (F_{N3} + F_{N4}) &= mg\cos\theta \\
F_R = (F_{R3} + F_{R4}) &= \mu_s F_N \\
F_{traccion} = mg\sin\theta + F_R &= mg\left(\sin\theta + \mu_s\cos\theta\right)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
P = FV &= \tau\omega \\
\omega &= \frac{v}{r} \\
\tau &= \frac{P}{\omega}
\end{aligned}
$$

En cuanto a los servomotores, se mantienen sin modificaciones, excepto por el hecho de que como se indicó previamente, el valor del par proporcionado en la configuración 1 resulta insuficiente. No obstante, esta situación se abordará mediante la reducción de la masa del robot o el rediseño del rin de la rueda en rediseños posteriores.

Por su parte, los motores sin escobillas y las hélices también se mantienen sin cambios, de acuerdo con los cálculos desarrollados en su respectiva sección.

La Tabla 4.3 resume los principales parámetros técnicos de los actuadores seleccionados

4.2.4.2. Sistemas de control

Una vez seleccionados los actuadores del sistema de locomoción, se identificaron los componentes necesarios para su control adecuado. Para los motores de corriente continua utilizados en las ruedas mecanum, se seleccionó una tarjeta EPOS4 Compact 50/5 de Maxon Motors por cada motor. Esta controladora permite operar en modo de corriente (par), velocidad o posición, y admite el envío de comandos mediante el sistema operativo para robots (ROS), lo que resulta especialmente útil en el desarrollo de tareas avanzadas.

Los servomotores HiWonder se operan mediante una tarjeta controladora por bus serial, proporcionada por la misma compañía. Este dispositivo, también compatible con ROS, permite gestionar hasta 40 servomotores y ofrece una interfaz gráfica para su configuración y monitoreo. En el caso de los motores sin escobillas, se emplea un controlador electrónico de velocidad (ESC) de la marca T-Motor, el cual implementa la técnica de control de campo orientado (FOC, *Field Oriented Control*, por sus siglas en inglés), ofreciendo un control preciso, silencioso y con capacidad para manejar corrientes de hasta 60 A.

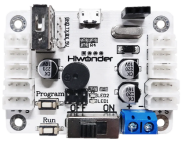
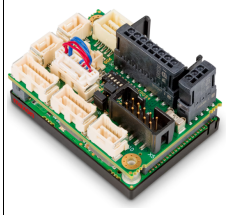
Para la gestión de los subsistemas electrónicos y la operación coordinada de las configuraciones terrestre y aérea del robot, se seleccionó una minicomputadora NVIDIA Jetson Orin NX, la cual se integra con un controlador de vuelo (autopiloto) Pixhawk 6X. Este Hardware es capaz de ejecutar el sistema ROS, lo que facilita su integración con sensores exteroceptivos, módulos de procesamiento de imagen y algoritmos de inteligencia artificial.

La Tabla 4.4 muestra los principales parámetros de los sistemas de control seleccionados.

Tabla 4.3: Tabla de parámetros de los actuadores empleados en el prototipo.

Componente	Descripción/características	Parámetros/especificaciones
Servomotor bus serial HTD-45H Hiwonder 	· Servomotor con tres conectores de bus serial · Engranaje metálico en su interior · Carcasa metálica · Segundo eje fijo para mayor estabilidad en soportes · Potenciómetro de alta precisión · Retroalimentación de voltaje, temperatura y posición	· Método de control: Comandos seriales UART · Tasa de transmisión: 115200 baudios · Torque: 45 kg-cm a 11.1 V · Rango de rotación: 0-240° en modo servo, 360° modo motor-reductor · Precisión: 0.2° · Corriente sin carga: 100 mA · Corriente máxima: 3 A · Dimensiones: 41.1 x 20.14 x 40 mm · Peso: 64 g · Precio: 25.00 dólares ~ $518.00 pesos mexicanos
Motor sin escobillas F90 2806.5 1950KV 	· Este motor está diseñado para construcciones Cinelifter X8 FPV o construcciones de estilo similar destinadas a transportar una cámara pesada y de largo alcance. · El modelo es 2806.5 y hay tres velocidades para elegir, KV1500, KV1300 y KV1950.	· Modelo: 2806.5 · Velocidad: 1950 KV · Configuración: 12N14P · Diámetro de eje: 4 mm · Corriente espera (10V): 1.5 A · Corriente pico (60s): 53.6 A · Potencia máxima (60s): 1302 W · Dimensiones: ∅ 33.4 x 34.7 mm · Peso: 46.6 g · Precio: 30.00 dólares ~ $621.00 pesos mexicanos
Hélice Gemfan Hurricane 51466 V2 3-Blade 	· Versión 2 de los accesorios Hurricane 51466 MCK · El V2 proporciona un agarre mucho mejor y características de vuelo más suaves	· Material: Policarbonato (PC) · Pitch: 3.6 pulgadas · Diámetro hélice: 5.1 pulgadas ~ 131.8 mm · Número de palas: 3 · Peso: 4.2 g · Precio: 3.29 dólares ~ $67.00 pesos mexicanos
Conjunto Motor Maxon Motor RE30, reductor GP32A y encoder incremental 500ppv 	· Sistema compuesto de motor, reductor y encoder con controlador de línea diferencial cuádruple.	Motor: · Voltaje nominal: 12 V · Corriente en vacío: 301 mA · Corriente nominal (máximo en continuo): 4 A · Corriente de arranque: 61.1 A · Máximo rendimiento: 85% · Velocidad en vacío: 8170 rpm · Velocidad nominal: 7630 rpm · Par nominal (máx. par en continuo): 51.6 mNm · Par de arranque: 853 mNm · Dimensiones: ∅ 30 x 68 mm · Peso: 260 g · Precio: 356.62 euros ~ $7639.00 pesos mexicanos Reductor: · Tipo: Engranes planetarios · Diámetro exterior: 32 mm · Diámetro eje: 6 mm · Relación reducción: 23:1 · Máximo par en continuo: 3 Nm · Máximo rendimiento: 75% · Dimensiones: ∅ 32 x 36.4 mm (+21 eje) · Peso: 162 g · Precio: 187.89 euros ~ $4025.00 pesos mexicanos Encoder: · Tipo: Incremental en cuadratura 3 canales · Resolución: 500 pulsos por vuelta · Máxima velocidad: 12000 rpm · Voltaje de alimentación: 5.0 V · Dimensiones: 30 x 18.3 x 41.2 mm · Peso: 27 g · Precio: 116.94 euros ~ $2505.00 pesos mexicanos

Tabla 4.4: Tabla de los controladores empleados en el prototipo.

Componente	Descripción/características	Parámetros/especificaciones
Computadora a bordo con controlador de vuelo integrado Jetson Nano Orin NX con Pixhaw6 	· Integración de control de vuelo Pixhawk y NVIDIA Jetson para sistemas autónomos · Interfaces avanzadas para sensores y periféricos · Optimizado para aplicaciones en tiempo real basadas en IA en robótica y drones	· Procesador: NVIDIA Jetson Orin Nx 16 GB · Control de vuelo: Pixhawk 6X FMU con procesador ARM Cortex-M7 STM32H753 480MHz · Interfaces: UART, I2C, I2S, SPI, CAN, USB, HDMI · Sensores integrados: PIXHAK: 3 x acelerómetro/giroscopio (IMU) ICM-45686, barómetro ICP20100 y BMP388, Magnetómetro BMM150, JETSON: IMU IIM42652 · Fuente de alimentación: 5V, 3A mediante USB-C o conector de batería · Sistemas operativos compatibles: Linux, PX4 Autopilot · Dimensiones: 126 x 80 x 45 mm · Peso: 185g (Jetson, disipado, controlador Pixhawk) · Precio: 1,940.00 dólares ~ $39,587.00 pesos mexicanos
Controlador de servomotores de bus serial Hiwonder 	· Controlador inteligente de servomotores por bus serial con capacidad de manejo inalámbrico mediante control PS2 en un rango de 10 metros · Soporta programación manual, depuración en línea y comunicación por puerto serial TTL · Capacidad de controlar hasta 40 servomotores	· Controlador: STM32 con ARM Cortex M3 · Tasa de transmisión: 9600 baudios · Conexión externa: serial UART · Dimensiones: 58 x 42mm · Peso: 21g · Precio: 40.00 dólares ~ $828.00 pesos mexicanos
Controlador de posición digital EPOS4 Compact 50/5 CAN 	· Controlador de posición dinámico listo para su conexión y de diseño compacto. · Adecuado para motores DC con escobillas y encoder, así como para motores brushless (BLDC) con sensores Hall y encoder de hasta 250 W / 750 W.	· Modos de regulación: corriente (par), velocidad y posición · Voltaje de operación: 10-50V · Corriente salida máxima: 15A <3s · Frecuencia PWM: 50kHz · Frecuencias de lazo: P a 25kHz, PI 2.5kHz, PID 2.5kHz · Máximo rendimiento: 97% · Interfaces de comunicación: RS232, USB (Full speed), CAN · Entradas digitales/analógicas: 8/2 · Salidas digitales/analógicas: 3/2 · Dimensiones: 55 x 40 x 26.9mm · Peso: 58g · Precio: 563.93 euros ~ $12,085.00 pesos mexicanos
Controlador electrónico de velocidad ESC T-Motor Alpha 40A 	· El T-Motor Alpha 40A 6S ESC ofrece un control de motor preciso y eficiente con tecnología FOC (control de campo orientado - onda sinusoidal). · Cuenta con bajo nivel de ruido, respuesta rápida, protecciones incorporadas y resistencia al agua y al polvo IP55, lo que lo hace ideal para vehículos aéreos no tripulados profesionales · Contiene protección contra sobrecorriente / bloqueo del motor / cortocircuito / bajo voltaje.	· Voltaje: 18-25.2V (6S) · Corriente continua: 40A · Corriente máxima: 60A <10s · Corriente en espera: <50mA · Frecuencia actualización acelerador: 500Hz · Dimensiones: 64.5 x 29.4 x 14.7mm · Peso: 54.5g · Precio: 70.00 dólares ~ $1,449.00 pesos mexicanos

4.2.4.3. Sensores

La minicomputadora a bordo con controlador de vuelo integrado, incorpora varios sensores internos: cuatro unidades de medición inercial (IMUs, *Inertial Measurement Units*, por sus siglas en inglés), dos barómetros y un magnetómetro. Con el objetivo de ampliar la capacidad de percepción del robot e incrementar su autonomía en tareas de búsqueda, reconocimiento, mapeo y cobertura, se integraron sensores exteroceptivos complementarios.

Entre estos sensores se incluyeron: un receptor de posicionamiento global (GPS, *Global*

Positioning System, por sus siglas en inglés) para rastreo y geolocalización; un escáner láser LiDAR (*Light Detection and Ranging*, por sus siglas en inglés) para la generación de mapas y evasión de obstáculos; y una cámara de profundidad para la captura y transmisión de imágenes en tiempo real. La transmisión de video y la comunicación entre el robot y el operador se realiza mediante un sistema inalámbrico, compuesto por un control remoto que actúa como estación terrestre, el cual se enlaza con una estación aérea ubicada a bordo del robot, ofreciendo un alcance operativo de hasta 20 km.

Adicionalmente, se incorporaron dos sensores ultrasónicos para estimar la distancia entre la base del robot y el suelo. Esto permite suavizar las maniobras de aterrizaje y detectar obstáculos al operar como péndulo invertido sobre ruedas.

La Tabla 4.5 resume los parámetros principales de los sensores y dispositivos de percepción seleccionados.

4.2.4.4. Alimentación

Con base en los componentes seleccionados para actuadores, sensores y sistemas de control, se determinaron las fuentes de alimentación portátiles requeridas para cada subsistema electrónico. Entre las principales opciones disponibles en el mercado se encuentran las baterías de plomo-ácido (Pb-acid), níquel-cadmio (Ni-Cd), alcalinas, hidruro metálico de níquel (Ni-MH), iones de litio (Li-ion) y polímero de litio (Li-Po), seleccionadas por su relación desempeño–costo [206].

También existen opciones más avanzadas, como las baterías de litio-aire (Li-air), litio-cloruro de tionilo (Li-$SOCl_2$) y litio-azufre (Li-S) [207]. Las dos primeras ofrecen entre dos y siete veces más autonomía que una batería Li-ion, pero presentan limitaciones en cuanto a disponibilidad comercial, precio elevado, bajo número de ciclos de recarga y tiempos prolongados de recarga. Por su parte, las baterías de litio-azufre representan una alternativa emergente más económica, con potencial para sustituir a las Li-ion en aplicaciones futuras.

Una alternativa adicional son las celdas de combustible (hidrógeno–oxígeno o hidrógeno–aire); sin embargo, su adopción está limitada por factores como el tamaño del sistema y los altos costos operativos.

En este proyecto se optó por emplear baterías Li-Po en los subsistemas con altas tasas de descarga, como los motores de corriente continua de las ruedas mecanum y los motores sin escobillas de las hélices. Las baterías Li-ion, en cambio, se utilizarán para alimentar los servomotores, las tarjetas de control y los sensores, aprovechando su mayor densidad energética (cantidad de energía almacenada por unidad de volumen o masa).

A continuación, se presentan los cálculos de consumo y selección de baterías por subsistema electrónico:

- Sistema de control y alimentación para las ruedas:
  - 4 motores Maxon con un consumo nominal de 192 W.
  - 4 codificadores de posición con un consumo nominal de 1.1 W.

Tabla 4.5: Tabla de los sensores empleados en el prototipo.

Componente	Descripción/características	Parámetros/especificaciones
Sistema de posicionamiento global (GPS) F9P 	Recepción simultánea de hasta 4 constelaciones GNSS Antena omnidireccional. 3 opciones de cable de conexión	· Receptor H-RTK ZED-F9P Rover · Brújula: RM3100 · Precisión: RTK 0.01 m + 1 ppm CEP · Antena: alta ganancia 20.5 dB 47.5 x 47.5 x 4 mm · Velocidad máxima: 500 m/s · Dimensiones: 78 x 78 x 22 mm · Peso: 177 g · Grado de protección: IP66 · Precio: 55 dólares ~ $1138.00 pesos mexicanos
CubePilot Herelink Sistema de transmisión de video HD de largo alcance de 2.4GHz - V1.1 	· Herelink es un control remoto integrado, una estación terrestre y un sistema de transmisión digital inalámbrica diseñado para ser utilizado con el piloto automático Cube, Ardupilot o PX4. Herelink permite que el control RC, el video HD y los datos de telemetría se transmitan hasta 20 km entre la estación terrestre y la unidad aérea.	Unidad aérea · Procesador: 4 Cortex A53 a 2.2 GHZ y 4 Cortex A53 a 1.4 GHz · Distancia de transmisión: FCC 20 km; CE/SRRC/MIC 12 km · Resolución: 720p@30 fps o 1080p@30/60 fps · Banda de frecuencia: ISM 2,4 GHz · Interfaces: UART, Sbus, micro USB · Consumo de energía: <4W · Entrada de alimentación de 7-12 V · Dimensiones: 78.5 x 30 x 15 mm · Peso: 98 g Control · Comunicación inalámbrica: Bluetooth/WIFI/GPS/ 2.4 GHz · Dimensiones: 217 x 106.5 x 31 mm · Peso: 536 g · Precio: 1500 dólares ~ $30359.00 pesos mexicanos
Cámara de profundidad ORBBEC Gemini Plus 	· Aprovecha la tecnología de imágenes 3D de luz estructurada binocular para proporcionar información de profundidad con resolución y velocidades de fotogramas mejoradas. · Rendimiento antirreflejos estable y una idoneidad excepcional para entornos interiores y exteriores. · Compatible con aplicaciones multiplataforma, incluidas Raspberry Pi, Jetson y PC con Windows, ROS1 y ROS2.	· Tecnología 3D: Luz estructurada binocular activa Orbbec (proyección infrarroja) · Rango de operación: 0.25-2.5 m · Precisión: 1m: +- 5 mm · Campo de visión: Cámara de profundidad (H 67.9°, V 45.3°), cámara imagen RGB (H 71°, V 56.7°) · Resolución máxima: cámara profundidad (USB 3.0) 1280 x 800 a 30 fps, cámara imagen RGB (USB3.0) 1920 x x1080 a 30fps · Consumo de energía: <2.2W · Dimensiones: 76 x 68 x 30 mm · Peso: 88 g · Precio: 150.00 dólares ~ $3103.00 pesos mexicanos
SLAMTEC RPLIDAR C1M1: Escáner de rango láser de 360° con tecnología de fusión 	· El escáner láser SLAMTEC RPLIDAR C1 360° DTOF es un sensor de última generación diseñado para mejorar las capacidades de percepción ambiental de los robots de consumo. · Cuenta con una tecnología de tiempo directo de vuelo (DTOF) de tipo fusión, que permite una detección precisa a larga distancia y una alta sensibilidad. Destaca en la detección de alta definición de objetos pequeños y cercanos y está equipado con sólidas funciones anti interferentes y antiadherentes. · El diseño compacto y ágil del dispositivo es ideal para una variedad de aplicaciones, incluido el posicionamiento de robots, el mapeo, la navegación y la evitación de obstáculos en diversos entornos.	· Rango de distancia: 0.05-12 m objetos blancos a menos del 70% reflexión; 0.05-6 m objetos oscuros a menos del 10% reflexión · Rango de trabajo: 360° · Longitud de onda de trabajo: 895-915 nm · Frecuencia de muestreo: 5 kHz · Frecuencia de escaneo: 8~12 Hz, 10 Hz típicamente · Resolución angular: 0.72 ° típicamente · Planitud del campo de escaneo: 0°~1.5° personalizable · Interfaz de comunicación: TTL UART · Velocidad de comunicación: 460800 bps · Precisión: +- 30 mm · Resolución: 15 mm · Grado de protección: IP54 · Límite de luz ambiental: 40,000 lux · Dimensiones: 55.6 x 55.6 x 41.3 mm · Peso: 110 g · Precio: 69 dólares ~ $1396.50 pesos mexicanos
Sensor ultrasónico de alta precisión (DYP-A22YYCW) 	· El módulo A22 tiene una serie de ventajas como pequeño punto ciego, pequeño ángulo de medición, corto tiempo de respuesta, filtrado de interferencias de cofrecuencia, alta adaptabilidad de instalación, polvo e impermeabilidad, larga vida útil y alta confiabilidad. · La tecnología de procesamiento acústico inteligente desarrollada de forma independiente por nuestra empresa puede identificar y filtrar la onda acústica de interferencia y emitir datos más estables y confiables, lo que hace que el módulo A22 reduzca la probabilidad de interferencia ultrasónica de cofrecuencia hasta cierto punto y satisfaga las necesidades de aplicación de los usuarios para el entorno complejo en el campo del control automático del robot.	· Voltaje de alimentación: 3.3-12 V (24 V máx.) · Área ciega: 2 cm · Distancia máxima: 300 cm · Interfaces: UART, PWM, TTL, RS485, I2C · Tasa de transmisión: 115200 bps · Tiempo de respuesta: 8-140 ms · Grado de protección: IP67 · Dimensiones: 47 x 18 x 22.5 mm · Peso: ~ 25 g · Precio: 16 dólares ~ $ 324.00 pesos mexicanos

- 4 tarjetas controladoras con un consumo nominal de 14 W.

Se obtiene un consumo nominal total de 207.1 W. Con un tiempo de operación estimado de 30 minutos y una descarga de la batería del 100 % al 20 % ($\Delta SoC = 0.8$), la capacidad de la batería requerida se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{bat} = \frac{P_{bat} t_{op}}{\Delta SoC}$$
$$C_{bat} = \frac{207.1\ W \times 0.5\ h}{1 - 0.2} = 129.44\ Wh = 129.44\ VAh$$

donde P_{bat} es la potencia requerida por parte de la batería en W, t_{op} es el tiempo de operación en horas, y ΔSoC es la diferencia entre el estado inicial y final de la carga en la batería en porcentaje 0-1. Por lo tanto, el resultado es un valor de 129.44 Wh, lo que equivale a una batería de 8.745 Ah a 14.8 V. Para la búsqueda y selección se considera la mitad del valor como consumo real. La batería seleccionada es de la marca HRB, con una capacidad de 5 Ah, 14.8 V, un peso de 495 g y una tasa de descarga de 50 C. Este valor indica la corriente de descarga máxima que proporciona una batería, y su valor queda determinado por la siguiente ecuación:

$$Tasa\ de\ descarga\ [C] = \frac{Corriente\ de\ descarga\ [mA]}{Capacidad\ de\ la\ batera\ [mAh]}$$

Por lo tanto, se tiene una tasa de descarga de 250 A, suficiente para suministrar los 244.4 A de corriente de arranque en los motores (61.1 A por motor).

- Sistema de control para extremidades:
  - 1 tarjeta controladora para servomotres por bus serial con un consumo nominal de 10 W.
  - 16 servomotores de bus serial con un consumo nominal de 532.8 W.

En este caso, el consumo nominal total es de 542.8 W. Asumiendo un uso intermitente, se considera la mitad del consumo nominal (271.4 W). La batería necesaria debe tener un voltaje de operación de 11.1 V y una capacidad de 15.28 Ah. Durante la búsqueda, se identificó la necesidad de usar dos baterías en paralelo de 7.6 Ah cada una, con un peso total de 1.12 kg, lo cual resultó inviable por restricciones de peso.

Por esta razón, se descartó un tiempo de operación continuo de 30 minutos para los servomotores. En su lugar, se eligió una batería ProRange Li-ion de 8.4 Ah, 11.1 V, y 450 g, capaz de suministrar hasta 20 minutos de funcionamiento. Su tasa de descarga es de 11 C,

equivalente a 92.4 A, suficiente para proporcionar los 48 A requeridos por los 16 servomotores (3 A cada uno).

- Sistema de control y percepción:
  - 1 sensor LIDAR con un consumo nominal de 1.3 W.
  - 2 sensores ultrasónicos con un consumo nominal de 0.3 W.
  - 1 cámara de profundidad con un consumo nominal de 12.5 W.
  - 1 computadora abordo Jetson Orin NX con un consumo nominal de 75 W.

Este subsistema presenta un consumo nominal total de 89.1 W, además de operar continuamente. Por lo tanto, se calcula una batería de 5.01 Ah a 11.1 V. La batería seleccionada es nuevamente de la marca ProRange, de tipo Li-ion, con 4.5 Ah, 11.1 V, un peso de 360 g, y una tasa de descarga de 10 C, equivalente a 45 A, más que suficiente para los componentes del subsistema.

- Sistema de control para vuelo, localización y transmisión:
  - 1 tarjeta controladora de vuelo Pixhawk 6X con un consumo nominal de 10 W.
  - 1 sensor de posicionamiento global GPS M9N con un consumo nominal de 1 W.
  - 1 tarjeta de control/transmisión aérea Herelink v1.1 con un consumo nominal de 30 W.
  - 6 motores sin escobillas con un consumo nominal máximo de 7812 W.

El consumo nominal total es de 7,853 W. Dado que se requiere operar a máxima potencia para lograr la fuerza de empuje necesaria, en este caso no se reduce el consumo estimado. Sin embargo, para media hora de operación se requeriría una batería de 221.08 Ah a 22.2 V, lo cual es inviable por peso y volumen.

Se seleccionó una batería DXF Li-Po de 8.4 Ah, 22.2 V, 890 g, con una tasa de descarga de 120 C, capaz de suministrar hasta 1008 A. Esto cubre los 321.6 A necesarios para los seis motores sin escobillas (53.6 A cada uno), pero solo durante 1.425 minutos. La incorporación de una batería adicional duplicaría este tiempo a 2.85 minutos, acercando al robot a su límite de peso de 12 kg.

Se consideró esta limitación como aceptable, ya que el modo de vuelo está destinado únicamente a superar obstáculos complejos que no pueden abordarse mediante locomoción con ruedas o cuadrúpeda.

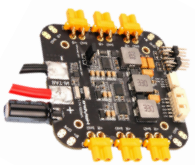
Para aumentar la autonomía, se contempla un rediseño posterior enfocado en la reducción de peso estructural o selección de materiales ligeros.

Consideraciones generales

Debido al diseño adaptativo del robot, su morfología varía según el entorno. Por esta razón, no es viable establecer un tiempo de operación promedio, ya que cada sistema de locomoción se activa bajo distintas condiciones y durante tiempos variables.

La Tabla 4.6 presenta un resumen de las propiedades técnicas de las baterías seleccionadas para cada subsistema.

Tabla 4.6: Tabla de parámetros de los elementos de alimentación para el prototipo.

Componente	Descripción/características	Parámetros/especificaciones
Batería DXF 6S 8400mAh Lipo 22.2 V 120C XT60 	· La tecnología de apilamiento automático estable permite capacidades de una sola celda. · Mayor capacidad durante la descarga pesada. Más del 90 % a una tasa C del 100 %. · Capacidad de carga rápida, hasta 5C en algunas baterías. · Vida útil más larga, casi el doble que la tecnología lipoly estándar.	· Tipo: Polímero de iones de litio · Capacidad: 8400 mAh · Voltaje: 22.2 V / 6 celdas / 6S1P · Tasa de descarga: 120C · Conector de salida: XT60 · Dimensiones: 135 x 70 x 45 mm · Peso: 890 g · Precio: 178 dólares ~ $3634.00 pesos mexicanos
Batería HRB 4S 5000 mAh Lipo 14.8V 50C XT60 	· Disipación continua de 50C a 150C · Incluye conectores XT60, T Deans y EC5 para una conexión segura. · Con una amplia gama de capacidades y opciones de descarga continua, la batería HRB RC Lipo se adapta a las necesidades de varios usuarios y vehículos.	· Tipo: Polímero de iones de litio · Capacidad: 5000 mAh · Voltaje: 14.8 V / 4 celdas / 4S1P · Tasa de descarga: 50C · Conector de salida: XT60 · Dimensiones: 155 x 48 x 32 mm · Peso: 495 g · Precio: $1588.00 pesos mexicanos
Batería de iones de litio Pro-range INR 21700 11.1 V 3S2P 80-100A 	· Paquete de baterías de iones de litio para drones Pro-Range INR 21700 P42A 11.1 V 8400 mAh 3S2P 80 A / 100 A. · El peso más compacto y ligero para la capacidad. · Mayor tiempo de vuelo. · Mayor WH/kg que los paquetes de baterías Li-Po.	· Tipo: Iones de Litio · Capacidad: 8400 mAh · Voltaje: 11.1 V / 3 celdas / 3S2P · Tasa de descarga: 11C · Conector de salida: XT60 · Dimensiones: 70 x 60 x 45 mm · Peso: 450 g · Precio: 49.8 dólares ~ $1002.00 pesos mexicanos
Batería de iones de litio Pro-range INR 21700 11.1 V 4500 mAh 3S1P 40-50 A 	· Paquete de baterías de iones de litio para drones Pro-Range INR 21700 P45A 11.1 V 8400 mAh 3S2P 80 A / 100 A. · El peso más compacto y ligero para la capacidad. · Mayor tiempo de vuelo. · Mayor WH/kg que los paquetes de baterías Li-Po.	· Tipo: Iones de Litio · Capacidad: 4500 mAh · Voltaje: 11.1 V / 3 celdas / 3S1P · Tasa de descarga: 10C · Conector de salida: XT60 · Dimensiones: 75 x 65 x 45 mm · Peso: 360 g Precio: 33.4 dólares ~ $672.00 pesos mexicanos
Módulo de alimentación PM03D 	· Fuente de alimentación regulada desde la batería · Proporciona mediciones de consumo de corriente y voltaje de la batería a través del protocolo digital I2C · Compatible con controladores de vuelo con monitor de potencia por I2C · Seis conectores para motores o accesorios · Dos reguladores de voltaje integrados de 5V y 8/12V seleccionable para periféricos	· Voltaje máximo de entrada: batería 6S · Corriente nominal: 60 A · Corriente máxima: 120 A (< 60 s) · Detección de corriente máxima: 164 A · Conectores: XT-60 para batería y XT-30 para motores · Dimensiones: 84 x 78 x 12 mm · Peso: 59 g Precio: 51.59 dólares ~ $1068.00 pesos mexicanos

4.2.4.5. Integración de subsistemas

La Figura 4.59 muestra un diagrama de los diversos componentes que conforman el sistema electrónico. El costo aproximado de estos componentes electrónicos es de $165,000.00

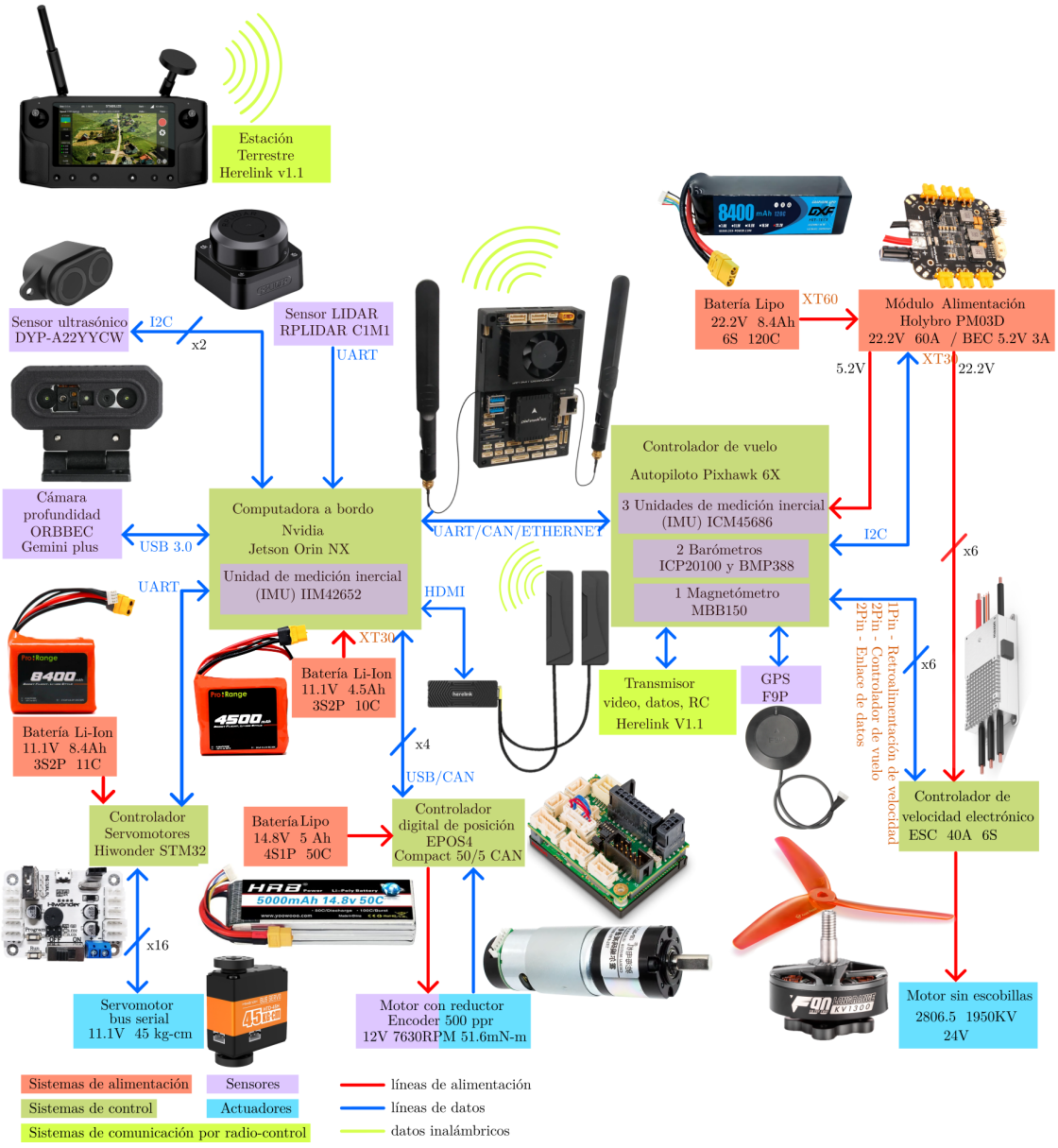


Figura 4.59: Sistema electrónico del robot móvil.

4.2.5. Selección de materiales

Para estimar el peso total del prototipo, fue necesario asignar materiales específicos a las piezas diseñadas, así como masas aproximadas a los componentes comerciales o importados. Los elementos de maquinaria incluyen sujetadores, ejes, anillos de retención, rodamientos, juntas, resortes y engranajes. La selección de materiales para estos elementos se basó en la disponibilidad ofrecida por el portal de Misumi México [208], el cual provee componentes para maquinaria industrial. Se eligieron principalmente aceros inoxidables como el AISI 304 clase A2-70, un acero austenítico con resistencia mínima a la tracción de 700 MPa, buena resistencia a la corrosión y oxidación, baja conductividad magnética y adecuada estabilidad térmica en un amplio rango de temperaturas.

Para los actuadores, incluyendo servomotores, motores de corriente continua con imanes permanentes, cajas reductoras, hélices y motores sin escobillas, los materiales están definidos por el fabricante. En estos casos, se sobreescribió directamente su masa al modelo 3D. Se intentó seleccionar componentes con protección IP, aunque esta información no estuvo disponible en todos los sitios web consultados. Algunas opciones que sí contaban con dicha protección fueron descartadas por diversas razones técnicas. Por ejemplo, el servomotor AGF A86BHMW, con grado IP67, fue excluido debido a su control mediante PWM y a la ausencia de un eje secundario que otorgara mayor estabilidad a las articulaciones. Del mismo modo, motores sin escobillas con protección IP eran generalmente modelos de carga pesada, como el T-Motor U15II KV80 con clasificación IP33, que genera 36 kg de empuje pero pesa 1.74 kg. El modelo MAD CINE CM5320, con protección IP45 y empuje de 9.1 kg, pesa 481 g, pero requiere hélices de 17 pulgadas. Por otro lado, el soporte central del motor de corriente continua y los soportes para servomotores fueron diseñados mediante operaciones de chapa metálica, empleando láminas de aluminio 6061 de 3 mm de espesor, debido a su baja densidad en comparación con el acero inoxidable y por tratarse de un material estándar en soportes comerciales.

En el resto de los componentes estructurales del prototipo, diseñados de acuerdo con los requerimientos funcionales, se seleccionaron materiales considerando su impacto en el peso total, su resistencia mecánica y su durabilidad frente a agentes externos. Para evitar una amplia variedad innecesaria de materiales, se agruparon en dos categorías principales:

- Categoría 1 (Termopásticos): engranajes rectos y cónicos, seguros de bloqueo, cremalleras, pines de los seguros, marcos de rueda, bases para rodillos, soportes de rodillos, soportes superior e inferior del motor de corriente directa, rin y bases del chasis.
- Categoría 2 (Elastómeros): rodillos.

Para ambas categorías se utilizó la base de datos de materiales poliméricos del software Granta EduPack 2023 [209]. En la categoría 1 se evaluaron termoplásticos de ingeniería, comúnmente empleados en piezas de precisión como engranajes, componentes estructurales ligeros y maquinaría de precisión. Las propiedades de los materiales analizados se resumen en las Tablas 4.7 y 4.8 [209].

Tabla 4.7: Propiedades físicas y mecánicas de los termoplásticos de ingeniería.

Propiedades físicas y mecánicas / **Material**	**Densidad [kg/m^3]**	**Módulo elástico [GPa]**	**Rigidez específica [MN·m/kg]**	**Límite elástico [MPa]**	**Resistencia a la tracción [MPa]**	**Resistencia específica [kN·m/kg]**	**Elongación [% deformación]**	**Módulo de compresión [GPa]**	**Resistencia a la compresión [MPa]**	**Coeficiente de Poisson**	**Precio [MXN/kg]**
Acrilonitrilo butadieno estireno de alto impacto (ABS)	1030	1.63	1.58	27.4	36.3	26.7	19.4	1.41	41.4	0.409	53.9
Ácido poliláctico de alto impacto (PLA)	1210	3.13	2.58	42.7	42.7	35.1	19	3.13	51.2	0.33	77
Policarbonato (PC)	1200	2.38	1.98	62.1	67.4	51.7	128	2.41	77.1	0.399	69.8
Acrilonitrilo butadieno estireno + Policarbonato (ABS+PC)	1110	2.51	2.26	35.1	45.2	31.6	79.1	2.51	80.7	0.398	85
Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA)	1050	1.88	1.78	37.2	37.8	35.3	31.6	1.88	44.7	0.405	38
Poliamida-imida (PAI)	1420	4.75	3.33	39.9	144	28.1	10.7	4	173	0.45	625
Polieteretercetona (PEEK)	1310	3.85	2.94	99.5	107	76	67.1	3.85	125	0.4	1700
Polieterimida (PEI)	1270	2.96	2.33	77.2	96.5	60.8	60	3.3	151	0.393	276

Tabla 4.8: Propiedades térmicas, de procesamiento y durabilidad de los termoplásticos de ingeniería.

Propiedades térmicas y durabilidad **Material**	**Máxima temperatura de servicio [°C]**	**Tipo de proceso**	**Impresión por deposición fundida**	**Resistencia inmersión agua dulce**	**Resistencia inmersión agua salada**	**Resistencia inmersión ácidos débiles (pH 4-7)**	**Resistencia inmersión álcalis débiles (pH 7-10)**	**Resistencia a la inmersión en solventes orgánicos**	**Durabilidad ante luz solar (UV)**	**Grado de inflamabilidad**	**Resistencia a diversos químicos**
Acrilonitrilo butadieno estireno de alto impacto (ABS)	69.6	Moldeado por inyección; extrusión y termoformado	Filamento comercial	Excelente	Excelente	Excelente	Aceptable	Inaceptable	Pobre	Altamente inflamable	No satisfactorio
Ácido poliláctico de alto impacto (PLA)	49	Moldeado por inyección; extrusión y termoformado	Filamento comercial	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Uso limitado	Buena	Altamente inflamable	No satisfactorio
Policarbonato (PC)	108	Moldeado por inyección; extrusión y termoformado	Filamento comercial	Excelente	Excelente	Excelente	Aceptable	Uso limitado	Regular	Combustión lenta	No satisfactorio
Acrilonitrilo butadieno estireno + Policarbonato (ABS+PC)	69.6	Moldeado por inyección; extrusión y termoformado	Filamento comercial	Excelente	Aceptable	Aceptable	Uso limitado	Inaceptable	Regular	Altamente inflamable	Dudosamente
Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA)	59.6	Moldeado por inyección; extrusión y termoformado	Filamento comercial	Excelente	Excelente	Aceptable	Excelente	Inaceptable	Buena	Altamente inflamable	No satisfactorio

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 4.8

Propiedades térmicas y durabilidad **Material**	**Máxima temperatura de servicio [°C]**	**Tipo de proceso**	**Impresión por deposición fundida**	**Resistencia inmersión agua dulce**	**Resistencia inmersión agua salada**	**Resistencia inmersión ácidos débiles (pH 4-7)**	**Resistencia inmersión álcalis débiles (pH 7-10)**	**Resistencia a la inmersión en solventes orgánicos**	**Durabilidad ante luz solar (UV)**	**Grado de inflamabilidad**	**Resistencia a diversos químicos**
Poliamida-imida (PAI)	210	Moldeado por inyección y extrusión	Sin información	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Auto extinguible	Satisfactorio
Polieteretercetona (PEEK)	249	Moldeado por inyección; extrusión y termofor-mado	Filamento comercial	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Auto extinguible	Probablemente satisfactorio
Polieterimida (PEI)	170	Moldeado por inyección; extrusión y termofor-mado	Filamento comercial	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Auto extinguible	Satisfactorio

De acuerdo a los datos obtenidos, los materiales con mejor relación de resistencia específica (límite elástico dividido entre densidad) fueron la Polieteretercetona (PEEK), con 76 kNm/kg, y la Polieterimida (PEI), con 60.8 kNm/kg. Esto indica que ambos materiales presentan una elevada capacidad de resistir deformaciones permanentes por unidad de masa, lo que los hace ideales para reducir el peso total sin comprometer la resistencia estructural. En cuanto a sus propiedades térmicas, el PEEK soporta temperaturas de hasta 249 °C, mientras que el PEI alcanza un máximo de 170 °C. Adicionalmente, ambos son autoextinguibles. No obstante, el PEI ofrece mejor resistencia química.

Asimismo, ambos materiales pueden ser procesados mediante impresión 3D por deposición fundida. Por estas razones, se selecciona el PEEK como material tentativo para los componentes de la categoría 1, principalmente por su mayor límite elástico y resistencia específica. En caso de que se requiera una reducción adicional de peso y mientras el factor de seguridad lo permita, se considera el uso del PEI como segunda opción, dadas sus propiedades aceptables, menor densidad y precio.

Una de las ventajas del uso de Granta EduPack es la posibilidad de exportar directamente las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales al software de simulación SolidWorks, lo cual permitirá evaluar su desempeño mediante un análisis de esfuerzos estáticos en fases posteriores del desarrollo.

Para la categoría 2, se llevó a cabo una revisión de los materiales más utilizados en rodillos de ruedas mecanum reportados en la literatura. Según lo señalado en [210], los materiales más comunes incluyen: rodillos de aluminio, caucho gris, bases de policarbonato (PC) recubiertas con uretano, mezclas de acrilonitrilo butadieno estireno con policarbonato (ABS-PC) con recubrimiento de caucho, caucho de estireno butadieno (SBR), y bases de ABS con recubrimientos de poliuretano con dureza Shore 75A–85A.

Esta escala de dureza se utiliza para medir la rigidez de materiales blandos y flexibles, como los elastómeros, y permite identificar aplicaciones típicas en función del valor alcanzado, tal como se muestra en la Figura 4.60. A partir del análisis realizado, se identificó que estos materiales pertenecen a la categoría de elastómeros termoestables (cauchos). Las propiedades mecánicas y de durabilidad de estos y otros materiales candidatos se presentan en las Tablas 4.9 y 4.10 [209, 211, 212].

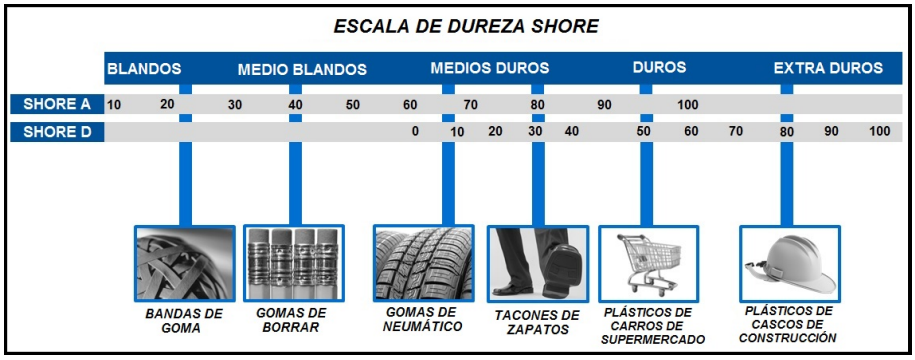


Figura 4.60: Escala de dureza shore.

Tabla 4.9: Propiedades físicas y mecánicas de los termoestables para rodillos.

Propiedades físicas y mecánicas / **Material**	**Densidad [kg/m^3]**	**Módulo elástico [GPa]**	**Rigidez específica [MN·m/kg]**	**Límite elástico [MPa]**	**Resistencia a la tracción [MPa]**	**Resistencia específica [kN·m/kg]**	**Elongación [% deformación]**	**Módulo de compresión [GPa]**	**Resistencia a la compresión [MPa]**	**Tenacidad [kJ/m^2]**	**Coeficiente de Poisson**	**Precio [MXN/kg]**
Caucho estireno-butadieno (SBR)	950	4.472	4.7	2.05	2.05	2.16	490	4.472	2.46	15.6	0.488	29.1
Caucho de butadieno (BR)	925	1.45	1.57	3.24	3.24	3.5	524	1.45	3.89	10.8	0.499	34.3
Caucho endurecido (Ebonita)	1180	1374.77	1170	69.282	69.282	58.9	4.9	1374.77	83.1	106	0.494	61.7
Caucho butílico-Isobutileno e isopreno (IIR)	930	1.025	1.1	4.899	4.899	5.28	675	1.025	5.88	4.01	0.499	48.8
Caucho etileno propileno y dieno (EPDM)	870	1.091	1.25	1.936	1.936	2.22	592	1.091	2.32	10.8	0.487	64.1
Caucho siliconado 40-70 % mineral (VMQ)	2220	11.619	5.22	3.499	3.499	1.57	84.9	11.619	4.2	5.64	0.479	67.5
Caucho fluorosilicona (FVMQ)	1450	15.811	10.9	9.961	9.961	6.88	427	15.811	11.9	11.1	0.479	1450
Caucho fluoro elastómero (FKM-Viton®)	1830	11.068	1.68	15.009	15.009	6.46	296	11.068	14.2	11.5	0.494	401
Caucho perfluoro elastómero (FFKM)	2020	5.665	2.81	11.661	11.661	5.77	245	5.665	14	17	0.494	5870
Caucho de poliuretano	1200	8.660	7.21	45.166	45.166	37.6	612	8.660	54.2	28.6	0.479	51.3

Tabla 4.10: Propiedades térmicas, de procesamiento y durabilidad de los termoestables para rodillos.

Propiedades térmicas y durabilidad / **Material**	**Máx. temp. servicio [°C]**	**Dureza Shore A**	**Resistencia a la abrasión**	**Adherencia a materiales rígidos**	**Resistencia inmersión agua dulce**	**Resistencia inmersión agua salada**	**Resistencia inmersión ácidos débiles (pH 4-7)**	**Resistencia inmersión álcalis débiles (pH 7-10)**	**Resistencia a aceites y gasolinas**	**Grado de inflamabilidad**	**Resistencia a diversos químicos**
Caucho estireno-butadieno (SBR)	87.7	30-95	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Aceptable	Excelente	No aceptable	Altamente inflamable	No satisfactorio
Caucho de butadieno (BR)	89.7	30-47	Buena	Bueno	Aceptable	Aceptable	Uso limitado	Aceptable	No aceptable	Altamente inflamable	No satisfactorio
Caucho endurecido (Ebonita)	93.8	98-100	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Aceptable	Uso limitado	Altamente inflamable	No satisfactorio
Caucho butílico-Isobutileno e isopreno (IIR)	108	20-38	Buena	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	No aceptable	Altamente inflamable	No satisfactorio
Caucho etileno propileno y dieno (EPDM)	163	20-40	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	No aceptable	Altamente inflamable	Satisfactorio
Caucho siliconado 40-70 % mineral (VMQ)	255	70-85	Pobre	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Aceptable	Auto extinguible	Satisfactorio
Caucho fluorosilicona (FVMQ)	224	25-70	Pobre	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Auto extinguible	Satisfactorio
Caucho fluoro elastómero (FKM-Viton®)	210	50-60	Regular	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	No inflamable	Satisfactorio
Caucho perfluoro elastómero (FFKM)	268	55-80	Regular	Regular	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	No inflamable	Satisfactorio
Caucho de poliuretano	91.7	50-92	Excelente	Excelente	Aceptable	Uso limitado	Aceptable	Aceptable	Quema lenta	Satisfactorio	Satisfactorio

En la selección del material para los rodillos, se priorizan propiedades como:

- Alta capacidad de carga, reflejada en buena resistencia a la compresión, necesaria para soportar el peso del prototipo.
- Absorción de impactos, dada la interacción con irregularidades del terreno y obstáculos, relacionada con la tenacidad del material.
- Resistencia a la abrasión, para reducir la frecuencia de reemplazo de los 160 recubrimientos distribuidos en las cuatro ruedas mecanum.
- Durabilidad ante agentes externos, debido a su posible presencia en entornos de desastre.

Con base en estos criterios, se descartaron materiales como la fluorosilicona (FVMQ), el fluoroelastómero (FKM) y el perfluoroelastómero (FFKM). Aunque presentan excelente resistencia química y térmica, su baja resistencia a la abrasión y compresión, así como su alta densidad y elevado costo, los hacen inadecuados para esta aplicación.

El material que mejor equilibra los requisitos es el caucho de poliuretano, gracias a su resistencia a la compresión, tenacidad, durabilidad ante agentes externos y químicos, buena adherencia y excelente comportamiento frente al desgaste.

Aunque la ebonita (caucho endurecido) presenta incluso mejor resistencia a la compresión, tenacidad y abrasión, su elevada inflamabilidad y baja resistencia a ambientes agresivos limitan su aplicación en contextos de desastre.

Para validar la selección propuesta, se realizarán simulaciones de esfuerzo estático en SolidWorks dentro del ensamble individual de un soporte de rodillos, con el fin de verificar el comportamiento del material bajo condiciones reales de carga.

4.2.6. Tercer rediseño del sistema mecánico

Con base en la información reunida sobre materiales, dimensiones y masas de los distintos componentes (sensores, actuadores, tarjetas de control y baterías), se procedió al rediseño de las bases del chasis. Se calculó la masa total y el centro de masas del chasis, y dichos valores fueron asignados a un modelo simplificado (sin componentes electrónicos internos ni tornillería), con el objetivo de reducir el número de elementos del ensamble y, en consecuencia, el costo computacional en los análisis de movimiento y esfuerzos mecánicos realizados en SolidWorks.

La Figura 4.61 muestra los tres elementos principales del chasis, rediseñados para optimizar la ubicación de los componentes electrónicos y brindarles protección del exterior. Por su parte, la Figura 4.62 presenta una comparativa entre las propiedades físicas del ensamble completo y su versión simplificada. Se observa que los valores de masa, centro de masas y momentos de inercia son equivalentes en ambas versiones, lo que valida el uso del modelo simplificado para los análisis posteriores.

El mismo procedimiento fue aplicado a los ensambles de las ruedas mecanum en configuración A y B. En sus versiones detalladas, se incluyen elementos como la tornillería, rodamientos

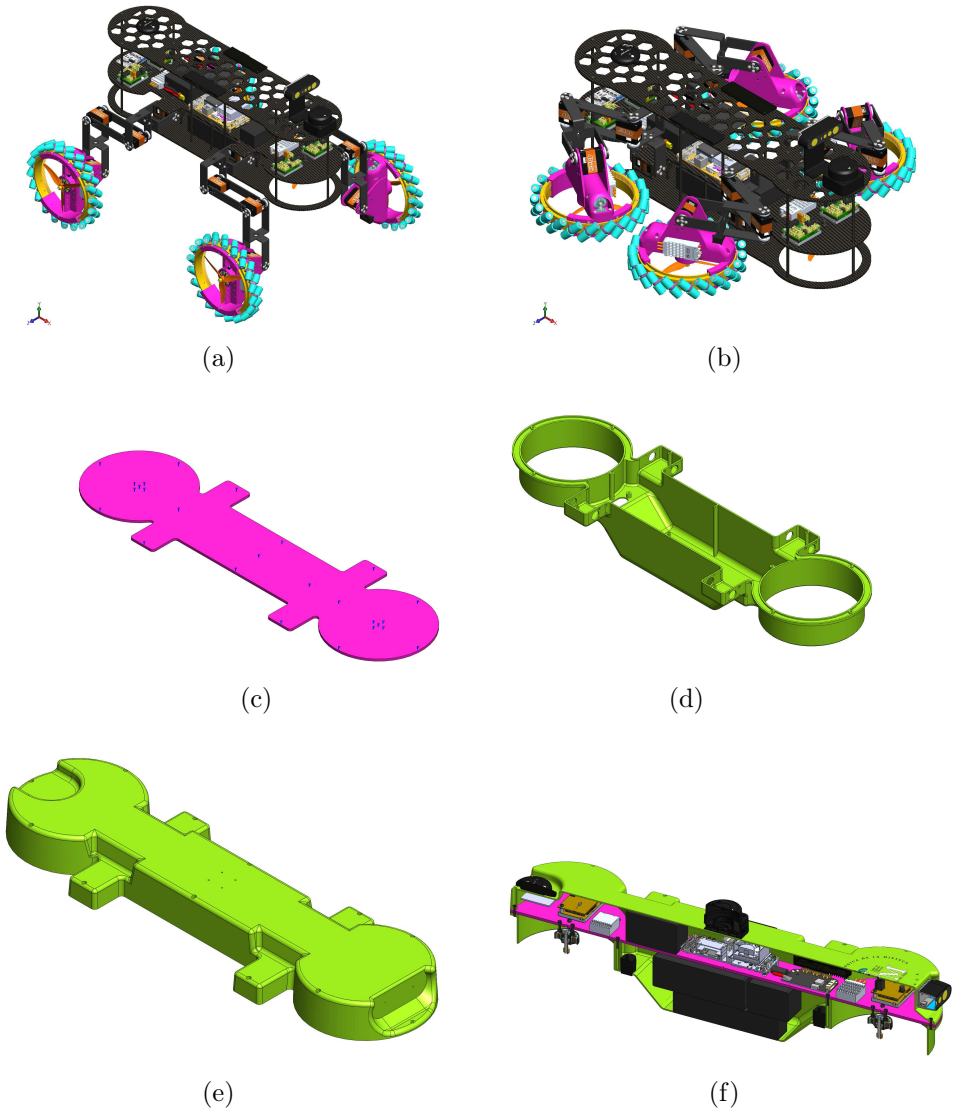


Figura 4.61: Rediseño de las bases que conforman el chasis del prototipo. (a) Prototipo en modo terrestre con distribución de componentes; (b) Prototipo en modo aéreo con distribución de componentes; (c) Base central para albergar el sistema electrónico; (d) Base inferior para baterías, sensores ultrasónicos y protección de hélices fijas; (e) Base superior para colocación de sensores exteroceptivos; (f) Vista de corte dimétrica para apreciar la distribución de los componentes electrónicos en el chasis.

del rin y el mecanismo de bloqueo/liberación del giro de los rodillos. Estos elementos fueron omitidos en los modelos simplificados, nuevamente con el propósito de disminuir la complejidad computacional durante la simulación.

La Figura 4.63 muestra las propiedades físicas de ambas ruedas en sus versiones completas, las cuales fueron reemplazadas por sus equivalentes simplificados en el análisis estructural, cinemático y dinámico del sistema.

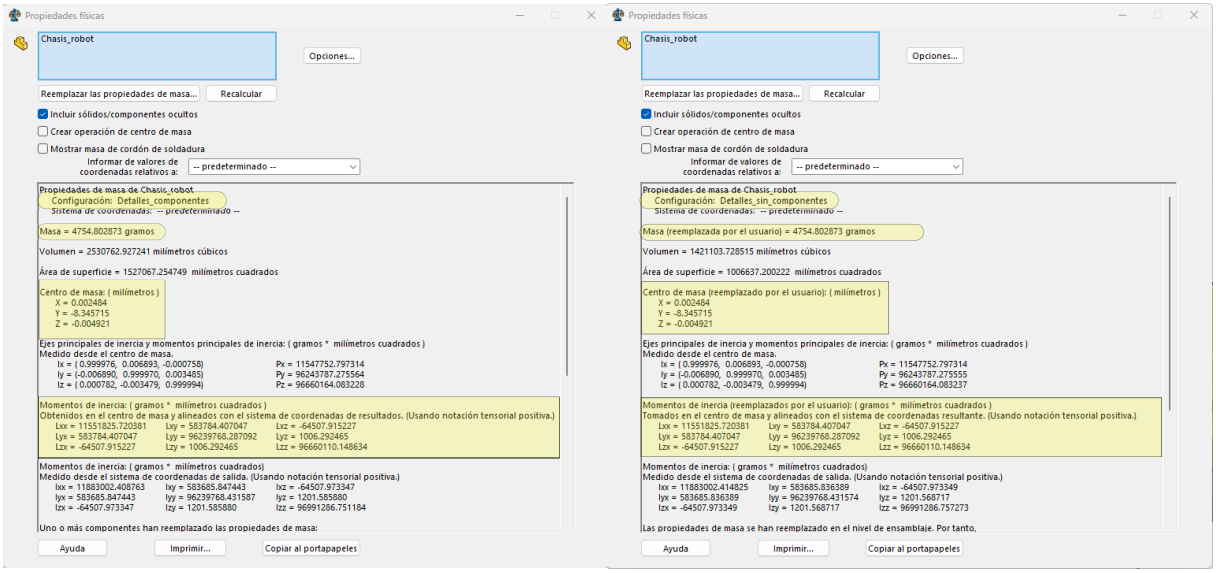


Figura 4.62: Propiedades físicas del chasis con componentes y su versión simplificada.

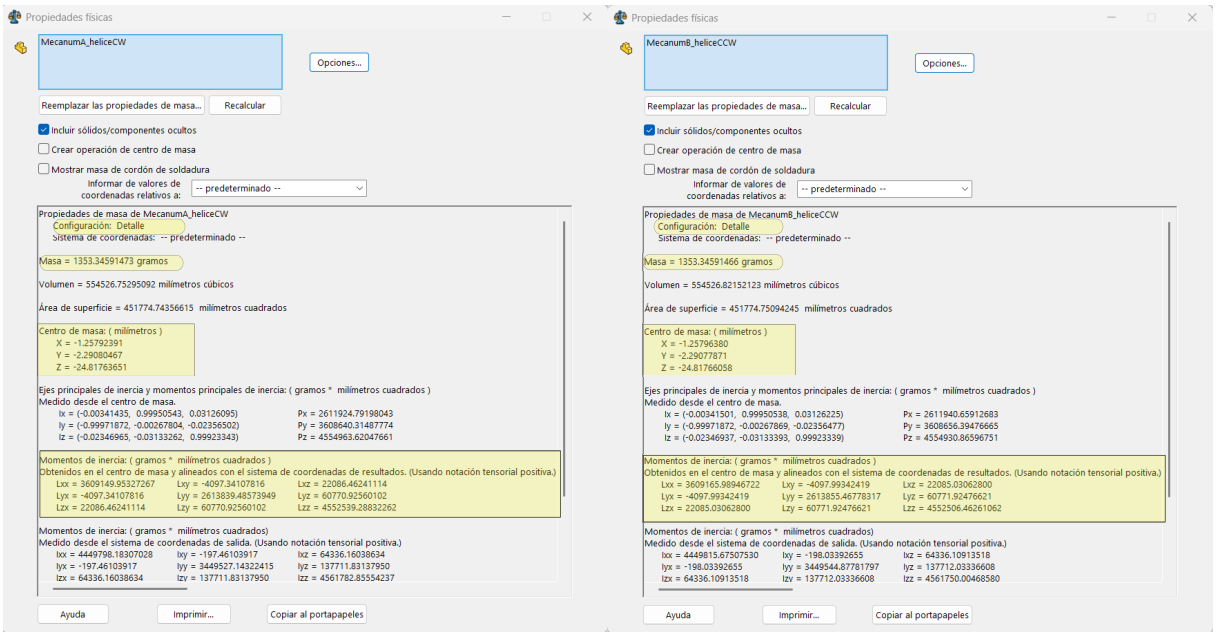


Figura 4.63: Propiedades físicas de las ruedas mecanum A y B a detalle.

En esta etapa, se realizaron ajustes en las dimensiones de los soportes de los servomotores con el fin de simplificar el modelo matemático de las extremidades, particularmente para facilitar la obtención del modelo cinemático inverso mediante el enfoque geométrico. Además, las longitudes de los soportes fueron modificadas para optimizar el espacio disponible en el chasis, asegurar el posicionamiento adecuado de los centros de las hélices en los vértices del hexágono durante la reconfiguración aérea y evitar interferencias entre eslabones en las soluciones cinemáticas. Estas modificaciones también permiten aumentar el rango de desplazamiento vertical del robot y mantener su simetría estructural.

Adicionalmente, se reorientó horizontalmente el servomotor ubicado en el soporte central del rin, con el propósito de simplificar el cálculo de los ángulos de orientación yaw, pitch y roll del rin respecto a la cadera. Asimismo, permitió reducir la distancia dy_1 a 0.075 m de los 0.093 m iniciales.

Como resultado de estos cambios, se incrementan los pares de torsión requeridos en los servomotores de cadera. No obstante, se decidió conservar los servomotores inicialmente seleccionados para analizar su comportamiento bajo carga real, lo cual permitirá evaluar con mayor precisión los elementos involucrados en el sistema (soportes, actuadores, bases del chasis, ruedas mecanum, sistemas de referencia, distribución de masas y relaciones de posición). Con base en los resultados de dicha evaluación, se considerarán posibles rediseños, sustituciones o reducción en la masa del prototipo.

Por otra parte, se redujo la longitud del arco en el saliente del rin de 114.52 mm a 64.57 mm, de forma que únicamente tres rodillos ubicados en la parte inferior contribuyan al movimiento omnidireccional de la rueda. Esta modificación permite operar con ruedas en modo convencional, reduciendo el ángulo de orientación requerido y, en consecuencia, el par de torsión necesario para su funcionamiento en los servomotores asociados.

La Figura 4.64 muestra las propiedades físicas del ensamble del robot en sus configuraciones terrestre y aérea, en las cuales se registra un peso total de 11.35 kg. Este valor se encuentra dentro de los límites establecidos, una vez que las seis hélices instaladas son capaces de generar una fuerza de empuje vertical en conjunto de hasta 12.45 kg. Finalmente, la Figura 4.65 muestra el prototipo final en ambas configuraciones tras la implementación de las modificaciones descritas.

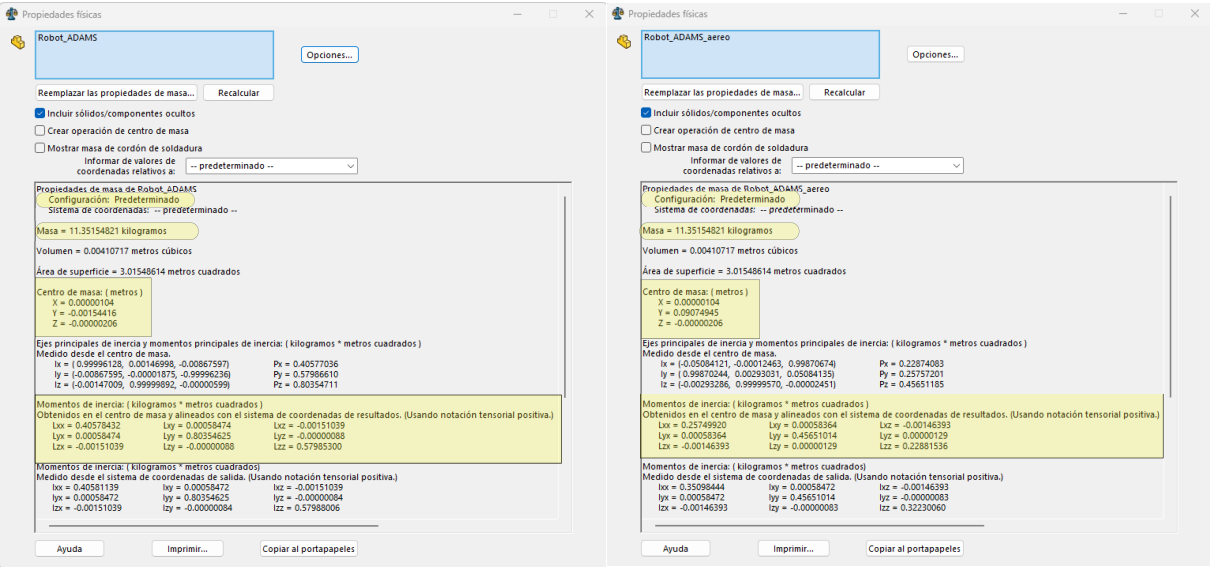


Figura 4.64: Propiedades físicas del prototipo de robot móvil en ambas configuraciones.

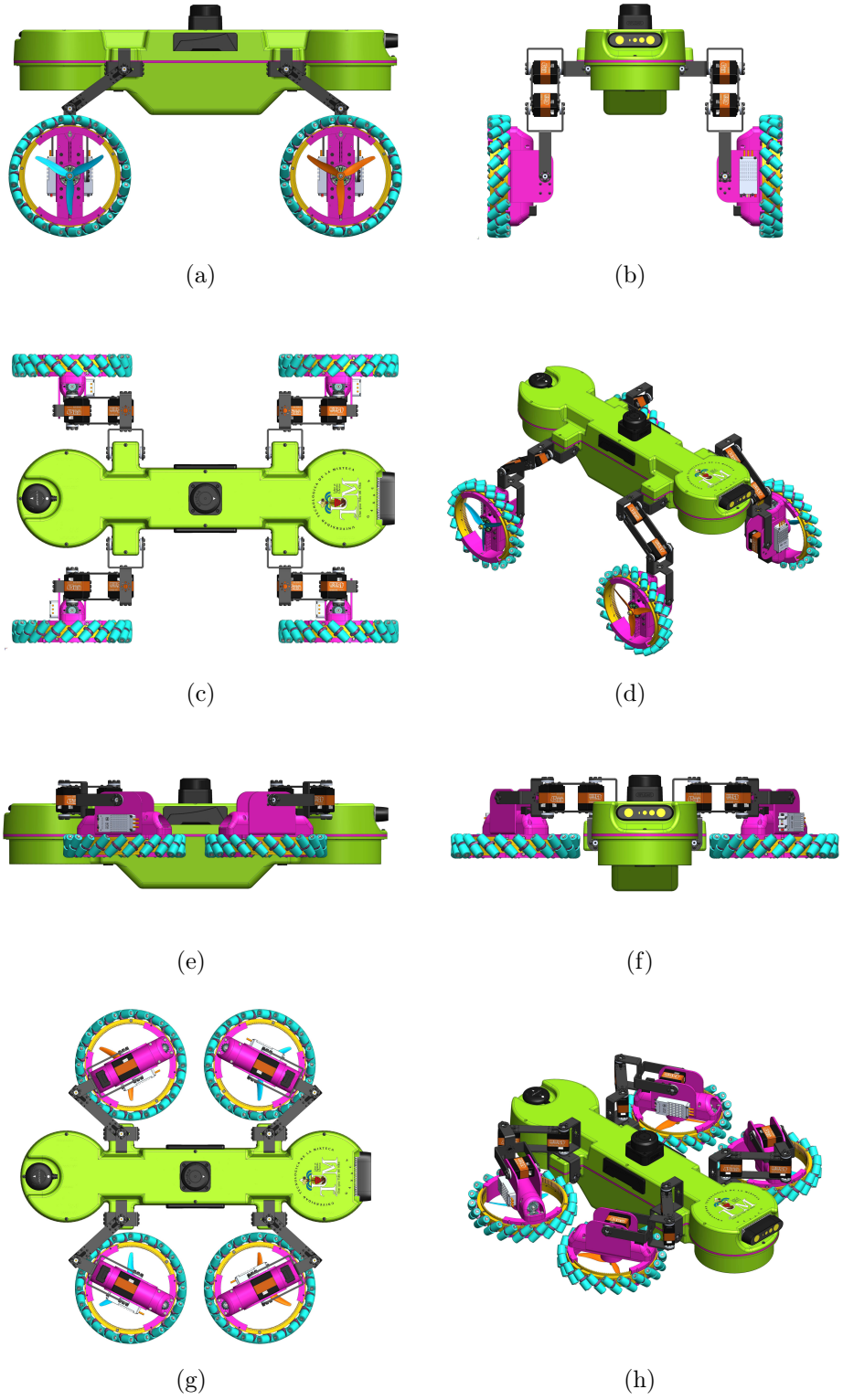


Figura 4.65: Prototipo final del robot. (a) Vista lateral en modo terrestre; (b) Vista frontal en modo terrestre; (c) Vista superior en modo terrestre; (d) Vista isométrica en modo aéreo; (e) Vista lateral en modo aéreo; (f) Vista frontal en modo aéreo; (g) Vista superior en modo aéreo; (h) Vista isométrica en modo aéreo.

Capítulo 5

Modelado cinemático

La cinemática es el estudio del movimiento de un sistema sin considerar las fuerzas que lo generan. El análisis cinemático del sistema desarrollado permite describir sus desplazamientos e interacciones con el entorno. Este campo aborda dos problemas fundamentales:

1. **Cinemática directa**, que consiste en determinar la posición y orientación (pose o postura) del robot a partir de los desplazamientos conocidos en sus articulaciones. En un robot cuadrúpedo, esto se refiere a los ángulos articulares; en un robot móvil, al ángulo de dirección y rotación de las ruedas; y en un hexacóptero, a las rotaciones de las hélices.
2. **Cinemática inversa**, que se encarga de determinar la existencia de solución en el desplazamiento, y calcular los desplazamientos necesarios en las articulaciones, así como las rotaciones en las ruedas o hélices, para alcanzar una posición y orientación deseadas del sistema en el espacio de trabajo.

Dado que el robot cuenta con un sistema de locomoción híbrido, la construcción de un modelo cinemático integral resulta compleja por la cantidad de variables involucradas. Por esta razón, se opta por desarrollar un análisis cinemático independiente para cada modo de locomoción principal: cuadrúpeda, ruedas mecanum y hexacóptero.

Como primer paso, se establece un marco de referencia inercial en el suelo, denotado como $\{S_F : O_F, X_F, Y_F, Z_F\}$, donde O_F representa el origen del marco y (X_F, Y_F, Z_F) es una triada ortonormal de vectores base que define un sistema de coordenadas dextrógiro. Además, se define un marco de referencia ligado al cuerpo del robot $\{S_R : O_R, X_R, Y_R, Z_R\}$, lo que permite representar su posición y orientación.

5.1. Parámetros del robot

La estructura del cuadrúpedo adopta una configuración de extremidades tipo mamífero con postura 1 (rodilla frontal y codo posterior), conforme a lo descrito en [45, 46]. Esta confi-

guración proporciona una distribución completamente simétrica, adecuada para la superación de obstáculos verticales, priorizando el contacto con las ruedas antes que con el cuerpo.

A diferencia de otras configuraciones cuadrúpedas que utilizan 12 grados de libertad (3 GDL por extremidad), el presente diseño incorpora un total de 16 grados de libertad distribuidos en cuatro extremidades. Estos se detallan a continuación:

- 1 GDL en la cadera para movimiento de abducción y aducción (H_{AA} - Hip Abduction/Aduction).
- 1 GDL en la cadera para movimiento de flexión y extensión (H_{FE} - Hip Flexion/Extension).
- 1 GDL en la rodilla para movimiento de flexión y extensión (K_{FE} - Knee Flexion/Extension).
- 1 GDL en el tobillo para movimiento de inversión y eversión (A_{IE} - Ankle Inversion/Eversion).

El último grado de libertad (A_{IE}) se incorpora con el propósito de orientar el rin de manera perpendicular a la superficie, así como de facilitar la reconfiguración del sistema en su modo aéreo.

Los parámetros físicos del robot se muestran en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1: Tabla de parámetros físicos del robot. **(Longitudes en configuración predeterminada)*

Parámetros	**Símbolo**	**Valor**	**Unidades**
Masa total	m_g	11.35	kg
Masa chasis	m_b	4.7548	kg
Momentos principales de inercia con respecto al sistema de coordenadas SR	L_{xx}	0.3452	$\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2$
	L_{yy}	0.5049	$\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2$
	L_{zz}	0.6401	$\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2$
Longitud corporal* – x	l_b	0.6430	m
Anchura corporal* – y	w_b	0.4815	m
Altura corporal* – z	h_b	0.28	m
Radio de las ruedas	r_w	0.1	m
Longitud eslabón H_{AA}	$L_{H_{AA}}$	0.070	m
Longitud eslabón H_{FE}	$L_{H_{FE}}$	0.110	m
Longitud eslabón K_{FE}	$L_{K_{FE}}$	0.110	m
Longitud eslabón A_{IE}	$L_{A_{IE}}$	0.075	m

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 5.1

Parámetros	**Símbolo**	**Valor**	**Unidades**
Par de torsión en articulaciones	$\tau_{JH_{AA}}, \tau_{JH_{FE}}$ $\tau_{JK_{FE}}, \tau_{JA_{IE}}$	4.413	$\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}$

5.2. Cinemática de las extremidades en modo cuadrúpedo

En la Figura 5.1 se muestran los distintos marcos de referencia asociados al movimiento del robot en su modalidad cuadrúpeda. El marco de referencia ligado al cuerpo del robot, denotado como $\{S_R\}$, se sitúa cerca del centro de masas, específicamente en la parte inferior de la base del chasis. Esto permite tener una referencia clara de la altura del robot respecto al suelo. En este sistema, el eje X_R apunta en la dirección de avance, Z_R hacia arriba, y Y_R completa el sistema de coordenadas dextrógiro.

En cuanto a las extremidades, se definen marcos de referencia locales $\{S_{LX_Y}\}$, donde el subíndice X indica el número de extremidad (1–4) y Y identifica el eslabón correspondiente (0-4). Por razones de simetría, las extremidades 1–3 y 2–4 comparten la misma disposición de marcos de referencia.

5.2.1. Cinemática directa de las extremidades

La disposición mostrada en la Figura 5.1 se construyó siguiendo la convención establecida por Denavith-Hartenberg, con la cual se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla 5.2. Estos parámetros son necesarios para obtener las matrices homogéneas $\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_i(q_i)$ que representan las transformaciones de coordenadas entre los sistemas i e $i-1$. Estas matrices se definen como el producto de cuatro transformaciones básicas de la siguiente manera:

Tabla 5.2: Tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg para las extremidades del robot.

Extremidades	**Eslabones**	$\theta_i[^\circ]$	$d_i[m]$	$a_i[m]$	$\alpha_i[^\circ]$
1 y 3	1–H_{AA}	$\theta_1 - 90^\circ$	0	0	-90°
	2–H_{EE}	$\theta_2 + 90^\circ$	0.070	0.110	0°
	3–K_{KE}	$\theta_3 - 90^\circ$	0	0.110	90°
	4–A_{IE}	$\theta_4 + 90^\circ$	0	0075	-90°
2 y 4	1–H_{AA}	$\theta_1 + 90^\circ$	0	0	90°
	2–H_{EE}	$\theta_2 - 90^\circ$	0.070	0.110	0°
	3–K_{KE}	$\theta_3 + 90^\circ$	0	0.110	90°
	4–A_{IE}	$\theta_4 + 90^\circ$	0	0075	-90°

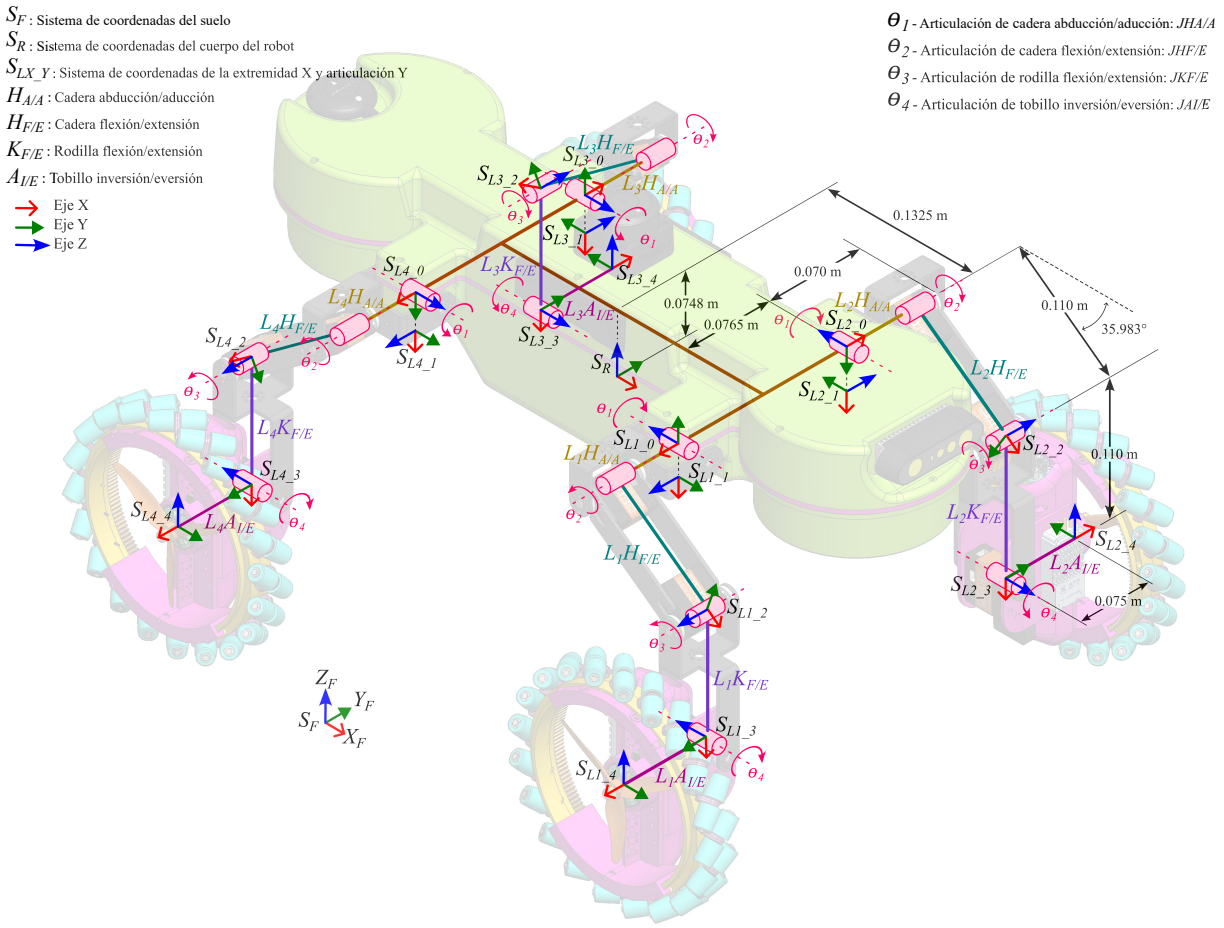


Figura 5.1: Marcos de referencia global y local para el esquema simplificado del robot en modo cuadrúpedo.

$$\mathbf{A}_i = Rot_{z,\theta}\, Trans_{z,d}\, Trans_{x,a}\, Rot_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_i} & -\mathrm{S}_{\theta_i}\mathrm{C}_{\alpha_i} & \mathrm{S}_{\theta_i}\mathrm{S}_{\alpha_i} & a_i\mathrm{C}_{\theta_i} \\ \mathrm{S}_{\theta_i} & \mathrm{C}_{\theta_i}\mathrm{C}_{\alpha_i} & -\mathrm{C}_{\theta_i}\mathrm{S}_{\alpha_i} & a_i\mathrm{S}_{\theta_i} \\ 0 & \mathrm{S}_{\alpha_i} & \mathrm{C}_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.1}$$

donde $\mathrm{C}_{\theta_i} = \cos\theta_i$, $\mathrm{S}_{\theta_i} = \sin\theta_i$, $\mathrm{C}_{\alpha_i} = \cos\alpha_i$ y $\mathrm{S}_{\alpha_i} = \sin\alpha_i$.

Las matrices obtenidas para las matrices 1-3 son:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_1} & 0 & -\mathrm{S}_{\theta_1} & 0 \\ \mathrm{S}_{\theta_1} & 0 & \mathrm{C}_{\theta_1} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_2} & -\mathrm{S}_{\theta_2} & 0 & 0.11\mathrm{C}_{\theta_2} \\ \mathrm{S}_{\theta_2} & \mathrm{C}_{\theta_2} & 0 & 0.11\mathrm{S}_{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0.07 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_3} & 0 & \mathrm{S}_{\theta_3} & 0.1100\mathrm{C}_{\theta_3} \\ \mathrm{S}_{\theta_3} & 0 & -\mathrm{C}_{\theta_3} & 0.1100\mathrm{S}_{\theta_3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_4} & 0 & -\mathrm{S}_{\theta_4} & 0.075\mathrm{C}_{\theta_3} \\ \mathrm{S}_{\theta_4} & 0 & \mathrm{C}_{\theta_4} & 0.075\mathrm{S}_{\theta_3} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.2}$$

Por su parte, las matrices obtenidas para las extremidades 2-4 son:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_1} & 0 & \mathrm{S}_{\theta_1} & 0 \\ \mathrm{S}_{\theta_1} & 0 & -\mathrm{C}_{\theta_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_2} & -\mathrm{S}_{\theta_2} & 0 & 0.11\mathrm{C}_{\theta_2} \\ \mathrm{S}_{\theta_2} & \mathrm{C}_{\theta_2} & 0 & 0.11\mathrm{S}_{\theta_2} \\ 0 & 0 & 1 & 0.07 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_3} & 0 & \mathrm{S}_{\theta_3} & 0.11\mathrm{C}_{\theta_3} \\ \mathrm{S}_{\theta_3} & 0 & -\mathrm{C}_{\theta_3} & 0.11\mathrm{S}_{\theta_3} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\theta_4} & 0 & -\mathrm{S}_{\theta_4} & 0.075\mathrm{C}_{\theta_3} \\ \mathrm{S}_{\theta_4} & 0 & \mathrm{C}_{\theta_4} & 0.075\mathrm{S}_{\theta_3} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.3}$$

Posteriormente, se realiza la multiplicación en cascada de estas matrices para obtener la matriz de transformación homogénea:

$$\mathbf{T}_0^4 = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\mathbf{A}_3\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0^4 & \mathbf{d}_0^4 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_4 & \mathbf{y}_4 & \mathbf{z}_4 & \mathbf{d}_0^4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{t} & \mathbf{n} & \mathbf{d}_0^4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.4}$$

Esta matriz representa la transformación de coordenadas desde el sistema 4 (centro del rin) al sistema 0 (cadera de la extremidad). Las tres primeras componentes de la cuarta columna corresponden al vector de posición $\mathbf{d}_0^4 = [d_x \quad d_y \quad d_z]^T$, mientras que la matriz de rotación $\mathbf{R}_0^4$ está formada por los primeros tres renglones y tres columnas (9 componentes). Sus componentes r_{ij}, con $i, j = 1, 2, 3$. definen la orientación de los vectores columna **a** (axial), **t** (transversal) y **n** (normal) del sistema $\{S_{LX_4}\}$ con respecto al marco de referencia en la cadera $\{S_{LX_0}\}$.

La matriz homogénea para las extremidades 1-3 es:

$$\mathbf{T}_{01-3}^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{23} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.5}$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= -S_1 S_4 + C_1 C_4 C_{23} \\ r_{21} &= S_4 C_1 + S_1 C_4 C_{23} \\ r_{31} &= -S_{23} C_4 \\ r_{12} &= -S_{23} C_1 \\ r_{22} &= -S_1 S_{23} \\ r_{32} &= -C_{23} \\ r_{13} &= -S_1 C_4 - S_4 C_1 C_{23} \\ r_{23} &= -S_1 S_4 C_{23} + C_1 C_4 \\ r_{33} &= S_4 S_{23} \\ d_x &= -0.075 S_1 S_4 + 0.075 C_1 C_4 C_{23} - 0.07 S_1 + 0.11 C_1 C_2 + 0.11 C_1 C_{23} \\ d_y &= 0.075 S_1 C_4 C_{23} + 0.075 S_4 C_1 + 0.07 C_1 + 0.11 S_1 C_2 + 0.11 S_1 C_{23} \\ d_z &= -0.075 S_{23} C_4 - 0.11 S_2 - 0.11 S_{23} \end{aligned}$$

donde $C_i = \cos(\theta_i), S_i = \sin(\theta_i), C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j), S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$.

Por su parte, la matriz homogénea para las extremidades 2-4 es:

$$\mathbf{T}_{02-4}^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & d_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & d_y \\ r_{31} & r_{23} & r_{33} & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.6}$$

$$
\begin{aligned}
r_{11} &= S_1S_4 + C_1C_4C_{23} \\
r_{21} &= -S_4C_1 + S_1C_4C_{23} \\
r_{31} &= S_{23}C_4 \\
r_{12} &= -S_{23}C_1 \\
r_{22} &= -S_1S_{23} \\
r_{32} &= C_{23} \\
r_{13} &= S_1C_4 - S_4C_1C_{23} \\
r_{23} &= -S_1S_4C_{23} - C_1C_4 \\
r_{33} &= -S_4S_{23} \\
d_x &= 0.075S_1S_4 + 0.075C_1C_4C_{23} + 0.07S_1 + 0.11C_1C_2 + 0.11C_1C_{23} \\
d_y &= 0.075S_1C_4C_{23} - 0.075S_4C_1 - 0.07C_1 + 0.11S_1C_2 + 0.11S_1C_{23} \\
d_z &= 0.075S_{23}C_4 + 0.11S_2 + 0.11S_{23}
\end{aligned}
$$

A partir de los componentes de la matriz de rotación $\mathbf{R}_0^4$, es posible obtener los tres ángulos de Euler que describen la orientación del marco local en el rin $\{S_{LX_4}\}$, respecto al marco local en las caderas del robot $\{S_{LX_0}\}$. Estos ángulos corresponden a los movimientos de balanceo, cabeceo y guiñada, conocidos como $\text{Roll}_{(x,\phi)}, \text{Pitch}_{(y,\theta)}, \text{Yaw}_{(z,\psi)}$, respectivamente, definidos de la siguiente forma:

$$
\begin{aligned}
\phi &= \text{atan2}(r_{32}/\cos\theta, r_{33}/\cos\theta) \\
\theta &= \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \\
\psi &= \text{atan2}(r_{21}/\cos\theta, r_{11}/\cos\theta)
\end{aligned}
\tag{5.2.7}
$$

En el caso especial donde: $\theta = \pm 90^\circ$, la solución se ajusta a:

$$
\begin{aligned}
\phi &= 0.0^\circ \\
\psi &= \pm\,\text{atan2}(r_{12}, r_{22})
\end{aligned}
$$

Asimismo, cada marco de referencia en la cadera, denotado como $\{S_0\}$ está posicionado y orientado con respecto al marco del cuerpo del robot $\{S_R\}$ mediante la matriz de transformación homogénea $\mathbf{T}_{Rx}^0$, donde $x : 1,\ 2,\ 3$ y 4. identifica cada extremidad. Las matrices de transformación homogénea que permiten expresar la posición y orientación de cada cadera con respecto al cuerpo del robot son:

$$\mathbf{T}^0_{R1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0.1325 \\ -1 & 0 & 0 & -0.0765 \\ 0 & 1 & 0 & 0.0748 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}^0_{R2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0.1325 \\ 1 & 0 & 0 & 0.0765 \\ 0 & -1 & 0 & 0.0748 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{T}^0_{R3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -0.1325 \\ 1 & 0 & 0 & 0.0765 \\ 0 & 1 & 0 & 0.0748 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}^0_{R4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -0.1325 \\ -1 & 0 & 0 & -0.0765 \\ 0 & -1 & 0 & 0.0748 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.8}$$

Estas matrices se postmultiplican con sus respectivas matrices homogéneas locales $\mathbf{T}^4_{0x}$ con $x : 1,\ 2,\ 3$ y 4., de modo que se obtiene la transformación total:

$$\mathbf{T}^4_R = \mathbf{T}^0_R \mathbf{T}^4_0 \tag{5.2.9}$$

Esta matriz representa la posición y orientación del marco de referencia en los centros de cada rin $\{S_4\}$ con respecto al marco de referencia del cuerpo del robot $\{S_R\}$.

5.2.2. Cinemática inversa de las extremidades

El problema de la cinemática inversa se plantea a partir de cuatro matrices de transformación homogénea deseadas $\mathbf{H}_1$, $\mathbf{H}_2$, $\mathbf{H}_3$, $\mathbf{H}_4$, con estructura similar a la matriz $\mathbf{T}^4_0$ definida en la Ecuación (5.2.4).

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^4_0 & \mathbf{d}^4_0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_4 & \mathbf{y}_4 & \mathbf{z}_4 & \mathbf{d}^4_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a} & \mathbf{t} & \mathbf{n} & \mathbf{d}^4_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.2.10}$$

Estas matrices representan la posición y orientación deseadas del marco de referencia $\{S_{LX_4}\}$, ubicado en centro del rin de cada extremidad, respecto al marco de referencia en la cadera del robot $\{S_{LX_0}\}$. Cada matriz genera nueve ecuaciones no lineales en función de las cuatro variables articulares. Debido a la complejidad computacional y al carácter iterativo del enfoque numérico (el cual no garantiza convergencia), se opta por una solución en forma cerrada mediante el enfoque geométrico.

Desacoplamiento de posición y orientación

El primer paso consiste en desacoplar la posición y orientación de la articulación 4 asociada al marco de referencia $\{S_{LX_3}\}$. Dado que el movimiento de esta articulación no afecta la posición del tobillo, se determina primero la posición del marco $\{S_{LX_3}\}$ y posteriormente su orientación. La posición se expresa como:

$$\mathbf{p}_a = \mathbf{p}_d - a_4\mathbf{a} \tag{5.2.11}$$

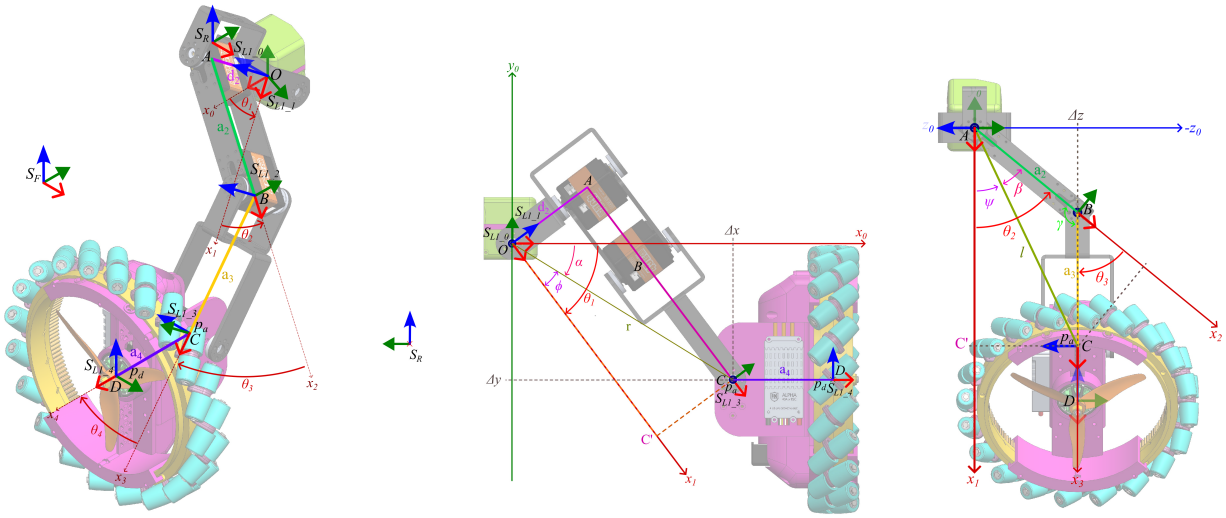
donde $\mathbf{p}_d$ es el vector de posición deseado, a_4 es la longitud del eslabón del tobillo (parámetro de Denavit-Hartenberg) y $\mathbf{a}$ es el vector director correspondiente a la primer columna de $\mathbf{R}_0^4$.

Determinación de θ_1

Se proyecta la posición del tobillo sobre el plano $x_0 - y_0$ como se muestra en la Figura 5.2(b). Mediante relaciones geométricas se tiene:

$$C' = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 - d_2^2} \tag{5.2.12}$$

donde C' es la proyección de $\overline{OC}$ sobre el eje x_1, mientras $\Delta x, \Delta y$ son las primeras dos componentes de las coordenadas de $\mathbf{p}_a$,y d_2 es el desfase de la segunda articulación (parámetro D-H), con los cuales se determinan los siguientes ángulos:



(a) (b) (c)

Figura 5.2: Análisis geométrico de la extremidad. (a) vista isométrica de una extremidad junto a sus marcos de referencia, en configuración rodilla arriba; (b) plano $x_0 - y_0$ de la extremidad para la determinación del ángulo θ_1; (c) plano $z_0 - x_1$ de la extremidad para la determinación de los ángulos θ_2 y θ_3.

$$\alpha = \text{atan2}(\Delta y, \Delta x), \quad \phi = \text{atan2}(d_2, C') \tag{5.2.13}$$

donde α es el ángulo entre x_0 y $\overline{OC}$, y ϕ es el ángulo entre $\overline{OC}$ y $\overline{OC'}$. El valor de la primera variable articular θ_1 se determina según la posición del tobillo se encuentre por debajo del cuerpo del robot $\Delta y < 0$, o por arriba $\Delta y > 0$:

$$\theta_1 = \begin{cases} \text{extremidades 1 y 3} \begin{cases} \alpha - \phi & \text{si } \Delta y < 0 \\ -\pi + \alpha + \phi & \text{si } \Delta y > 0 \text{ y } (|\Delta_y| \neq d_2 \text{ y } |\Delta_x| \neq C') \\ 0 & \text{si } \Delta y > 0 \text{ y } (|\Delta_y| = d_2 \text{ o } |\Delta_x| = C') \end{cases} \\ \text{extremidades 2 y 4} \begin{cases} \alpha + \phi & \text{si } \Delta y < 0 \\ \pi + \alpha - \phi & \text{si } \Delta y > 0 \text{ y } (|\Delta_y| \neq d_2 \text{ y } |\Delta_x| \neq C') \\ 0 & \text{si } \Delta y > 0 \text{ y } (|\Delta_y| = d_2 \text{ o } |\Delta_x| = C') \end{cases} \end{cases} \tag{5.2.14}$$

Determinación de θ_2 y θ_3

Se realiza una proyección de la posición del tobillo en el plano $z_0 - x_1$, debido a que el movimiento de las articulaciones 2 y 3 permanecen en dicho plano. Esta proyección y las variables asociadas se muestran en la Figura 5.2(c). Nuevamente mediante relaciones geométricas se obtiene:

$$\psi = \text{atan2}(\Delta z, C'), \quad \beta = \text{atan2}(a_3 \sin\theta_3, a_2 + a_3 \cos\theta_3) \tag{5.2.15}$$

$$l^2 = C'^2 + \Delta z^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 - d_2^2 + \Delta z^2 \tag{5.2.16}$$

aplicando la ley de cosenos, se tiene que:

$$\begin{aligned} l^2 &= a_2^2 + a_3^2 - 2a_2a_3\cos\gamma \\ \cos\gamma &= \cos(\pi + \theta_3) = -\cos\theta_3 \\ \therefore l^2 &= a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3\cos\theta_3 \end{aligned} \tag{5.2.17}$$

esto asociado al sentido de giro del ángulo θ_3. Igualando las Ecuaciones (5.2.16) y (5.2.17), se despeja el coseno del ángulo de la siguiente manera:

$$E := \cos\theta_3 = \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 - d_2^2 + \Delta z^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \tag{5.2.18}$$

Empleando la identidad trigonométrica $\sin\theta^2 + \cos\theta^2 = 1$, se obtiene que:

$$\sin\theta_3 = \pm\sqrt{1-E^2} \tag{5.2.19}$$

Con esto se determina el valor de las variables articulares θ_3 y θ_2 en función de si la configuración es rodilla arriba θ_3^u o abajo θ_3^d, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
&\text{extremidades 1 y 3 :}\\
&\qquad \theta_3^u = \text{atan2}(-\sqrt{1-E^2}, E)\\
&\qquad \theta_3^d = \text{atan2}(\sqrt{1-E^2}, E)\\
&\qquad \theta_2 = -\psi - \beta\\
&\text{extremidades 2 y 4 :}\\
&\qquad \theta_3^u = \text{atan2}(\sqrt{1-E^2}, E)\\
&\qquad \theta_3^d = \text{atan2}(-\sqrt{1-E^2}, E)\\
&\qquad \theta_2 = \psi - \beta
\end{aligned} \tag{5.2.20}$$

Determinación de la matriz de orientación final

Una vez determinadas las tres primeras variables articulares $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, se calcula la matriz de orientación parcial:

$$\mathbf{R}_0^3 = \mathbf{R}_0^1\mathbf{R}_1^2\mathbf{R}_2^3 \tag{5.2.21}$$

Con esta matriz, es posible determinar la orientación relativa del rin $\mathbf{R}_3^4$ con respecto al marco $\{S_{LX_3}\}$ mediante la relación:

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_0^4 &= [\mathbf{a} \quad \mathbf{t} \quad \mathbf{n}] = \mathbf{R}_0^3\mathbf{R}_3^4\\
\mathbf{R}_3^4 &= \left(\mathbf{R}_0^3\right)^{-1}\mathbf{R}_0^4 = \left(\mathbf{R}_0^3\right)^T[\mathbf{a} \quad \mathbf{t} \quad \mathbf{n}]
\end{aligned} \tag{5.2.22}$$

donde $\mathbf{R}_0^4$ es la matriz de rotación extraída de $\mathbf{H}$, mientras que $\mathbf{R}_0^3$ se calcula una vez conocidas las tres primeras variables articulares.

A partir de la estructura de las matrices $\mathbf{A}_4$, definidas en las Ecuaciones (5.2.2) o (5.2.3), se determina el valor de la cuarta variable articular mediante:

$$\theta_4 = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \tag{5.2.23}$$

Con este conjunto de valores se determina la existencia de soluciones para distintas configuraciones (rodilla arriba o abajo), así como la posición y orientación del marco de referencia localizado en el centro del rin con respecto al marco de referencia localizado en la cadera del robot para cada extremidad.

Transformación global del robot

Como se definió en la Ecuación (5.2.8), la matriz $\mathbf{T}_R^0$ transforma desde el marco en la cadera de cada extremidad $\{S_{LX_0}\}$ al marco del cuerpo del robot $\{S_R\}$. Adicionalmente, se consideran las siguientes matrices:

- $\mathbf{T}_F^R$: matriz de transformación del marco del robot $\{S_R\}$ con respecto al marco inercial del suelo $\{S_F\}$, la cual representa la pose deseada de la base.
- $\mathbf{T}_F^4$: matriz de transformación del marco en el centro del rin $\{S_{LX_4}\}$ con respecto al marco inercial del suelo $\{S_F\}$, representando la pose deseada del rin.

Con estas matrices, se puede calcular la transformación del marco de referencia en la cadera de cada extremidad con respecto al suelo mediante:

$$\mathbf{T}_F^0 = \mathbf{T}_F^R \mathbf{T}_R^0 \tag{5.2.24}$$

Finalmente, la matriz de transformación homogénea deseada $\mathbf{H}$ se obtiene como:

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}_0^4 = {\mathbf{T}_F^0}^{-1} \mathbf{T}_F^4 \tag{5.2.25}$$

5.3. Cinemática del robot móvil con ruedas mecanum

Previo al desarrollo del modelo cinemático del robot con ruedas mecanum, se establecen las siguientes consideraciones que delimitan el alcance del análisis:

- El robot móvil no contiene partes flexibles.
- La superficie de desplazamiento es plana.
- El robot presenta únicamente un movimiento planar en el plano $x - y$.

Además, el movimiento de las extremidades afecta tanto la altura del robot como la posición de las ruedas respecto al centro del cuerpo. En este modelado, se considera la altura como un valor constante y no se contempla su variación, asumiendo que el centro de gravedad se mantiene siempre dentro del área de contacto entre las ruedas y el suelo.

En cambio, la posición y orientación de las ruedas sí presentan un impacto en la cinemática del sistema. Por lo tanto, estos movimientos se restringen a mantener el plano de cada rueda normal a la superficie de desplazamiento.

Para construir el modelo cinemático, se define la relación entre el movimiento del chasis y las ruedas con respecto a un sistema de referencia global. A continuación, se enlistan los marcos de referencia empleados:

- $\{S_F\}$: marco de referencia inercial.

- $\{S_R\}$: marco en el cuerpo del robot.
- $\{S_{w_i} : O_{w_i}, X_{w_i}, Y_{w_i}, Z_{w_i}\}$ con $i : 1,\ 2,\ 3$ y 4.: marcos de referencia locales ligados a las ruedas. En estos marcos:
  - El origen O_{w_i} se localiza en el centro de cada rueda.
  - El eje X_{w_i} apunta en dirección de avance frontal.
  - El eje Y_{w_i} en dirección del eje de rotación de la rueda, apuntando hacia la izquierda.
  - El eje Z_{w_i} es normal a la superficie de desplazamiento, formando así un sistema dextrógiro.
- $\{S_{r_i} : O_{r_i}, X_{r_i}, Y_{r_i}, Z_{r_i}\}$ con $i : 1,\ 2,\ 3$ y 4.: marcos de referencia en los rodillos inferiores que están en contacto con el suelo. Para estos marcos:
  - El origen O_{r_i} corresponde al punto de contacto con el suelo.
  - El eje X_{r_i} en dirección del avance del rodillo.
  - El eje Y_{r_i} en la dirección del eje de rotación del rodillo, el cual forma un ángulo $\gamma = \pm\pi/4$ con respecto al eje de giro de la rueda.
  - El eje Z_{r_i} es normal a la superficie de desplazamiento.

La disposición y orientación de estos marcos se muestran en la Figura 5.3, donde se representan únicamente los rodillos ubicados en la parte inferior de las ruedas, que son los que interactúan principalmente con el suelo (no los visibles desde una vista superior).

La posición y orientación del marco de cada rueda $\{S_{w_i}\}$ con respecto al marco del robot $\{S_R\}$ se describen mediante los siguientes parámetros:

- L_i: distancia desde el origen del marco del robot $\{S_R\}$ hasta el origen del marco de la rueda $\{S_{w_i}\}$.
- α_i: ángulo entre el eje X_R del marco $\{S_R\}$ y el vector L_i.
- (L_i, α_i): coordenadas polares que representan la posición del origen del marco de la rueda $\{S_{w_i}\}$ con respecto al marco del robot $\{S_R\}$.
- β_i: ángulo entre la prolongación de L_i y el eje Y_{W_i}, el cual representa la orientación del plano de la rueda con respecto a L_i.
- δ_i: ángulo de orientación del marco de la rueda $\{S_{w_i}\}$ con respecto al marco del robot $\{S_R\}$, típicamente igual a cero.

La orientación del marco del rodillo en contacto con el suelo $\{S_{r_i}\}$, con respecto al marco de la rueda $\{S_{w_i}\}$ se define por:

$$\phi_i = \pi + \gamma_i \tag{5.3.26}$$

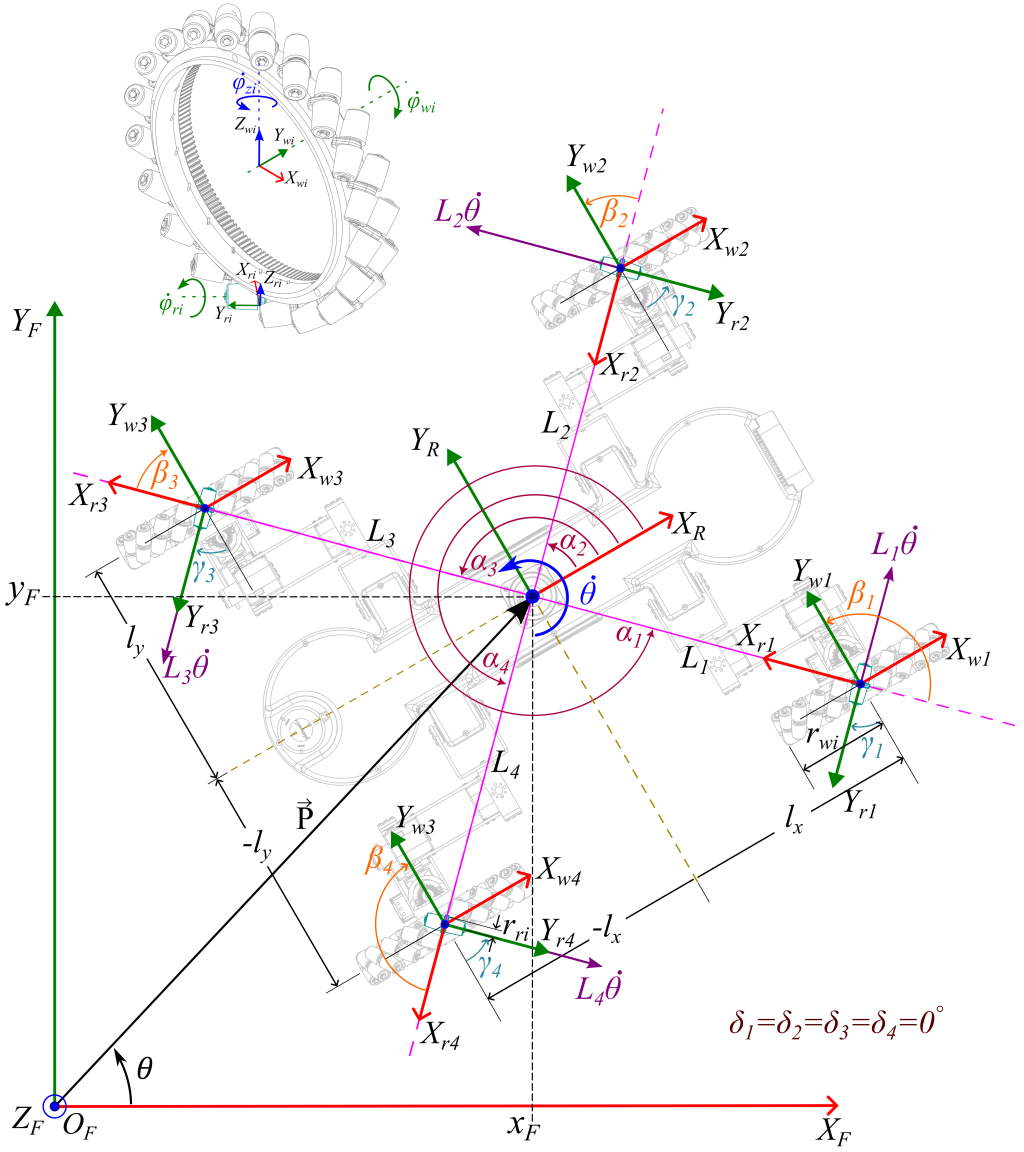


Figura 5.3: Marcos de referencia global y local para el robot móvil con ruedas mecanum.

donde γ_i es el ángulo entre el eje de rotación de la rueda y el eje Y_{r_i} del rodillo. Esta componente Y_{r_i} también indica la dirección de la componente cero de velocidad en el punto de contacto entre la rueda y el suelo.

La postura del robot se describe mediante tres variables (x_F, y_F, θ):

- (x_F, y_F): coordenadas que indican la posición relativa del origen del marco $\{S_R\}$ con respecto al marco inercial $\{S_F\}$.
- θ: orientación del marco $\{S_R\}$ con respecto al marco $\{S_F\}$.

El vector de pose o postura del robot se define como:

$$\boldsymbol{\xi}_F = [x_F \quad y_F \quad \theta]^T \in \mathbb{R}. \tag{5.3.27}$$

Para describir el movimiento global del robot en términos de las componentes de movimiento local, es necesario realizar un mapeo del movimiento a lo largo de los ejes del marco inercial con el movimiento a lo largo de los ejes del sistema local. Se emplean las siguientes matrices de rotación ortonormales alrededor del eje Z:

- Transformación de un vector de coordenadas en el marco $\{S_F\}$ a un vector de coordenadas con respecto al marco de coordenadas $\{S_R\}$:

$$\mathbf{R}_R^F(\theta) = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_\theta & \mathrm{S}_\theta & 0 \\ -\mathrm{S}_\theta & \mathrm{C}_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.3.28}$$

- Transformación de un vector de coordenadas en el marco $\{S_R\}$ a un vector de coordenadas con respecto al marco de coordenadas $\{S_F\}$

$$\mathbf{R}_F^R(\theta) = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_\theta & -\mathrm{S}_\theta & 0 \\ \mathrm{S}_\theta & \mathrm{C}_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.3.29}$$

Estas matrices permiten mapear velocidades, fuerzas o desplazamientos entre el sistema local (cuerpo del robot) y el sistema inercial (suelo).

5.3.1. Cinemática diferencial del robot móvil con ruedas

En el análisis de robótica móvil con ruedas, es común utilizar un enfoque de cinemática diferencial, en el cual se establecen relaciones entre velocidades, más que entre posiciones u orientaciones. Esto se debe a que las ruedas imponen restricciones no integrables sobre el movimiento del robot, conocidas como restricciones no holonómicas, las cuales impiden obtener directamente relaciones de posición a partir de la velocidad.

En este contexto, se abordan dos problemas fundamentales:

- **Cinemática diferencial directa**: A partir de las características geométricas de las ruedas mecanum, (el radio de la rueda, la orientación en el chasis, la distancia entre ruedas, el radio y la orientación de los rodillos) y su localización con respecto al centro geométrico del chasis, así como sus velocidades angulares de rotación, se calcula la velocidad del cuerpo del robot con respecto al marco de referencia inercial:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = f\left(\dot{\varphi}_{w_1}, \dot{\varphi}_{w_2}, \dot{\varphi}_{w_3}, \dot{\varphi}_{w_4}\right) \tag{5.3.30}$$

  donde $\dot{\boldsymbol{\xi}}$ es el vector de velocidad del robot (traslacional y rotacional), y $\dot{\varphi}_{w_i}$ es la velocidad angular de rotación de la i-ésima rueda.

- **Cinemática diferencial inversa**: En este caso, se determina el conjunto de velocidades angulares de rotación requeridas en cada rueda para que el robot se desplace con una velocidad deseada:

$$\left(\dot{\varphi}_{w_1}, \dot{\varphi}_{w_2}, \dot{\varphi}_{w_3}, \dot{\varphi}_{w_4}\right) = f(\dot{\boldsymbol{\xi}}) \tag{5.3.31}$$

Con lo cual, el mapeo del movimiento del robot en el marco inercial $\{S_F\}$ hacia el marco local $\{S_R\}$ queda denotado por:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_R = \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \mathbf{R}_R^F \dot{\boldsymbol{\xi}}_F = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_\theta & \mathrm{S}_\theta & 0 \\ -\mathrm{S}_\theta & \mathrm{C}_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_F \\ \dot{y}_F \\ \dot{\theta}_F \end{bmatrix} \tag{5.3.32}$$

y viceversa, el movimiento del robot en el marco inercial a partir del movimiento en su marco de referencia local queda denotado por

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_F = \mathbf{R}_F^R \dot{\boldsymbol{\xi}}_R = \left(\mathbf{R}_R^F\right)^{-1} \dot{\boldsymbol{\xi}}_R \tag{5.3.33}$$

donde $\left(\mathbf{R}_R^F\right)^{-1} = \mathbf{R}_R^{F^T}$.

Cada rueda contribuye al movimiento general del robot y, al mismo tiempo, impone restricciones en el movimiento. Estas restricciones, definidas por la posición y orientación de cada rueda en el chasis, se combinan para formar un conjunto de restricciones que rige el comportamiento cinemático general del sistema.

5.3.1.1. Restricciones cinemáticas

Para el análisis de las restricciones cinemáticas impuestas por las ruedas, se establecen los siguientes supuestos o condiciones:

1. La rueda es rígida e indeformable;
2. El plano de la rueda permanece vertical;
3. Existe un único punto de contacto entre la rueda y la superficie de desplazamiento;
4. No existe deslizamiento en este punto de contacto (condición de rodadura pura), aunque si se permite rotar alrededor del eje vertical que pasa por este punto.

Bajo estos supuestos, se definen dos restricciones cinemáticas generales para cada tipo de rueda:

- **Restricción de rodadura**: la rueda debe rodar cuando el movimiento tiene lugar en su dirección efectiva. La velocidad lineal en el eje de avance de la rueda, denotada como v_{wx_i}, es proporcional a la velocidad de rotación de la rueda $\dot{\varphi}_{w_i}$ mediante:

$$v_{wx_i} = r_{w_i}\dot{\varphi}_{w_i} \tag{5.3.34}$$

- **Restricción de deslizamiento**: impide el movimiento lateral ortogonal al plano de la rueda, reforzando la condición de no deslizamiento transversal.

En general, estas restricciones proporcionan dos condiciones independientes. En el caso particular de las ruedas mecanum, debido a la rotación relativa presentada por los rodillos con respecto a la rueda, existe un sólo componente cero de velocidad en el punto de contacto. Esta dirección está determinada por el ángulo γ_i, medido desde el eje de rotación de la rueda hacia el eje del rodillo.

Como resultado, el robot no puede moverse en la dirección del eje del rodillo sin que exista rotación de la rueda principal (salvo que exista deslizamiento, lo cual infringe el supuesto establecido), lo cual genera una única condición de restricción de rodadura en la dirección efectiva alineada con la dirección de la componente cero de velocidad, en lugar del plano de la rueda. Por el contrario, el movimiento ortogonal a esta dirección no está restringido debido a la rotación libre de los rodillos pasivos.

Dado que esta dirección efectiva coincide con el eje Y_{r_i}, del marco de referencia del rodillo $\{S_{r_i}\}$, es necesario expresar tanto las velocidades de la rueda como las del robot con respecto a dicho marco.

Para ello, se define el vector de velocidades angulares de la rueda como:

$$\dot{\mathbf{q}}_i = [\dot{\varphi}_{w_i} \quad \dot{\varphi}_{r_i} \quad \dot{\varphi}_{z_i}]^T \tag{5.3.35}$$

donde $\dot{\varphi}_{w_i}$ es la velocidad angular de rotación de la rueda, $\dot{\varphi}_{r_i}$ es la velocidad angular de rotación del rodillo, y $\dot{\varphi}_{z_i}$ es la velocidad angular de la rueda alrededor del eje vertical en el punto de contacto.

Relación entre velocidades en ruedas mecanum

La velocidad lineal generada por la rotación de la rueda está dada por:

$$v_{w_i} = r_{w_i}\dot{\varphi}_{w_i} \tag{5.3.36}$$

Asimismo, la velocidad tangencial del rodillo en contacto con el suelo se define como:

$$v_{r_i} = r_{r_i}\dot{\varphi}_{r_i} \tag{5.3.37}$$

En consecuencia, las componentes de la velocidad de la rueda v_w respecto al marco del rodillo $\{S_r\}$ se expresan como:

$$\begin{aligned} v_{wrx_i} &= -r_{w_i}\dot{\varphi}_{w_i}\cos\gamma_i + r_{r_i}\dot{\varphi}_{r_i} \\ v_{wry_i} &= r_{w_i}\dot{\varphi}_{w_i}\sin\gamma_i \\ \dot{\theta}_{rz_i} &= \dot{\varphi}_{wz_i} \end{aligned} \tag{5.3.38}$$

Reescribiendo en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} v_{wrx_i} \\ v_{wry_i} \\ \dot{\theta}_{rz_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{w_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} & r_{r_i} & 0 \\ r_{w_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_i} \\ \dot{\varphi}_{r_i} \\ \dot{\varphi}_{z_i} \end{bmatrix} \tag{5.3.39}$$

Por otra parte, el vector de velocidad absoluta de la rueda inducido por el movimiento del robot, expresado en el marco del robot $\{S_R\}$, se define como:

$$\begin{bmatrix} v_{wRx_i} \\ v_{wRy_i} \\ \dot{\theta}_{Rz_i} \end{bmatrix} = \dot{\boldsymbol{\xi}}_R + \mathbf{v}_{W/R} = \dot{\boldsymbol{\xi}}_R + \dot{\theta}_R\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{r}}_{W/R} \tag{5.3.40}$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix} + \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & \dot{\theta}_R \\ L_i\mathrm{C}_{\alpha_i} & L_i\mathrm{S}_{\alpha_i} & 0 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x_R} - L_i\mathrm{S}_{\alpha_i}\dot{\theta}_R \\ \dot{y_R} + L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\dot{\theta}_R \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_i \mathrm{S}_{\alpha_i} \\ 0 & 1 & L_i \mathrm{C}_{\alpha_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix}$$

La transformación entre el marco del robot $\{S_R\}$ al marco del rodillo $\{S_r\}$ se realiza mediante la matriz de rotación:

$$\mathbf{R}_r^R(\phi_i) = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\phi_i} & \mathrm{S}_{\phi_i} & 0 \\ -\mathrm{S}_{\phi_i} & \mathrm{C}_{\phi_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{C}_{\pi+\gamma_i} & \mathrm{S}_{\pi+\gamma_i} & 0 \\ -\mathrm{S}_{\pi+\gamma_i} & \mathrm{C}_{\pi+\gamma_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -\mathrm{S}_{\gamma_i} & 0 \\ \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.3.41}$$

donde $\phi_i = \pi + \gamma_i$, por lo tanto, $\mathrm{C}_{\pi+\gamma_i} = -\mathrm{C}_{\gamma_i}$, y $\mathrm{S}_{\pi+\gamma_i} = -\mathrm{S}_{\gamma_i}$.

Con lo cual, las velocidades de la Ecuación (**??**) quedan descritas en el marco del rodillo $\{S_r\}$ como:

$$\begin{bmatrix} v_{wrx_i} \\ v_{wry_i} \\ \dot{\theta}_{rz_i} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_r^R \begin{bmatrix} v_{wRx_i} \\ v_{wRy_i} \\ \dot{\theta}_{Rz_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -\mathrm{S}_{\gamma_i} & 0 \\ \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_i \mathrm{S}_{\alpha_i} \\ 0 & 1 & L_i \mathrm{C}_{\alpha_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix} \tag{5.3.42}$$

Por lo tanto, al igualar las Ecuaciones (5.3.39) y (5.3.42) se tiene:

$$\begin{bmatrix} v_{wrx_i} \\ v_{wry_i} \\ \dot{\theta}_{rz_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{w_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} & r_{r_i} & 0 \\ r_{w_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_i} \\ \dot{\varphi}_{r_i} \\ \dot{\varphi}_{z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -\mathrm{S}_{\gamma_i} & 0 \\ \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_i \mathrm{S}_{\alpha_i} \\ 0 & 1 & L_i \mathrm{C}_{\alpha_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -r_{w_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} & r_{r_i} & 0 \\ r_{w_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_i} \\ \dot{\varphi}_{r_i} \\ \dot{\varphi}_{z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -\mathrm{S}_{\gamma_i} & L_i\mathrm{S}_{\alpha_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} - L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} \\ \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -L_i\mathrm{S}_{\alpha_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} - L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix} \tag{5.3.43}$$

Dado que la dirección efectiva para mantener la restricción de rodadura corresponde a aquella en la cual la componente de velocidad es cero, es decir, a lo largo del eje Y_{r_i}, se establece que la ecuación de movimiento asociada a esta restricción queda definida a partir de la segunda fila de la matriz de velocidades relativas, según la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -L_i\mathrm{S}_{\alpha_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} - L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_R - r_{w_i}\mathrm{S}_{\gamma_i}\dot{\varphi}_{w_i} = 0 \tag{5.3.44}$$

De forma equivalente, esta ecuación puede reescribirse en términos del marco de referencia inercial $\{S_F\}$, aplicando la transformación de coordenadas correspondiente:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -L_i\mathrm{S}_{\alpha_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} - L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} \end{bmatrix} \mathbf{R}_R^F \dot{\boldsymbol{\xi}}_F - r_{w_i}\mathrm{S}_{\gamma_i}\dot{\varphi}_{w_i} = 0 \tag{5.3.45}$$

5.3.1.2. Cinemática inversa del robot con ruedas mecanum

A partir de la Ecuación de movimiento (5.3.44), es posible determinar fácilmente la cinemática diferencial inversa, despejando la velocidad angular de cada rueda mecanum:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_{w_i} &= \frac{1}{r_{w_i}\mathrm{S}_{\gamma_i}} \begin{bmatrix} \mathrm{S}_{\gamma_i} & -\mathrm{C}_{\gamma_i} & -L_i\mathrm{S}_{\alpha_i}\mathrm{S}_{\gamma_i} - L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\mathrm{C}_{\gamma_i} \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_R \\ &= \frac{1}{r_{w_i}} \begin{bmatrix} 1 & -\cot(\gamma_i) & -L_i\mathrm{S}_{\alpha_i} - L_i\mathrm{C}_{\alpha_i}\cot(\gamma_i) \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\xi}}_R \end{aligned} \tag{5.3.46}$$

Dado que el movimiento del robot se genera por la acción simultánea de las cuatro ruedas mecanum, y asumiendo que todas tienen el mismo radio $r_{w_i} = r_w$, se obtiene la formulación matricial de la cinemática diferencial inversa con respecto al marco del robot $\{S_R\}$ de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_1} \\ \dot{\varphi}_{w_2} \\ \dot{\varphi}_{w_3} \\ \dot{\varphi}_{w_4} \end{bmatrix} &= \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} 1 & -\cot(\gamma_1) & -L_1\mathrm{S}_{\alpha_1} - L_1\mathrm{C}_{\alpha_1}\cot(\gamma_1) \\ 1 & -\cot(\gamma_2) & -L_2\mathrm{S}_{\alpha_2} - L_2\mathrm{C}_{\alpha_2}\cot(\gamma_2) \\ 1 & -\cot(\gamma_3) & -L_3\mathrm{S}_{\alpha_3} - L_3\mathrm{C}_{\alpha_3}\cot(\gamma_3) \\ 1 & -\cot(\gamma_4) & -L_4\mathrm{S}_{\alpha_4} - L_4\mathrm{C}_{\alpha_4}\cot(\gamma_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} \\ \dot{\boldsymbol{\varphi}}_w &= \mathbf{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}}_R \end{aligned} \tag{5.3.47}$$

donde $\mathbf{J^{-1}}$ representa la matriz Jacobiana inversa.

Para determinar la cinemática diferencial inversa con respecto al marco de referencia inercial, se reemplaza $\dot{\boldsymbol{\xi}}_R$ por la Ecuación (5.3.32), por lo tanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_1} \\ \dot{\varphi}_{w_2} \\ \dot{\varphi}_{w_3} \\ \dot{\varphi}_{w_4} \end{bmatrix} = \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} 1 & -\cot(\gamma_1) & -L_1\mathrm{S}_{\alpha_1} - L_1\mathrm{C}_{\alpha_1}\cot(\gamma_1) \\ 1 & -\cot(\gamma_2) & -L_2\mathrm{S}_{\alpha_2} - L_2\mathrm{C}_{\alpha_2}\cot(\gamma_2) \\ 1 & -\cot(\gamma_3) & -L_3\mathrm{S}_{\alpha_3} - L_3\mathrm{C}_{\alpha_3}\cot(\gamma_3) \\ 1 & -\cot(\gamma_4) & -L_4\mathrm{S}_{\alpha_4} - L_4\mathrm{C}_{\alpha_4}\cot(\gamma_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{C}_\theta & \mathrm{S}_\theta & 0 \\ -\mathrm{S}_\theta & \mathrm{C}_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x_F} \\ \dot{y_F} \\ \dot{\theta_F} \end{bmatrix} \tag{5.3.48}$$
$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{R}_R^F\dot{\boldsymbol{\xi}}_F$$

La Tabla 5.3 muestra los parámetros cinemáticos del robot móvil con ruedas. Estos parámetros consideran la simetría en la distribución de las ruedas, y los signos respectivos de sus componentes en los ejes x e y dentro del marco de referencia del robot $\{S_R\}$. Los valores absolutos de estas posiciones se obtienen a partir de la cinemática directa de cada extremidad con respecto al marco del robot.

Tabla 5.3: Tabla de parámetros del robot con ruedas mecanum.

Rueda i	$L_i \sin\alpha_i$ [m]	$L_i \cos\alpha_i$ [m]	γ_i [rad]	r_{w_i} [m]
1	$-l_y$	l_x	$-\frac{\pi}{4}$	$r_w = 0.1$
1	l_y	l_x	$\frac{\pi}{4}$	$r_w = 0.1$
1	l_y	$-l_x$	$-\frac{\pi}{4}$	$r_w = 0.1$
1	$-l_y$	$-l_x$	$\frac{\pi}{4}$	$r_w = 0.1$

Sustituyendo dichos valores en la Ecuación (5.3.47) se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_1} \\ \dot{\varphi}_{w_2} \\ \dot{\varphi}_{w_3} \\ \dot{\varphi}_{w_4} \end{bmatrix} = \frac{1}{r_w} \begin{bmatrix} 1 & 1 & l_x + l_y \\ 1 & -1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & 1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & -1 & l_x + l_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix} \tag{5.3.49}$$
$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w = \mathbf{J}^{-1}\dot{\boldsymbol{\xi}}_R$$

con la matriz Jacobiana inversa definida como:

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{r_w}\begin{bmatrix} 1 & 1 & l_x + l_y \\ 1 & -1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & 1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & -1 & l_x + l_y \end{bmatrix} \tag{5.3.50}$$

5.3.1.3. Cinemática directa del robot con ruedas mecanum

A partir de la Ecuación (5.3.49), es posible obtener la cinemática diferencial directa, la cual permite expresar el vector de velocidad del robot con respecto al marco $\{S_R\}$ en términos del vector de velocidades angulares de las ruedas.

Para ello, se considera el cambio de variable $T = \mathbf{J}^{-1}$, lo que permite calcular la pseudo inversa de la matriz Jacobiana inversa, utilizando la siguiente expresión:

$$\mathbf{J} = \mathbf{T}^{\dagger} = \left(\mathbf{T}^T\mathbf{T}\right)^{-1}\mathbf{T}^T \tag{5.3.51}$$

Aplicando esta operación, se obtiene la matriz Jacobiana directa:

$$\mathbf{J} = \frac{r_w}{4}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ \frac{1}{(l_x+l_y)} & \frac{-1}{(l_x+l_y)} & \frac{-1}{(l_x+l_y)} & \frac{1}{(l_x+l_y)} \end{bmatrix} \tag{5.3.52}$$

Por lo tanto, la velocidad del robot en su propio marco de referencia $\{S_R\}$, se calcula mediante:

$$\begin{bmatrix} \dot{x_R} \\ \dot{y_R} \\ \dot{\theta_R} \end{bmatrix} = \frac{r_w}{4}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ \frac{1}{(l_x+l_y)} & \frac{-1}{(l_x+l_y)} & \frac{-1}{(l_x+l_y)} & \frac{1}{(l_x+l_y)} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{w_1} \\ \dot{\varphi}_{w_2} \\ \dot{\varphi}_{w_3} \\ \dot{\varphi}_{w_4} \end{bmatrix} \tag{5.3.53}$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_R = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w$$

A partir de este vector, se define la magnitud de la velocidad lineal del robot y su dirección de desplazamiento angular mediante:

$$v_R = \sqrt{\dot{x_R}^2 + \dot{y_R}^2}$$
$$\rho = \text{atan2}\left(\dot{y_R}, \dot{x_R}\right) \tag{5.3.54}$$

En la Figura 5.4 se muestran las velocidades resultantes y los movimientos básicos del robot con ruedas mecanum, con base en las velocidades angulares de cada rueda.

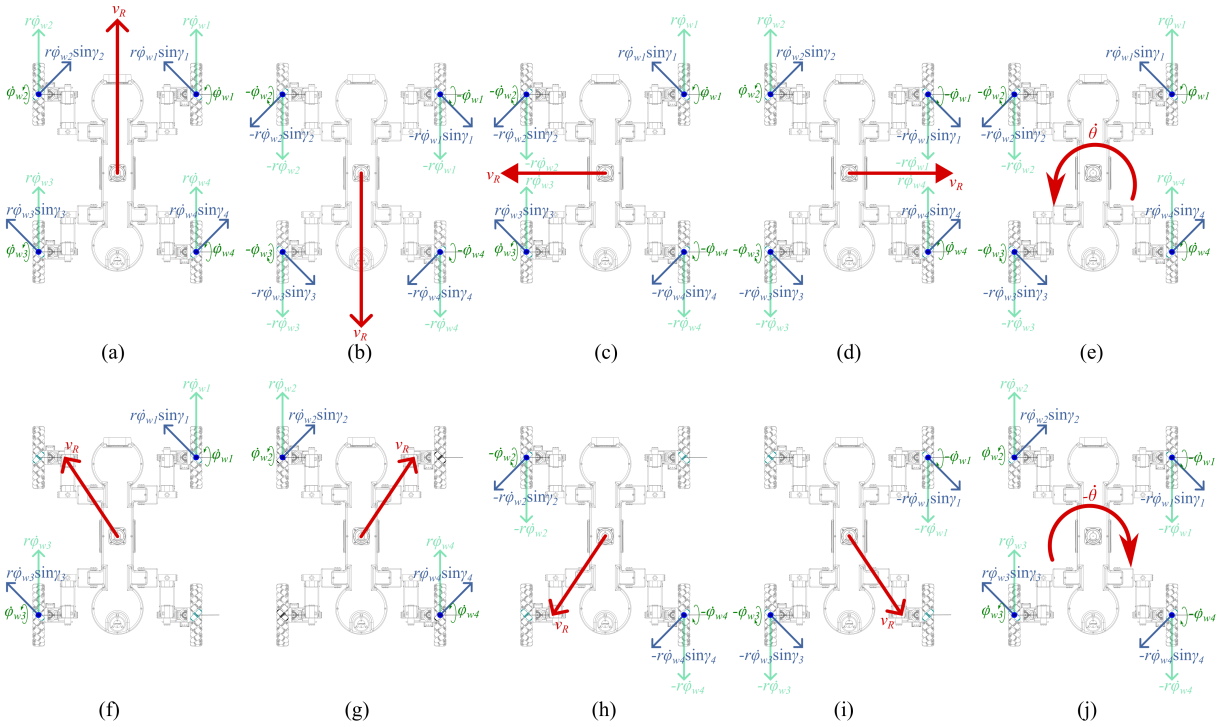


Figura 5.4: Velocidades resultantes del cuerpo del robot con base en las diversas velocidades angulares de cada rueda.

5.4. Cinemática del hexacóptero

En el modo de operación aérea tipo hexacóptero, la representación en tres dimensiones de la posición y orientación del robot requiere el establecimiento de dos marcos de referencia adicionales, definidos conforme a la convención aeronáutica, como se muestra en la Figura 5.5.

El marco de referencia inercial terrestre se representa por el sistema de coordenadas $\{S_E : O_E X_E Y_E Z_E\}$, donde el eje X_E apunta al norte, el eje Y_E al este y el eje Z_E se orienta verticalmente hacía el centro la tierra, a lo largo del vector de gravedad, formando un sistema de coordenadas dextrógiro.

El marco de referencia ligado al cuerpo del robot está dado por $\{S_B : O_B X_B Y_B Z_B\}$, donde el eje X_B apunta en la dirección de avance sobre el eje longitudinal del robot, el eje Z_B apunta hacia abajo y el eje Y_B completa el sistema de coordenadas dextrógiro.

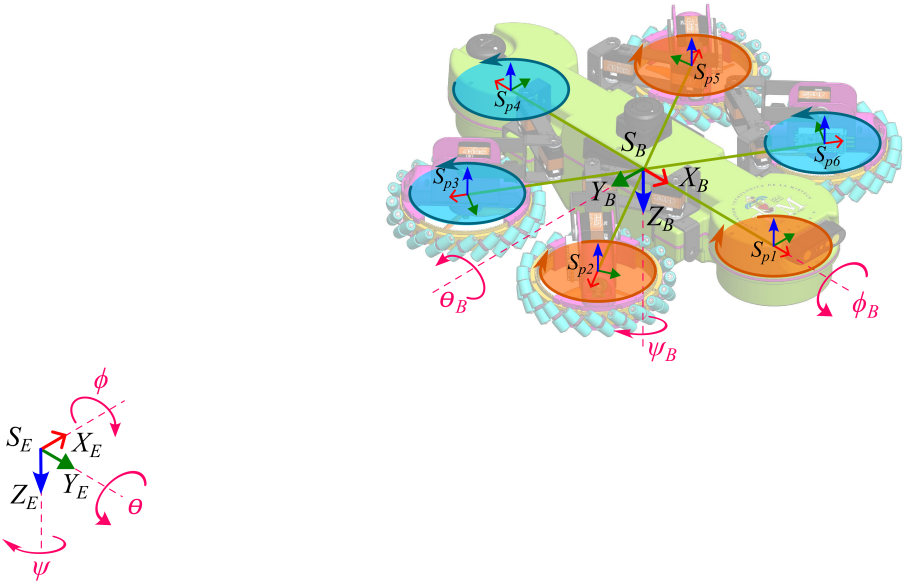


Figura 5.5: Marcos de referencia global en tierra $\{S_E\}$ y local en el cuerpo $\{S_B\}$ del hexacóptero.

La posición del hexacóptero en el marco del cuerpo $\{S_B\}$ con respecto al marco terrestre $\{S_E\}$ se expresa mediante el vector:

$$\boldsymbol{\xi}_E = [x_E \quad y_E \quad z_E]^T \tag{5.4.55}$$

y el vector de actitud (*ángulos de orientación*) se describe con:

$$\boldsymbol{\eta}_E = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T \tag{5.4.56}$$

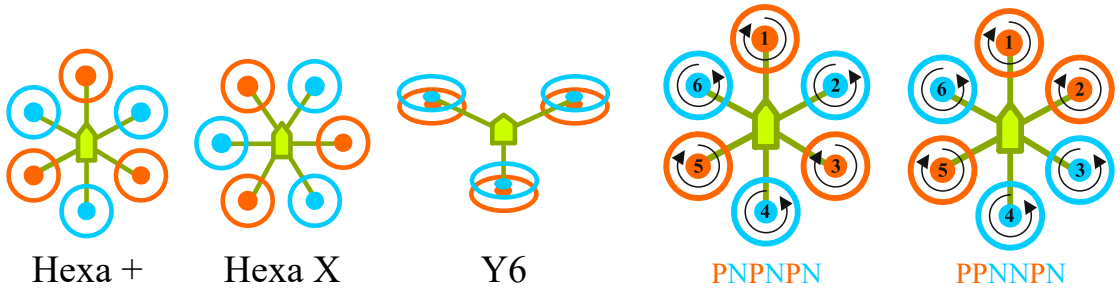
donde ϕ, θ, ψ representan los ángulos de balanceo (roll), cabeceo (pitch) y guiñada (yaw), respectivamente.

La actitud del hexacóptero se controla mediante variaciones en la velocidad de rotación de sus rotores, que a su vez modifican la magnitud de las fuerzas de empuje generadas por las hélices. La Figura 5.6(a) muestra algunas configuraciones típicas de fuselajes para hexacópteros. En la Figura 5.6(b) se muestran dos arreglos para la dirección de giro de los rotores, numerados del 1 al 6 en sentido horario, comenzando desde el rotor frontal alineado con el eje X_B.

Aunque el arreglo PNPNPN es el más común (donde P indica sentido horario (CW, *Clock Wise*, por sus siglas en español) y N antihorario (CCW, *Counter Clock Wise*, por sus siglas en español), este proyecto adopta una configuración hexa+ y un arreglo PPNNPN, ya que ha demostrado mayor robustez ante fallos en algunos de sus motores [213–215].

A continuación, se describe la influencia que tienen las velocidades en los rotores en el cálculo de los ángulos de orientación del hexacóptero:

Balanceo (roll, ϕ): corresponde la rotación alrededor del eje X_B. Un ángulo positivo se



(a) (b)

Figura 5.6: Configuraciones de fuselaje y arreglo en rotores para hexacópteros. (a) Configuraciones Hexa+, HexaX y Y6 (coaxial); (b) Configuración Hexa+ y arreglo PNPNPN y PPNNPN.

obtiene al disminuir la velocidad de los rotores 2 y 3, al mismo tiempo que se incrementa la velocidad de los rotores 5 y 6. Un ángulo negativo se obtiene al invertir las relaciones de velocidad en los rotores antes mencionados. Esta diferencia de velocidades, a su vez, conduce a un par de torsión al rededor del eje X y por lo tanto, a una aceleración angular.

Cabeceo (pitch, θ): es la rotación alrededor del eje Y_B. Un ángulo positivo se obtiene al incrementar la velocidad de los rotores 1, 2 y 6, al mismo tiempo que se disminuye la velocidad en los rotores 3, 4 y 5. Al invertir las relaciones de velocidad en los rotores antes mencionados se obtiene un ángulo negativo. Esta diferencia de velocidades, a su vez, conduce a un par de torsión al rededor del eje Y y por lo tanto, a una aceleración angular.

Guiñada (yaw, ψ): representa la rotación alrededor del eje Z_B. Cuando la hélice rota se produce un par de torsión alrededor del eje Z y en sentido contrario a la rotación de la hélice, es decir, si la hélice rota en sentido de las manecillas del reloj (CW), esto genera un par en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW) al rededor del eje Z. Por esto, para mantener estable al hexacóptero, se requieren tres rotores girando a favor de las manecillas del reloj y los tres restantes girando en sentido contrario. Un ángulo positivo se obtiene al disminuir la velocidad de los rotores 1, 2 y 5, al mismo tiempo que se incrementa la velocidad en los rotores 3, 4 y 6. Para un ángulo negativo se invierten las relaciones de velocidad en los rotores antes mencionados.

La actitud del hexacóptero con respecto al marco de referencia terrestre $\{S_E\}$, se representa mediante la matriz de rotación compuesta:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_E^B(\psi,\theta,\phi) &= \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi) \\ &= \begin{bmatrix} \mathrm{C}_\psi\mathrm{C}_\theta & \mathrm{C}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{S}_\phi - \mathrm{S}_\psi\mathrm{C}_\phi & \mathrm{C}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{C}_\phi + \mathrm{S}_\psi\mathrm{S}_\phi \\ \mathrm{S}_\psi\mathrm{C}_\theta & \mathrm{S}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{S}_\phi + \mathrm{C}_\psi\mathrm{C}_\theta & \mathrm{S}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{C}_\phi - \mathrm{C}_\psi\mathrm{S}_\phi \\ -\mathrm{S}_\theta & \mathrm{C}_\theta\mathrm{S}_\phi & \mathrm{C}_\theta\mathrm{C}_\phi \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{5.4.57}$$

que representa la transformación de un vector de coordenadas en términos del marco en el cuerpo del hexacóptero $\{S_B\}$ a un vector de coordenadas en términos del marco terrestre $\{S_E\}$. Por el contrario, la transformación del marco terrestre hacía el marco del cuerpo del hexacóptero, se determina mediante la inversa de dicha matriz de rotación, equivalente a su matriz transpuesta:

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_B^E &= \mathbf{R}_E^{B^{-1}} = \mathbf{R}_E^{B^T} \\ &= \begin{bmatrix} \mathrm{C}_\psi\mathrm{C}_\theta & \mathrm{S}_\psi\mathrm{C}_\theta & -\mathrm{S}_\theta \\ \mathrm{C}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{S}_\phi - \mathrm{S}_\psi\mathrm{C}_\phi & \mathrm{S}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{S}_\phi + \mathrm{C}_\psi\mathrm{C}_\theta & \mathrm{C}_\theta\mathrm{S}_\phi \\ \mathrm{C}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{C}_\phi + \mathrm{S}_\psi\mathrm{S}_\phi & \mathrm{S}_\psi\mathrm{S}_\theta\mathrm{C}_\phi - \mathrm{C}_\psi\mathrm{S}_\phi & \mathrm{C}_\theta\mathrm{C}_\phi \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{5.4.58}$$

La velocidad lineal del hexacóptero en el marco del cuerpo $\{S_B\}$ se describe mediante el vector:

$$\mathbf{V}_B = [u \quad v \quad w]^T \tag{5.4.59}$$

mientras que su transformación al marco terrestres $\{S_E\}$ se describe mediante:

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_E = \mathbf{R}_E^B\mathbf{V}_B = [\dot{x}_E \quad \dot{y}_E \quad \dot{z}_E]^T \tag{5.4.60}$$

donde el vector $\dot{\boldsymbol{\xi}}_E$ representa la derivada temporal del vector de posición en el marco de la tierra.

Las velocidades angulares del hexacóptero con respecto a su marco $\{S_B\}$ se describen mediante el vector:

$$\boldsymbol{\omega}_B = [p \quad q \quad r]^T \tag{5.4.61}$$

donde p, q, r representan las velocidades de rotación alrededor de los ejes X_B, Y_B, y Z_B, respectivamente.

Para relacionar las velocidades angulares del cuerpo del hexacóptero con las velocidades angulares en el marco de la tierra se tiene:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_E = [\Phi \quad \Theta \quad \Psi]^T = \begin{bmatrix}\dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi}\end{bmatrix}^T \tag{5.4.62}$$

se requiere tener en cuenta que la transformación entre ambos marcos de referencia implica el uso de dos marcos de referencia intermedios $\{S_1\}$ y $\{S_2\}$. Por lo tanto, las velocidades angulares del hexacóptero deben transformarse en cada marco intermedio para obtener los valores adecuados de balanceo, cabeceo y guiñada.

Primeramente, se parte de un marco $\{S_0\}$ coincidente con el marco terrestre $\{S_E\}$. Dado que no hay rotación en el marco de la tierra $\{S_E\}$, se tiene que $\boldsymbol{\omega}_E = [0 \quad 0 \quad 0]^T$. El primer marco intermedio $\{S_1\}$ se formó al realizar una rotación del marco $\{S_0\}$ al rededor del eje Z_E mediante un ángulo de guiñada $\mathbf{R}(\psi)$, por lo que la velocidad en dicho marco queda definida como:

$$\boldsymbol{\omega}_{B1} = \mathbf{R}(\psi)\boldsymbol{\omega}_E + [0 \quad 0 \quad \dot{\psi}]^T = [0 \quad 0 \quad \dot{\psi}]^T \tag{5.4.63}$$

A continuación, se rotó el el marco $\{S_1\}$ alrededor del eje Y_E mediante un ángulo de cabeceo $\mathbf{R}(\theta)$, formando el marco $\{S_2\}$, por lo tanto:

$$\boldsymbol{\omega}_{B2} = \mathbf{R}(\theta)\boldsymbol{\omega}_{B1} + [0 \quad \dot{\theta} \quad 0]^T = [-\dot{\psi}\mathrm{S}_\theta \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}\mathrm{C}_\theta]^T \tag{5.4.64}$$

Por último, se rotó el marco $\{S_2\}$ alrededor del eje X_E un ángulo de balanceo $\mathbf{R}(\phi)$ hacía el marco del cuerpo $\{S_B\}$, obteniendo:

$$\boldsymbol{\omega}_B = \mathbf{R}(\phi)\boldsymbol{\omega}_{B2} + [\dot{\phi} \quad 0 \quad 0]^T = [\dot{\phi} - \dot{\psi}\mathrm{S}_\theta \quad \dot{\theta}\mathrm{C}_\phi + \dot{\psi}\mathrm{S}_\phi\mathrm{C}_\theta \quad -\dot{\theta}\mathrm{S}_\phi + \dot{\psi}\mathrm{C}_\phi\mathrm{C}_\theta]^T \tag{5.4.65}$$

Reescribiendo en forma matricial se tiene:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_B &= \mathbf{R}_{s_B^E}\dot{\boldsymbol{\eta}}_E \\ \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\mathrm{S}_\theta \\ 0 & \mathrm{C}_\phi & \mathrm{S}_\phi\mathrm{C}_\theta \\ 0 & -\mathrm{S}_\phi & \mathrm{C}_\phi\mathrm{C}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5.4.66}$$

donde $\mathbf{R}_{s_B^E}$ representa la matriz de rotación que transforma la velocidad angular de los ángulos de Euler desde el marco de la tierra al marco del cuerpo. Por el contrario, la transformación de la velocidad angular en el marco del cuerpo con respecto al marco de la tierra $\mathbf{R}_{s_E^B}$ se define como:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_E = \mathbf{R}_{s\,E}^{B}\boldsymbol{\omega}_B$$
$$\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & \mathrm{S}_\phi\mathrm{T}_\theta & \mathrm{C}_\phi\mathrm{T}_\theta\\ 0 & \mathrm{C}_\phi & -\mathrm{S}_\phi\\ 0 & \frac{\mathrm{S}_\phi}{\mathrm{C}_\theta} & \frac{\mathrm{C}_\phi}{\mathrm{C}_\theta}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p\\ q\\ r\end{bmatrix} \tag{5.4.67}$$

donde $\mathrm{T}_\theta = \tan\theta$. Esta matriz se encuentra definida si y sólo si $\theta \neq \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad (n \in \mathrm{N})$.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Análisis de esfuerzos

Una vez completado el diseño del prototipo del robot móvil con locomoción híbrida y determinado su peso total, se procedió a validar la selección de los materiales mediante análisis de esfuerzos en SolidWorks. Para ello, se realizaron dos estudios de análisis estático: uno aplicado al ensamble de la base de la rueda y otro al soporte de los rodillos. Estas piezas fueron seleccionadas debido a que, a pesar de la simplificación del modelo, el tiempo y costo computacional requerido para analizar el ensamble completo era demasiado. Además, ambos elementos son críticos, ya que soportan directamente la carga del robot y están expuestos a esfuerzos mecánicos significativos. Los soportes de los rodillos actúan como medio de transmisión de la fuerza de reacción entre el terreno y la estructura del robot. Por su parte, la base de la rueda transfiere esa misma fuerza desde su interacción con los soportes, al tiempo que debe conservar su geometría circular. Asimismo, permiten evaluar tanto el material termoplástico, el elastómero, y algunos elementos de maquinaria.

Inicialmente, los 11.35 kg de peso total del robot se distribuyeron uniformemente entre las cuatro ruedas, correspondiente a su modo de operación terrestre. Sin embargo, durante maniobras como evasión de obstáculos, marcha, trote o reconfiguración (particularmente en la configuración de péndulo invertido sobre ruedas), el peso puede concentrarse solamente en dos ruedas. Asumiendo el contacto de un solo rodillo por rueda en estos casos, se estimó una fuerza de compresión de aproximadamente 55.7 N por rodillo. Para fines de simulación y validación estructural, se utilizó una carga sobredimensionada de 150 N, considerando factores de seguridad y condiciones de carga más exigentes.

La Figura 6.1 muestra la configuración aplicada para el análisis estático de la base de la rueda. Se asignaron sujeciones fijas en los extremos periféricos, debido a su soporte mediante 16 rodamientos montados en el rin, los cuales permiten una rotación con baja fricción y evitan desplazamientos laterales. Asimismo, se aplicó una carga distribuida normal de 150 N en la cara inferior de la base, correspondiente a la zona de contacto con la base del soporte del rodillo. Se incluyeron además cinco conectores tipo perno que simulan la fijación mecánica mediante tornillos entre las dos bases de la rueda, así como una conexión de tipo contacto

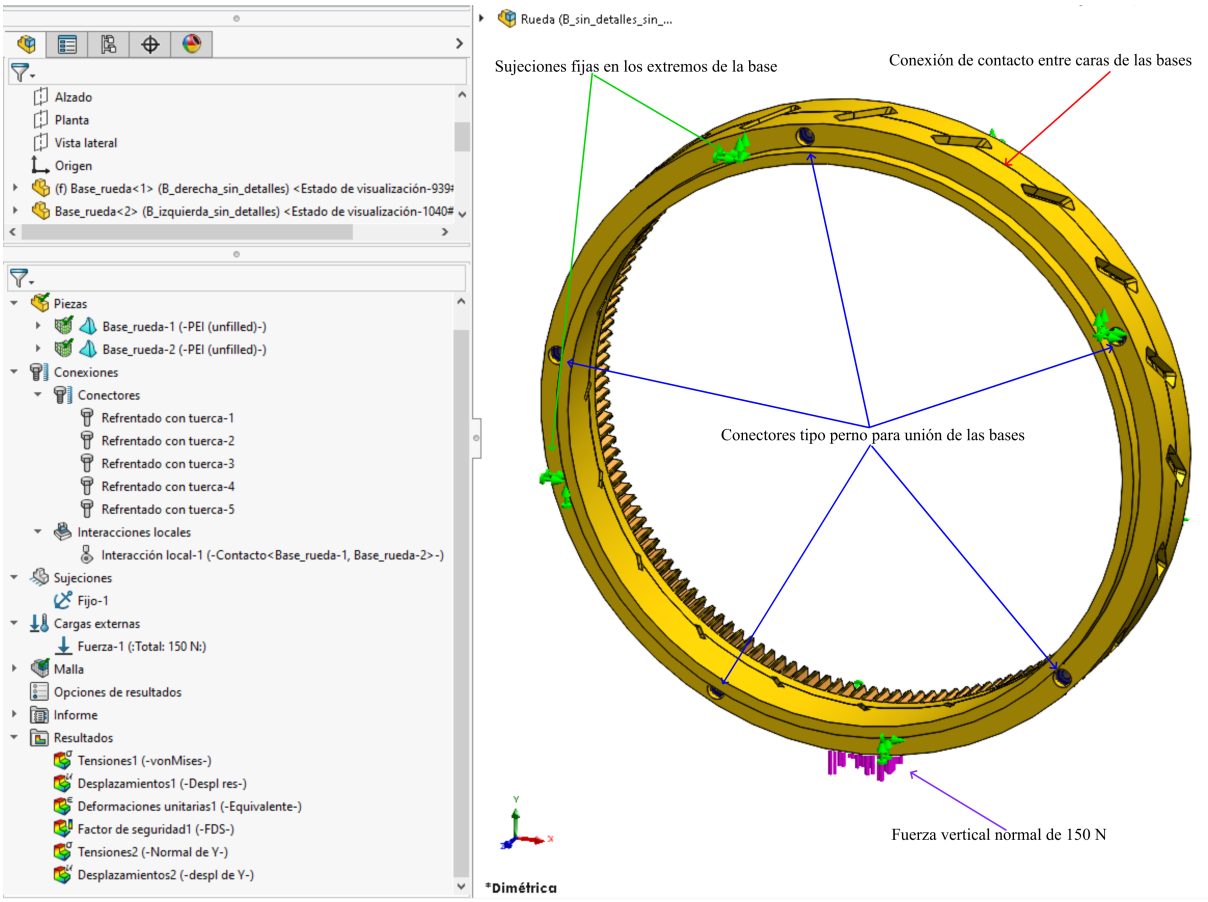
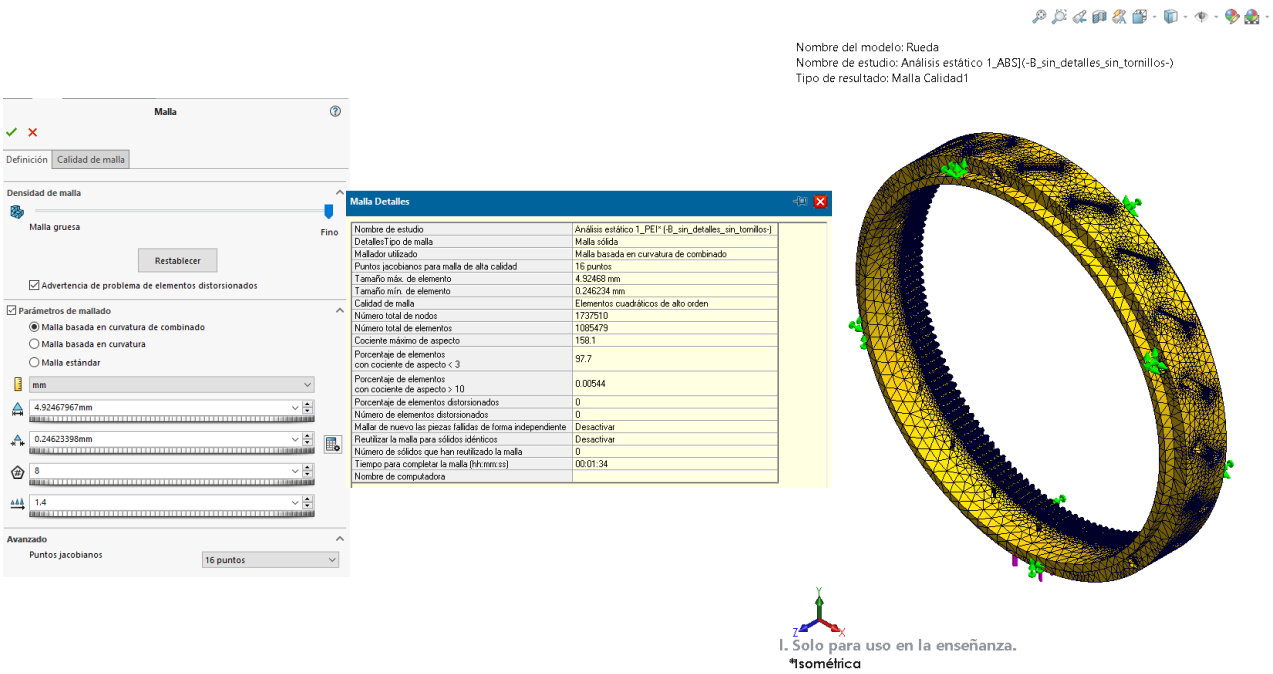


Figura 6.1: Configuración para el análisis de la base de la rueda.

entre ambas superficies de unión.

A continuación, se llevó a cabo un mallado fino empleando el parámetro de malla basado en curvatura de combinado, el cual adapta automáticamente el tamaño de los elementos según la curvatura de la geometría, generando así un patrón de malla uniforme y eficiente. La Figura 6.2 muestra la configuración realizada y los detalles de la malla generada. Posteriormente, se asignaron cada uno de los materiales de interés a ambas piezas del ensamble de la base de la rueda y se ejecutó el análisis estático correspondiente.

La Tabla 6.1 resume los resultados obtenidos para cada material termoplástico evaluado. Entre las opciones analizadas, el material PEEK demostró el mejor desempeño, con un factor de seguridad de 9.344, como se muestra en la Figura 6.3, y el menor desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga. El material PEI, si bien presentó también un factor de seguridad elevado (7.243), posee una resistencia específica inferior, lo cual puede comprometer la estructura del prototipo en condiciones de impacto o colisiones. Por lo tanto, se valida la selección del material PEEK como termoplástico para los componentes estructurales, y el material PEI como una alternativa en posteriores rediseños.

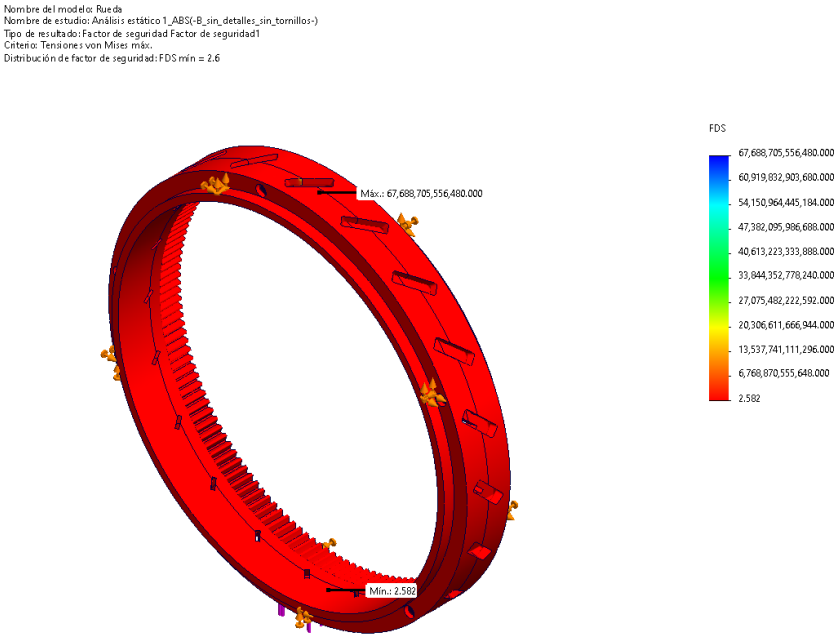


Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1_PEI* (-B_sin_detalles_sin_tornillos-)
DetallesTipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Tamaño máx. de elemento	4.92468 mm
Tamaño mín. de elemento	0.246234 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	1737510
Número total de elementos	1085479
Cociente máximo de aspecto	158.1
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	97.7
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0.00544
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Número de elementos distorsionados	0
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar
Reutilizar la malla para sólidos idénticos	Desactivar
Número de sólidos que han reutilizado la malla	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:01:34
Nombre de computadora	

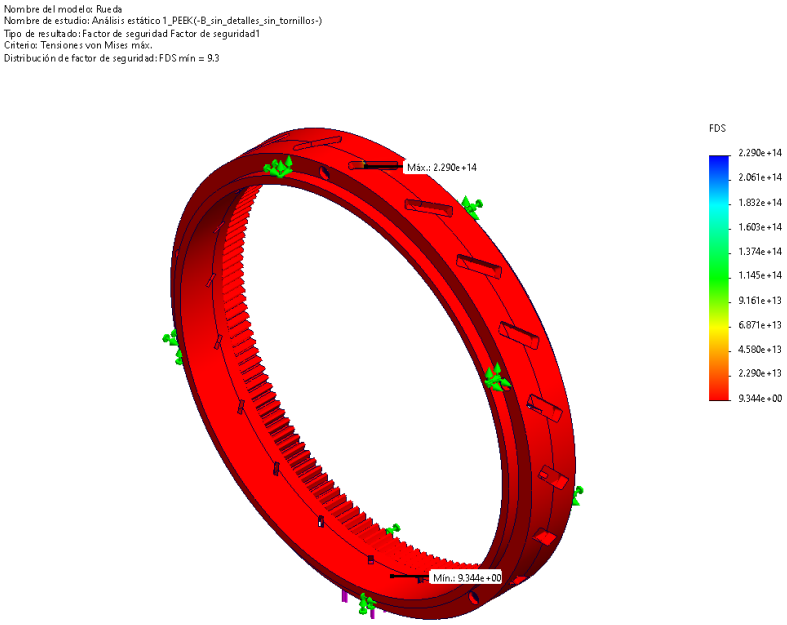
Figura 6.2: Propiedades de la malla aplicada al análisis de la base de la rueda.

Tabla 6.1: Resultados de materiales sometidos a una fuerza de 150 N.

Material	**Fuerza aplicada [N]**	**Límite elástico [MPa]**	**Tensión de Von Mises [MPa]** mínima – máxima	**Tensión normal en Y [MPa]** mínima – máxima	**Desplazamiento en Y [mm]** mínimo – máximo	**Factor de seguridad**
Acrilonitrilo butadieno estireno de alto impacto (ABS)	150	27.4	0.0 – 10.628	-3.777 – 9.634	-0.004 – 0.071	2.582
Ácido poliláctico de alto impacto (PLA)	150	42.7	0.0 – 10.763	-3.669 – 9.095	-0.002 – 0.037	3.967
Policarbonato (PC)	150	62.1	0.0 – 10.650	-3.678 – 9.543	-0.002 – 0.049	5.829
Acrilonitrilo butadieno estireno + Policarbonato (ABS+PC)	150	35.1	0.0 – 10.653	-3.767 – 9.530	-0.002 – 0.046	3.291
Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA)	150	37.2	0.0 – 10.638	-3.774 – 9.593	-0.003 – 0.062	3.499
Poliamida-imida (PAI)	150	39.9	0.0 – 10.489	-3.694 – 10.178	-0.001 – 0.025	3.809
Polieteretercetona (PEEK)	150	99.5	0.0 – 10.648	-3.769 – 9.551	-0.001 – 0.030	9.344
Polieterimida (PEI)	150	77.2	0.0 – 10.662	-3.762 – 9.493	-0.002 – 0.039	7.243



(a)



(b)

Figura 6.3: Factor de seguridad en la base de la rueda. (a) Factor de seguridad con material ABS; (b) Factor de seguridad con material PEEK.

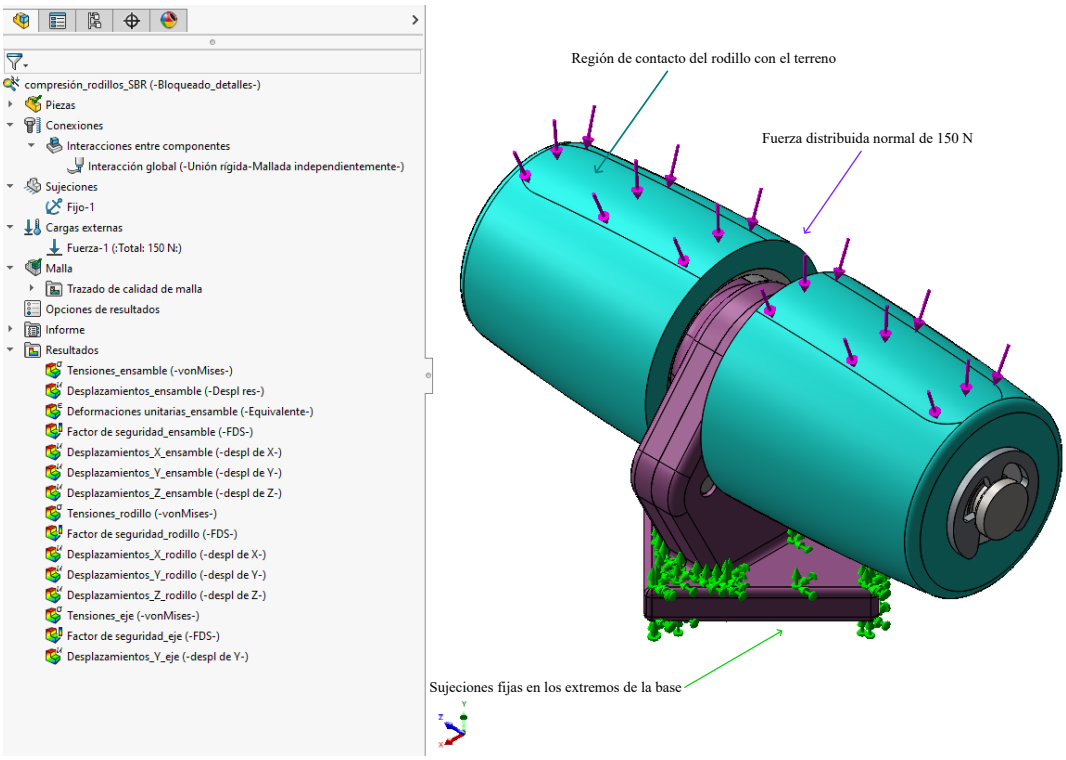


Figura 6.4: Configuración para el análisis de la base de los rodillos.

Para validar la selección del material elastómero y los elementos de maquinaria asociados, se utilizó el ensamble del soporte de rodillos mostrado previamente en la Figura 4.44. La Figura 6.4 detalla la configuración del análisis estático aplicado a dicho componente. Se establecieron restricciones fijas alrededor de la base del soporte, debido a su sujeción por medio de las bases de la rueda. La carga de compresión se asignó en ambos segmentos del rodillo mediante una sección de área delimitada que representa la zona de contacto con el terreno, aplicándose una fuerza normal distribuida de 150 N. Adicionalmente, en el apartado de conexiones, se definió una interacción global (unión rígida) entre los componentes del ensamble, lo que garantiza la transferencia de cargas entre superficies en contacto.

La Figura 6.5 muestra la configuración y los detalles del mallado fino, generado mediante un parámetro de malla basado en curvatura de combinado. Posteriormente, se asignaron los distintos materiales a analizar en las piezas, como se muestra en la Figura 6.6, y se procedió a la ejecución del estudio estático.

Inicialmente, se configuraron los resultados para evaluar el comportamiento estructural del ensamble completo del soporte, así como de forma individual en los rodillos y el eje. Durante el primer estudio con material SBR, se obtuvo un factor de seguridad de 1.4, como se muestra en la Figura 6.7. Un análisis más detallado permitió identificar que dicho valor correspondía al eje, mientras que el rodillo presentaba un factor de seguridad de 1.8.

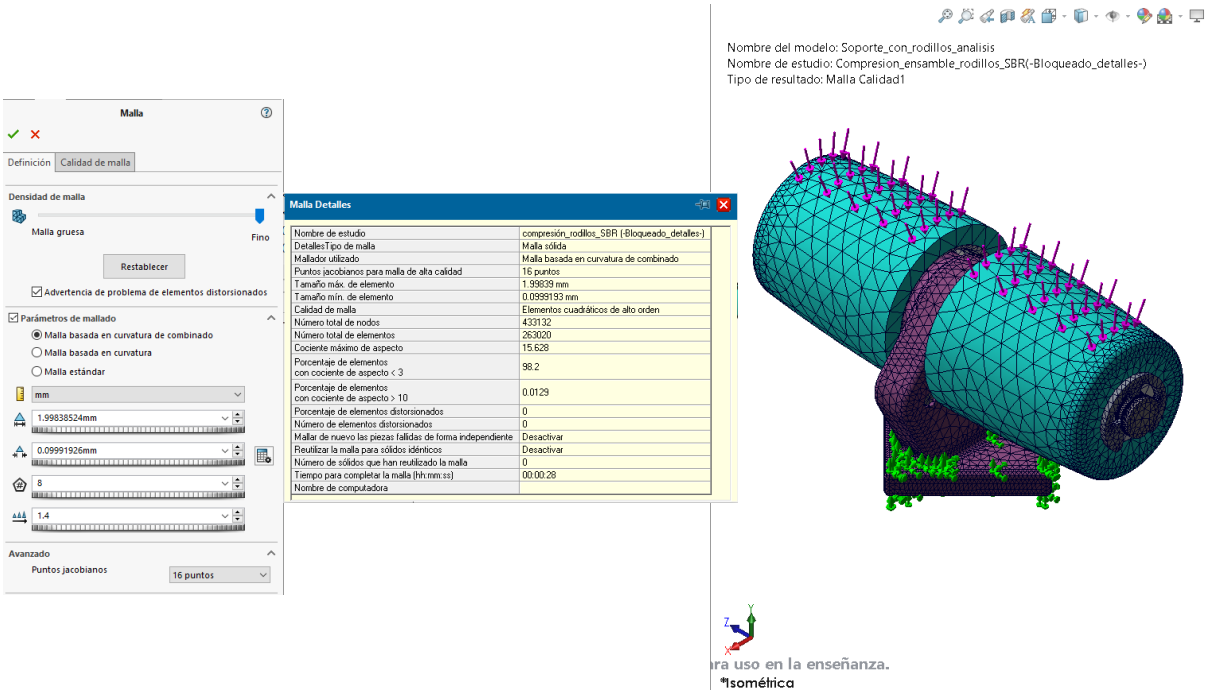


Figura 6.5: Propiedades de la malla aplicada al análisis de la base de los rodillos.

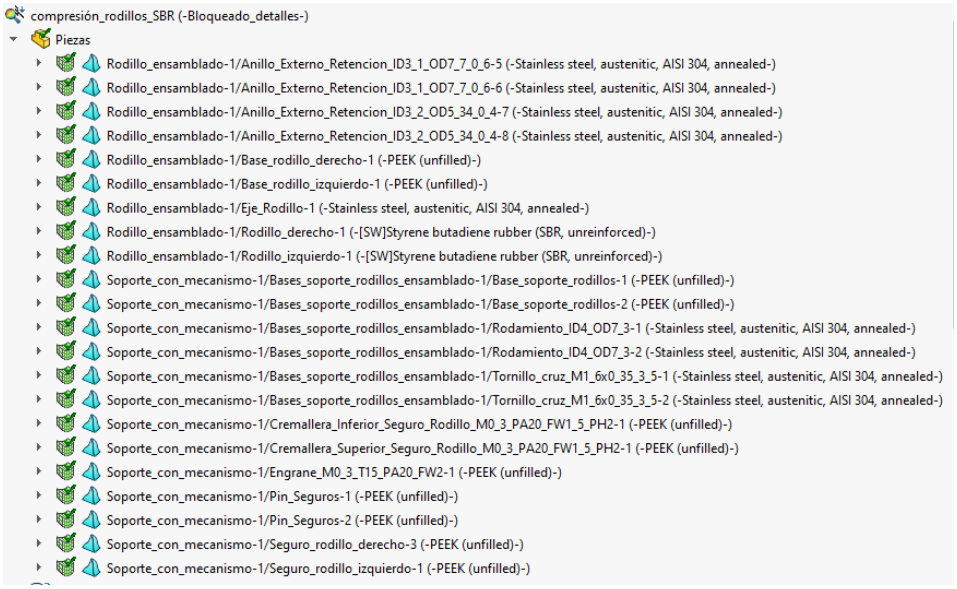
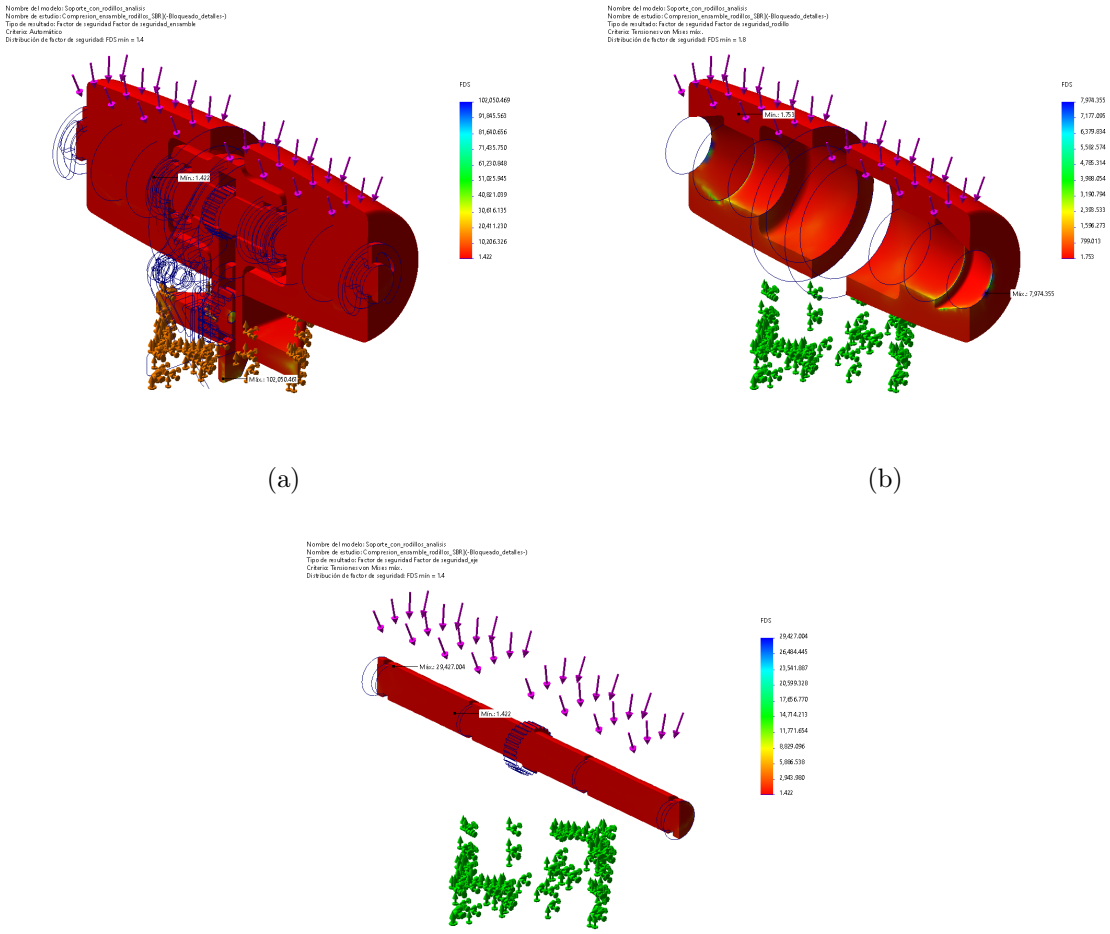


Figura 6.6: Materiales asignados a los elementos de los soportes de los rodillos.

Con el objetivo de mejorar el factor de seguridad del eje, se reemplazó el acero AISI 304 por un AISI 4140, un acero con mayor resistencia a la tracción, buena tenacidad, dureza y maquinabilidad. Aunque presenta menor resistencia a la corrosión en comparación con el AISI 304, su disponibilidad en forma de varillas de 1/4 de pulgada lo hace adecuado para la aplicación.



(a) (b)

(c)

Figura 6.7: Resultados del análisis estático al ensamble del soporte de los rodillos. (a) Factor de seguridad del ensamble; (b) Factor de seguridad de los rodillos; (c) Factor de seguridad del eje.

Tras ejecutar nuevamente el análisis, el factor de seguridad en los rodillos se mantuvo en 1.8, mientras que el del eje aumentó a 2.3. Se decidió configurar resultados adicionales para obtener los factores de seguridad de las bases de los rodillos, bases del soporte y rodamientos del eje, los cuales fueron de 3.665, 4.738 y 2.168, respectivamente.

Dado que el material PEEK (utilizado en las bases) ya había sido validado previamente, se optó por evaluar una nueva opción de rodamientos con las mismas dimensiones pero fabricados con un material distinto. A través del catálogo de MISUMI México, se seleccionó el modelo SB674ZZ, un rodamiento de bolas rígido, compacto, fabricado en acero inoxidable 440C, con doble sellado y una capacidad de carga dinámica de 217 N.

Antes de ejecutar el nuevo análisis, se modificó nuevamente el material del eje, esta vez especificando un tratamiento térmico de templado a 205 °C con enfriamiento en aceite, incrementando así su resistencia mecánica. Una vez realizado el estudio, se observó que los factores de seguridad de los rodillos y las bases se mantuvieron sin cambios, mientras que el del eje se incrementó significativamente a 9.1 y el de los rodamientos a 3.9, como se muestra en la Figura 6.8. Por su parte, la Tabla 6.2 resume los resultados para los distintos materiales elastómeros evaluados.

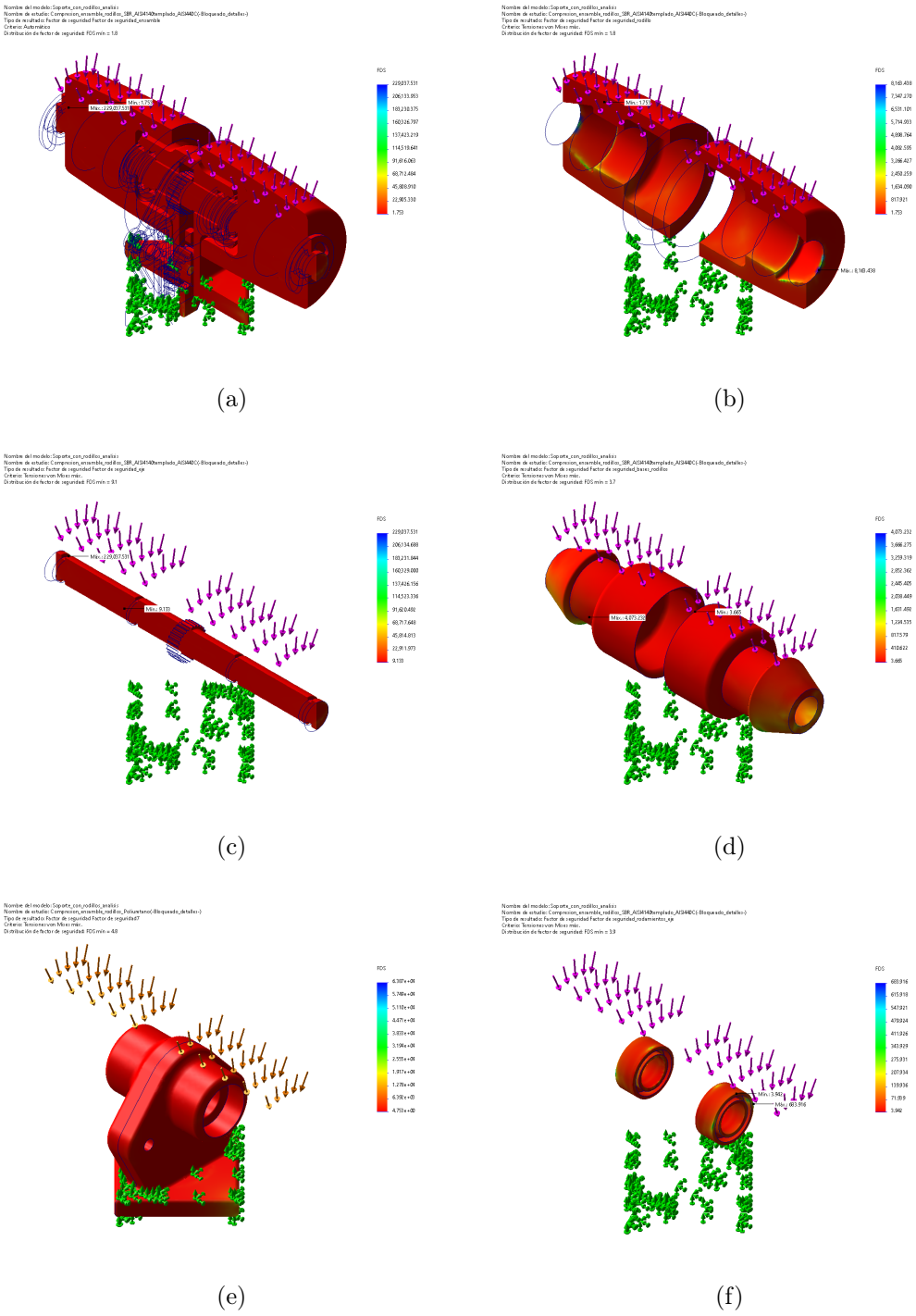
El factor de seguridad más alto para los rodillos correspondió al caucho de poliuretano, con un valor de 39.284, seguido del caucho endurecido, con 33.771. No obstante, este último fue descartado debido a su baja resistencia frente a agentes externos y alta flamabilidad. Por su parte, materiales como la fluorosilicona, el fluoroelastómero y el perfluoroelastómero presentaron factores de seguridad aceptables y buenas propiedades ante agentes externos; sin embargo, sus características de adherencia, resistencia a la abrasión y al desgaste fueron insuficientes para esta aplicación. Por lo tanto, se valida la selección del caucho de poliuretano como material óptimo para los rodillos.

Finalmente, se realizó un análisis de caída libre del chasis, considerando el peso total de los componentes internos. Esta evaluación se enfocó exclusivamente en el chasis, debido a la complejidad de realizar una malla fina en el modelo completo y el elevado costo computacional de su simulación. El objetivo del análisis fue determinar si la geometría y el material del chasis son capaces de preservar la integridad estructural de los componentes electrónicos internos ante posibles fallos durante el aterrizaje o pérdida de empuje de los motores-hélice durante el vuelo.

Para simplificar el mallado, se suprimieron operaciones como redondeos y perforaciones en las bases, ya que el software no lograba generar correctamente la malla al no disponer del mallado adaptativo basado en curvatura de combinado para este tipo de análisis. La Figura 6.9(a) muestra la configuración del estudio de caída desde una altura de 10 m sobre una superficie rígida. Las Figuras 6.9(b), 6.9(c) y 6.9(d) muestran las propiedades de la malla aplicada, el esfuerzo de Von Mises máximo y la distribución de la fuerza resultante en la base inferior del chasis.

La Figura 6.10 resume los valores de esfuerzo y desplazamiento obtenidos en la base del chasis durante el impacto. Se observó que, a los 16.23 microsegundos tras el impacto, se generó un esfuerzo de Von Mises de 80.768 MPa. Posteriormente, el esfuerzo alcanzó su valor máximo de 308.032 MPa a los 406 microsegundos, superando el límite elástico del PEEK (99.5 MPa). En cuanto al desplazamiento, se registró un valor de 5.124 mm en la dirección y.

Estos resultados indican que el chasis, en su diseño actual, no puede absorber eficazmente el impacto de una caída libre desde dicha altura sin comprometer su integridad estructural.



(a) (b)

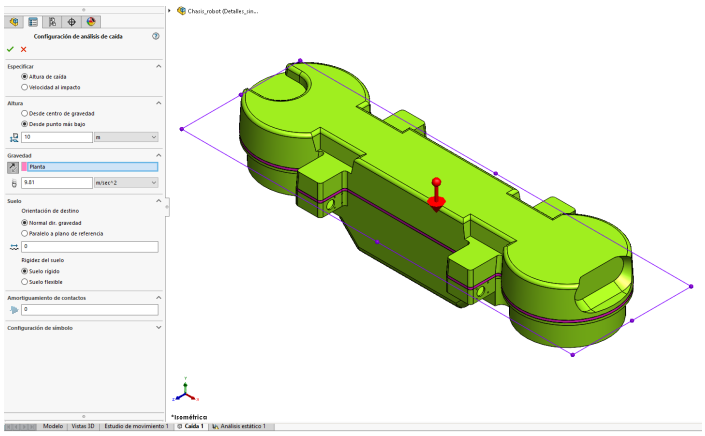
(c) (d)

(e) (f)

Figura 6.8: Resultados del análisis estático al ensamble del soporte de los rodillos tras los cambios. (a) Factor de seguridad del ensamble; (b) Factor de seguridad de los rodillos; (c) Factor de seguridad del eje; (d) Factor de seguridad de las bases de los rodillos; (e) Factor de seguridad de las bases del soporte; (f) Factor de seguridad de los rodamientos del eje.

Tabla 6.2: Resultados del análisis estático aplicado al soporte de los rodillos.

Material	**Fuerza aplicada [N]**	**Límite elástico [MPa]**	**Tensión de Von Mises – Rodillo [MPa]** mínima – máxima	**Desplazamiento en Y [mm]** mínimo – máximo	**Factor de seguridad ensamble**	**Factor de seguridad rodillos**	**Factor de seguridad eje**	**Factor de seguridad base de rodillos**	**Factor de seguridad rodamientos del eje**	**Factor de seguridad base del soporte**
Caucho estireno-butadieno (SBR)	150	2.049	0.0 – 1.169	-0.438 – 0.006	1.753	1.753	9.133	3.665	3.942	4.758
Caucho de butadieno (BR)	150	3.24	0.0 – 1.134	-0.995 – 0.007	2.858	2.858	8.998	3.572	3.975	4.746
Caucho endurecido (Ebonita)	150	69.282	0.0 – 2.052	-0.042 – -0.019	3.833	33.771	12.555	16.688	3.943	4.749
Caucho butílico (IIR)	150	4.899	0.0 – 1.136	-1.351 – 0.007	3.429	4.314	8.996	3.571	3.937	4.736
Caucho EPDM	150	1.936	0.0 – 1.178	-1.394 – 0.007	1.644	1.644	9.030	3.706	3.936	4.742
Caucho siliconado (VMQ)	150	3.499	0.0 – 1.142	-0.253 – 0.004	3.063	3.063	9.405	4.440	3.936	4.739
Caucho fluorosilicona (FVMQ)	150	9.961	0.0 – 1.132	-0.216 – 0.003	3.831	8.800	9.540	4.604	3.936	4.739
Caucho fluoroelastómero (FKM-Viton)	150	15.009	0.0 – 1.153	-0.259 – 0.004	3.819	13.013	9.349	4.367	3.945	4.732
Caucho perfluoroelastómero (FFKM)	150	11.661	0.0 – 1.165	-0.366 – 0.006	3.586	10.013	9.167	3.586	3.943	4.752
Caucho de poliuretano	150	45.166	0.0 – 1.150	-0.301 – 0.005	3.826	39.284	9.312	4.327	3.940	4.753

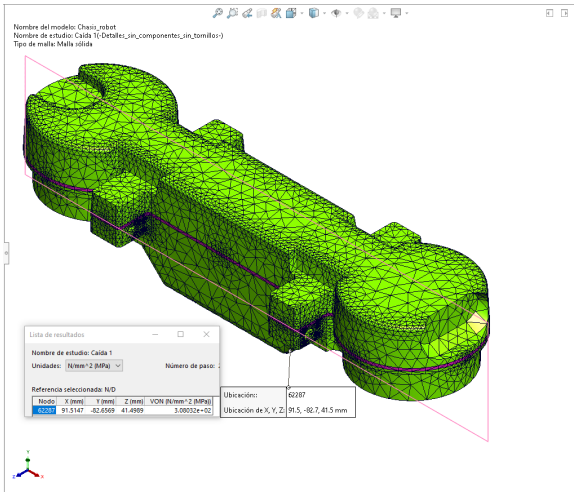


(a)

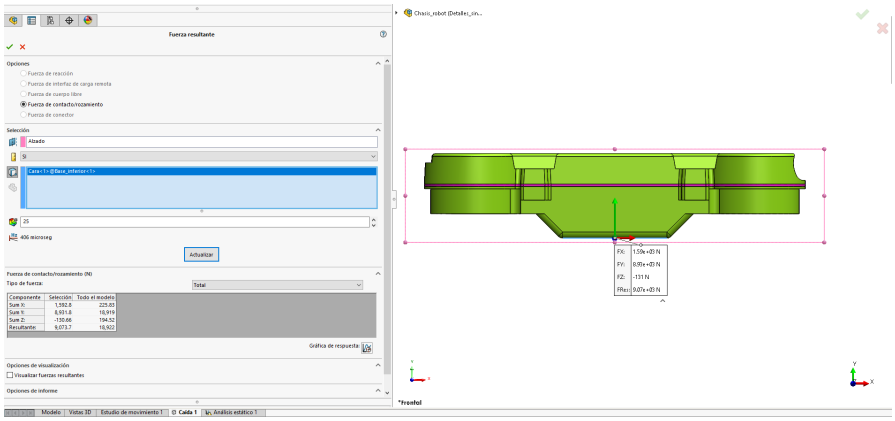
Malla Detalles

Nombre de estudio	Caída 1* (-Detalles_sin_componentes_sin_tornillos-)
DetallesTipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Tamaño máx. de elemento	20 mm
Tamaño mín. de elemento	0.1 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	206609
Número total de elementos	232149
Cociente máximo de aspecto	47.241
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	76.7
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0.393
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Número de elementos distorsionados	0
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:16
Nombre de computadora	

(b)

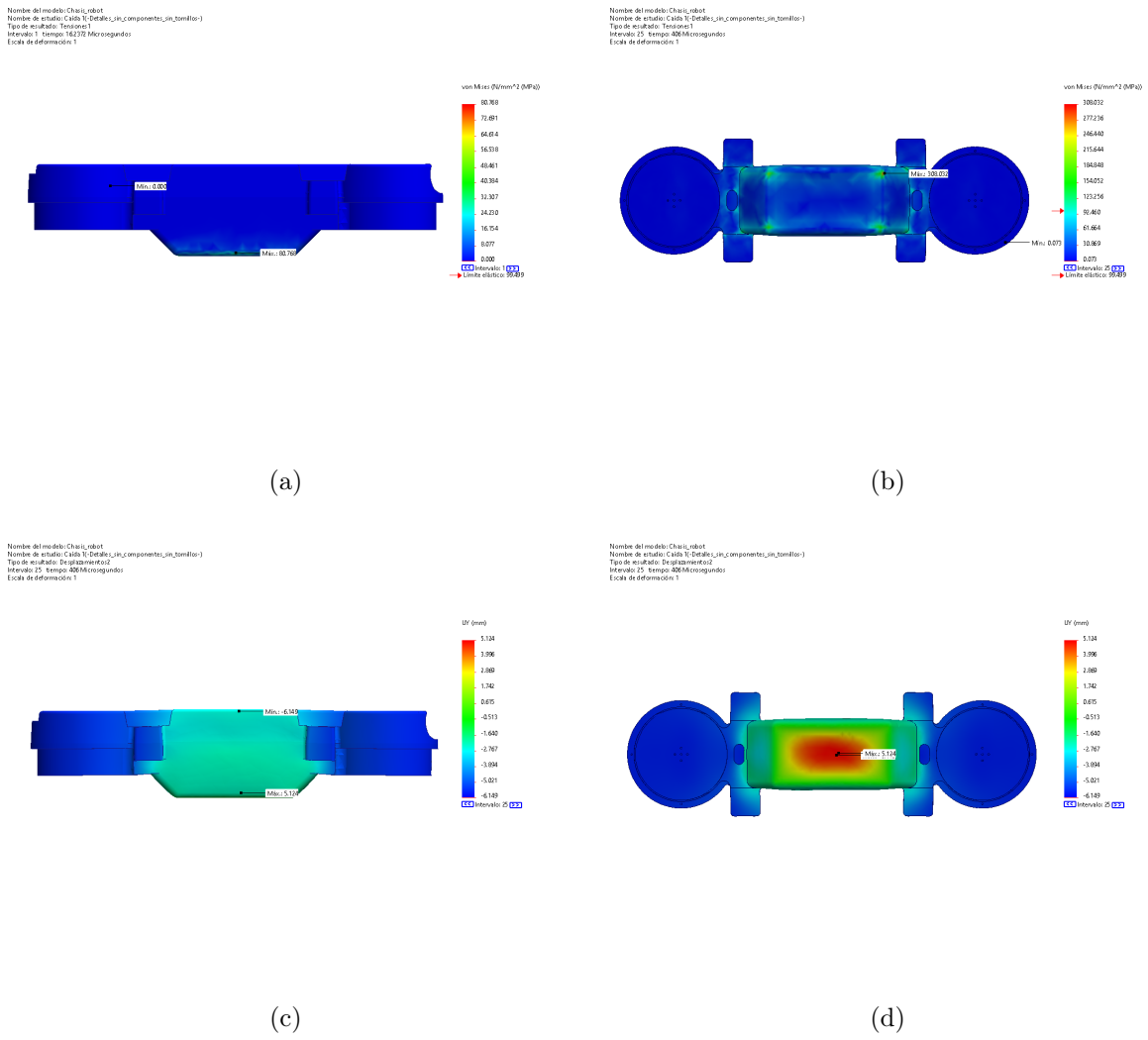


(c)



(d)

Figura 6.9: Configuración y ejecución del análisis de caída libre en el chasis del robot. (a) Configuración del estudio de caída libre; (b) Parámetros del mallado del chasis; (c) Mallado y localización de la tensión máxima de Von Mises; (d) Fuerzas de contacto resultantes sobre la base del chasis.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 6.10: Esfuerzos y desplazamientos en el chasis del robot durante una caída libre de 10 m. (a) Esfuerzo de Von Mises a los 16.23 μs; (b) Esfuerzo de Von Mises a los 406 μs; (c) Desplazamiento vertical en vista lateral; (d) Desplazamiento vertical en vista inferior.

Para mitigar estos efectos y preservar los componentes internos, se propone incorporar en diseños posteriores mecanismos que amortigüen el impacto, como:

- Una secuencia de despliegue de las extremidades, que actúe como sistema de amortiguamiento durante la caída.
- La implementación de un tren de aterrizaje desplegable, diseñado para amortiguar el impacto sin afectar la movilidad terrestre del robot ni ser susceptible a quedar atrapado en terrenos irregulares o con obstáculos.

Los reportes donde se detallan los diversos análisis estructurales realizados se presentan en el Apéndice A1.10. Por su parte, en la carpeta del Anexo A.2 se presentan las comparativas

a detalle entre la familia de materiales Termoplásticos y Elastómeros evaluados, así como la base de datos de sus propiedades físicas exportada a Solidworks.

6.2. Análisis de movimiento en ADAMS/View

Para validar el comportamiento dinámico del robot, se utilizó el software ADAMS®, específicamente el complemento ADAMS/View®, que cuenta con una interfaz gráfica para acceder a herramientas de simulación dinámica, así como un post-procesador para la visualización de resultados.

6.2.1. Configuración del estudio de movimiento en Solidworks

Para exportar el modelo a ADAMS/View, primero se ensambló el robot sobre una superficie de madera de fibra orientada (OSB, *Oriented Strand Board*, por sus sigles en inglés.), como se muestra en la Figura 6.11. Esta superficie integra diversos escenarios conforme a los aparatos empleados en los métodos de prueba y métricas establecidos para evaluar la movilidad en robots de rescate, según los estándares del NIST y la ASTM, así como de la guía de ensamble para escenarios de la RoboCup Rescue [216]. En particular, se consideran las normas ASTM E2801-11 (cruce de brechas horizontales en áreas confinadas), E2802-11 (superación de obstáculos verticales en áreas confinadas), E2804-11 (atravesar escaleras en áreas confinadas), E2826-11 (atravesar terrenos con rampas contínuas) y E2828-11 (atravesar terrenos complejos con peldaños simétricos en áreas confinadas), enfocadas en la superación de obstáculos en entornos confinados. Por motivos de visibilidad, se omitieron las vallas de contención que delimitan cada área de prueba.

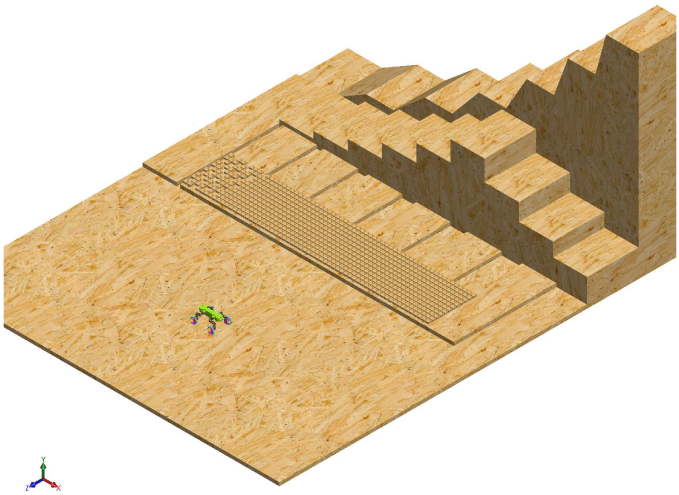
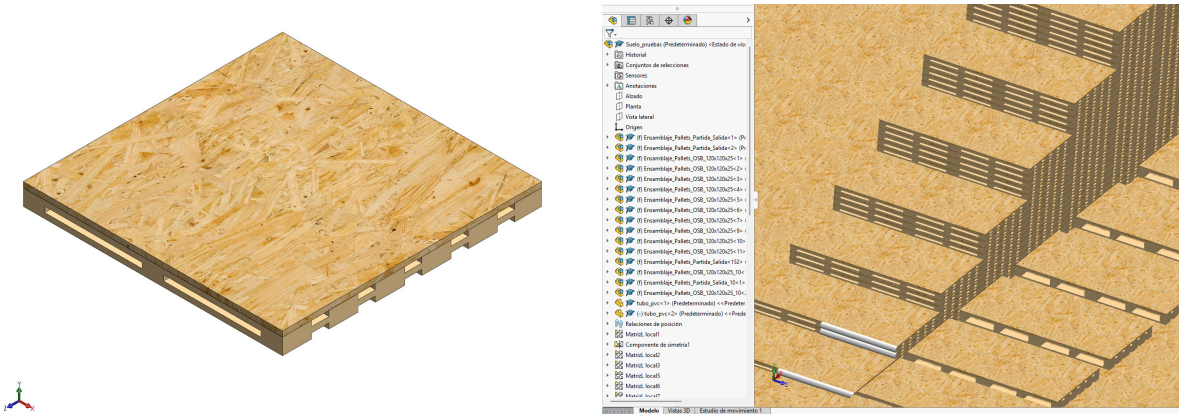


Figura 6.11: Ensamble del robot sobre una superficie de prueba.

Las normas indican que los aparatos deben realizarse a partir de palets individuales con medidas normalizadas como se muestra en la Figura 6.12. No obstante, el uso de palets individuales implicaba una gran cantidad de superficies, generando una demora en la reconstrucción del ensamble y la asignación de relaciones de contacto con los rodillos de las ruedas. Asimismo, esto provocaba un cierre inesperado del programa SolidWorks. Por esto, se optó por representar la plataforma de prueba como una sola pieza. Esta decisión redujo significativamente el tiempo de reconstrucción del ensamble y la asignación de relaciones de contacto, mejorando el rendimiento del sistema y evitando cierres inesperados del programa.



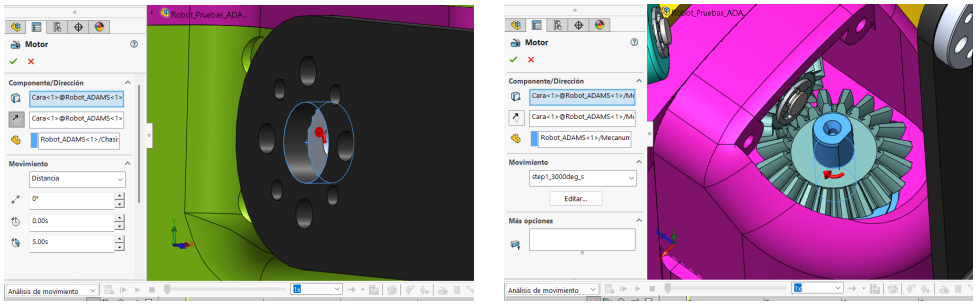
(a) (b)

Figura 6.12: Palets para superficies de prueba. (a) Palet de OSB comercial 1.2m x 1.2m x 0.1m; (b) Superficie de pruebas realizada con palets individuales.

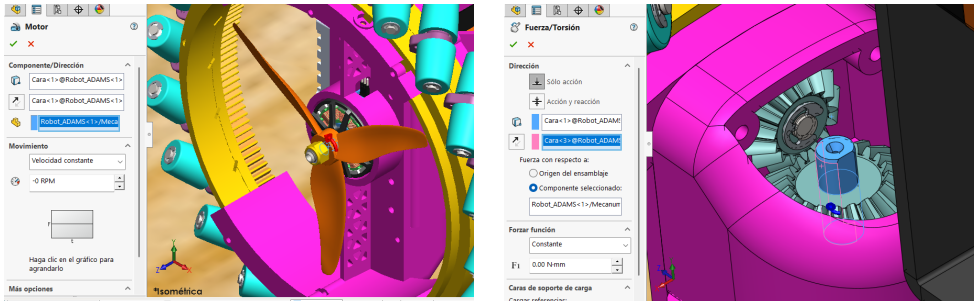
Con el ensamble completo, se configuró un estudio de movimiento en SolidWorks. La Figura 6.13 muestra algunos de los elementos integrados al modelo, incluyendo motores asignados a las articulaciones de las extremidades (identificados como 'LxHAA", "LxHFE", "LxKFE" y "LxAIE" con $x = 1, 2, 3, 4.$), motores para las ruedas ("MWxA"), y motores para las hélices ("HxCW y HyCCW", con $x = 1, 2, 5.$, $y = 3, 4, 6.$). También se añadieron fuerzas de torsión en cada rueda ("TWx") y fuerzas lineales de empuje ("Fuerzax"), una fuerza gravitacional ("Gravity") y múltiples relaciones de contacto entre los 160 rodillos, soportes-extremidades, bases del chasis y rines, con el fin de evitar interferencias entre sus geometrías.

Debido a la simplificación de la superficie de prueba y de la estructura del robot, el software logró realizar la configuración de estos elementos, aunque con tiempos prolongados en la asignación de relaciones de contacto. La Figura 6.14 muestra un resumen de los elementos asignados.

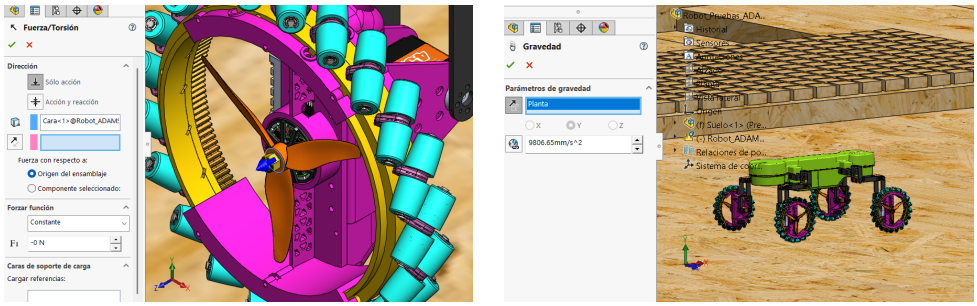
Durante la ejecución del análisis de movimiento, el tiempo de reconstrucción del ensamble generaba un congelamiento y cierre del software. Para mejorar el desempeño, se suprimieron las operaciones relacionadas con discontinuidades, peldaños y rampas, dejando únicamente una superficie plana.



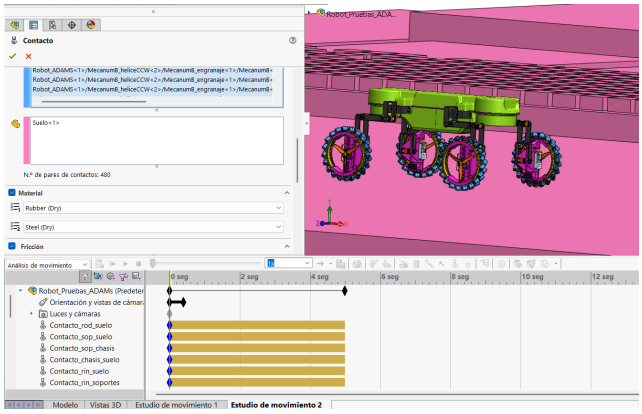
(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)



(g)

Figura 6.13: Elementos configurados para el estudio de movimiento en Solidworks. (a) Motor de las articulaciones; (b) Motor de las ruedas; (c) Motor de las hélices; (d) Torsión aplicado a las ruedas; (e) Fuerza aplicada a las hélices; (f) Fuerzas de contacto entre elementos.

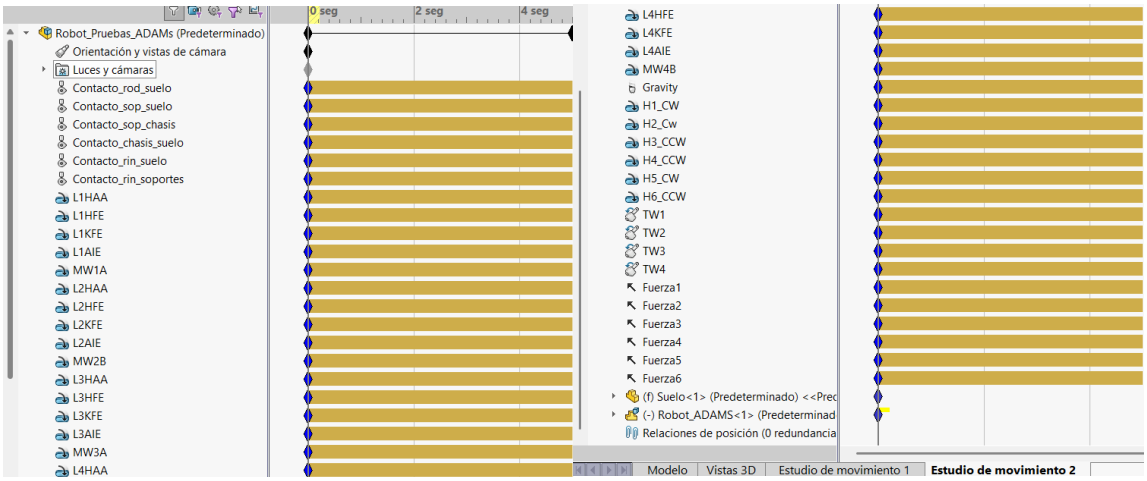


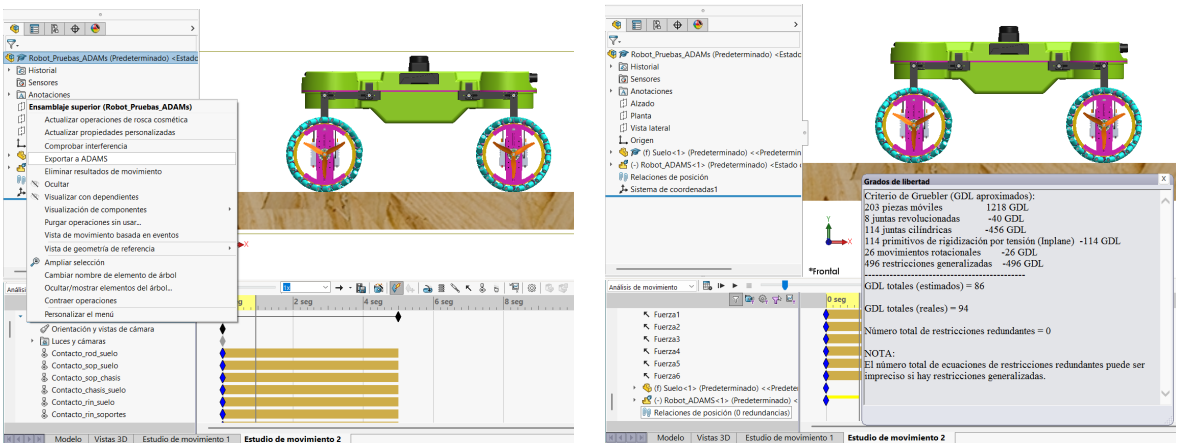
Figura 6.14: Elementos de movimiento, pares de torsión, fuerzas y contactos añadidos al robot en Solidworks para su análisis de movimiento.

Esta modificación permitió analizar una fracción de segundo de movimiento, lo suficiente para ajustar parámetros y exportar el modelo como archivo .cmd de ADAMS, como se muestra en la Figura 6.15(a). En la Figura 6.15(b), se muestra que el modelo no presenta redundancias en los grados de libertad (0 redundancias), lo cual favorece el cálculo numérico. Esta característica es crucial debido a que en análisis anteriores, las redundancias incrementaban el costo computacional, así como daban lugar a inconsistencias o falta de convergencia en la solución numérica.

En total, se estimaron 86 grados de libertad: 80 correspondientes a los rodillos con movimiento libre, y 6 del robot en el espacio. A pesar de que el modelo indica 94 grados de libertad verdaderos, se determinó que estos 8 grados adicionales estaban atribuidos a relaciones mecánicas de tipo engranaje (dos por rueda; una por engranaje cónico y otra por engranaje recto). Esta deducción se realizó al comparar con una versión simplificada sin relaciones mecánicas de tipo engranaje y con actuación directa en las ruedas, en la cual el número de grados estimados coincidía con los reales.

6.2.2. Configuración del modelo en ADAMS/View

Una vez exportado el modelo desde SolidWorks, este fue importado en ADAMS/View, como se muestra en la Figura 6.16. A continuación, se especificaron las posiciones, orientaciones y elementos asociados a los marcadores (marcos de referencia) y fuerzas de contacto, con el fin de obtener mediciones del robot, tales como posición, orientación, velocidad lineal y angular, fuerzas y pares de torsión, entre otros. La Figura 6.17 muestra un ejemplo de dicha configuración, junto con algunos elementos importados desde el estudio previamente definido en SolidWorks.



(a) (b)

Figura 6.15: Estudio de movimiento en Solidworks finalizado. (a) Exportación del modelo a un conjunto de archivo de datos .cmd; (b) Grados de libertad y redundancias en el modelo.

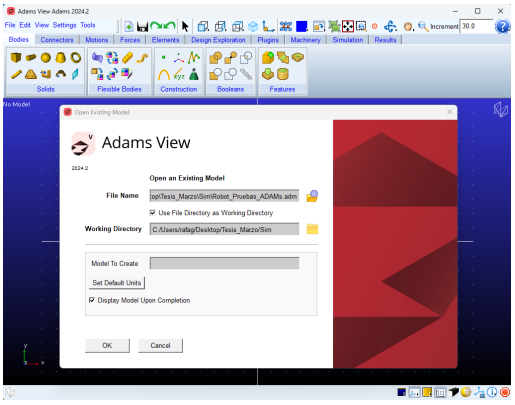
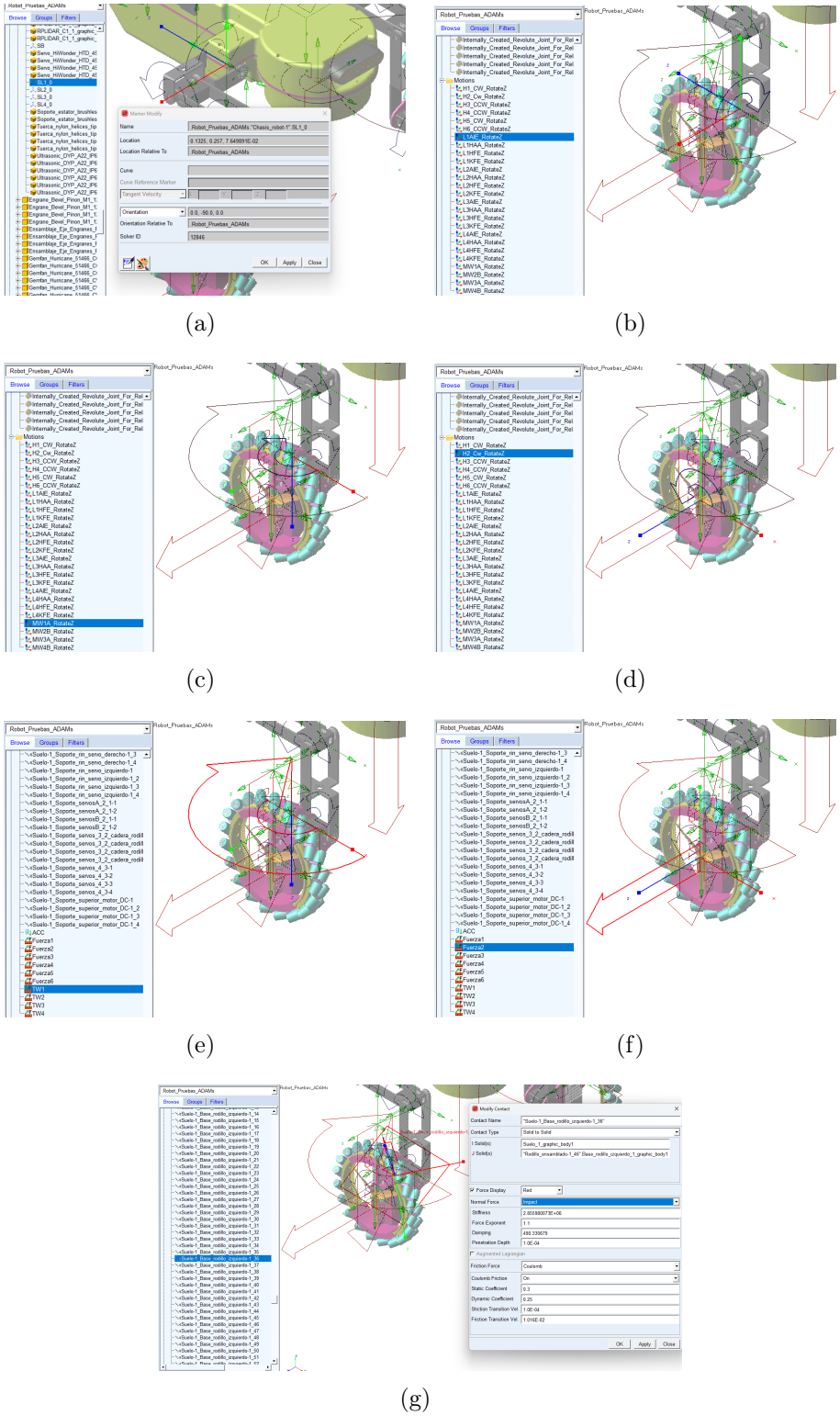


Figura 6.16: Importación del modelo dentro del software ADAMS/View.

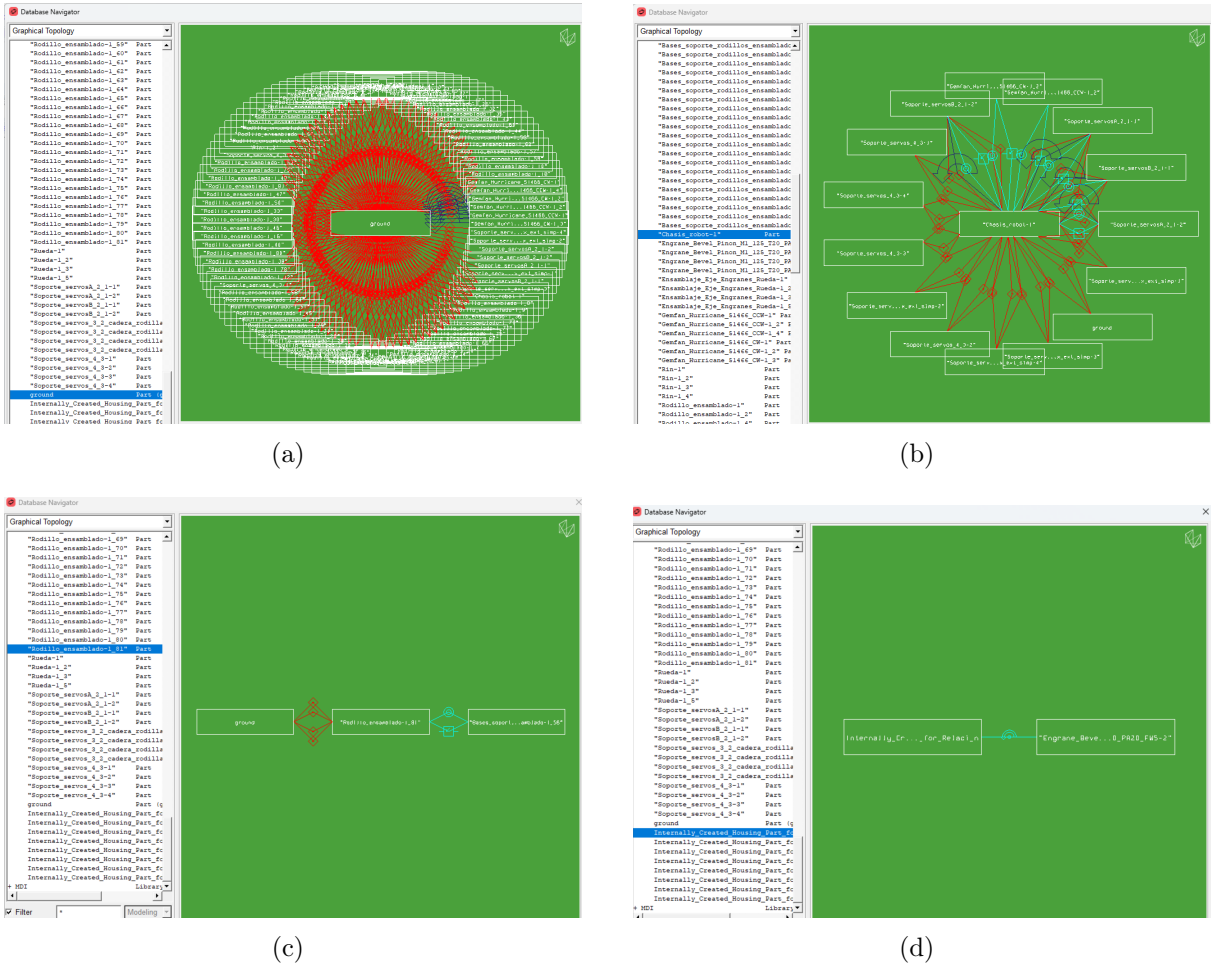
La Figura 6.18 muestra cuatro gráficos topológicos de algunos componentes del modelo. En particular:

- Figura 6.18(a): Relaciones de contacto entre la superficie (suelo-ground) y los componentes con los que interactúa, indicadas en rojo.
- Figura 6.18(b): Relaciones del chasis del robot, incluyendo contactos (rojo), posiciones (celeste) y actuadores (azul marino) de los cuatro servomotores montados en las caderas.
- Figura 6.18(c): Relaciones del ensamble de un rodillo, con contacto al suelo y posición relativa a su base de soporte.
- Figura 6.18(d): Elemento "Internally_Created_Housing_Part_for_RelacionX", generado automáticamente por SolidWorks para representar una relación mecánica tipo engranaje, en este caso tipo cónico.



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g)

Figura 6.17: Visualización del marcador y elementos importados desde Solidworks. (a) Motor de las articulaciones; (b) Motor de las ruedas; (c) Motor de las hélices; (d) Torsión aplicado a las ruedas; (e) Fuerza aplicada a las hélices; (f) Fuerzas de contacto entre rodillo y suelo.



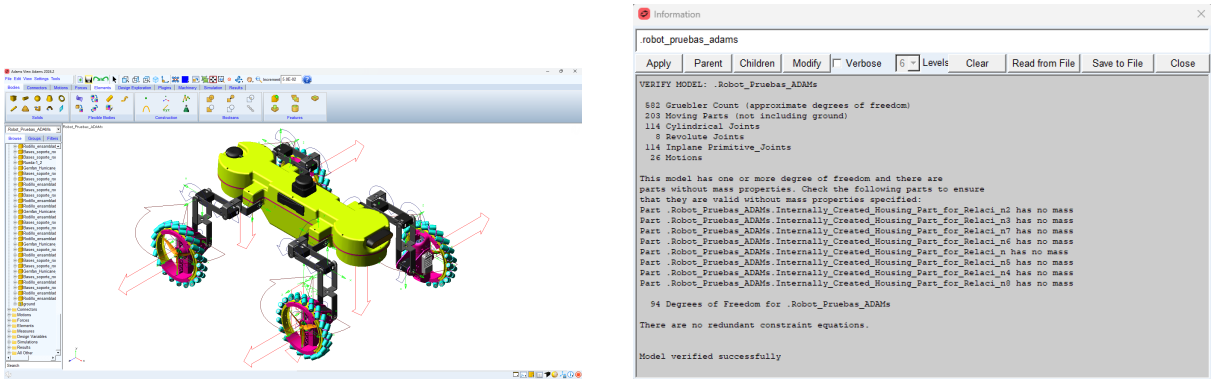
(a) (b)

(c) (d)

Figura 6.18: Topología gráfica de los elementos asociados al suelo y al chasis del robot. (a) Relaciones del suelo; (b) Relaciones del chasis; (c) Relaciones del ensamble de rodillo; (d) Relaciones de un elemento interno creado para las relaciones de tipo engranaje.

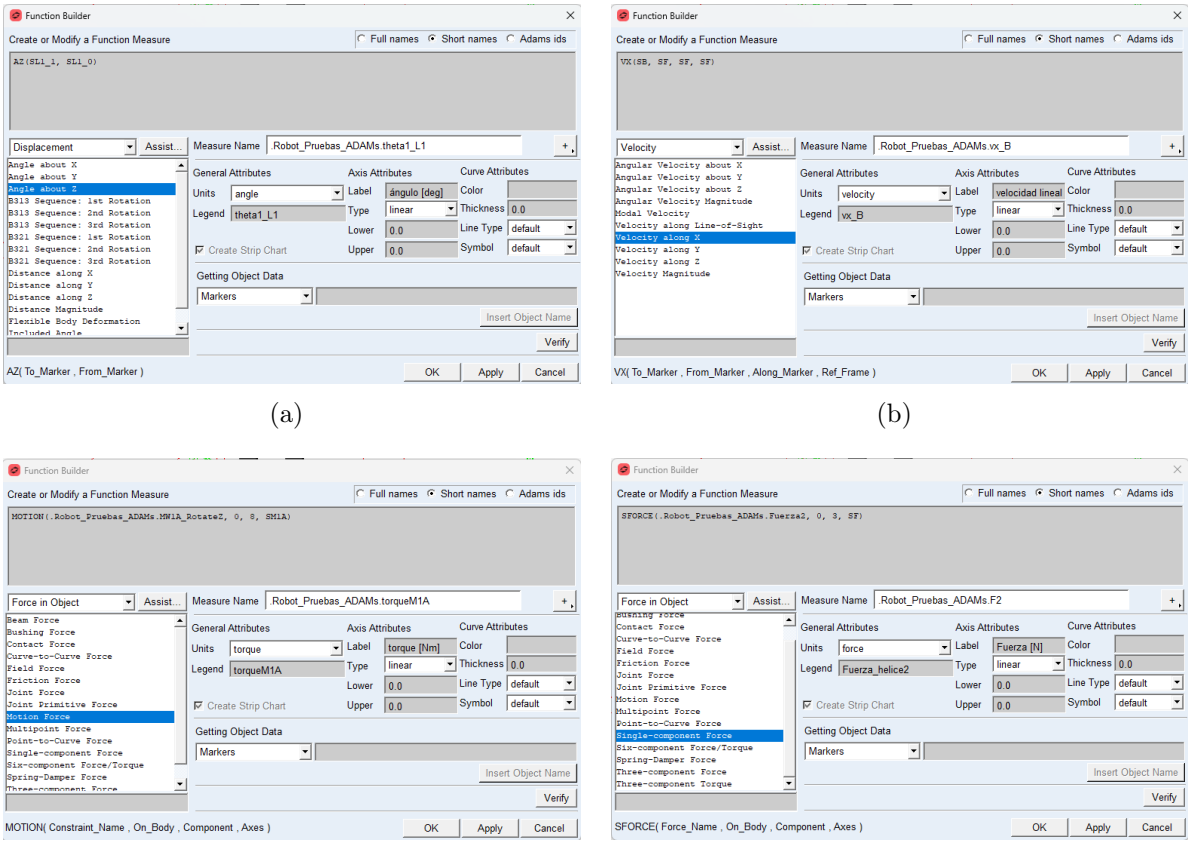
La Figura 6.19(a) muestra el ensamble completo del robot y los diversos elementos asociados en ADAMS. En la Figura 6.19(b) se muestra el cuadro de verificación del modelo, que reporta el total de componentes y los grados de libertad (GDL). Aunque se indica que algunos elementos no tienen masa asociada (componentes internos generados por SolidWorks para engranajes) esto no afecta significativamente el análisis dinámico. A partir del análisis topológico, se confirmó que estos corresponden a las relaciones de engranaje, validando así el incremento de 8 GDL adicionales sobre los 86 GDL estimados por el criterio de Gruebler, dando un total de 94 GDL en el modelo.

Como siguiente paso, se configuraron las mediciones del estudio de movimiento. La Figura 6.20 muestra ejemplos de estas configuraciones utilizando los marcadores configurados, mientras que la Figura 6.21 resume las diferentes mediciones definidas.



(a) (b)

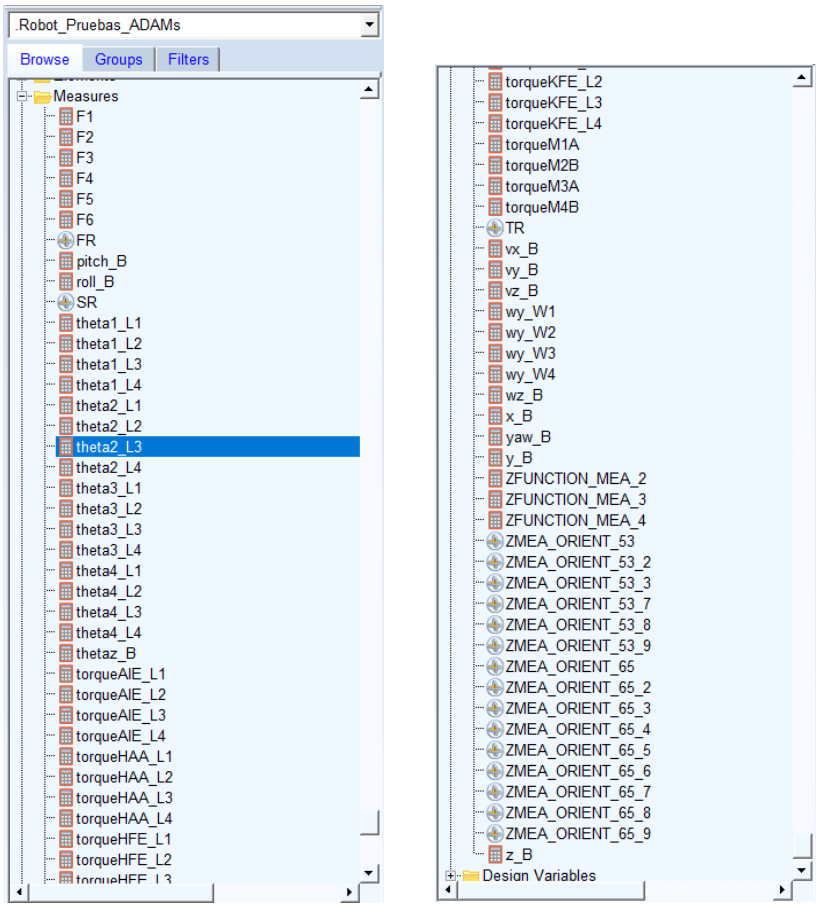
Figura 6.19: Modelo del robot en ADAMS. (a) Elementos de movimiento, fuerzas y marcadores; (b) Verificación del modelo en ADAMS.



(a) (b)

(c) (d)

Figura 6.20: Configuración de algunas mediciones empleando marcadores en ADAMS. (a) Posición angular sobre el eje Z; (b) Velocidad lineal en el eje X; (c) Par torsional aplicado por el motor; (d) Fuerza de empuje generado por la hélice.



(a) (b)

Figura 6.21: Conjunto de mediciones configuradas en ADAMS. (a) Relaciones del suelo; (b) Relaciones del chasis.

Posteriormente, se establecieron los valores de entrada para motores y fuerzas a emplear en el estudio. Para evitar discontinuidades o cambios abruptos en el movimiento y asegurar la convergencia numérica de la solución, se emplearon funciones escalón de tipo Heaviside suavizadas mediante polinomios cúbicos, con la estructura "STEP(x , x0 , h0 , x1 , h1)", como se observa en la Figura 6.22, donde:

- x: Arreglo de valores en el eje x (generalmente tiempo).
- x0: Valor de x donde comienza la transición de h0 a h1.
- h0: Valor de h inicial antes de la transición.
- x1: Valor de x donde se alcanza h1.
- h1: Valor de h final después de la transición.

Los valores de entrada para algunos actuadores se muestran en la Figura 6.23. Con base en estos, se evaluó el comportamiento omnidireccional del robot en modo terrestre mediante

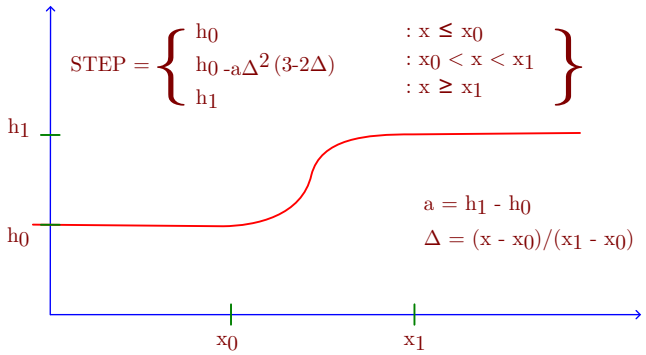


Figura 6.22: Función escalón unitario aplicada a los movimientos de los actuadores y fuerzas en ADAMS.

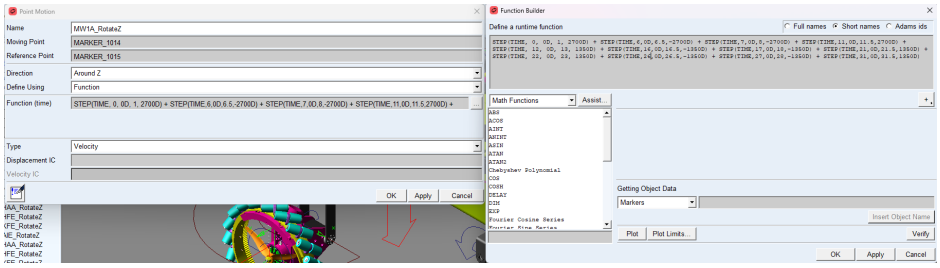
desplazamientos rectos hacia adelante y atrás, movimientos laterales, rotación sobre su centro y desplazamientos en diagonal. En el modo cuadrúpedo, se analizaron algunos rangos de movimiento y orientaciones que le permiten afrontar obstáculos durante su desplazamiento. Asimismo, se validó la reconfiguración desde el modo terrestre hacia dos configuraciones aéreas, activando las hélices para generar un empuje vertical total de 12 kg.

Debido a las limitaciones computacionales, no fue posible implementar una cosimulación en tiempo real; por ello, la validación dinámica se realizó únicamente en lazo abierto.

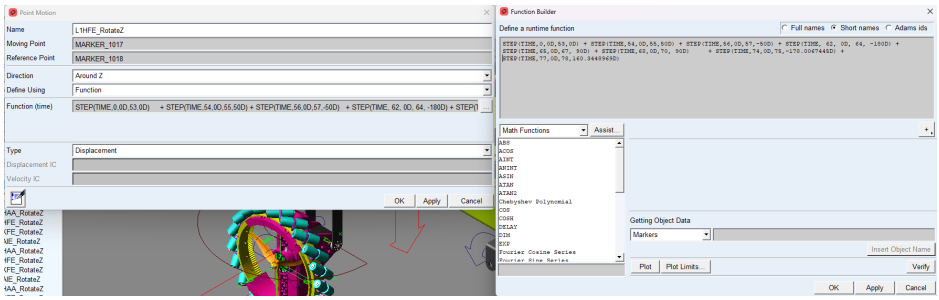
Para la configuración de la solución dinámica del estudio en ADAMS/View existen diversos métodos (integradores). El integrador predeterminado es el GSTIFF, el cual utiliza la formulación de diferenciación hacia atrás (BDF, *Backwards Differentiation Formula*, por sus siglas en inglés) para resolver ecuaciones diferenciales algebraicas (DAE, *Differential Algebraic Equations*, por sus siglas en inglés). Este integrador cuenta con dos variantes: I3 (índice 3) y SI2 (índice estabilizado 2). El índice indica la cantidad de derivadas temporales necesarias para transformar las DAE en ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE, *Ordinary Differential Equations*, por sus siglas en inglés); cuanto menor es el índice, más sencilla resulta su resolución numérica.

Para este modelo se seleccionó la variante GSTIFF-SI2, ya que ofrece una mayor precisión en el cálculo de velocidades y aceleraciones. Esta versión permite errores hasta 10 o 100 veces mayores que el GSTIFF regular sin comprometer la calidad de los resultados, y es menos propensa a errores por pasos de integración muy pequeños. No obstante, su desventaja es que, por lo general, es entre un 25 % y un 100 % más lento que el GSTIFF regular cuando se mantiene el mismo nivel de error. Además, requiere que todas las funciones de velocidad sean continuas y diferenciables, razón por la cual los movimientos se definieron mediante funciones STEP suavizadas con polinomios cúbicos. Asimismo, se recomienda esta variante para modelos donde la precisión de velocidad es importante, y en los cuales se incluyen modelos con fricción o contacto.

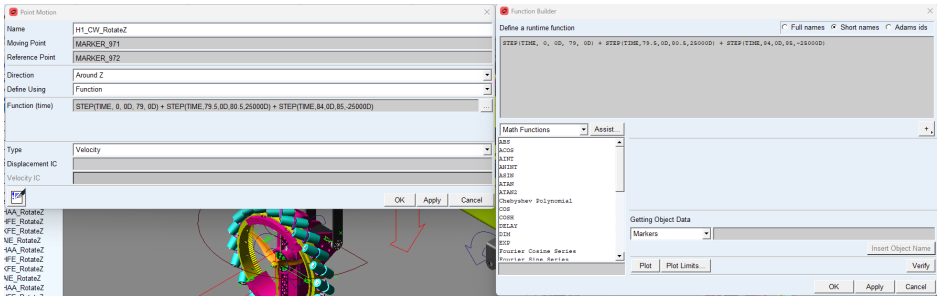
Se configuró un tiempo total de simulación de 90 segundos, con un paso de integración



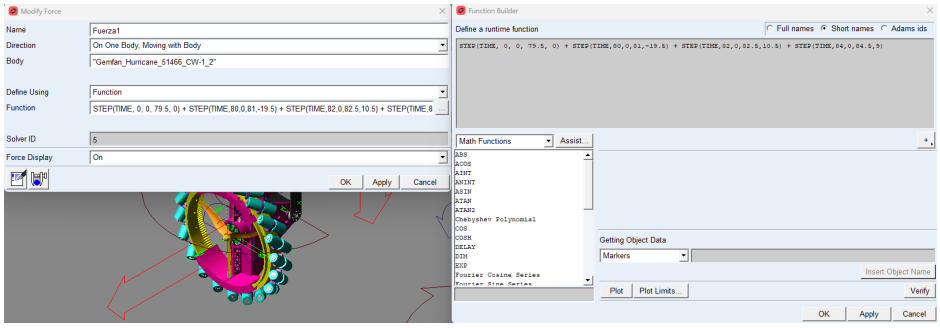
(a)



(b)

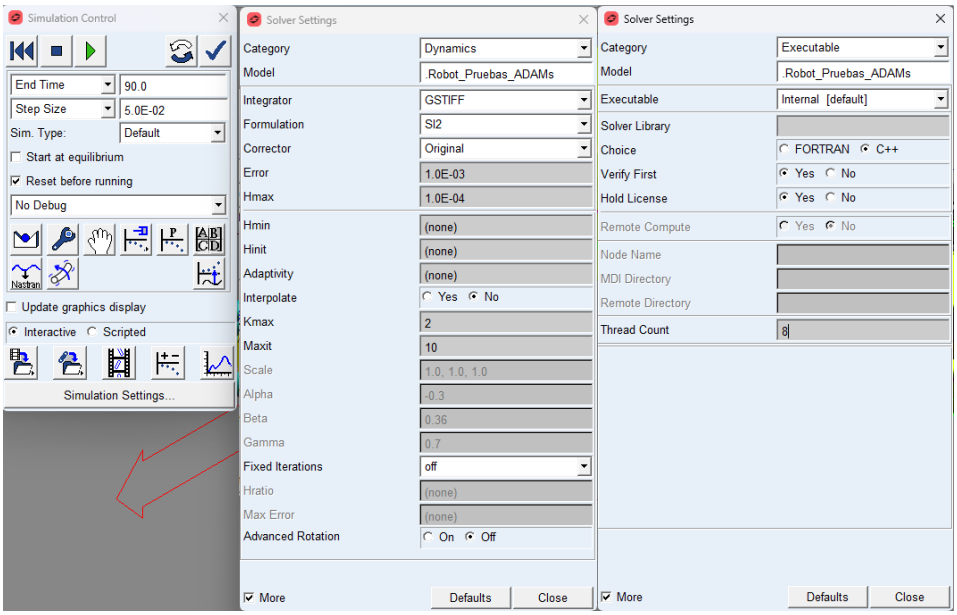


(c)



(d)

Figura 6.23: Configuración de algunas funciones para el movimiento del robot. (a) Función para motor de la rueda 1A; (b) Función para movimiento de la articulación 1 (cadera-flexión/extensión); (c) Función para rotación de la hélice 1 en sentido horario; (d) Fuerza de empuje generado por la hélice.



(a)

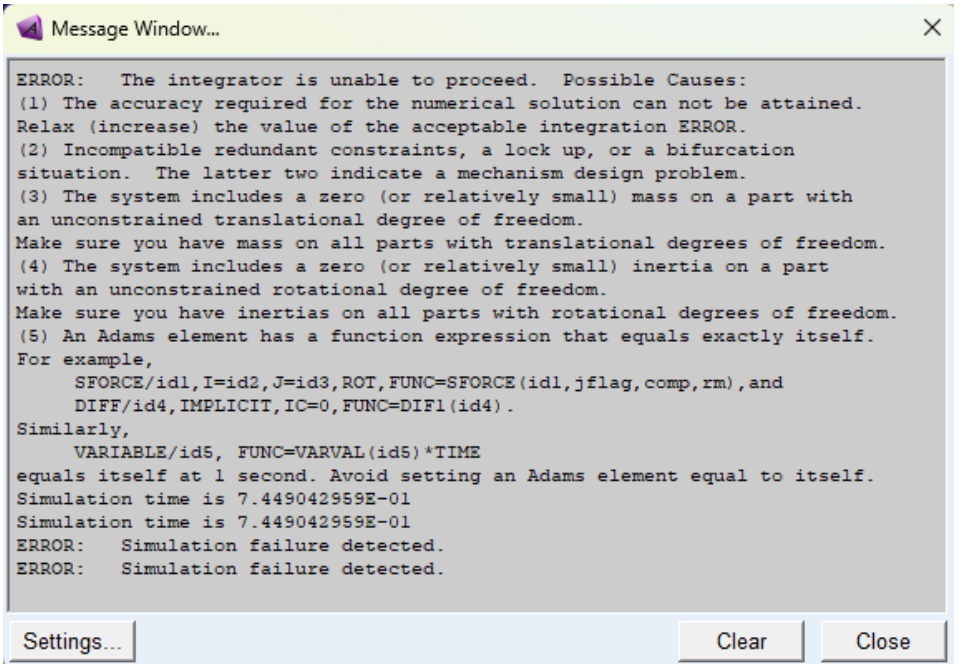
Figura 6.24: Configuración del control de simulación.

de 0.05 segundos. La configuración del tipo de estudio dinámico, el integrador y el uso de hasta 8 subprocesos paralelos se muestra en la Figura 6.24. A pesar de estas configuraciones, la simulación se detuvo al intentar ejecutar la segunda rotación del robot sobre su centro, arrojando el mensaje de error mostrado en la Figura 6.25.

Análisis del error y solución implementada

Tras una revisión de las posibles causas del error en la simulación, se identificó que, a diferencia del contacto continuo característico de una rueda convencional con el suelo, la rueda mecanum genera múltiples contactos con sus rodillos, produciendo distintas fuerzas de contacto. Estos contactos son catalogados en ADAMS como eventos discontinuos, que se manifiestan a través de impulsos, fuerzas normales elevadas, cambios de signo en las velocidades de los cuerpos implicados y picos abruptos en las aceleraciones.

Sin embargo, los integradores numéricos empleados en los simuladores asumen que las ecuaciones de movimiento son continuas. Esta suposición dificulta la resolución precisa cuando se presentan discontinuidades. En este contexto, el solucionador de ADAMS incluye un predictor de contacto, el cual anticipa el instante en que ocurrirá un nuevo contacto y ajusta el tamaño del paso de integración en consecuencia. Una vez ocurrido el contacto, se calcula la velocidad de penetración entre las geometrías involucradas, con lo cual se estima un tiempo de contacto más preciso. Esto provoca que el paso de tiempo actual se rechace y se sustituya por el paso de tiempo más preciso.



(a)

Figura 6.25: Mensaje de error del integrador durante la simulación.

Por esta razón, se recomienda utilizar el corrector modificado en lugar del original cuando se modelan sistemas que presentan discontinuidades en las funciones de fuerza. Además, ADAMS ofrece el integrador WSTIFF con su variante SI2 y la opción del corrector modificado. Esta configuración conserva las ventajas del integrador GSTIFF-SI2, con la diferencia de que permite variaciones en el tamaño del paso de tiempo sin comprometer la precisión de los resultados.

Una vez implementadas estas modificaciones, la simulación se completó de forma satisfactoria.

6.2.3. Resultados del análisis de movimiento en ADAMS/View

Una vez finalizada la simulación, se graficaron los resultados correspondientes a las mediciones configuradas. En la Figura 6.26 se muestran los valores de la postura del robot, las orientaciones y velocidades del cuerpo del robot. En la gráfica de la postura se puede observar la variación en la altura del cuerpo medida desde la base del chasis, la cual indica que mediante dicho ajuste puede atravesar obstáculos menores a 0.245 mm.

En cuanto a las rotaciones del cuerpo, se observan valores nominales de 20° para el cabeceo y de 40° para el balanceo. Una combinación de ambos no fue implementada en la secuencia de movimiento, pero se aborda en la siguiente subsección a través de la validación de la cinemática inversa para la modalidad terrestre con extremidades.

La Figura 6.27(a) muestra las velocidades angulares en las ruedas, las cuales alcanzan 60 rpm y producen una velocidad de avance frontal de 0.627 m/s, poco más que la velocidad máxima establecida de 0.5 m/s, empleando las cuatro ruedas.

En cuanto a los pares de torsión asociados a las ruedas, en la Figura 6.27(b) se muestran los valores que deben proporcionar directamente los motores de corriente continua, sin considerar las cajas de engranajes que hay hasta la rueda. Estos valores se encuentran dentro del rango del par máximo del motor de 0.0516 Nm.

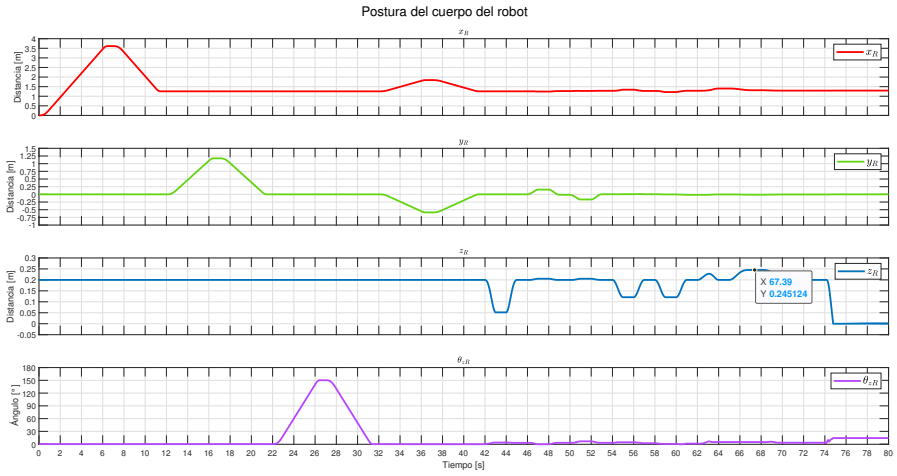
Para el modo de operación terrestre con extremidades, la Figura 6.28 muestra los diversos rangos de movimiento en cada una de las articulaciones de las cuatro extremidades. Al mismo tiempo, estos movimientos requieren de un par torsional en cada servomotor para lograr mantener al robot en dicha postura, como se muestran en la Figura 6.29.

Estos valores confirman que las articulaciones de cadera H_{AA} y H_{FE} requieren de un servomotor con mayor par de torsión, mientras que las articulaciones de rodilla K_{FE} y tobillo A_{IE} se encuentran dentro de los límites del par de torsión.

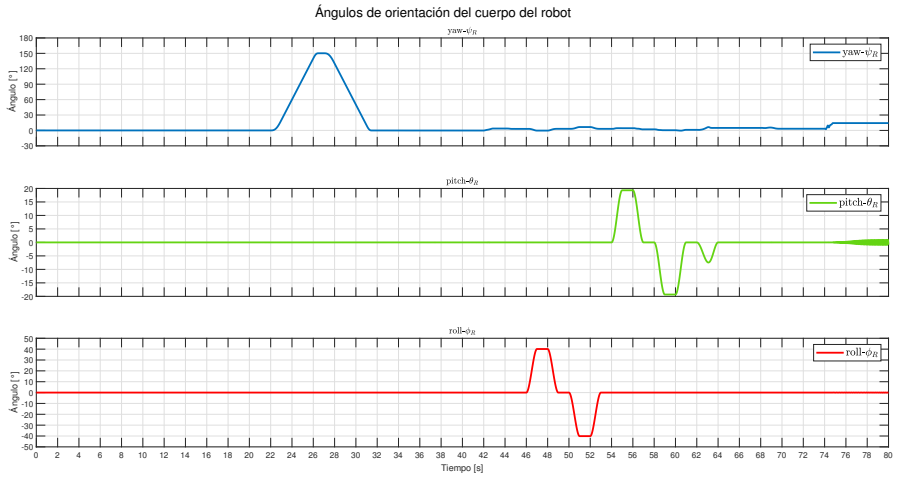
Este inconveniente se puede abordar seleccionando servomotores con mayor par de torsión, sin embargo, durante esta búsqueda se encontró que estos incrementarían de manera proporcional el peso del chasis, así como el peso asociado a su fuente de alimentación. Es por esto que se decidió, primeramente realizar una optimización de la estructura, buscando reducir el peso del robot y evaluar nuevamente en rediseños posteriores.

Por último, en la Figura 6.30 se muestran las fuerzas de empuje que se configuraron en los rotores-hélices. El valor máximo en cada rotor-hélice fue de 20.35 N, y debido a que no se implementó algún control de vuelo, se disminuyó la fuerza en dos pasos para evaluar el impacto de la estructura con el suelo. La Figura 6.31 muestra que durante el impacto, la fuerza producida sobre la base del chasis llega hasta 425 N, por lo cual, no se compromete la integridad de los componentes internos.

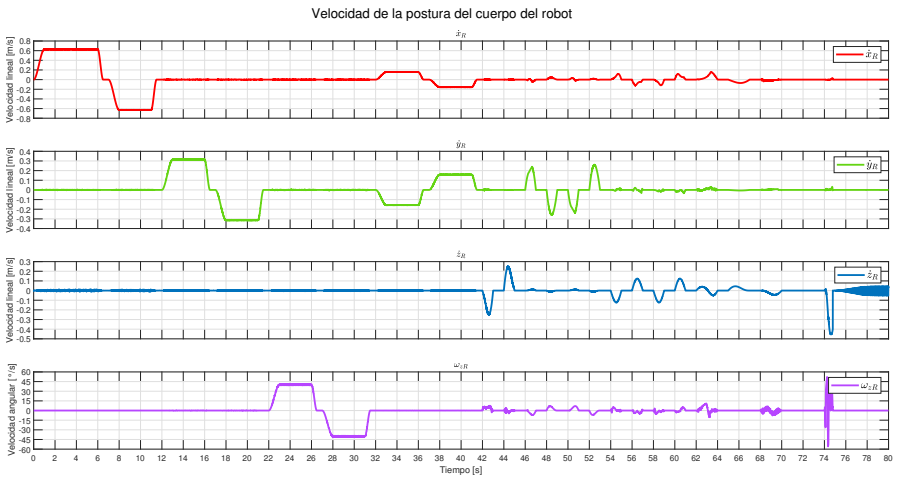
El video que muestra la secuencia de movimientos de esta simulación se encuentra en el Apéndice A1.9.



(a)

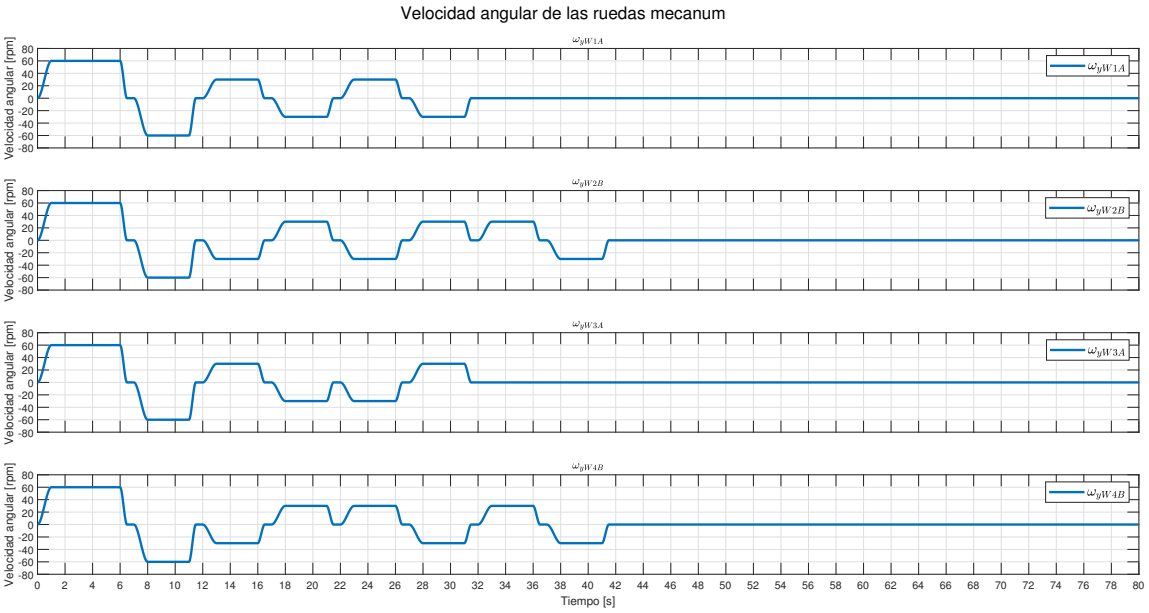


(b)

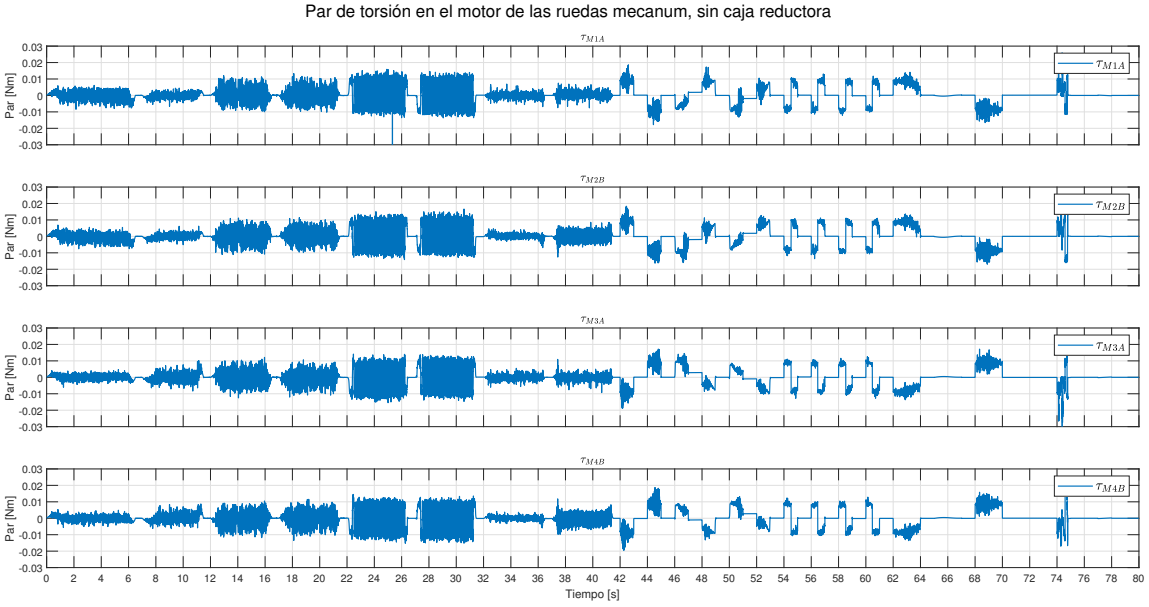


(c)

Figura 6.26: Desplazamientos y velocidades del robot. (a) Postura del robot; (b) Orientaciones del robot; (c) velocidades del robot.

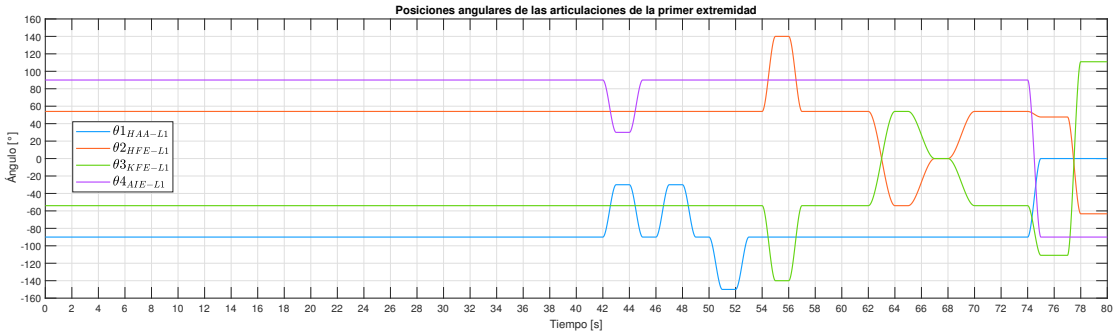


(a)

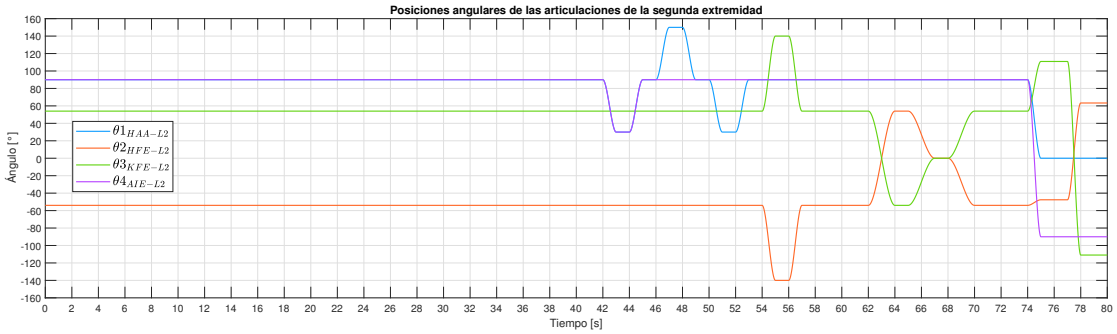


(b)

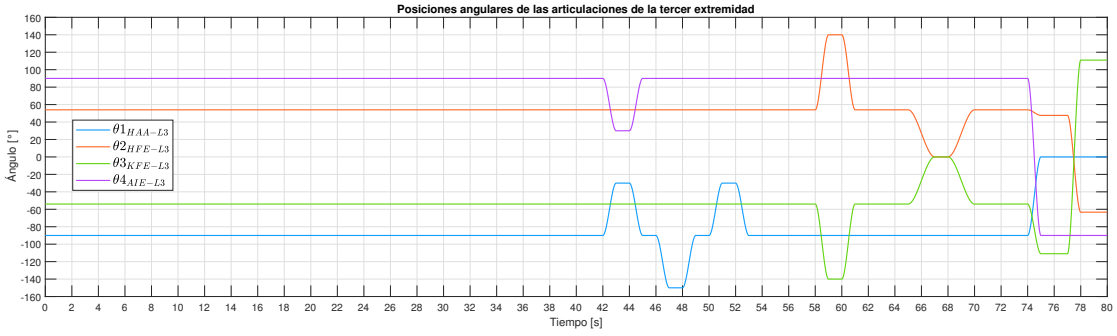
Figura 6.27: Velocidades angulares y pares de torsión en las ruedas. (a) Velocidades angulares en las ruedas; (b) Pares de torsión en la salida del reductor.



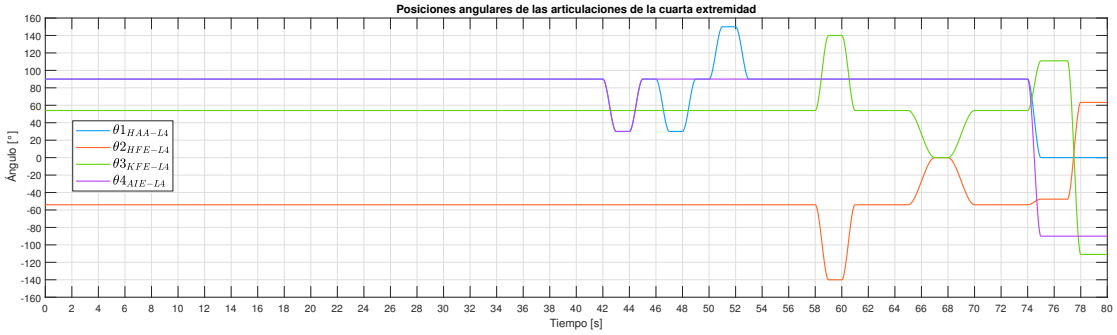
(a)



(b)

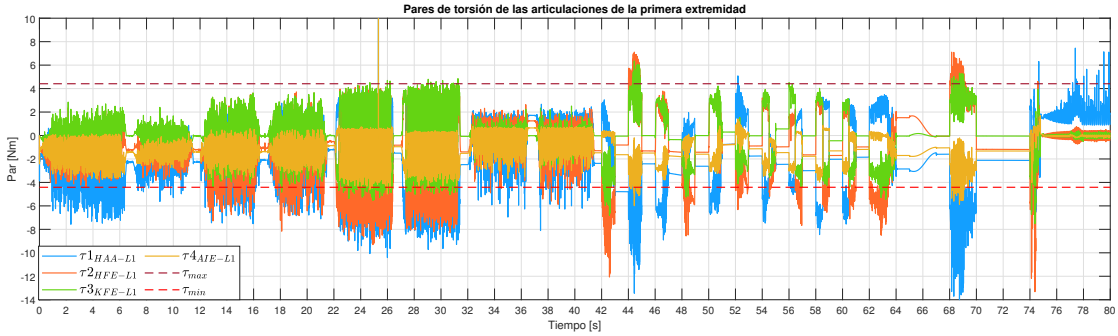


(c)

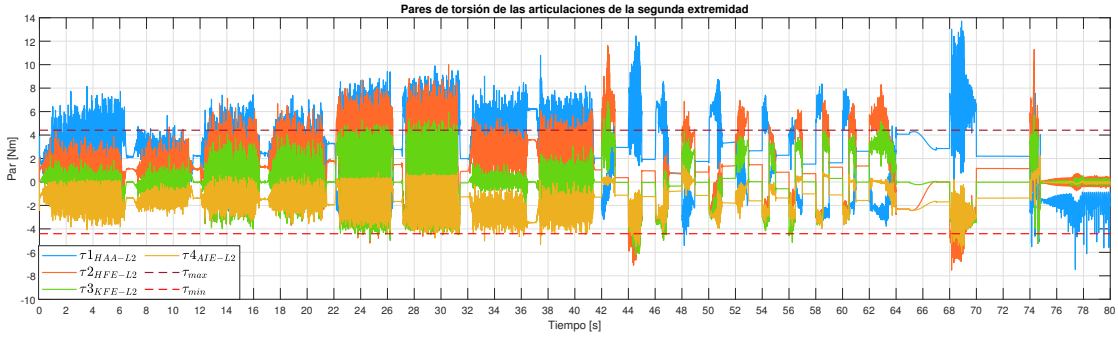


(d)

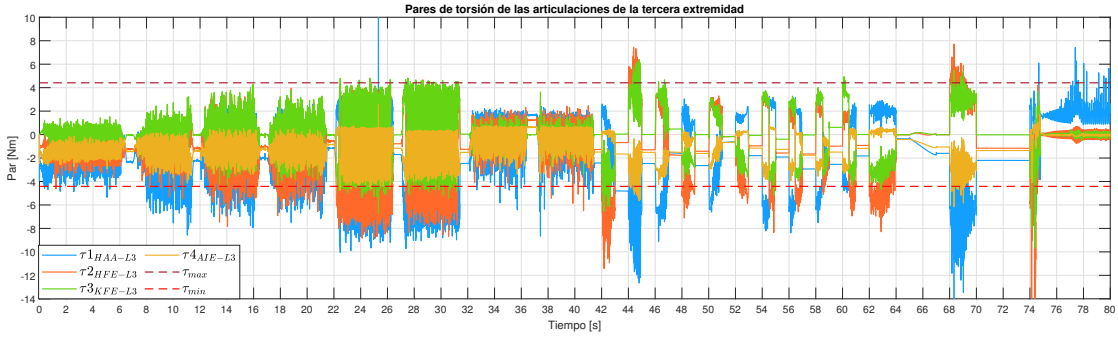
Figura 6.28: Rotaciones angulares de las extremidades 1 a 4. (a) Ángulos de los servomotores de la extremidad 1; (b) Ángulos de los servomotores de la extremidad 2. (c) Ángulos de los servomotores de la extremidad 3; (d) Ángulos de los servomotores de la extremidad 4.



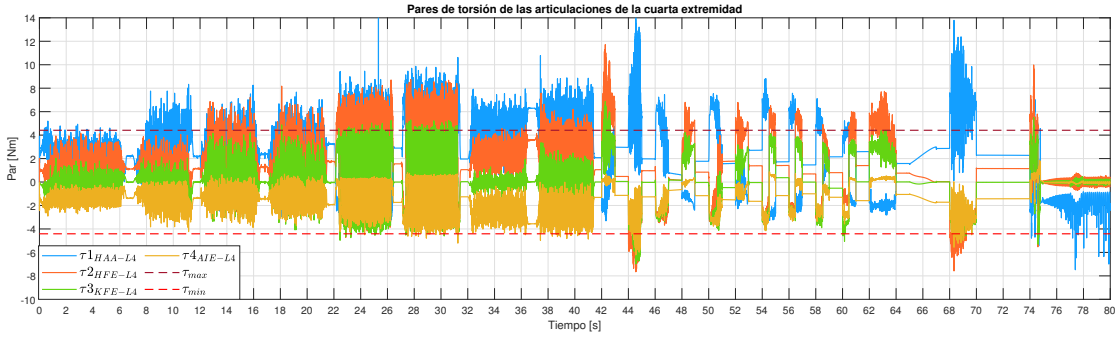
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.29: Pares de torsión de las extremidades 1 a 4. (a) Pares en los servomotores de la extremidad 1; (b) Pares en los servomotores de la extremidad 2. (c) Pares en los servomotores de la extremidad 3; (d) Pares en los servomotores de la extremidad 4.

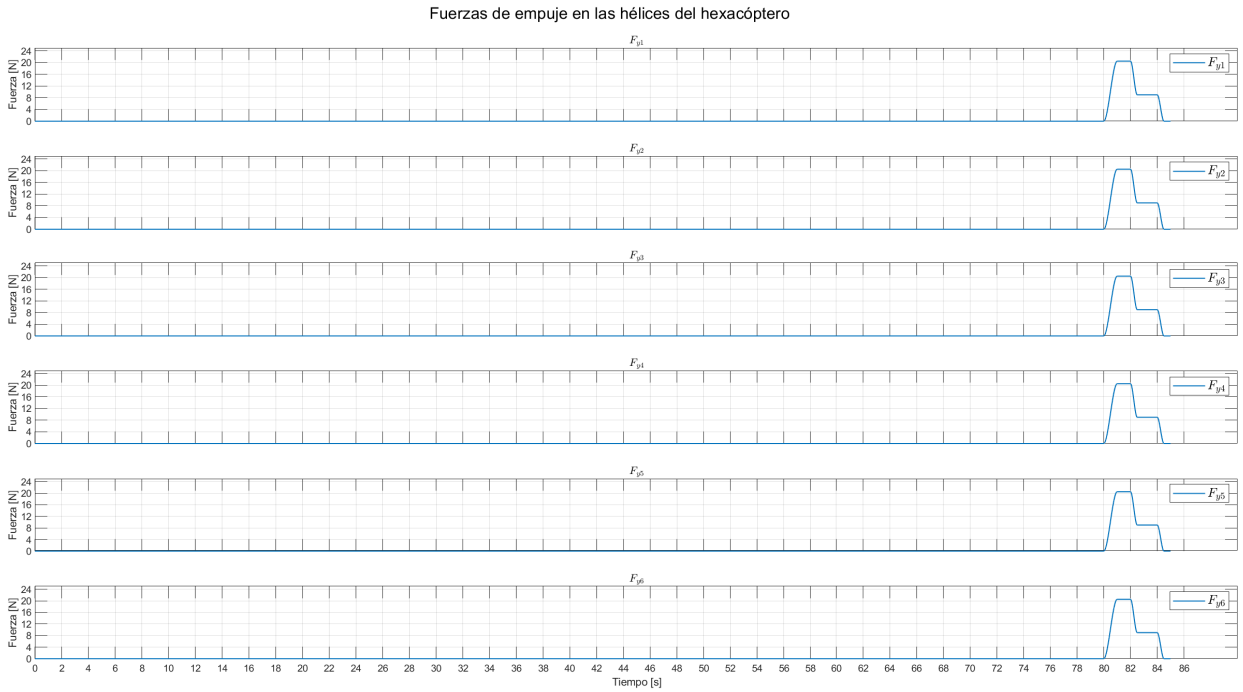


Figura 6.30: Fuerzas de sustentación en las hélices.

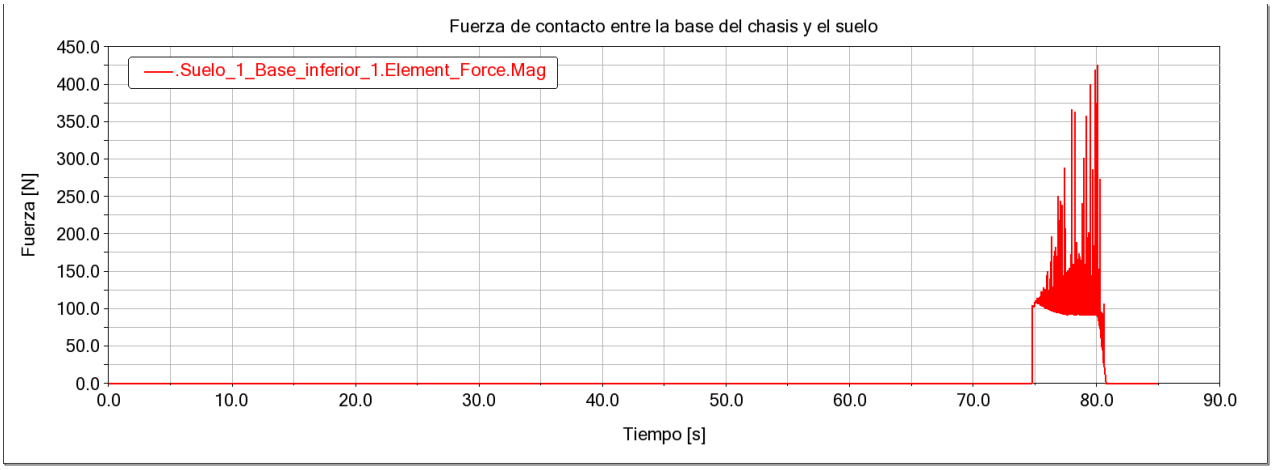


Figura 6.31: Fuerza de contacto entre la base del chasis y el suelo.

6.2.4. Validación de la cinemática directa del robot en modo cuadrúpedo

Con las matrices obtenidas en la sección de modelado cinemático, se procede a verificar los valores de posición y orientación de las extremidades LX con $X = 1, 2, 3, 4.$, desde el marco de referencia del centro del rin $\{S_{LX_4}\}$ hacia el marco de referencia en las caderas del robot $\{S_{LX_0}\}$, conforme a la postura del robot mostrada en la Figura 5.1. Para las extremidades 1 y 3 se establecen los ángulos iniciales $\theta_1 = -90°, \theta_2 = 54.017°, \theta_3 = -54.0227°, \theta_4 = 90°$, mien-

tras que las extremidades 2 y 4 presentan los ángulos iniciales $\theta_1 = 90°, \theta_2 = -54.017°, \theta_3 = 54.0227°, \theta_4 = 90°$. Por lo tanto, se obtienen las siguientes matrices:

$$\mathbf{T}^4_{01-3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.1450 \\ 0 & 0 & 1 & -0.1746 \\ 0 & -1 & 0 & -0.0890 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{T}^4_{02-4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.1450 \\ 0 & 0 & -1 & 0.1746 \\ 0 & 1 & 0 & -0.0890 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir de estas, se obtienen las siguientes posiciones y ángulos de orientación:

$$\mathbf{d}^4_{01-3} = \begin{bmatrix} 0.1450 & -0.1746 & -0.0890 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi_{1-3} \quad \theta_{1-3} \quad \psi_{1-3}] = \begin{bmatrix} -90° & 0° & 0° \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}^4_{02-4} = \begin{bmatrix} 0.1450 & 0.1746 & -0.0890 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi_{2-4} \quad \theta_{2-4} \quad \psi_{2-4}] = \begin{bmatrix} 90° & 0° & 0° \end{bmatrix}$$

Los valores obtenidos desde el marco de referencia del centro del rin $\{S_{LX_4}\}$ al marco de referencia del robot $\{S_R\}$ son:

$$\mathbf{T}^4_{R1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.2215 \\ -1 & 0 & 0 & -0.2215 \\ 0 & 0 & 1 & -0.0998 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{T}^4_{R2} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0.2215 \\ 1 & 0 & 0 & 0.2215 \\ 0 & 0 & 1 & -0.0998 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6.2.1}$$

$$\mathbf{T}^4_{R3} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -0.2215 \\ 1 & 0 & 0 & 0.2215 \\ 0 & 0 & 1 & -0.0998 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{T}^4_{R4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -0.2215 \\ -1 & 0 & 0 & -0.2215 \\ 0 & 0 & 1 & -0.0998 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

con:

$$\mathbf{d}^4_{R1} = \begin{bmatrix} 0.2215 & -0.2215 & -0.0998 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi_1 \quad \theta_1 \quad \psi_1] = \begin{bmatrix} 0° & 0° & -90° \end{bmatrix} \tag{6.2.2}$$

$$\mathbf{d}^4_{R2} = \begin{bmatrix} 0.2215 & 0.2215 - 0.0998 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi_2 \quad \theta_2 \quad \psi_2] = \begin{bmatrix} 0° & 0° & 90° \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}^4_{R3} = \begin{bmatrix} -0.2215 & 0.2215 & -0.0998 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi_3 \quad \theta_3 \quad \psi_3] = \begin{bmatrix} 0° & 0° & 90° \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}^4_{R4} = \begin{bmatrix} -0.2215 & -0.2215 - 0.0998 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi_4 \quad \theta_4 \quad \psi_4] = \begin{bmatrix} 0° & 0° & -90° \end{bmatrix}$$

Esta información permite comprobar la simetría de la estructura del robot y corroborar su postura inicial en el software de SolidWorks, como se muestra en la Figura 6.32.

6.2.5. Validación de la cinemática inversa del robot en modo cuadrúpedo

Con las matrices obtenidas en la sección de modelado cinemático, se procede a validar el cálculo de la cinemática inversa para tres configuraciones del robot: modo aéreo 1 con rodillas abajo, modo aéreo 2 con rodillas arriba y modo terrestre, considerando una posición y orientación deseada para el cuerpo del robot.

6.2.5.1. Modo aéreo 1 con rodillas abajo

Para esta configuración, se definieron las posiciones y orientaciones deseadas del centro del rin $\{S_{LX_4}\}$ con respecto al marco del robot $\{S_R\}$, utilizando el software de SolidWorks. Estos valores se agruparon en vectores de posición deseados $\mathbf{p}_d$ y ángulos de rotación $\text{Roll}_{(x,\phi)}, \text{Pitch}_{(y,\theta)}, \text{Yaw}_{(z,\psi)}$, conforme a la siguiente estructura:

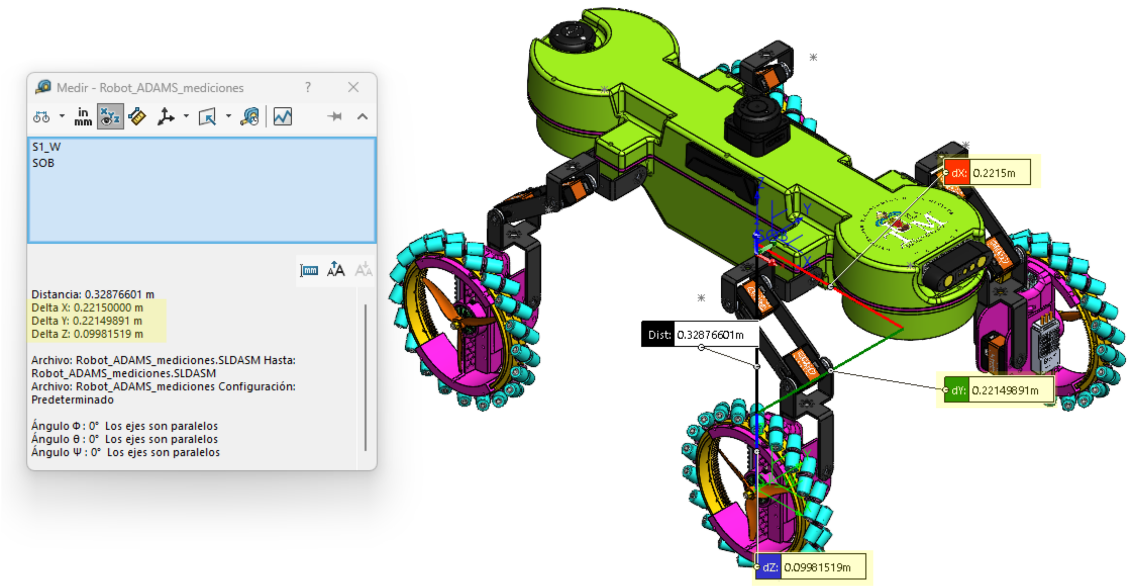


Figura 6.32: Posición y orientación predeterminada del robot en SolidWorks.

$$\mathbf{d}_{R1}^{4} = \begin{bmatrix} 0.1155 & -0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^{T}, \qquad [\phi_1 \quad \theta_1 \quad \psi_1] = \begin{bmatrix} 0° & 90° & -42.3681° \end{bmatrix} \tag{6.2.3}$$

$$\mathbf{d}_{R2}^{4} = \begin{bmatrix} 0.1155 & 0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^{T}, \qquad [\phi_2 \quad \theta_2 \quad \psi_2] = \begin{bmatrix} 0° & 90° & 42.3681° \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}_{R3}^{4} = \begin{bmatrix} -0.1155 & 0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^{T}, \qquad [\phi_3 \quad \theta_3 \quad \psi_3] = \begin{bmatrix} 0° & 90° & 137.6319° \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{d}_{R4}^{4} = \begin{bmatrix} -0.1155 & -0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^{T}, \qquad [\phi_4 \quad \theta_4 \quad \psi_4] = \begin{bmatrix} 0° & 90° & -137.6319° \end{bmatrix}$$

Con estos datos, se generaron las matrices de transformación homogénea $\mathbf{T}_{R}^{4}$ para cada extremidad:

$$\mathbf{T}_{R1}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.6739 & 0.7388 & 0.1155 \\ 0 & 0.7388 & -0.6739 & -0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{T}_{R2}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & -0.6739 & 0.7388 & 0.1155 \\ 0 & 0.7388 & 0.6739 & 0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6.2.4}$$

$$\mathbf{T}_{R3}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & -0.6739 & -0.7388 & -0.1155 \\ 0 & -0.7388 & 0.6739 & 0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{R4}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.6739 & -0.7388 & -0.1155 \\ 0 & -0.7388 & -0.6739 & -0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, despejamos la matriz $\mathbf{T}_{0}^{4}$ de la Ecuación (5.2.9) mediante:

$$\mathbf{T}_{0}^{4} = \left(\mathbf{T}_{R}^{0}\right)^{-1}\mathbf{T}_{0}^{4} \tag{6.2.5}$$

A partir de esto, se obtienen las matrices de transformación homogéneas deseadas $\mathbf{T}_{0}^{4} = \mathbf{H}$ a continuación:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.7388 & 0.6739 & 0.1236 \\ -1 & 0 & 0 & -0.0050 \\ 0 & -0.6739 & -0.7388 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.7388 & 0.6739 & 0.1236 \\ 1 & 0 & 0 & 0.0050 \\ 0 & 0.6739 & -0.7388 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.2.6)$$

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -0.7388 & 0.6739 & 0.1236 \\ -1 & 0 & 0 & -0.0050 \\ 0 & -0.6739 & -0.7388 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.7388 & 0.6739 & 0.1236 \\ 1 & 0 & 0 & 0.0050 \\ 0 & 0.6739 & -0.7388 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir de estas matrices, se obtienen los valores de las variables articulares para cada extremidad:

$$\begin{aligned} &\text{Extremidades 1 y 3: } \theta_1 = 90°; \theta_2 = -6.385°; \theta_3 = -56.9099°; \theta_4 = -180° \\ &\text{Extremidades 2 y 4: } \theta_1 = -90°; \theta_2 = 6.385°; \theta_3 = 56.9099°; \theta_4 = -180° \end{aligned} \quad (6.2.7)$$

Finalmente, al introducir estos valores en el software ADAMS/view, se validó que las posiciones y orientaciones obtenidas coinciden con las deseadas, como se observa en la Figura 6.33.

6.2.5.2. Modo aéreo 2 con rodillas arriba

Para la configuración correspondiente al modo aéreo 2 con rodillas arriba, se mantienen los mismos vectores de posición deseados definidos en la configuración anterior. Sin embargo, los ángulos de orientación varían, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \mathbf{d}^4_{R1} &= \begin{bmatrix} 0.1155 & -0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^T, & [\phi_1\ \theta_1\ \psi_1] &= \begin{bmatrix} 0° & 90° & -153.3006° \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}^4_{R2} &= \begin{bmatrix} 0.1155 & 0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^T, & [\phi_2\ \theta_2\ \psi_2] &= \begin{bmatrix} 0° & 90° & 153.3006° \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}^4_{R3} &= \begin{bmatrix} -0.1155 & 0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^T, & [\phi_3\ \theta_3\ \psi_3] &= \begin{bmatrix} 0° & 90° & 26.6994° \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.2.8)$$

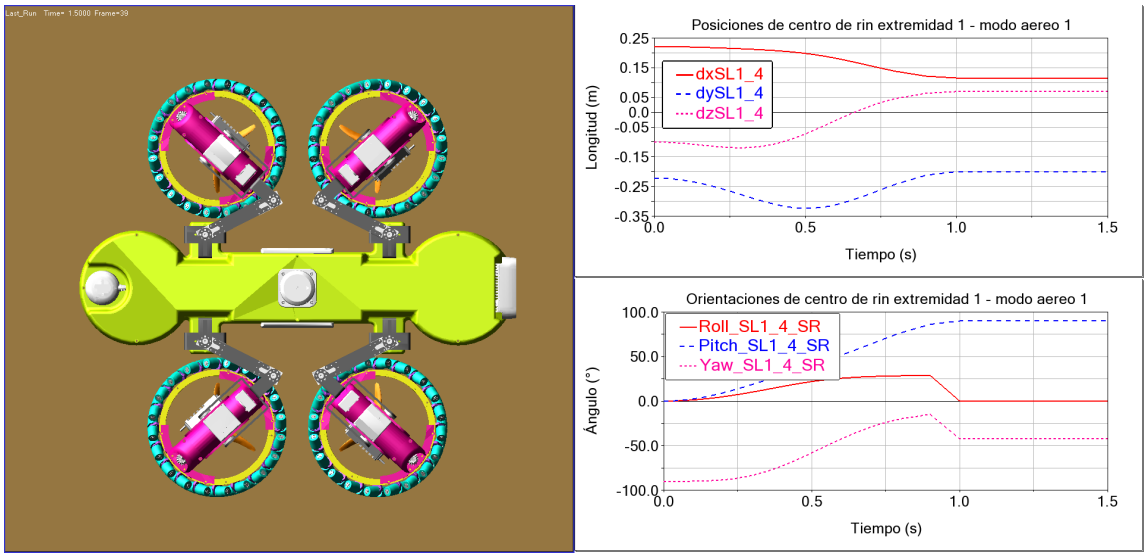


Figura 6.33: Posición y orientación deseadas para la configuración aérea 1 en ADAMS/View.

$$\mathbf{d}_{R4}^{4} = \begin{bmatrix} -0.1155 & -0.2001 & 0.0698 \end{bmatrix}^{T}, \qquad [\phi_4 \ \theta_4 \ \psi_4] = \begin{bmatrix} 0° & 90° & -26.6994° \end{bmatrix}$$

A partir de estos valores, se generaron las siguientes matrices de transformación homogénea $\mathbf{T}_{R}^{4}$ para cada extremidad:

$$\mathbf{T}_{R1}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4493 & -0.8934 & 0.1155 \\ 0 & -0.8934 & -0.4493 & -0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{R2}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & -0.4493 & -0.8934 & 0.1155 \\ 0 & -0.8934 & 0.4493 & 0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6.2.9}$$

$$\mathbf{T}_{R3}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & -0.4493 & 0.8934 & -0.1155 \\ 0 & 0.8934 & 0.4493 & 0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{R4}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.4493 & 0.8934 & -0.1155 \\ 0 & 0.8934 & -0.4493 & -0.2001 \\ -1 & 0 & 0 & 0.0698 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, se obtuvieron las matrices de transformación homogénea deseadas $\mathbf{T}_{0}^{4} = \mathbf{H}$:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.8934 & 0.4493 & 0.1236 \\ -1 & 0 & 0 & -0.0050 \\ 0 & -0.4493 & 0.8934 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -0.8934 & 0.4493 & 0.1236 \\ 1 & 0 & 0 & 0.0050 \\ 0 & 0.4493 & 0.8934 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.2.10)$$

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.8934 & 0.4493 & 0.1236 \\ -1 & 0 & 0 & -0.0050 \\ 0 & -0.4493 & 0.8934 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} 0 & -0.8934 & 0.4493 & 0.1236 \\ 1 & 0 & 0 & 0.0050 \\ 0 & 0.4493 & 0.8934 & 0.0170 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir de estas matrices, se calcularon las siguientes variables articulares para cada extremidad:

$$\begin{aligned} &\text{Extremidades 1 y 3: } \theta_1 = 90^\circ; \theta_2 = -117.3177^\circ; \theta_3 = 164.9553^\circ; \theta_4 = -180^\circ \\ &\text{Extremidades 2 y 4: } \theta_1 = -90^\circ; \theta_2 = 117.3177^\circ; \theta_3 = -164.9553^\circ; \theta_4 = -180^\circ \end{aligned} \quad (6.2.11)$$

Al introducir estos valores en el software ADAMS/View, se validó que las extremidades alcanzan las posiciones y orientaciones deseadas, como se muestra en la Figura 6.34.

6.2.5.3. Modo terrestre con posición y orientación del chasis

Para la configuración correspondiente al modo terrestre, se posiciona y orienta el marco de referencia ligado al chasis del robot $\{S_R\}$ con respecto al marco inercial del suelo $\{S_F\}$, con los siguientes valores de posición y orientación deseados:

$$\mathbf{d}_F^R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix}^T, \qquad [\phi \quad \theta \quad \psi] = \begin{bmatrix} 10^\circ & 15^\circ & 0^\circ \end{bmatrix} \quad (6.2.12)$$

A partir de estos valores, se genera la matriz de transformación homogénea $\mathbf{T}_F^R$:

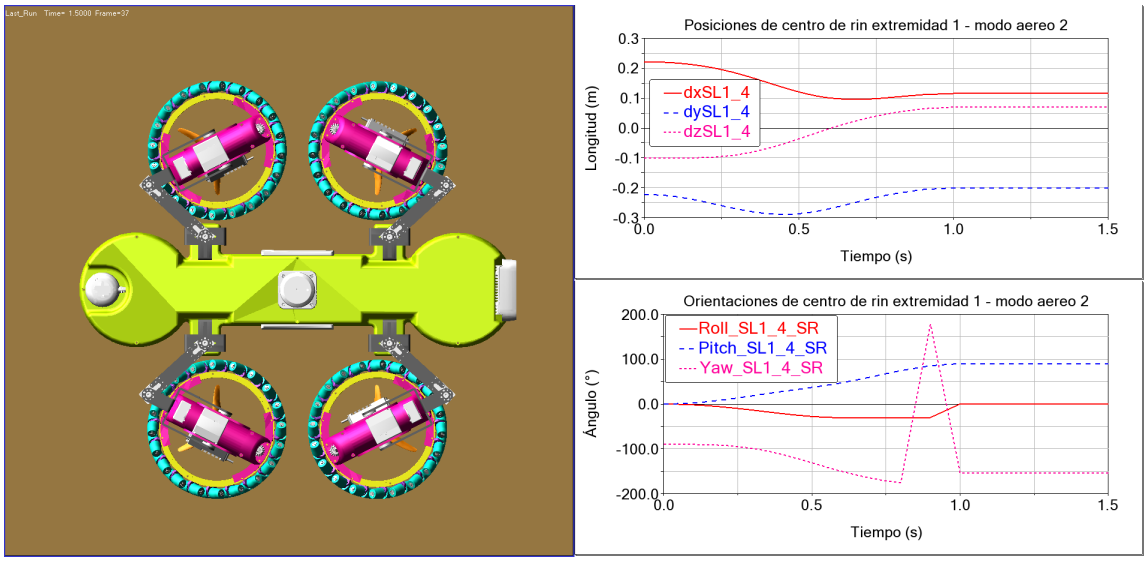


Figura 6.34: Posición y orientación deseadas para la configuración aérea 2 en ADAMS/View.

$$\mathbf{T}_F^R = \begin{bmatrix} 0.96593 & 0.044943 & 0.25489 & 0 \\ 0 & 0.98481 & -0.17365 & 0 \\ -0.25882 & 0.16773 & 0.95125 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.2.13}$$

Las posiciones y orientaciones de los marcos de referencia ubicados en el centro de cada rin $\{S_{LX_4}\}$, con respecto al marco de referencia inercial del suelo $\{S_F\}$, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_{F1}^4 &= \begin{bmatrix} 0.22 & -0.22 & 0.1 \end{bmatrix}^T, & [\phi_1 \quad \theta_1 \quad \psi_1] &= \begin{bmatrix} 0° & 0° & -90° \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}_{F2}^4 &= \begin{bmatrix} 0.22 & 0.22 & 0.1 \end{bmatrix}^T, & [\phi_2 \quad \theta_2 \quad \psi_2] &= \begin{bmatrix} 0° & 0° & 90° \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}_{F3}^4 &= \begin{bmatrix} -0.22 & 0.22 & 0.1 \end{bmatrix}^T, & [\phi_3 \quad \theta_3 \quad \psi_3] &= \begin{bmatrix} 0° & 0° & 90° \end{bmatrix} \\ \mathbf{d}_{F4}^4 &= \begin{bmatrix} -0.22 & -0.22 & 0.1 \end{bmatrix}^T, & [\phi_4 \quad \theta_4 \quad \psi_4] &= \begin{bmatrix} 0° & 0° & -90° \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{6.2.14}$$

Con esta información, se generan las matrices de transformación homogéneas $\mathbf{T}_F^4$ siguientes:

$$\mathbf{T}_{F1}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.22 \\ -1 & 0 & 0 & -0.222 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{T}_{F2}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0.22 \\ 1 & 0 & 0 & 0.222 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6.2.15}$$

$$\mathbf{T}_{F3}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -0.22 \\ 1 & 0 & 0 & 0.222 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{T}_{F4}^{4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -0.22 \\ -1 & 0 & 0 & -0.222 \\ 0 & 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Posteriormente, se calcula la matriz de transformación $\mathbf{T}_{F}^{0}$ a partir de la Ecuación (5.2.24) y se emplea la Ecuación (5.2.25) para obtener las matrices de transformación homogénea deseadas $\mathbf{T}_{0}^{4} = \mathbf{H}$, resultando:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0.98481 & -0.044943 & -0.16773 & 0.13866 \\ 0.17365 & 0.25489 & 0.95125 & -0.028115 \\ 0 & -0.96593 & 0.25882 & -0.092945 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6.2.16}$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0.98481 & -0.044943 & 0.16773 & 0.14166 \\ 0.17365 & 0.25489 & -0.95125 & 0.10452 \\ 0 & 0.96593 & 0.25882 & -0.092945 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 0.98481 & -0.044943 & 0.16773 & 0.12188 \\ -0.17365 & -0.25489 & 0.95125 & -0.21667 \\ 0 & -0.96593 & -0.25882 & -0.067063 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} 0.98481 & -0.044943 & -0.16773 & 0.15843 \\ -0.17365 & -0.25489 & -0.95125 & 0.14027 \\ 0 & 0.96593 & -0.25882 & -0.067063 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente, se calcularon los ángulos de articulación para cada extremidad a partir de las matrices anteriores:

$$\begin{aligned} &\text{Extremidad 1: } \theta_1 = -8.1978^\circ; \theta_2 = 80.782^\circ; \theta_3 = -72.996^\circ; \theta_4 = 18.041^\circ \\ &\text{Extremidad 2: } \theta_1 = 1.3915^\circ; \theta_2 = -45.98^\circ; \theta_3 = 54.014^\circ; \theta_4 = -8.5251^\circ \\ &\text{Extremidad 3: } \theta_1 = -6.2767^\circ; \theta_2 = -16.437^\circ; \theta_3 = 16.431^\circ; \theta_4 = -3.7233^\circ \\ &\text{Extremidad 4: } \theta_1 = -5.318^\circ; \theta_2 = -6.4289^\circ; \theta_3 = 21.507^\circ; \theta_4 = 4.5214^\circ \end{aligned} \tag{6.2.17}$$

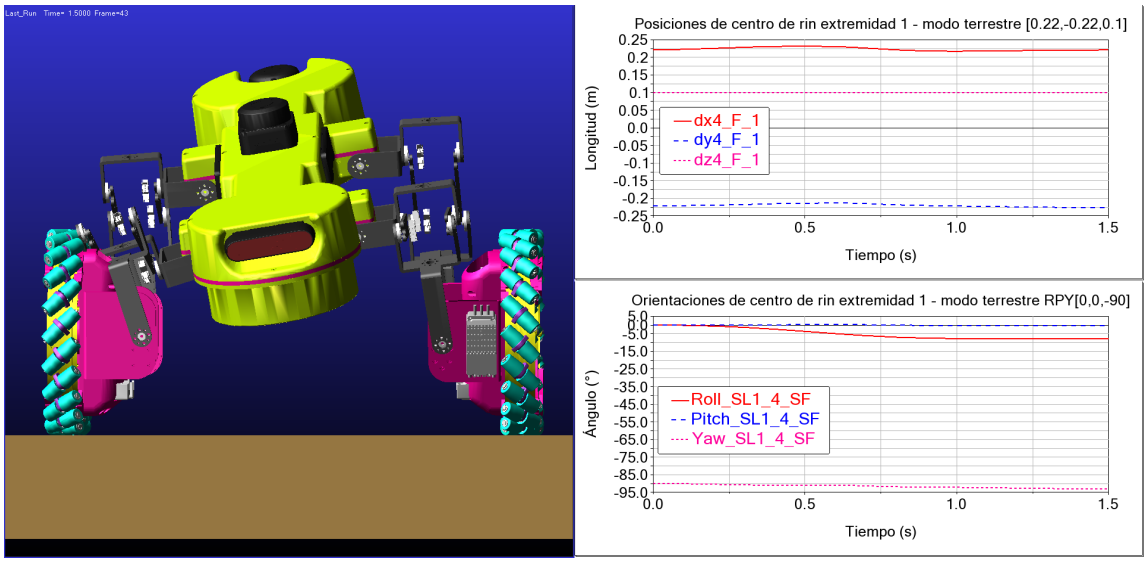
Al introducir estos valores en el software de ADAMS/View, se observó que las extremidades y ruedas alcanzan las posiciones y orientaciones deseadas. No obstante, se registraron ligeras desviaciones atribuidas al movimiento de los rodillos en contacto con el suelo, como se muestra en la Figura 6.35.

6.2.6. Validación de la cinemática diferencial directa del robot móvil con ruedas

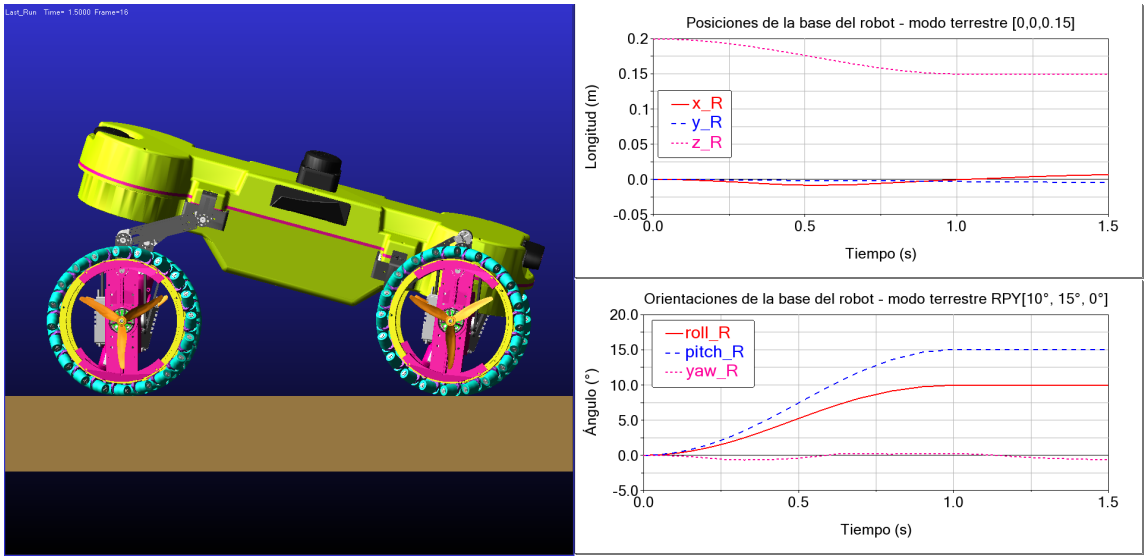
Dado que la actuación de los motores de las ruedas se implementó en lazo abierto en el entorno de simulación ADAMS/View, se procedió a comparar los valores de entrada aplicados a cada rueda con las velocidades del robot obtenidas mediante cálculos analíticos, utilizando las Ecuaciones (5.3.53) y (5.3.49), y con los resultados obtenidos en la simulación.

Los parámetros considerados para este análisis son:

- Radio de la rueda: $r_w = 0.1m$



(a)



(b)

Figura 6.35: Posición y orientación deseadas para una configuración terrestre en ADAMS/View. (a) Posición y orientación del marco de referencia en el centro del rin $\{S_{LX_4}\}$ con respecto al marco de referencia del suelo $\{S_F\}$; (b) Posición y orientación del marco de referencia en el chasis del robot $\{S_R\}$ con respecto al marco de referencia del suelo $\{S_F\}$.

- Posición en x del origen de S_w respecto a S_R: $l_x = 0.2215m$
- Posición en y del origen de S_w respecto a S_R: $l_y = 0.2215m$

considerando la postura predeterminada en modo terrestre con cuatro ruedas.

Los valores de la Tabla 6.3 y los resultados mostrados en la gráfica de la Figura 6.36, muestran una alta concordancia entre los valores teóricos y simulados, presentando algunas desviaciones mínimas atribuibles a fuerzas de fricción y otros efectos no considerados en el modelo analítico. Estos resultados respaldan la validez de la formulación cinemática del robot con ruedas mecanum, así como la precisión del simulador considerando las dinámicas asociadas del robot.

Tabla 6.3: Comparación entre las velocidades de rotación en las ruedas y las velocidades en el cuerpo del robot, calculadas analíticamente y obtenidas mediante simulación en ADAMS/View.

Movimiento	**Valores articulares** [**rad/s**]	**Postura del robot calculada** [$\mathbf{m/s, m/s, m/s, rad/s}$]	**Postura del robot simulada** [$\mathbf{m/s, m/s, m/s, rad/s}$]
Adelante	$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w = [6.283, 6.283, 6.283, 6.283]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0.628, 0, 0]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0.627, -0.0014, 0]^T$
Izquierda	$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w = [3.1416, -3.1416, 3.1416, -3.1416]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0.3142, 0, 0]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0.3156, -0.00034, 0]^T$
Giro antihorario	$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w = [3.1416, -3.1416, -3.1416, 3.1416]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0, 0, 0.7092]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0, 0, 0.7088]^T$
Diagonal derecha	$\dot{\boldsymbol{\varphi}}_w = [0, 3.1416, 0, 3.1416]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0.1571, -0.1571, 0]^T$	$\dot{\boldsymbol{\xi}} = [0.1544, -0.1598, 0]^T$

6.3. Dimensiones y parámetros finales

Las dimensiones finales del robot en sus configuraciones terrestre y aérea se presentan en las Figuras 6.37(a) a 6.37(d), respectivamente.

La Figura 6.38 muestra los diversos modos de operación que el robot puede adoptar mediante la reconfiguración de sus estructura. Esta reconfiguración es posible debido a las extremidades articuladas, las cuales le permiten modificar su altura y longitud. Asimismo, permiten reorientar las ruedas para operar como ruedas convencionales u omnidireccionales, así como la orientación de las hélices para generar fuerzas de sustentación en el modo aéreo, o bien, fuerzas de empuje y equilibrio en el modo de operación sobre dos ruedas.

La secuencia de reconfiguración entre el modo terrestre con 4 ruedas y extremidades hacia el modo aéreo se muestra en el video del Apéndice A1.2, mientras que la secuencia de reconfiguración del modo terrestre de cuatro ruedas a dos se muestra en la Figura 6.39.

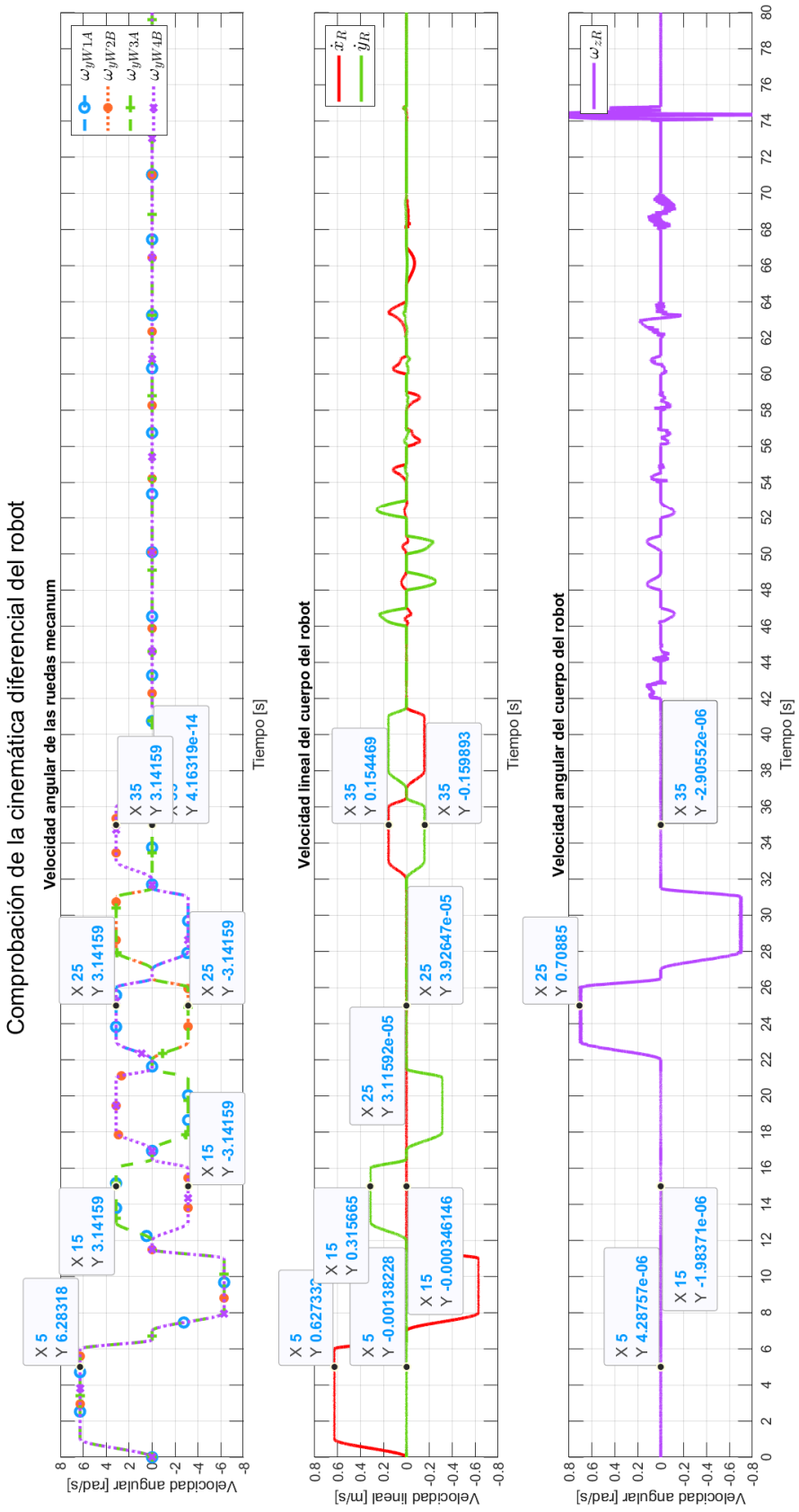


Figura 6.36: Comprobación de la cinemática diferencial del robot.

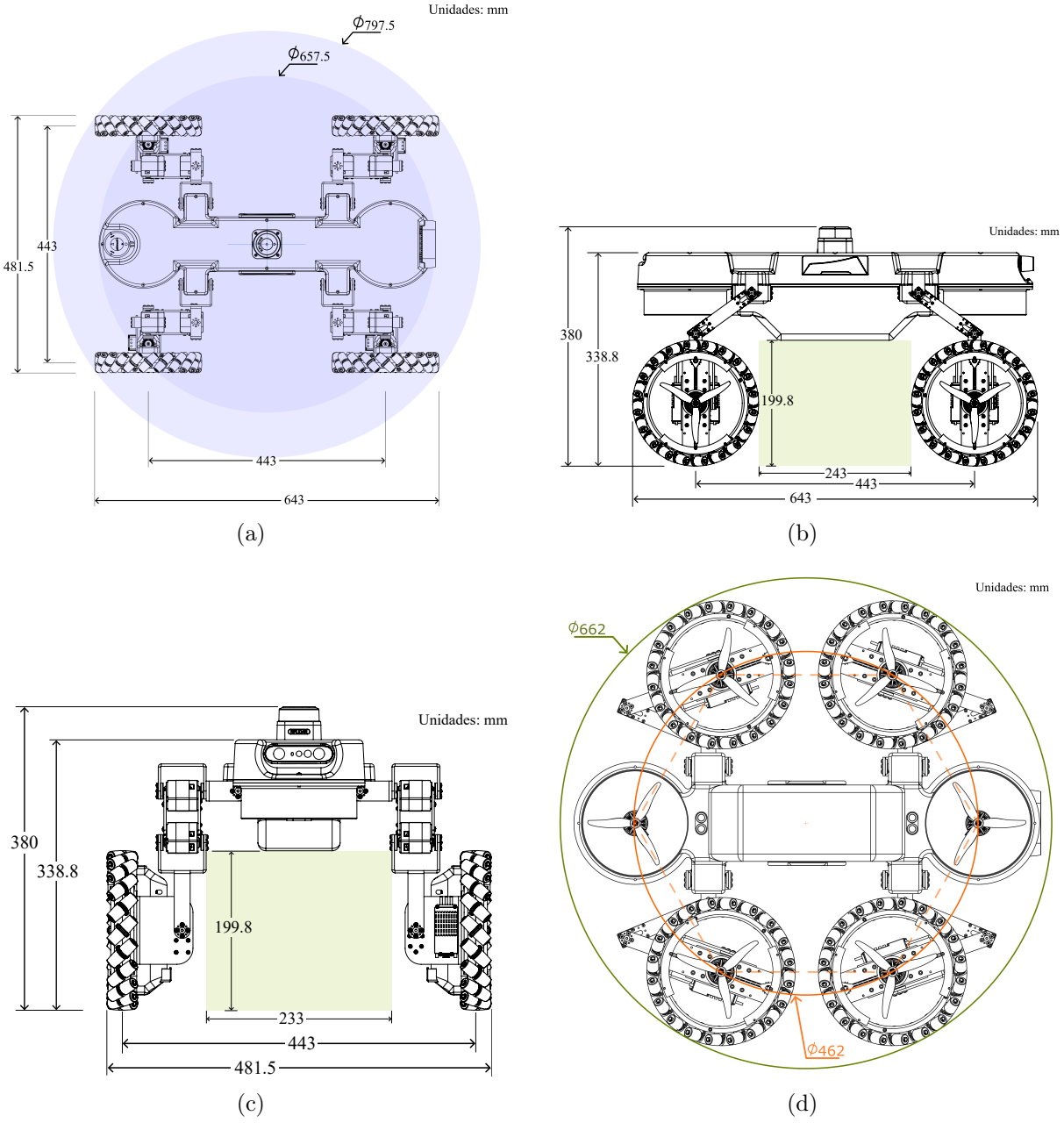


Figura 6.37: Dimensiones predeterminadas del robot en modo terrestre-omnidireccional y aéreo. (a) Vista superior terrestre-omnidireccional; (b) Vista lateral izquierda terrestre-omnidireccional; (c) Vista frontal terrestre-omnidireccional; (d) Dimensiones del robot en modo aéreo.

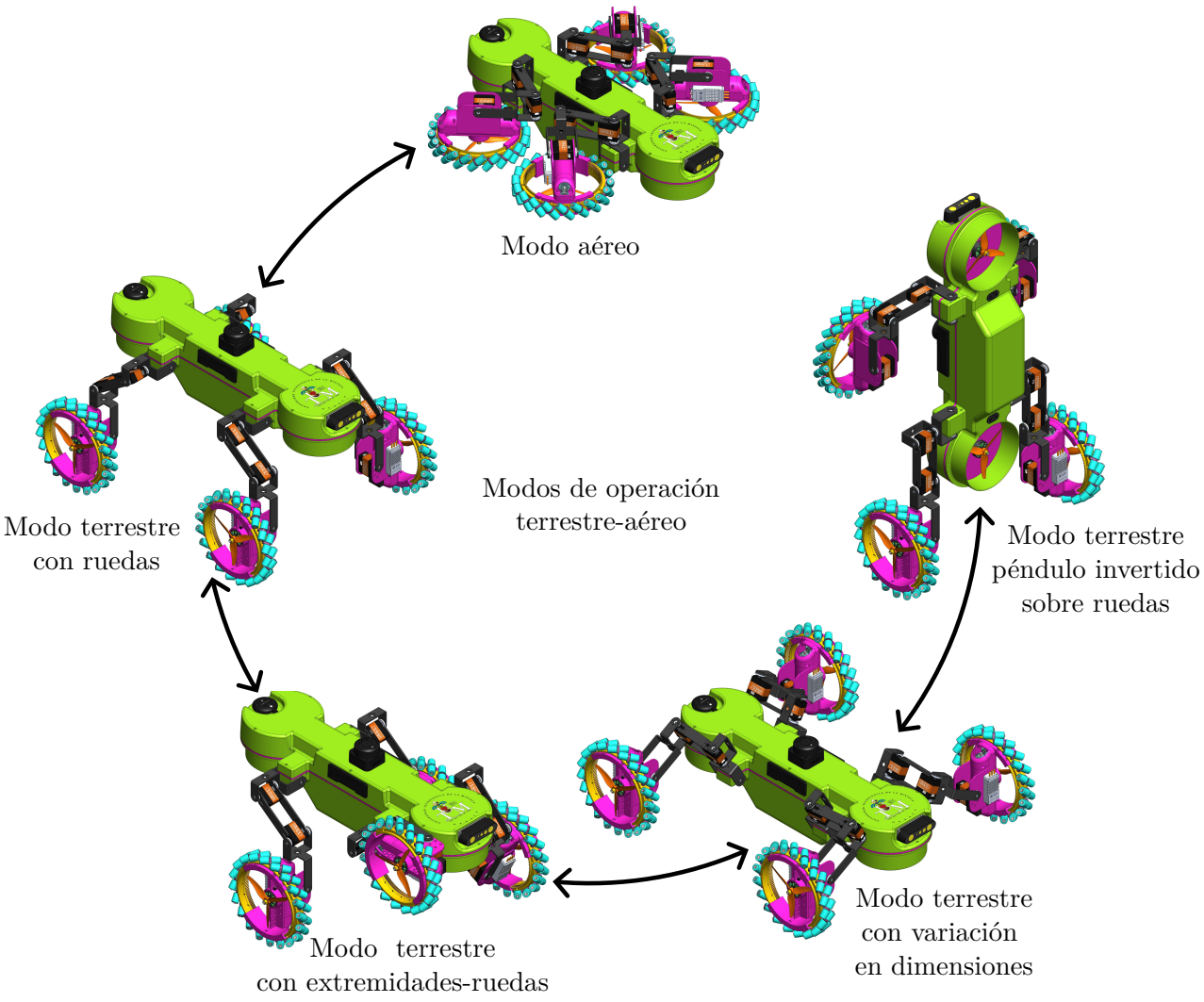


Figura 6.38: Diversos modos de operación posibles en el robot.

En la Figura 6.40 se muestran los modos de interacción del robot con obstáculos presentes en el entorno. Se observa que el robot es capaz de superar escalones de hasta 250 mm de altura

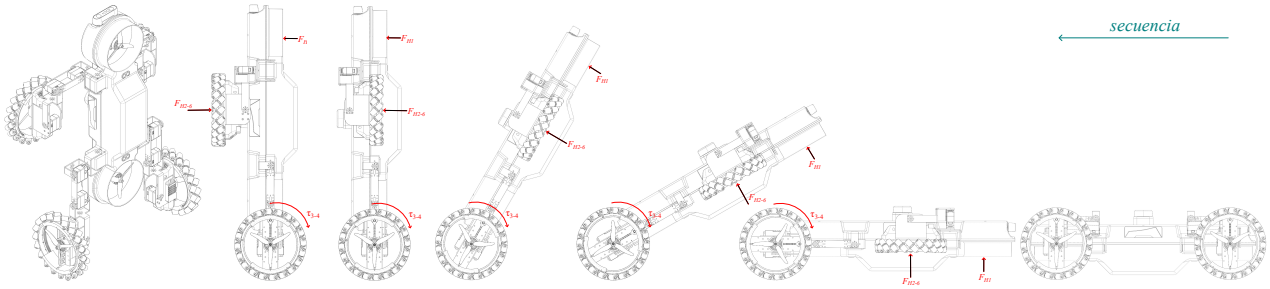
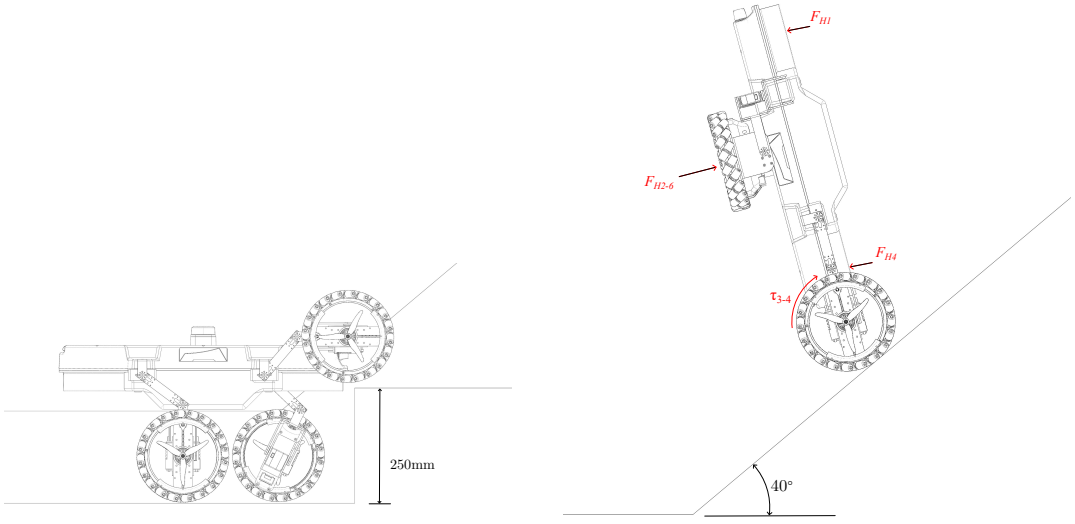


Figura 6.39: Secuencia reconfiguración de 4 ruedas a dos ruedas (péndulo invertido sobre ruedas).



(a) (b)

Figura 6.40: Obstáculos en modo terrestre. (a) Escalón con altura máxima de 250 mm; (b) Pendiente con inclinación de 40°.

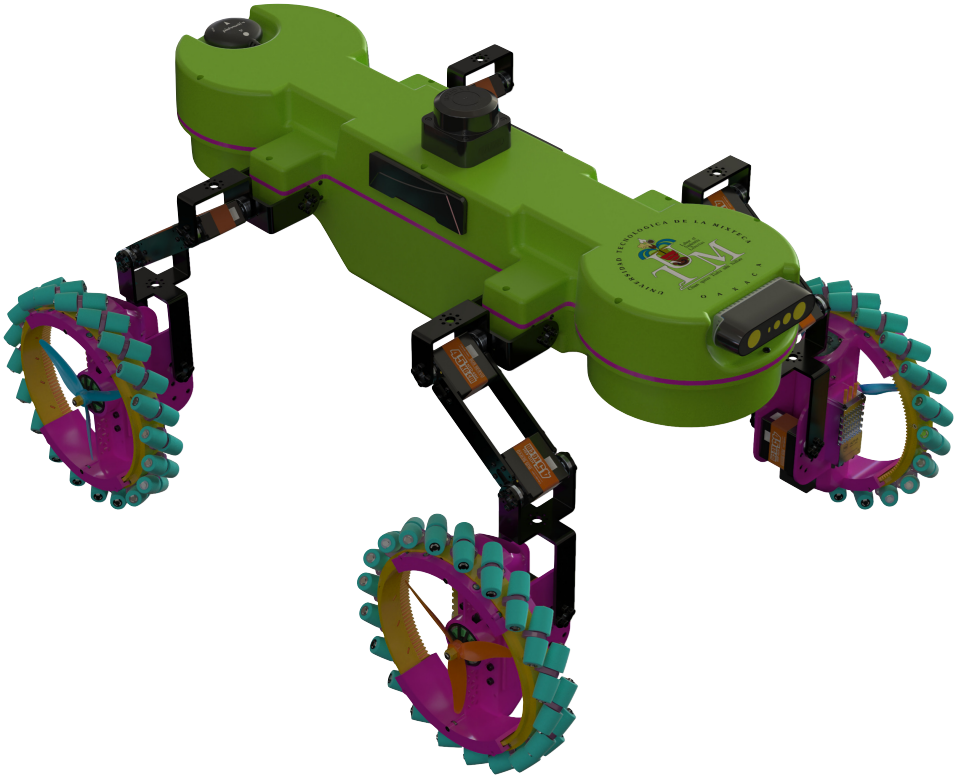
(mayor a media altura corporal) y ascender pendientes de 40° en configuración de péndulo invertido sobre ruedas.

Estas simulaciones no fueron posibles debido a que requieren de una percepción de su entorno, así como de un control en lazo cerrado que le permita corregir sus movimientos. Lo cual queda fuera de los alcances del trabajo.

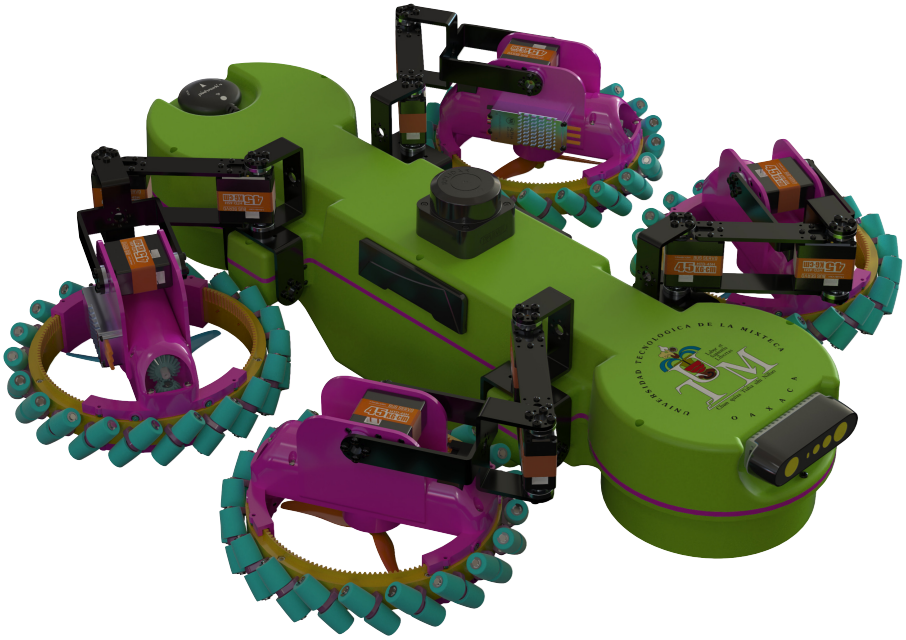
Finalmente, las Figuras 6.41(a) y 6.41(b) muestran renderizados de los modos de operación terrestre y aéreo, respectivamente.

6.3.1. Características estructurales y capacidades funcionales del robot

Las principales características estructurales del robot se muestran en la Tabla 6.4, mientras que la Tabla 6.5 resume sus capacidades funcionales. Esta información sirve como base para evaluar el grado de cumplimiento alcanzado conforme a los requerimientos del usuario y para asignar los pesos relativos en la evaluación de versatilidad desarrollada en las siguientes subsecciones.



(a)



(b)

Figura 6.41: Vistas del prototipo final. (a) Isométrico del modo de operación en tierra; (b) Isométrico del modo de operación en aire.

Tabla 6.4: Tabla de las características estructurales del robot.

Características estructurales	**Descripción**
Dimensiones	**Modo terrestre:** ▪ Largo: 643 mm ▪ Ancho: 481.5 mm ▪ Alto: 380 mm **Modo aéreo:** ▪ Diámetro: 662 mm
Peso	11.35 kg
Conexión	Operación inalámbrica
Fuente de alimentación	**Baterías portátiles:** ▪ Li-Po: • 22.2 V 120C 8400 mAh • 14.8 V 50C 5000 mAh ▪ Li-Ion: • 11.1 V 11C 8400 mAh • 11.1 V 10C 4500 mAh
Mecanismos de locomoción	**Modo terrestre:** ▪ Rueda convencional • radio: 100 mm ▪ Rueda mecanum • Número de rodillos: 20 • Orientación de rodillos: 45° ▪ Extremidades en modo cuadrúpedo mamífero **Modo aéreo:** ▪ Multirotores-hexacóptero Hexa+ PPNNPN

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 6.4

Características estructurales	Descripción
Sistema de control	▪ Minicomputadora y autopiloto integrados: Nvidia Jetson Nano Orin NX-Pixhawk 6 ▪ 4 controladoras de posición para motores de imanes permanentes – EPOS4 Compact 50/5 CAN ▪ 6 controladores electrónicos de velocidad – T-Motor Alpha 40A ▪ 1 controladora de servos digitales – STM32 ARM Cortex M3
Actuadores	▪ 4 motores de corriente directa de imanes permanentes con caja reductora de engranes relación 23 a 1 - Maxon Motor RE30-GP32A ▪ 4 motores de corriente directa sin escobillas - F90 2806.5 1950KV con 4 hélices de tres palas - Gemfan Hurricane 51466 V2 ▪ 16 servomotores digitales - HIWonder HTD-45H
Sensores	**Localización:** ▪ 1 receptor GNSS - Ublox ZED-F9P: precisión 0.1 m ▪ 4 unidades de medición inercial (IMU) - 3 × ICM-45686; IIM45652 ▪ 2 barómetros - ICP20100; BMP388 ▪ 1 magnetómetro - BMM150 ▪ 20 codificadores rotatorios: 4 en motores de imanes permanentes y 16 en servomotores **Percepción:** ▪ 1 LiDAR-RPLIDAR C1M1: 0.05-12 m; rango 360° ▪ 1 cámara RGB y profundidad - ORBBEC Gemini Plus: 0.25-2.5 m; 1920x1080@30fps; 1280x800@30fps ▪ 2 ultrasónicos-DYP-A22YYCW: 20 - 3000 mm

Tabla 6.5: Tabla de las capacidades funcionales del robot.

Capacidades funcionales	Descripción
Entornos de operación	**Modo terrestre:** ▪ Superficies planas ▪ Superficies suaves ▪ Superficies irregulares **Modo aéreo:** ▪ Vuelo a baja altitud
Velocidad máxima	Nominal 0.5 m/S en superficies planas y con una inclinación de hasta 45° en movimientos frontales (eje x)
Pares de torsión	**Servomotores**: 4.413 Nm **Motores de imanes permanentes**: 51.6 mNm **Motores sin escobillas**: 180 mNm
Coeficiente de fricción rodillos-suelo	**Caucho-concreto**: $\mu_s = 0.9 - 1.0$; $\mu_k = 0.8$ **Caucho-madera**: $\mu_s = 0.7 - 95$; $\mu_k = 0.6$
Pendiente de inclinación máxima	Sin datos, el dimensionamiento de actuadores asegura un par de torsión para asegurar una tracción adecuada en pendientes de hasta 45° en modo sobre ruedas. En modo aéreo sin inconvenientes.
Máximo tamaño de obstáculos (escalones)	En modo aéreo sin inconvenientes
Máxima distancia de separación entre brechas	En modo aéreo sin inconvenientes
Tiempo de operación	**Ruedas**: $\sim$ 30 minutos **Extremidades**: $\sim$ 20 minutos **Rotores**: $\sim$ 1.42 minutos
Tiempo de reconfiguración	$<$ 5 segundos
Fuerza de empuje (sustentación)	Configuración tipo hexacóptero con una fuerza total de 122.159 N
Capacidad de carga	Limitada a menos de 1 kg al momento
Grado de autonomía	Inicialmente control a nivel de articulaciones mediante tele operación
Telemetría	Estación terrestre CubePilot Herelink V1.1

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 6.5

Capacidades funcionales	Descripción
Frecuencias de comunicación	2.4 GHz
Rango de operación	Alcance máximo de 20 km
Resistencia al ambiente	**Temperatura máxima:** ▪ 249°C en la estructura **Inflamabilidad:** ▪ Auto extinguible para la estructura ▪ Quema lenta en los rodillos **Resistencia UV:** ▪ Excelente en la estructura ▪ Degradación por exposición prolongada en rodillos **Resistencia a diversos químicos:** ▪ Probablemente satisfactorio en la estructura ▪ Satisfactorio en rodillos **Protección IP:** ▪ IP55 para controlador electrónico de velocidad ▪ IP66 para receptor GNSS ▪ IP54 para LiDAR ▪ IP67 para sensor ultrasónico

6.3.2. Versatilidad y complejidad

La evaluación de la versatilidad y complejidad del robot se realizó conforme a la metodología establecida en [32]. El robot cuenta con un total de 26 articulaciones, cada una con su respectivo actuador. Por lo cual, al aplicar la Ecuación (2.3.2), se obtuvo un valor de complejidad mecánica igual a $C = 676$.

Este resultado sitúa al robot como un sistema más complejo que otros diseños como Bigdog o Scorpion, que utilizan únicamente extremidades, pero menos complejo que robots como ATRON y las variantes del robot ACM que emplean locomoción con ruedas, e inclusive que robots modulares e híbridos, como se muestra en la Figura 2.35.

Cabe señalar que la complejidad del robot podría reducirse al emplear un accionamiento

en común para los mecanismos de ruedas y hélices, como se propuso en la primer versión del diseño. Sin embargo, en su momento lo que dificultó esta implementación fue el peso añadido del mecanismo de acoplamiento. Una alternativa podría ser buscar una solución parecida a la desarrollada en [103], mostrada en la Figura 2.23(b).

En cuanto a la versatilidad, se realizó una evaluación cualitativa de manera personal basada en el desempeño esperado de los sistemas de locomoción integrados. Así como de la revisión de la literatura y la información proporcionada en las Tablas 2.2 y 6.5.

La Tabla 6.6 muestra las puntuaciones asignadas a los dominios terrestre, aéreo y de transición. El valor total calculado mediante la Ecuación (2.3.1) fue de 0.32519, lo que indica una versatilidad considerablemente superior en comparación con los robots analizados en la Figura 2.35, cuyo valor máximo registrado es inferior a 0.16.

6.3.3. Comparativa entre requerimientos de diseño y resultados

Finalmente, la Tabla 6.7 muestra cómo los resultados obtenidos satisfacen los requerimientos del usuario mediante el cumplimiento de los requerimientos funcionales previamente establecidos. Asimismo, se confirma que las dimensiones finales y el peso total del robot se mantienen dentro de las restricciones definidas para garantizar su portabilidad por una persona (*man-packable*).

Si bien no fue posible realizar simulaciones en entornos de desastre debido a limitaciones de tiempo y a las capacidades del software-hardware utilizado, los resultados obtenidos validan el funcionamiento general de la estructura mecánica. Asimismo, el sistema electrónico seleccionado permite realizar tareas de percepción del entorno y navegación. Estos resultados permiten avanzar hacia la implementación en simuladores especializados para la percepción, navegación e interacción con el entorno, tales como Gazebo, Webots, ROS o CoppeliaSim, en trabajos de investigación posteriores.

Tabla 6.6: Tabla de los pesos correspondientes a la evaluación de la versatilidad del robot conforme a lo descrito en [32].

Dominio	w_d	**Tipo movilidad o maniobrabilidad**	w_t	**Subdominio**	w_s	**Movilidad**	w_m	**Capacidad del robot**	w_c	**Producto pesos**
Terrestre	0.2	Maniobrabilidad	0.6	Plano	0.33	X	0.35	Completamente	2	0.02772
						Y	0.15	Rudimentario	1	0.00594
						Z	0.15	Incompetente	0	0
						roll	0	NA	2	0
						pitch	0	NA	2	0
						yaw	0.35	Competente	2	0.02772
						H	0	NA	0	0
				Irregular	0.33	X	0.30	Competente	2	0.02376
						Y	0.10	Rudimentario	1	0.00396
						Z	0.10	Incompetente	0	0
						roll	0.10	Incompetente	0	0
						pitch	0.10	Incompetente	0	0
						yaw	0.30	Rudimentario	1	0.01188
						H	0	NA	0	0
				Deformable	0.33	X	0.30	Competente	2	0.02376
						Y	0.10	Rudimentario	1	0.00396
						Z	0.10	Incompetente	0	0
						roll	0.10	Incompetente	0	0
						pitch	0.10	Incompetente	0	0
						yaw	0.30	Rudimentario	1	0.01188
						H	0	NA	0	0
		Movilidad en obstáculos	0.4	NA	0.25	Brecha $<$ 0.5 LC	0.33	Competente	2	0.0132
						Brecha $<$ LC	0.33	Rudimentario	1	0.0066

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 6.6

Dominio	w_d	Tipo movilidad o maniobrabilidad	w_t	Subdominio	w_s	Movilidad	w_m	Capacidad del robot	w_c	Producto pesos
						Brecha > LC	0.33	Incompetente	0	0
						Obstáculo < AC	0.5	Competente	2	0.02
						Obstáculo ≥ AC	0.5	Rudimentario	1	0.01
						Obstáculos continuos < AC	0.5	Competente	2	0.02
						Obstáculos continuos ≥ AC	0.5	Rudimentario	1	0.01
				Plano	0.25	Pendiente 0–30°	0.4	Competente	2	0.016
						Pendiente 30–60°	0.3	Rudimentario	1	0.006
						Pendiente 60–90°	0.3	Incompetente	0	0
				Irregular	0.25	Pendiente 0–30°	0.4	Rudimentario	1	0.008
						Pendiente 30–60°	0.3	Incompetente	0	0
						Pendiente 60–90°	0.3	Incompetente	0	0
				Deformable	0.25	Pendiente 0–30°	0.4	Rudimentario	1	0.008
						Pendiente 30–60°	0.3	Incompetente	0	0
						Pendiente 60–90°	0.3	Incompetente	0	0
	0.2	Maniobrabilidad	NA	NA	NA	X	0.14	Competente	2	0.056
						Y	0.14	Competente	2	0.056
Aéreo										

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 6.6

Dominio	w_d	**Tipo movilidad o maniobrabilidad**	w_t	**Subdominio**	w_s	**Movilidad**	w_m	**Capacidad del robot**	w_c	**Producto pesos**
						Z	0.14	Competente	2	0.056
						roll	0.14	Rudimentario	1	0.0280
						pitch	0.14	Rudimentario	1	0.0280
						yaw	0.14	Competente	2	0.056
						H	0.14	Competente	2	0.056
Transición	0.2	NA	NA	NA	NA	Terrestre ↔ Escansorial	0.14	Incompetente	0	0
						Terrestre ↔ Aéreo	0.14	Competente	2	0.056
						Escansorial ↔ Terrestre	0.14	Incompetente	0	0
						Escansorial ↔ Aéreo	0.14	Incompetente	0	0
						Acuático ↔ Aéreo	0.14	Incompetente	0	0
						Aéreo ↔ Terrestre	0.14	NA	0	0
						Aéreo ↔ Escansorial	0.14	Incompetente	0	0
AC: altura corporal		LC: longitud corporal		H: sustentación en el aire					Métrica de versatilidad:	0.32519

Tabla 6.7: Tabla de los resultados obtenidos en el desarrollo del robot que atienden a los requerimientos del cliente.

Requerimientos del cliente	**Requerimientos funcionales (con fuerte relación)**	**Resultados**	**Áreas de oportunidad**
▪ **Alta movilidad** ▪ **Versatilidad**	▪ Sistema de locomoción híbrido ▪ Estructura simétrica ▪ Sistema de ajuste de altura ▪ Sistema de acoplamiento en la locomoción ▪ Reconfiguración independiente-autónoma	El prototipo fue diseñado con una estructura simétrica y un sistema de locomoción híbrida, que combina ruedas capaces de operar en modo convencional y omnidireccional. Esta configuración elimina la necesidad de reorientar la postura del robot para desplazarse en cualquier dirección, lo que mejora su capacidad de respuesta en superficies lisas, rugosas o compactas, así como pendientes con una inclinación de hasta 45° conforme al dimensionamiento de los actuadores. Las extremidades articuladas le permiten superar obstáculos de tamaño considerable en relación con el radio de la rueda, así como modificar su altura y ancho estructural, facilitando el acceso a entornos confinados. Por su parte, la locomoción aérea, basada en una configuración tipo hexáptero, proporciona una solución eficaz para sortear obstáculos que no pueden ser evitados mediante locomoción terrestre. Aunque las pruebas de movilidad se realizaron solo en superficies planas, se evaluó el rango de movimiento de las extremidades y las diversas posturas del robot, así como se verificó que los actuadores en las ruedas permiten una velocidad dentro de los 0.5 m/s indicados en las restricciones. Finalmente, la integración de los distintos modos de locomoción se logró mediante un sistema de acoplamiento adaptativo, que permite una reconfiguración rápida, autónoma e independiente, sin intervención externa, cumpliendo con los requerimientos de operar en diversos entornos terrestres y aéreos.	La validación de la estructura, junto con el análisis cinemático, permite migrar a un software de simulación especializado en algoritmos de navegación e interacción con el entorno, en lugar de ADAMS, que se centra en el cálculo de las dinámicas de toda la estructura. Implementar algoritmos de percepción del entorno y planificación de rutas, así como secuencias de reconfiguración adaptadas a las condiciones del entorno.
▪ **Tracción**	▪ Sistema de suspensión	El ajuste de la distancia entre la rueda y el suelo, necesaria para garantizar una tracción adecuada, se lleva a cabo mediante las articulaciones de las extremidades y la orientación de las ruedas, permitiendo operar en modo convencional y minimizando deslizamientos indeseados. Además, el caucho de poliuretano seleccionado para los rodillos ofrece una alta adherencia, mejorando el contacto con la superficie.	Implementar sensores de fuerza para garantizar un contacto firme entre las ruedas y el suelo, y asegurar un amortiguamiento eficaz.

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 6.7

Requerimientos del cliente	**Requerimientos funcionales (con fuerte relación)**	**Resultados**	**Áreas de oportunidad**
▪ **Robustez estructural** ▪ **Estructura sellada/hermética**	▪ Materiales ligeros, resistentes y no corrosivos ▪ Estructura, sensores/actuadores herméticos	La selección de materiales con alta resistencia específica garantiza una estructura ligera y resistente, además de ofrecer temperaturas de servicio altas y buena tolerancia a agentes ambientales como agua dulce, salada y solventes, condiciones frecuentes en escenarios de desastre o procesos de limpieza y descontaminación. Aunque la estructura aún no incorpora protección contra sólidos y líquidos, la mayoría de los sensores externos cuenta con protección conforme a normas IP.	Con base en los resultados del análisis estructural, el material PEI presenta una densidad inferior al PEEK, lo que representa una alternativa viable para reducir el peso total del robot, especialmente si se combina con una redistribución de componentes o la aplicación de protecciones adicionales en áreas críticas. Diseñar juntas herméticas para evitar la entrada de líquidos y sólidos, e implementar un sistema de refrigeración por aire forzado en caso de vuelos prolongados.
▪ **Tiempo de operación continua (15–30 minutos)**	▪ Fuente de alimentación portátil	La selección de baterías de polímero de litio (Li-Po) y de ion de litio (Li-Ion) se realizó en función de la demanda de corriente promedio y la tasa de descarga requerida por los actuadores, así como por los sistemas de sensores y control. Estos sistemas proporcionan un tiempo de operación estimado entre 20 a 30 minutos, considerando diversos modos y combinaciones de operación.	Rediseñar los componentes estructurales para reducir el peso y aumentar el tiempo promedio de operación en vuelo.
▪ **Retroalimentación del entorno** ▪ **Capacidad de integración adicional de elementos externos**	▪ Sistema de comunicación remota ▪ Sistema electrónico/-control especializado	La retroalimentación del entorno se obtiene mediante un sistema de percepción adecuado junto con un módulo de navegación y control que permite recibir instrucciones externas. Gracias a la capacidad de comunicación, la reconfiguración puede realizarse en tiempo real.	La capacidad de interconexión podría mejorarse incorporando protocolos de comunicación redundantes y un módulo de diagnóstico del sistema que permita predecir fallos antes de que ocurran.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

Impacto y limitaciones de la robótica de rescate: Cada año, desastres naturales y provocados por el hombre causan miles de muertes. En este contexto, el uso de robots como una extensión a los equipos de búsqueda y rescate ha demostrado ser una herramienta valiosa, ya que protege la integridad de los rescatistas y reduce el tiempo de respuesta en la localización de víctimas, especialmente durante las primeras 48 horas. No obstante, su limitada movilidad en estructuras colapsadas y entre escombros ha restringido significativamente su efectividad en dichas misiones.

Enfoque de locomoción multimodal para mejorar la movilidad: A partir de una revisión de la literatura, se identificó que los robots con locomoción multimodal, capaces de operar en entornos terrestres, aéreos y acuáticos, ofrecen una mayor movilidad, adaptabilidad y versatilidad. Estas características son fundamentales para que los robots de rescate puedan desplazarse eficazmente en entornos no estructurados.

Área de oportunidad en el diseño de robots de rescate: Aunque existen robots con locomoción híbrida o multimodal, muchos no fueron diseñados específicamente para tareas de búsqueda, y rescate, así como presentan un bajo nivel de madurez tecnológica. En contraste, competencias como la RoboCup Rescue y la DARPA Robotics Challenge han impulsado desarrollos orientados a la detección de víctimas y de respuesta a desastres, centrándose principalmente en la validación de algoritmos de percepción, manipulación y navegación. No obstante, el diseño centrado en mejorar la movilidad continúa siendo un área de oportunidad.

Definición de entornos de operación y requerimientos: Considerando la necesidad de mejorar la movilidad, el desarrollo del prototipo de robot móvil se orientó a su operación en entornos terrestres y aéreos, donde se ha documentado un mayor despliegue de robots en situaciones reales de desastre. Asimismo, la revisión de la literatura permitió identificar los requerimientos de diseño en aspectos de movilidad asociados a tareas inmediatas como búsqueda, reconocimiento y mapeo, así como ampliación de la cobertura en comunicaciones.

Matriz de la casa de la calidad como punto de partida: A partir de la identificación de las necesidades del usuario y la definición de requerimientos funcionales, se elaboró la matriz de la casa de la calidad de acuerdo con la metodología QFD (Despliegue de la Función de Calidad). Este análisis permitió priorizar tres características clave: un sistema de locomoción híbrido, una estructura simétrica y un mecanismo de ajuste de altura. Además, se identificó que nueve de los doce requerimientos funcionales estaban directamente relacionados con el sistema mecánico del robot.

Descomposición funcional y diseño preliminar: Se llevó a cabo una descomposición funcional de los sistemas mecánico y electrónico del robot, con el objetivo de abordar cada subsistema conforme a su prioridad funcional. El diseño preliminar permitió definir de forma general el concepto estructural del sistema de locomoción. Este sistema integró como componente principal para operación terrestre, una rueda omnidireccional tipo Mecanum sin marco, esto para colocar en su interior una hélice destinada a la operación aérea. Ambos mecanismos compartían un sistema de actuación común mediante un tren de engranajes y embragues electromagnéticos, esto bajo un enfoque de diseño adaptativo.

Durante el proceso de integración de los subsistemas restantes, fue necesario realizar varios rediseños para mejorar la compatibilidad entre componentes. No obstante, el peso estimado del sistema mecánico (sin incluir los sistemas electrónicos ni de actuación) superó significativamente la fuerza de empuje que las cuatro hélices seleccionadas podían generar.

Primer rediseño mecánico: Para incrementar la fuerza de empuje generada por las hélices, se duplicó el diámetro de la rueda, manteniendo constante el número de rodillos en su periferia. Esta modificación permitió integrar hélices de 12.5 pulgadas, en contraste con las de 4.5 pulgadas utilizadas en el diseño inicial. Una de las decisiones más relevantes consistió en permitir que los sistemas de locomoción terrestre y aérea operaran de forma independiente, debido a que el diseño original requería una gran cantidad de embragues y engranajes para el sistema de acoplamiento utilizando un solo actuador. Asimismo, se incorporó un servomotor fijado al marco de cada rueda para habilitar la reconfiguración entre modos de locomoción de manera individual.

Durante esta etapa, se dimensionaron los actuadores requeridos para los mecanismos involucrados. Los análisis de simulación dinámica en entornos terrestre, aéreo y del sistema de reconfiguración, realizados mediante el software ADAMS/View, confirmaron la viabilidad del rediseño, e incluso se identificó la posibilidad de incorporar un par adicional de hélices en la base del chasis para aumentar la capacidad de carga útil del robot.

No obstante, el mecanismo de reconfiguración basado en servomotores resultó incompatible con el subsistema de ajuste de altura y suspensión. El análisis estructural reveló que sería necesario integrar articulaciones adicionales para compensar los cambios de orientación y altura, lo cual provocaría que el diseño excediera las dimensiones originalmente establecidas.

Segundo rediseño mecánico y electrónico: El segundo rediseño del sistema mecánico incorporó hélices de menor diámetro (5.1 pulgadas) junto con motores sin escobillas utilizados en aplicaciones de cinematografía, cuya alta eficiencia permitió recuperar el tamaño compacto

de la rueda original. Para no comprometer la fuerza total de empuje, se añadieron dos pares adicionales rotor-hélice en la base del chasis, adoptando una estructura de tipo hexacóptero en configuración hexa+ y con un arreglo de rotores PPNNPN, lo cual aporta robustez ante fallos en algunos rotores.

Los componentes mecánicos fueron rediseñados a nivel de detalle, considerando su manufactura mediante procesos como moldeo por inyección e impresión 3D por modelado por deposición fundida (FDM), así como el empleo de componentes de maquinaría comerciales (sujetadores, ejes, anillos de retención, rodamientos, etc.), tal que permiten un ensamblaje modular, con el fin de facilitar su mantenimiento y reparación. Entre los elementos más innovadores se encuentra una rueda tipo mecanum sin marco, que aloja en su interior un sistema rotor-hélice. Adicionalmente, los soportes de los rodillos integran un mecanismo de bloqueo y liberación tipo trinquete, el cual permite, mediante la orientación de la rueda, alternar entre un modo de rueda convencional (mejorando la tracción) y uno omnidireccional.

Asimismo, se incorporaron extremidades tipo cuadrúpedo con configuración mamífera, dimensionadas mediante un análisis de equilibrio estático y bajo condiciones de marcha dinámica. Estas extremidades permiten funciones adicionales como ajuste de altura, anchura, suspensión activa y reconfiguración morfológica entre modos de locomoción, necesarias para sobrepasar obstáculos en el camino y desplazarse en entornos no estrucutrados, mejorando su movilidad.

El sistema electrónico seleccionado cumple con los requerimientos de sensado necesarios para tareas de búsqueda y rescate (búsqueda, reconocimiento y mapeo), integrando además unidades de control capaces de procesar información *in situ*, permitir una operación teleoperada o autónoma, así como desarrollar tareas y aplicaciones avanzadas mediante la implementación del sistema operativo de robots (ROS). En cuanto al sistema de alimentación, se emplearon baterías de polímero de litio (Li-Po) y de ion de litio (Li-ion), seleccionadas conforme a la demanda de corriente promedio de los actuadores y electrónica, optimizando la relación entre costo, capacidad y rendimiento. Este rediseño consolidó un avance integral en términos de versatilidad, modularidad y viabilidad de fabricación del sistema robótico multimodal.

Diseño final: Con un diseño más avanzado del prototipo y sus subsistemas mecánico y electrónico, se procedió a la selección de materiales, evaluando candidatos pertenecientes a las familias de termoplásticos y elastómeros. Para componentes estructurales, se eligió el termoplástico PEEK, debido a su elevada resistencia específica, alto límite elástico, excelente comportamiento térmico (alta temperatura de servicio y autoextinguible) y su resistencia química ante agentes externos como agua dulce, agua salada y solventes, condiciones comunes en escenarios de desastre o durante procesos de limpieza y descontaminación.

En cuanto al material de los rodillos, se seleccionó caucho de poliuretano, tras evaluar propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, tenacidad, adherencia, abrasión y desgaste. Estas selecciones fueron validadas en el software de Solidworks mediante análisis estructurales aplicados a los componentes críticos, como rodillos y ruedas, en los que las cargas se sobredimensionaron hasta tres veces su valor nominal. Los factores de seguridad obtenidos fueron iguales o superiores a 3, lo cual indica que se tiene una estructura robusta ante colisiones e impactos moderados, sin comprometer la integridad de los componentes

internos. Adicionalmente, los altos factores de seguridad obtenidos permiten redimensionar o rediseñar las piezas estructurales correspondientes a fin de reducir el peso del prototipo.

Aunque el chasis fue rediseñado para alojar internamente los componentes electrónicos, actualmente no incorpora protección contra el ingreso de sólidos y líquidos, aspecto a considerar en futuras iteraciones, contemplando juntas tóricas, personalizadas o sobremoldeo, así como tornillos formadores de rosca trilobulares [217]. Por otro lado, se destaca la simetría estructural, que, junto con la propiedad holonómica de los sistemas de locomoción, permite tiempos de actuación más rápidos al evitar la necesidad de reorientación previa. En caso de una inversión accidental de la estructura, la combinación entre el rango de movimiento de las extremidades, actuadores y los datos de los sensores inerciales permiten su reorientación.

Análisis de resultados: Debido a la alta complejidad en las interacciones del sistema de bloqueo y liberación de los rodillos, su incorporación en el análisis dinámico no fue viable, ya que el elevado costo computacional ocasionaba fallos de ejecución en SolidWorks, impidiendo completar la configuración de las simulaciones. Esta misma situación se presentó al intentar asignar elementos de contacto entre los rodillos, la estructura del robot y las superficies irregulares del terreno simulado (obstáculos y escalones).

En consecuencia, se optó por simplificar el modelo, omitiendo los mecanismos de maquinaria y los sistemas de bloqueo/liberación, lo que permitió realizar simulaciones centradas en el comportamiento omnidireccional del robot, la cinemática de sus extremidades y la capacidad de vuelo según las fuerzas de empuje generadas. Asimismo, la ausencia de la implementación del sistema de bloqueo para los rodillos impidió que las ruedas funcionaran en modo convencional, lo cual provocó deslizamientos laterales en superficies inclinadas, haciendo que el robot descendiera. Por esta razón, y debido a que no se implementó un control en lazo cerrado, las pruebas de desplazamiento se limitaron a una superficie plana.

En el estudio de movimiento se incluyeron parámetros como motores para movimientos angulares de servomotores y ruedas, aplicación de pares de torsión, fuerzas lineales, fuerzas de contacto y gravedad. Esta configuración fue exportada al software ADAMS, donde se integraron marcadores y herramientas de medición para validar que las variables analizadas se mantuvieran dentro de los límites operativos establecidos.

Se diseñó una secuencia de movimientos que permitió verificar el desempeño omnidireccional de las ruedas, confirmando que los pares de torsión requeridos se encontraban dentro de los valores nominales especificados para los motores. Asimismo, se validó la consistencia entre las velocidades angulares de las ruedas y las velocidades lineales del cuerpo del robot, conforme al modelo cinemático desarrollado previamente. Si bien no se implementó un análisis de movimiento en su configuración de péndulo invertido sobre dos ruedas por cuestiones de tiempo, los actuadores se diseñaron para ser capaces de operar en dicha configuración.

En cuanto a los servomotores ubicados en la base (articulación de cadera), se determinó que deben ser redimensionados para soportar las diversas posturas del sistema, o bien, reducir la masa estructural del robot. No obstante, se validó la cinemática directa e inversa de la configuración cuadrúpeda, determinando los valores requeridos para la reconfiguración en modo terrestre y aérea, así como adoptar una postura en específico entre el cuerpo y las extremidades.

Por último, se comprobó que la fuerza de empuje generada por las seis hélices es suficiente

para permitir el despegue y la ejecución de operaciones aéreas básicas.

Conclusiones generales: El desarrollo de este prototipo virtual de robot con locomoción híbrida permitió validar, mediante análisis estructurales, cinemáticos y dinámicos, el cumplimiento de los requerimientos funcionales y las restricciones de diseño definidas. El diseño resultante es innovador en diversos aspectos, desde la integración de tres mecanismos de locomoción (ruedas, extremidades y multi-rotores), así como en el diseño de una rueda con capacidad de operación omnidireccional y convencional. Si bien, la complejidad del diseño y las limitaciones de hardware no permitieron un análisis completo del ensamble, esto se solventó realizando simplificaciones y análisis individuales.

Los análisis de esfuerzos confirmaron la adecuada selección de los materiales para los componentes estructurales, destacando la resistencia del PEEK en las bases de rueda y soportes de rodillo, el caucho de poliuretano en los rodillos, y el acero templado AISI 4140 en el eje. No obstante, el análisis de impacto en caída libre evidenció la necesidad de integrar mecanismos de absorción de impactos para proteger los componentes internos en escenarios de aterrizaje forzado. Asimismo, debido a los altos factores de seguridad obtenidos a partir de un sobredimensionamiento en las cargas aplicadas a las estructuras, es viable reducir la masa del robot. Esto se puede realizar empleando materiales menos densos como el PEI, rediseñando los componentes estructurales mediante un enfoque de optimización topológica o buscando fuentes de alimentación con mayor densidad de energía.

Por su parte, el análisis en ADAMS/View permitió evaluar la dinámica del robot y simular tres modos operativos del robot, validando su movilidad omnidireccional, el movimiento de sus articulaciones y extremidades para modificar su forma y adaptarse en terrenos irregulares, así como su capacidad de sustentación en modo aéreo. Asimismo, se demostró la viabilidad del diseño durante la reconfiguración entre sistemas de locomoción y se identificaron áreas susceptibles de rediseño, especialmente en las articulaciones sometidas a altos pares de torsión.

En conjunto, los resultados obtenidos validan el comportamiento integral del prototipo en un entorno virtual controlado. Si bien, se contempló realizar simulaciones en entornos propios de desastre, los tiempos debido al rediseño, los costos computacionales, así como las simplificaciones realizadas en los ensambles, limitaron la operación del comportamiento del robot para un análisis de movimiento completo. Por ello no se invirtió tiempo en considerar otros simuladores que si bien presentan motores de física para las interacciones entre componentes, su principal objetivo es evaluar algoritmos de control, percepción y navegación, y no evaluar las dinámicas asociadas como lo hace ADAMS/View, al menos durante esta etapa de desarrollo del prototipo.

7.2. Trabajo futuro

Con la finalidad de dar seguimiento al trabajo desarrollado, así como de una retroalimentación de los resultados obtenidos y áreas de oportunidad detectados, a continuación se plantean algunos trabajos o puntos de mejora a abordar:

- **Optimización estructural**: Se propone realizar un estudio de optimización topológica considerando diversos objetivos (masa, rigidez, viabilidad de manufactura, costo) a fin de

reducir la masa actual de robot y mejorar la autonomía del mismo, así como incorporar elementos flexibles que funjan como sellos y provean de hermeticidad al interior.

- **Simulaciones avanzadas**: Se propone una evaluación más detallada de criterios de fallo aplicables a materiales poliméricos, particularmente termoplásticos y elastómeros, dado que las simulaciones realizadas en SolidWorks se restringen al criterio de von Mises, adecuado principalmente para materiales dúctiles como los metales. Para ello, se plantea realizar una investigación acerca del uso de criterios de fallo más representativos, así como su validación en plataformas avanzadas como Abaqus, ANSYS o COMSOL Multiphysics, que permiten análisis no lineales bajo condiciones multiaxiales. Asimismo, se sugiere incorporar en las simulaciones condiciones realistas de operación (temperatura, presión, humedad o agentes químicos) con el fin de evaluar integralmente la resistencia y confiabilidad de los componentes poliméricos en escenarios de búsqueda y rescate.

- **Validación en entornos de desastre**: Para una validación más completa en entornos de desastre, se propone una vez optimizado el diseño mecánico del prototipo, preservando sus funcionalidades operativas, exportarlo a un formato de descripción del robot (URDF). Esto permitiría su integración en simuladores avanzados y la generación de escenarios de prueba que sigan los lineamientos de las normas ASTM o los sugeridos en la RoboCup. De manera complementaria, será necesario acondicionar los sensores integrados y desarrollar algoritmos de control en lazo cerrado, tanto cinemáticos como dinámicos, junto con módulos de percepción, navegación y, eventualmente, coordinación entre enjambres de robots.

  Asimismo, la complejidad estructural y la versatilidad del prototipo hacen necesario implementar estrategias de control jerárquico. Dicho enfoque puede considerar un nivel bajo orientado al accionamiento de los actuadores, un nivel intermedio dedicado a la ejecución de tareas preprogramadas (como la transición terrestre–aérea o viceversa), y un nivel robusto/adaptativo que permita responder a irregularidades o perturbaciones del entorno. Finalmente, un control de nivel superior podría realizar planificación de trayectorias a partir de la información proveniente de los sensores. Este planteamiento abre diversas líneas de investigación en control, percepción y coordinación multi-robot aplicables a escenarios de búsqueda y rescate.

- **Prototipado físico y evaluación experimental**: Desarrollar un prototipo físico funcional que permita validar los resultados obtenidos en simulación, iniciando con pruebas de laboratorio en un prototipo a escala y posteriormente en entornos no estructurados. Para ello será necesario seguir pautas de diseño para ensamble y considerar tolerancias geométricas y dimensionales acordes con los procesos de fabricación seleccionados, asegurando un comportamiento lo más parecido entre el prototipo y el modelo virtual.

Apéndice A1

Apéndices

A1.1. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 1

Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 1

Figura A1.1: QR para el video de la simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 1.

A1.2. Simulación del mecanismo de reconfiguración en la rueda del diseño 2

Simulación del mecanismo de reconfiguración en la rueda del diseño 2

Figura A1.2: QR para el video de la simulación del mecanismo de reconfiguración en la rueda del diseño 2.

A1.3. Simulación de la reconfiguración entre modo aéreo y terrestre del diseño 2

Simulación de la reconfiguración entre modo aéreo y terrestre del diseño 2

Figura A1.3: QR para el video de la simulación del mecanismo de reconfiguración entre modo aéreo y terrestre del diseño 2.

A1.4. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 2

Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 2

Figura A1.4: QR para el video de la simulación de movimiento omnidireccional del diseño 2.

A1.5. Simulación del funcionamiento del sistema de bloqueo liberación de los rodillos en el diseño 3

Simulación del funcionamiento del sistema de bloqueo liberación de los rodillos en el diseño 3



Figura A1.5: QR para el video de la Simulación del funcionamiento del sistema de bloqueo liberación de los rodillos en el diseño 3.

A1.6. Simulación de funcionamiento del ensamble de la rueda completa bajo acción de la gravedad y contacto entre elementos

Simulación de funcionamiento del ensamble de la rueda completa bajo acción de la gravedad y contacto entre elementos



Figura A1.6: QR para el video de la simulación de funcionamiento del ensamble de la rueda completa bajo acción de la gravedad y contacto entre elementos del diseño 3.

A1.7. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 3

Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional para el diseño 3



Figura A1.7: QR para el video de la simulación de movimiento omnidireccional del diseño 3.

A1.8. Simulación de movimiento aéreo para el diseño 3

Simulación de movimiento aéreo para el diseño 3



Figura A1.8: QR para el video de la simulación de movimiento aéreo del diseño 3.

A1.9. Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional, extremidades y aéreo para el diseño final

Simulación de secuencias de movimiento omnidireccional, extremidades y aéreo para el diseño final



Figura A1.9: QR para el video de la simulación de secuencias de movimiento omnidireccional, extremidades y aéreo para el diseño final.

A1.10. Carpeta con los reportes de análisis estructurales

Carpeta con los reportes de análisis estructurales



Figura A1.10: QR para la carpeta con los reportes de análisis estructurales.

Bibliografía

[1] IFRC. What is a disaster? Sitio Web, Noviembre 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/. [Fecha de acceso: 4 de noviembre del 2015].

[2] D. Delforge, R. Below, V. Wathelet, J. V. Loenhout, and N. Speybroeck. "2023 disaster in numbers". Reporte técnico, Institute Health and Society - UCLouvain, 2023. [En línea]. Disponible en: https://files.emdat.be/reports/2023_EMDAT_report.pdf. [Fecha de acceso: 20 de febrero del 2025].

[3] R.R. Murphy, S. Tadokoro, D. Nardi, A. Jacoff, P. Fiorini, H. Choset, and A. M. Erkmen. Search and rescue robotics. In *Springer Handbook of Robotics*, chapter 50, pages 1151–1173. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

[4] Robin R. Murphy. *Disaster Robotics*. The MIT Press, 2014.

[5] A. Davids. Urban search and rescue robots: from tragedy to technology. *Intelligent Systems, IEEE*, 17(2):81–83, March 2002.

[6] Robin R. Murphy, Jenn Casper, and Mark Micire. *Potential Tasks and Research Issues for Mobile Robots in RoboCup Rescue*, pages 339–344. Springer Berlin Heidelberg, 2001.

[7] N. Sato, F. Matsuno, and N. Shiroma. Fuma : Platform development and system integration for rescue missions. In *Safety, Security and Rescue Robotics, 2007. SSRR 2007 IEEE International Workshop on*, pages 1–6, Rome, September 2007. IEEE.

[8] H. Xu, D. Tan, Z. Zhang, K. Xue, and B. Jin. A reconfigurable mobile robot with 5th wheel. In *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on*, pages 211–216, Changchun, August 2009. IEEE.

[9] Chenghui Nie, Guillaume Hauschka, and Matthew Spenko. Design and experimental characterization of an omnidirectional unmanned ground vehicle for outdoor terrain. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2012, 14-18 May, 2012, St. Paul, Minnesota, USA*, pages 4016–4021, Saint Paul, Minnesota, USA, May 2012. IEEE.

[10] K. Tabata, A. Inaba, and H. Amano. Development of a transformational mobile robot to search victims under debris and rubble. 2nd report: improvement of mechanism and

interface. In *Safety, Security and Rescue Robotics, Workshop, 2005 IEEE International*, pages 19–24, Kobe, June 2005. IEEE.

[11] M.W. Kadous, R.K. Sheh, and C. Sammut. Caster: A robot for urban search and rescue. In *in Australasian Conference on Robotics and Automation*, pages 1–10, Sydney, Australia, 2005.

[12] H. Zhang, W. Wang, Z. Deng, G. Zong, and J. Zhang. A novel reconfigurable robot for urban search and rescue. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 3(4):359–366, 2006.

[13] H.X. Zhang, S.Y. Chen, W. Wang, J.W. Zhang, and G.H. Zong. Runtime reconfiguration of a modular mobile robot with serial and parallel mechanisms. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 2999–3004, San Diego, CA, October 2007. IEEE.

[14] H.X. Zhang, W. Wang, J.W. Zhang, and G.H. Zong. *A Novel Modular Mobile Robot Prototype for Urban Search and Rescue*, chapter Service Robot Applications, pages 215–234. InTech, 2008.

[15] D. Lu, E. Dong, C. Liu, M. Xu, and J. Yang. Design and development of a legwheel hybrid robot hytroi. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 6031–6036, Tokyo, Japan, November 2013. IEEE.

[16] Kenjiro Tadakuma, Riichiro Tadakuma, Akira Maruyama, Eric Rohmer, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida, Aigo Ming, Makoto Shimojo, Mitsuru Higashimori, and Makoto Kaneko. Mechanical design of the wheel-leg hybrid mobile robot to realize a large wheel diameter. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3358–3365, Taipei, Taiwan, October 2010. IEEE.

[17] G. Bayar, A.B. Koku, and E.I. Konukseven. Comorat: A configurable all terrain mobile robot. In *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation*, volume 11, pages 507–512, Istanbul, Turkey, 2009. WEAS Press.

[18] S. Weiyan, Q.F. Yang, and C. Zhengshuhua. Structure design and performance analysis for locomotion system of the field exploration robot. *WSEAS Transactions on Systems*, 10(10):331–341, October 2011.

[19] B. Aisham, Q. Bakhsh, K. Hasnan, and A. Ahmed. Design and control architecture of a small mobile robot with hybrid locomotion system. *Applied Mechanics and Materials*, 598:619–622, July 2014.

[20] K. Hasnan, Q. Bakhsh, and A. Ahmed. New hybrid locomotion system design. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(4):247–252, April 2014.

[21] Francois Michaud, Martin Arsenault, Yann Bergeron, Richard Cadrin, Frederic Gagnon, Marc-Antoine Legault, Mathieu Millette, Jean-Francois Pare, Marie-Christine Tremblay, Dominic Letourneau, Pierre Lepage, Yan Morin, Serge Caron, and Jonathan Bisson. Codesign of azimut: A multi-modal robotic platform. In *Volume 1: 23rd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B*, IDETC-CIE2003, pages 801–810. ASMEDC, 2003.

[22] Arash Kalantari and Matthew Spenko. Design and prototyping of a walking quadrotor. In *Volume 4: 36th Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B*, IDETC-CIE2012, pages 1067–1072. American Society of Mechanical Engineers, 2012.

[23] A. Kalantari and M. Spenko. Design and experimental validation of hytaq, a hybrid terrestrial and aerial quadrotor. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 4445–4450, Karlsruhe, May 2013. IEEE.

[24] K. Kawasaki, M. Zhao, K. Okada, and M. Inaba. Muwa: Multi-field universal wheel for air-land vehicle with quad variable-pitch propellers. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1880–1885, Tokyo, Japan, November 2013. IEEE.

[25] D.S. Ignatova and R.K. Oransky. Mechatronical approach to investigations of rescue operations. In *MECHATRONIKA, 2011 14th International Symposium*, pages 103–108, Trencianske Teplice, June 2011. IEEE.

[26] J.H. Carvajal. Metodologia de diseño mecatrónico de robots. *Épsilon*, 1(4):91–101, 2005.

[27] N. Cross. *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Wiley, 3rd edition, 2008.

[28] A.A.F. Nassiraei and K. Ishii. How does "intelligent mechanical design concept" help us to enhance robot's function? In A. Budiyono, B. Riyanto, and E. Joelianto, editors, *Intelligent Unmanned Systems: Theory and Applications*, volume 192 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 155–178. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[29] E. Haug, J. Kuhl, and F. Tsai. Virtual prototyping for mechanical system concurrent engineering. In E. Haug, editor, *Concurrent Engineering: Tools and Technologies for Mechanical System Design*, volume 108 of *NATO ASI Series*, pages 851–879. Springer Berlin Heidelberg, 1993.

[30] F.W. Liou. *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*. Mechanical Engineering. CRC Press, 2007.

[31] K.H. Chang. *e-Design: Computer-Aided Engineering Design*. Elsevier Science, 2015.

[32] Chenghui Nie, Xavier Pacheco Corcho, and Matthew Spenko. Robots on the move: Versatility and complexity in mobile robot locomotion. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 20:72–82, 2013.

[33] Richard Lock, Stuart Burgess, and Ravi Vaidyanathan. Multi-modal locomotion: from animal to application. *Bioinspiration and Biomimetics*, 9(1):011001, 12 2013.

[34] Patrick F. Muir and Charles P. Neuman. Kinematic modeling of wheeled mobile robots. *Journal of Robotic Systems*, 4(2):281–340, 1987.

[35] Roland Siegwart, Illah R. Nourbakhsh, and Davide Scaramuzza. *Introduction to autonomous mobile robots*. Intelligent robotics and autonomous agents. MIT Press, 2nd ed edition, 2011.

[36] Oussama Khatib Bruno Siciliano, editor. *Springer Handbook of Robotics*. Springer International Publishing, 2016.

[37] R. Hollis. Ballbots. *Scientific American*, 295(4):72–77, October 2006.

[38] L. Bruzzone and G. Quaglia. Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments. *Mechanical Sciences*, 3:49–62, July 2012.

[39] S.H. Lim and J. Teo. Recent advances on locomotion mechanisms of hybrid mobile robots. *WSEAS Transactions on Systems*, 14:11–25, 2015.

[40] Luca Bruzzone, Shahab Edin Nodehi, and Pietro Fanghella. Tracked locomotion systems for ground mobile robots: A review. *Machines*, 10(8):648, 2022.

[41] *Walking Robots*, pages 3–32. Springer London, London, 2006.

[42] Abhijit Mahapatra, Shibendu Shekhar Roy, and Dilip Kumar Pratihar. *Introduction*, pages 1–9. Springer Singapore, 2020.

[43] Zaineb Wared Matteb, Sadeq Hussein Bakhy, and Nabil Hassan Hadi. Advancements in legged walking robots: Review. *Iraqi Journal of Computers, Communications, Control and Systems Engineering*, pages 1–15, 2024.

[44] Priyaranjan Biswal and Prases K. Mohanty. Development of quadruped walking robots: A review. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2):2017–2031, 2021.

[45] Hui Chai, Yibin Li, Rui Song, Guoteng Zhang, Qin Zhang, Song Liu, Jinmian Hou, Yaxian Xin, Ming Yuan, Guoxuan Zhang, and Zhiyuan Yang. A survey of the development of quadruped robots: Joint configuration, dynamic locomotion control method and mobile manipulation approach. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2(1):100029, 2022.

[46] Yanan Fan, Zhongcai Pei, Chen Wang, Meng Li, Zhiyong Tang, and Qinghua Liu. A review of quadruped robots: Structure, control, and autonomous motion. *Advanced Intelligent Systems*, 6(6), 2024.

[47] Yuhai Zhong, Runxiao Wang, Huashan Feng, and Yasheng Chen. Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(3), 2019.

[48] Francois Michaud, Dominic Letourneau, Martin Arsenault, Yann Bergeron, Richard Cadrin, Frederic Gagnon, Marc-Antoine Legault, Mathieu Millette, Jean-Francois Pare, Marie-Christine Tremblay, Pierre Lepage, Yan Morin, and Serge Caron. Azimut: a multimodal locomotion robotic platform. In Grant R. Gerhart, Charles M. Shoemaker, and Douglas W. Gage, editors, *Unmanned Ground Vehicle Technology V*, volume 5083, page 101. SPIE, 2003.

[49] A. G. Korchenko and O. S. Illyash. The generalized classification of unmanned air vehicles. In *2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD)*, pages 28–34. IEEE, 2013.

[50] Paulo L. J. Drews, Armando Alves Neto, and Mario F. M. Campos. Hybrid unmanned aerial underwater vehicle: Modeling and simulation. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4637–4642. IEEE, 2014.

[51] Wilfried Adoni, Sandra Lorenz, Junaidh Fareedh, Richard Gloaguen, and Michael Bussmann. Investigation of autonomous multi-uav systems for target detection in distributed environment: Current developments and open challenges. *Drones*, 7(4):263, 2023.

[52] Mahmood Shafiee, Zeyu Zhou, Luyao Mei, Fateme Dinmohammadi, Jackson Karama, and David Flynn. Unmanned aerial drones for inspection of offshore wind turbines: A mission-critical failure analysis. *Robotics*, 10(1):26, 2021.

[53] Cason Butler and Mark Costello. Vehicle design in aerial robotics. *Current Robotics Reports*, 2(4):415–426, 2021.

[54] Xidong Zhou, Hang Zhong, Hui Zhang, Wei He, Hean Hua, and Yaonan Wang. Current status, challenges, and prospects for new types of aerial robots. *Engineering*, 41:19–34, 2024.

[55] Karishma Patnaik and Wenlong Zhang. Towards reconfigurable and flexible multirotors: A literature survey and discussion on potential challenges. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 5(3):365–380, 2021.

[56] Auke J. Ijspeert. Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile locomotion. *Science*, 346(6206):196–203, 2014.

[57] Robert Siddall and Mirko Kovac. *Bioinspired Aerial Robots*, pages 1–12. Springer Berlin Heidelberg, 2020.

[58] Yaguang Zhu, Poramate Manoonpong, and Qiao Hu. Editorial: Multimodal behavior from animals to bio-inspired robots. *Frontiers in Neurorobotics*, 17, Zhu2023.

[59] Stefano Mintchev and Dario Floreano. Adaptive morphology: A design principle for multimodal and multifunctional robots. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 23(3):42–54, 2016.

[60] Matteo Russo and Marco Ceccarelli. A survey on mechanical solutions for hybrid mobile robots. *Robotics*, 9(2):32, 2020.

[61] Jane Pauline Ramirez and Salua Hamaza. Multimodal locomotion: Next generation aerial-terrestrial mobile robotics. *Advanced Intelligent Systems*, 2023.

[62] F. Kadar and M. O. Tătar. *A Review on Mobile Robots with Multimodal Locomotion*, pages 337–349. Springer International Publishing, 2023.

[63] Zi Yue Wu, Jie Qi, and Shuai Zhang. Design of a wheel-propeller integrated amphibious robot and hydrodynamic analysis. *Applied Mechanics and Materials*, 421:50–55, 2013.

[64] Bir Bikram Dey, Sandeep Manjanna, and Gregory Dudek. Ninja legs: Amphibious one degree of freedom robotic legs. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5622–5628. IEEE, 2013.

[65] Yi Sun and Shugen Ma. epaddle mechanism: Towards the development of a versatile amphibious locomotion mechanism. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5035–5040. IEEE, 2011.

[66] K. Karakasiliotis, R. Thandiackal, K. Melo, T. Horvat, N. K. Mahabadi, S. Tsitkov, J. M. Cabelguen, and A. J. Ijspeert. From cineradiography to biorobots: an approach for designing robots to emulate and study animal locomotion. *Journal of The Royal Society Interface*, 13(119):20151089, 2016.

[67] Max Polzin, Qinghua Guan, and Josie Hughes. Robotic locomotion through active and passive morphological adaptation in extreme outdoor environments. *Science Robotics*, 10(99), 2025.

[68] Avi Cohen and David Zarrouk. Design, analysis and experiments of a high-speed water hovering amphibious robot: Amphistar. *IEEE Access*, 11:80874–80885, 2023.

[69] Minghai Xia, Qunwei Zhu, Qian Yin, Zhongyue Lu, Yiming Zhu, and Zirong Luo. Hydrodynamic simulation and experiment of a self-adaptive amphibious robot driven by tracks and bionic fins. *Biomimetics*, 9(10):580, 2024.

[70] R Siddall and M Kovač. Launching the aquamav: bioinspired design for aerial–aquatic robotic platforms. *Bioinspiration and Biomimetics*, 9(3):031001, 2014.

[71] Yufeng Chen, E. Farrell Helbling, Nick Gravish, Kevin Ma, and Robert J. Wood. Hybrid aerial and aquatic locomotion in an at-scale robotic insect. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 331–338. IEEE, 2015.

[72] Yufeng Chen, Hongqiang Wang, E. Farrell Helbling, Noah T. Jafferis, Raphael Zufferey, Aaron Ong, Kevin Ma, Nicholas Gravish, Pakpong Chirarattananon, Mirko Kovac, and Robert J. Wood. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic microrobot. *Science Robotics*, 2(11), 2017.

[73] Matthew A. Woodward and Metin Sitti. Multimo-bat: A biologically inspired integrated jumping–gliding robot. *The International Journal of Robotics Research*, 33(12):1511–1529, 2014.

[74] Mirko Kovač, Jean-Christophe Zufferey, and Dario Floreano. *Towards a Self-Deploying and Gliding Robot*, pages 271–284. Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[75] Daler Ludovic. *Adaptive Morphology for Multi-Modal Locomotion*. PhD thesis, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2015.

[76] Won Dong Shin, Jaejun Park, and Hae-Won Park. Development and experiments of a bio-inspired robot with multi-mode in aerial and terrestrial locomotion. *Bioinspiration and Biomimetics*, 14(5):056009, 2019.

[77] Song Li, Fangyuan Liu, Xin Dong, Jinwu Xiang, Daochun Li, Pakpong Chirarattananon, and Zhan Tu. Reciprocal actuation core and modular robotic limbs for flying, swimming and running. *Communications Engineering*, 4(1), 2025.

[78] Katsuaki Tanaka, Di Zhang, Sho Inoue, Ritaro Kasai, Hiroya Yokoyama, Koki Shindo, Ko Matsuhiro, Shigeaki Marumoto, Hiroyuki Ishii, and Atsuo Takanishi. A design of a small mobile robot with a hybrid locomotion mechanism of wheels and multi-rotors. In *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pages 1503–1508. IEEE, 2017.

[79] Moyuru Yamada, Manabu Nakao, Yoshiro Hada, and Naoyuki Sawasaki. Development and field test of novel two-wheeled uav for bridge inspections. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 1014–1021. IEEE, 2017.

[80] Ruibin Zhang, Yuze Wu, Lixian Zhang, Chao Xu, and Fei Gao. Autonomous and adaptive navigation for terrestrial-aerial bimodal vehicles, 2021.

[81] Jared R. Page and Paul E. I. Pounds. The quadroller: Modeling of a uav/ugv hybrid quadrotor. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4834–4841. IEEE, 2014.

[82] Eran Gefen and David Zarrouk. Flying star2, a hybrid flying driving robot with a clutch mechanism and energy optimization algorithm. *IEEE Access*, 10:115491–115502, 2022.

[83] David Zarrouk, Andrew Pullin, Nick Kohut, and Ronald S. Fearing. Star, a sprawl tuned autonomous robot. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 20–25. IEEE, 2013.

[84] Nir Meiri and David Zarrouk. Flying star, a hybrid crawling and flying sprawl tuned robot. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5302–5308. IEEE, 2019.

[85] Nitzan Ben David and David Zarrouk. Design and analysis of fcstar, a hybrid flying and climbing sprawl tuned robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4):6188–6195, 2021.

[86] Ke Shi, Zainan Jiang, Liyan Ma, Le Qi, and Minghe Jin. Mtabot: An efficient morphable terrestrial-aerial robot with two transformable wheels. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(2):1875–1882, 2024.

[87] Junxiao Lin, Ruibin Zhang, Neng Pan, Chao Xu, and Fei Gao. Skater: A novel bi-modal bi-copter robot for adaptive locomotion in air and diverse terrain. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(7):6392–6399, 2024.

[88] Muqing Cao, Xinhang Xu, Shenghai Yuan, Kun Cao, Kangcheng Liu, and Lihua Xie. Doublebee: A hybrid aerial-ground robot with two active wheels. In *2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 6962–6969. IEEE, 2023.

[89] Disney Research Zurich. Vertigo - a wall-climbing robot including ground-wall transition. Sitio Web, Diciembre 2015. [En línea]. Disponible en: https://la.disneyresearch.com/publication/vertigo/. [Fecha de acceso: 4 de Octubre del 2016].

[90] Stella Latscha, Michael Kofron, Anthony Stroffolino, Lauren Davis, Gabrielle Merritt, Matthew Piccoli, and Mark Yim. Design of a hybrid exploration robot for air and land deployment (h.e.r.a.l.d) for urban search and rescue applications. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1868–1873. IEEE, 2014.

[91] Daoxun Zhang, Ce Guo, Haoran Ren, Pengming Zhu, Ming Xu, and Huimin Lu. The design of an aerial/ground dual-modal mobile robot for exploring complex environments. In *2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, pages 393–398. IEEE, 2021.

[92] Daoxun Zhang, Ming Xu, Pengming Zhu, Ce Guo, Zhengyu Zhong, Huimin Lu, and Zhiqiang Zheng. The development of a novel terrestrial/aerial robot: autonomous quadrotor tilting hybrid robot. *Robotica*, 42(1):118–138, Zhang2023.

[93] Xinyu Zhang, Yuanhao Huang, Kangyao Huang, Xiaoyu Wang, Dafeng Jin, Huaping Liu, and Jun Li. A multi-modal deformable land-air robot for complex environments, 2022.

[94] Teodoro Dias and Meysam Basiri. Bogiecopter: A multi-modal aerial-ground vehicle for long-endurance inspection applications. In *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2023.

[95] Chinthaka Premachandra, Masahiro Otsuka, Ryo Gohara, Takao Ninomiya, and Kiyotaka Kato. A study on development of a hybrid aerial terrestrial robot system for avoiding ground obstacles by flight. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6(1):327–336, 2019.

[96] Marco Ceccarelli, Daniele Cafolla, Matteo Russo, and Giuseppe Carbone. Heritagebot platform for service in cultural heritage frames. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(4), 2018.

[97] Mark Pitonyak and Ferat Sahin. A novel hexapod robot design with flight capability. In *2017 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*, pages 1–6. IEEE, 2017.

[98] Wenjuan Ouyang, Haozhen Chi, Leifeng Lu, Chao Wang, and Qinyuan Ren. Motion control of a hybrid quadruped-quadrotor robot. *Actuators*, 13(6):215, 2024.

[99] W. R. T. Roderick, M. R. Cutkosky, and D. Lentink. Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments. *Science Robotics*, 6(61), 2021.

[100] Kyunam Kim, Patrick Spieler, Elena-Sorina Lupu, Alireza Ramezani, and Soon-Jo Chung. A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard. *Science Robotics*, 6(59), 2021.

[101] Xianwu Zeng, Lishu Huang, Guoteng Zhang, and Yibin Li. Kou-iii: A bipedal robot with quadrotor-assisted locomotion. *Mechatronics*, 107, 2025.

[102] He Wang, Jiadong Shi, Jianzhong Wang, Hongfeng Wang, Yiming Feng, and Yu You. Design and modeling of a novel transformable land/air robot. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019:1–10, 2019.

[103] Changlong Ye, Hongyu Wang, Suyang Yu, Xinyu Ma, and Ruizhe Zhou. Design and implementation of a land-air omnidirectional mobile robot. *Aerospace*, 11(7):576, 2024.

[104] Eric Sihite, Arash Kalantari, Reza Nemovi, Alireza Ramezani, and Morteza Gharib. Multi-modal mobility morphobot (m4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement. *Nature Communications*, 14(1), 2023.

[105] Ioannis Mandralis, Reza Nemovi, Alireza Ramezani, Richard M. Murray, and Morteza Gharib. Atmo: an aerially transforming morphobot for dynamic ground-aerial transition. *Communications Engineering*, 4(1), 2025.

[106] Qing Chang, Biao Yu, Hongwei Ji, Haifeng Li, Tiantian Yuan, Xiangyun Zhao, Hongsheng Ren, and Jinhao Zhan. Design and control of a reconfigurable robot with rolling and flying locomotion. *Actuators*, 13(1):27, 2024.

[107] R. Murphy, J. Casper, J. Hyams, M. Micire, and B. Minten. Mobility and sensing demands in usar. In *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000. 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies*, volume 1, pages 138–142. IEEE, 2000.

[108] James Wong; Cassandra Robinson; et al. Urban search and rescue technology needs: Identification of needs. techreport, The Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency and National Institute of Justice, 2004.

[109] C. Schlenoff and E. Messina. A robot ontology for urban search and rescue. In *Workshop on Research in Knowledge Representation for Autonomous Systems, part of the Association for Computing Machinery Conference on Information and Knowledge Management*, pages 1–9, Bremen, Germany, 2005.

[110] Craig Schlenoff, Elena Messina, Alan Lytle, Brian Weiss, and Ann Virts. *Test Methods and Knowledge Representation for Urban Search and Rescue Robots*, chapter 7, pages 151–188. IntechOpen, 2007.

[111] Daniela Doroftei, Anibal Matos, and Geert de Cubber. Designing search and rescue robots towards realistic user requirements. *Applied Mechanics and Materials*, 658:612–617, 2014.

[112] Frank E. Schneider and Dennis Wildermuth. Assessing the search and rescue domain as an applied and realistic benchmark for robotic systems. In *2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, pages 657–662. IEEE, 2016.

[113] Daniela Doroftei, Geert De Cubber, Rene Wagemans, Anibal Matos, Eduardo Silva, Victor Lobo, Guerreiro Cardoso, Keshav Chintamani, Shashank Govindaraj, Jeremi Gancet, and Daniel Serrano. *User-Centered Design*, chapter 2. IntechOpen, 2017.

[114] Ekaterina R. Stepanova, Markus von der Heyde, Alexandra Kitson, Thecla Schiphorst, and Bernhard E. Riecke. *Gathering and Applying Guidelines for Mobile Robot Design for Urban Search and Rescue Application*, pages 562–581. Springer International Publishing, 2017.

[115] Robert Bogue. Disaster relief, and search and rescue robots: the way forward. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 46(2):181–187, 2019.

[116] R. Chatterjee and F. Matsuno. Robot description ontology and disaster scene description ontology: analysis of necessity and scope in rescue infrastructure context. *Advanced Robotics*, 19(8):839–859, 2005.

[117] Elie Saad, Koen V. Hindriks, and Mark A. Neerincx. Ontology design for task allocation and management in urban search and rescue missions. In *Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pages 622–629. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2018.

[118] Kailin Tong, Yuxi Hu, Berin Dikic, Selim Solmaz, Friedrich Fraundorfer, and Daniel Watzenig. Robots saving lives: A literature review about search and rescue (sar) in harsh environments. In *2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 953–960. IEEE, 2024.

[119] Elena Messina and Adam Jacoff. Performance standards for urban search and rescue robots. In Grant R. Gerhart, Charles M. Shoemaker, and Douglas W. Gage, editors, *Unmanned Systems Technology VIII*, volume 6230, page 62301V. SPIE, 2006.

[120] Elena R. Messina and Adam S. Jacoff. Measuring the performance of urban search and rescue robots. In *2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, pages 28–33. IEEE, 2007.

[121] Adam Jacoff and Elena Messina. Urban search and rescue robot performance standards: progress update. In Grant R. Gerhart, Douglas W. Gage, and Charles M. Shoemaker, editors, *Unmanned Systems Technology IX*, volume 6561, page 65611L. SPIE, 2007.

[122] Adam Jacoff, Hui-Min Huang, Elena Messina, Ann Virts, and Anthony Downs. Comprehensive standard test suites for the performance evaluation of mobile robots. In *Proceedings of the 10th Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, PerMIS '10, pages 161–168. ACM, 2010.

[123] Adam Jacoff, Raymond Sheh, Ann-Marie Virts, Tetsuya Kimura, Johannes Pellenz, Sören Schwertfeger, and Jackrit Suthakorn. Using competitions to advance the development of standard test methods for response robots. In *Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, PerMIS'12, pages 182–189. ACM, 2012.

[124] ASTM International. E2801-11R20: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Gaps, 2020.

[125] ASTM International. E2802/E2802M-21E01: Standard Test Method for Evaluating Response Robot Mobility Using Variable Hurdle Obstacles, 2021.

[126] ASTM International. E2803-11R20: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Inclined Planes, 2020.

[127] ASTM International. E2804-11R20: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Confined Area Obstacles: Stairs/Landings, 2020.

[128] ASTM International. E2826/E2826M-20: Standard Test Method for Evaluating Response Robot Mobility Using Continuous Pitch/Roll Ramp Terrains, 2020.

[129] ASTM International. E2827/E2827M-20: Standard Test Method for Evaluating Response Robot Mobility Using Crossing Pitch/Roll Ramp Terrains, 2020.

[130] ASTM International. E2828/E2828M-20: Standard Test Method for Evaluating Response Robot Mobility Using Symmetric Stepfields Terrains, 2020.

[131] ASTM International. E2829-11R20: Standard Test Method for Evaluating Emergency Response Robot Capabilities: Mobility: Maneuvering Tasks: Sustained Speed, 2020.

[132] ASTM International. E2830-11R20: Standard Test Method for Evaluating the Mobility Capabilities of Emergency Response Robots Using Towing Tasks: Grasped Sleds, 2020.

[133] Yasuyoshi Yokokohji, Takashi Tubouchi, Akichika Tanaka, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi, Fumitoshi Matsuno, Shigeo Hirose, Hiroyuki Kuwahara, Fumiaki Takemura, Takao Ino, Kensuke Takita, Naoji Shiroma, Tetsushi Kamegawa, Yasushi Hada, Koichi Osuka, Taro Watasue, Tetsuya Kimura, Hiroaki Nakanishil, Yukio Horiguchi, Satoshi Tadokoro, and Kazunori Ohno. Guidelines for human interface design of rescue robots. In *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, pages 3455–3460. IEEE, 2006.

[134] Choon Yue Wong, Gerald Seet, and Siang Kok Sim. Multiple-robot systems for usar: Key design attributes and deployment issues. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 8(1), 2011.

[135] Jenay M. Beer, Arthur D. Fisk, and Wendy A. Rogers. Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. *J. Hum. Robot Interact.*, 3(2):74–99, 2014.

[136] George Adamides, Georgios Christou, Christos Katsanos, Michalis Xenos, and Thanasis Hadzilacos. Usability guidelines for the design of robot teleoperation: A taxonomy. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45(2):256–262, 2015.

[137] A. Hong, O. Igharoro, Y. Liu, F. Niroui, G. Nejat, and B. Benhabib. Investigating human-robot teams for learning-based semi-autonomous control in urban search and rescue environments. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 94(3–4):669–686, 2018.

[138] Ross D. Arnold, Hiroyuki Yamaguchi, and Toshiyuki Tanaka. Search and rescue with autonomous flying robots through behavior-based cooperative intelligence. *Journal of International Humanitarian Action*, 3(1), 2018.

[139] Junjie Chen, Shuai Li, Donghai Liu, and Xueping Li. Airobsim: Simulating a multisensor aerial robot for urban search and rescue operation and training. *Sensors*, 20(18):5223, 2020.

[140] Jason T. Isaacs, Kevin Knoedler, Andrew Herdering, Mishell Beylik, and Hugo Quintero. Teleoperation for urban search and rescue applications. *Field Robotics*, 2:1177–1190, 2022.

[141] Hareesh Chitikena, Filippo Sanfilippo, and Shugen Ma. Robotics in search and rescue (sar) operations: An ethical and design perspective framework for response phase. *Applied Sciences*, 13(3):1800, 2023.

[142] Adam Jacoff, Elena Messina, Hui-Min Huang, Ann Virts, Anthony Downs, Richard Norcross, and Raymond Sheh. DHS-NIST-ASTM Standard Test Methods for Response Robots: Guide for Evaluating, Purchasing, and Training with Response Robots Using DHS-NIST-ASTM International Standard Test Methods. Technical report, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2015. Sponsored by the U.S. Department of Homeland Security.

[143] R.S. Ortigoza, M.M. Aranda, G.S. Ortigoza, V.M.H. Guzman, M.A.M. Vilchis, G.S. Gonzalez, J.C.H. Lozada, and M.O. Carbajal. Wheeled mobile robots: A review. *Latin America Transactions, IEEE*, 10(6):2209–2217, December 2012.

[144] J. A. Tenreiro and M.F. Silva. An overview of legged robots. In *International Symposium on Mathematical Methods in Engineering*, Ankara, Turkey, 2006. Researchgate.

[145] Q. Bakhsh, K. Hasnan, and A. Ahmed. Comparative study between wheeled and tracked mobility system for mobile robot. *Applied Mechanics and Materials*, 393:538–543, September 2013.

[146] N.B. Ignell, N Rasmusson, and J Matsson. An overview of legged and wheeled robotic locomotion. mdh Icse12, 2012.

[147] Z. Wang and Gu H. A review of locomotion mechanisms of urban search and rescue robot. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(5):400–411, August 2007.

[148] K. Hasnan, Q. Bakhsh, A. Ahmed, B. Das, and S. Ayub. A novel hybrid locomotion mechanism for small mobile robot. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(17):1–5, August 2015.

[149] Robin R. Murphy. Trial by fire [rescue robots]. *IEEE Robotics Autom. Mag.*, 11(3):50–61, 2004.

[150] Geert De Cubber, Daniela Doroftei, Konrad Rudin, Karsten Berns, Anibal Matos, Daniel Serrano, Jose Sanchez, Shashank Govindaraj, Janusz Bedkowski, Rui Roda, Eduardo Silva, and Stephane Ourevitch. *Introduction to the Use of Robotic Tools for Search and Rescue*. InTech, 2017.

[151] Hartmut Surmann, Dominik Slomma, Stefan Grobelny, and Robert Grafe. Deployment of aerial robots after a major fire of an industrial hall with hazardous substances, a report. In *2021 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pages 40–47. IEEE, 2021.

[152] Hartmut Surmann, Dominik Slomma, Robert Grafe, and Stefan Grobelny. Deployment of aerial robots during the flood disaster in erftstadt / blessem in july 2021. In *2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, pages 97–102. IEEE, 2022.

[153] Hartmut Surmann, Kevin Daun, Marius Schnaubelt, Oskar von Stryk, Manuel Patchou, Stefan Böcker, Christian Wietfeld, Jan Quenzel, Daniel Schleich, Sven Behnke, Robert Grafe, Nils Heidemann, Dominik Slomma, and Ivana Kruijff-Korbayová. Lessons from robot-assisted disaster response deployments by the german rescue robotics center task force. *Journal of Field Robotics*, 41(3):782–797, 2023.

[154] Rejo Mathew, Pratik Jagtap, and Kingshuk Mitra. Ground robots for disaster response: A review. In *2023 11th International Symposium on Electronic Systems Devices and Computing (ESDC)*, pages 1–6. IEEE, 2023.

[155] V. Arunkumar, Devika Rajasekar, and N. Aishwarya. A review paper on mobile robots applications in search and rescue operations. In *International Conference on Future Technologies in Manufacturing, Automation, Design and Energy*, volume 130 of *ICOFT 2022*, pages 65–74. Trans Tech Publications Ltd, 2023.

[156] Antonios Samir Narouz, Abdallah Ismail, Ahmed Atef, Mohamed Magdy, Mina Abdallah, Mohamed Atwa, Sameh Shenoda, Mostafa Elsayed, Shehab Ayman, and Mohamed Ismail Ahmed. A review of features and characteristics of rescue robot with ai. *Advanced Sciences and Technology Journal*, 1(2):1–18, 2024.

[157] Ruchik Kashyapkumar Thaker. Robotics in disaster management: Ai-driven rescue, aerial mapping, and emerging iot applications for effective response. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Multidisciplinary Physical Sciences*, 12(6), 2024.

[158] David Greer, Phillip McKerrow, and Jo Abrantes. Robots in urban search and rescue operations. In Werner Friedrich and Patrick Lim, editors, *Australasian Conference on Robotics and Automation*, pages 25–30, 2002.

[159] Masahiko Onosato, Satoshi Tadokoro, Hiroaki Nakanishi, Kenzo Nonami, Kuniaki Kawabata, Yasushi Hada, Hajime Asama, Fumiaki Takemura, Kiyoshi Maeda, Kenjiro Miura, and Atsushi Yamashita. *Disaster Information Gathering Aerial Robot Systems*, pages 33–55. Springer London, 2009.

[160] Marzena Półłka, Szymon Ptak, and Łukasz Kuziora. The use of uav's for search and rescue operations. *Procedia Engineering*, 192:748–752, 2017.

[161] Hunter M. Ray, Ryan Singer, and Nisar Ahmed. A review of the operational use of uas in public safety emergency incidents. In *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 922–931. IEEE, 2022.

[162] Minhao Wu. Robotics applications in natural hazards. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 43:273–279, 2023.

[163] Mingyang Lyu, Yibo Zhao, Chao Huang, and Hailong Huang. Unmanned aerial vehicles for search and rescue: A survey. *Remote Sensing*, 15(13):3266, 2023.

[164] Reem Ashour, Sara Aldhaheri, and Yasmeen Abu-Kheil. *Applications of UAVs in Search and Rescue*, pages 169–200. Springer International Publishing, 2023.

[165] Carlos Osorio Quero and Jose Martinez-Carranza. Unmanned aerial systems in search and rescue: A global perspective on current challenges and future applications. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 118:105199, 2025.

[166] Delmerico, Jeffrey, Mintchev, Stefano, Giusti, Alessandro, Gromov, Boris, Melo, Kamilo, Horvat, Tomislav, Cadena, Cesar, Hutter, Marco, Ijspeert, Auke, Floreano, Dario, Gambardella, Luca M., Siegwart, Roland, and Scaramuzza, Davide. The current state and future outlook of rescue robotics. *Journal of Field Robotics*, 36(7):1171–1191, 2019.

[167] Eric Krotkov, Douglas Hackett, Larry Jackel, Michael Perschbacher, James Pippine, Jesse Strauss, Gill Pratt, and Christopher Orlowski. *The DARPA Robotics Challenge Finals: Results and Perspectives*, pages 1–26. Springer International Publishing, 2018.

[168] Matthew Johnson, Brandon Shrewsbury, Sylvain Bertrand, Duncan Calvert, Tingfan Wu, Daniel Duran, Douglas Stephen, Nathan Mertins, John Carff, William Rifenburgh, Jesper Smith, Chris Schmidt-Wetekam, Davide Faconti, Alex Graber-Tilton, Nicolas Eyssette, Tobias Meier, Igor Kalkov, Travis Craig, Nick Payton, Stephen McCrory, Georg

Wiedebach, Brooke Layton, Peter Neuhaus, and Jerry Pratt. Team ihmc's lessons learned from the darpa robotics challenge: Finding data in the rubble. *Journal of Field Robotics*, 34(2):241–261, 2016.

[169] Max Schwarz, Tobias Rodehutskors, David Droeschel, Marius Beul, Michael Schreiber, Nikita Araslanov, Ivan Ivanov, Christian Lenz, Jan Razlaw, Sebastian Schüller, David Schwarz, Angeliki Topalidou-Kyniazopoulou, and Sven Behnke. Nimbro rescue: Solving disaster-response tasks with the mobile manipulation robot momaro. *Journal of Field Robotics*, 34(2):400–425, 2016.

[170] Jeongsoo Lim, Hyoin Bae, Jaesung Oh, Inho Lee, Inwook Shim, Hyobin Jung, Hyun Min Joe, Okkee Sim, Taejin Jung, Seunghak Shin, Kyungdon Joo, Mingeuk Kim, Kangkyu Lee, Yunsu Bok, Dong-Geol Choi, Buyoun Cho, Sungwoo Kim, Jungwoo Heo, Inhyeok Kim, Jungho Lee, In So Kwon, and Jun-Ho Oh. *Robot System of DRC-HUBO+ and Control Strategy of Team KAIST in DARPA Robotics Challenge Finals*, pages 27–69. Springer International Publishing, 2018.

[171] G. Clark Haynes, David Stager, Anthony Stentz, J. Michael Vande Weghe, Brian Zajac, Herman Herman, Alonzo Kelly, Eric Meyhofer, Dean Anderson, Dane Bennington, Jordan Brindza, David Butterworth, Chris Dellin, Michael George, Jose Gonzalez-Mora, Morgan Jones, Prathamesh Kini, Michel Laverne, Nick Letwin, Eric Perko, Chris Pinkston, David Rice, Justin Scheifflee, Kyle Strabala, Mark Waldbaum, and Randy Warner. Developing a robust disaster response robot: Chimp and the robotics challenge. *Journal of Field Robotics*, 34(2):281–304, 2017.

[172] Paul Hebert, Max Bajracharya, Jeremy Ma, Nicolas Hudson, Alper Aydemir, Jason Reid, Charles Bergh, James Borders, Matthew Frost, Michael Hagman, John Leichty, Paul Backes, Brett Kennedy, Paul Karplus, Brian Satzinger, Katie Byl, Krishna Shankar, and Joel Burdick. Mobile manipulation and mobility as manipulation—design and algorithms of robosimian. *Journal of Field Robotics*, 32(2):255–274, 2015.

[173] H. Levent Akin, Nobuhiro Ito, Adam Jacoff, Alexander Kleiner, Johannes Pellenz, and Arnoud Visser. Robocup rescue robot and simulation leagues. *AI Magazine*, 34(1):78–86, 2013.

[174] Satoshi Tadokoro. *Overview of the ImPACT Tough Robotics Challenge and Strategy for Disruptive Innovation in Safety and Security*, pages 3–22. Springer International Publishing, 2019.

[175] Patrick Meier. Uaviators executive summary, 2015. Accedido: 5-Jun-2024.

[176] Geert De Cubber, Daniela Doroftei, Daniel Serrano, Keshav Chintamani, Rui Sabino, and Stephane Ourevitch. The eu-icarus project: Developing assistive robotic tools for search and rescue operations. In *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pages 1–4. IEEE, 2013.

[177] Karsten Berns, Atabak Nezhadfard, Massimo Tosa, Haris Balta, and Geert De Cubber. *Unmanned Ground Robots for Rescue Tasks*, chapter 4. InTech, 2017.

[178] N. E. Nava Rodríguez. Mechanical design thinking of control architecture. In N. E. Nava Rodríguez, editor, *Advanced Mechanics in Robotic Systems*, pages 91–105. Springer London, 2011.

[179] Ulrich K. T. and Eppinger S. D. *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw-Hill Interamericana, 2013.

[180] Secretaría del Trabajo y Previsión Social. Norma oficial mexicana nom-006-stps-2017: Manejo y almacenamiento de materiales - condiciones de seguridad y salud en el trabajo. Diario Oficial de la Federación, September 2017. Artículo 8.5, inciso e.

[181] Ioan Doroftei, Victor Grosu, and Veaceslav Spinu. *Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation*, chapter 29, pages 511–528. I-Tech Education and Publishing, 2007.

[182] Hamid Taheri and Chun Xia Zhao. Omnidirectional mobile robots, mechanisms and navigation approaches. *Mechanism and Machine Theory*, 153:103958, 2020.

[183] Luigi Tagliavini, Giovanni Colucci, Andrea Botta, Paride Cavallone, Lorenzo Baglieri, and Giuseppe Quaglia. Wheeled mobile robots: State of the art overview and kinematic comparison among three omnidirectional locomotion strategies. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 106(3), 2022.

[184] Hussam Akkad and Husam Ph.D. A comparative review of omnidirectional wheel types for mobile robotics. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/372941239_A_Comparative_Review_of_Omnidirectional_Wheel_Types_for_Mobile_Robotics. [Fecha de acceso: 12 de abril del 2024]., 2023.

[185] Stephen Ransom, Olaf Krömer, and Martin Lückemeier. Planetary rovers with mecanum wheels. In *10th Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA) 2008*, 2008.

[186] Olaf Diegel, Aparna Badve, Glen Bright, Johan Potgieter, and Sylvester Tlale. Improved mecanum wheel design for omni-directional robots. In *2002 Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2002.

[187] A. Ramirez-Serrano and R. Kuzyk. Modified mecanum wheels for traversing rough terrains. In *2010 Sixth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems*. IEEE, 2010.

[188] P. Fisette, L. Ferriere, B. Raucent, and B. Vaneghem. A multibody approach for modelling universal wheels of mobile robots. *Mechanism and Machine Theory*, 35(3):329–351, 2000.

[189] Weiting Le. Design of traction transmission and suspension systems for an omnidirectional mobile robot. Master's thesis, Lappeenranta University of Technology, 2015.

[190] Jong-Jin Bae and Namcheol Kang. Design optimization of a mecanum wheel to reduce vertical vibrations by the consideration of equivalent stiffness. *Shock and Vibration*, 2016:1–8, 2016.

[191] Said Bera Çíví and Veysel T́urkel. Hubless wheel design and calculations. *T́urk Doğa ve Fen Dergisi*, 12(4):1–10, 2023.

[192] Ionel Conduraru, Ioan Doroftei, and Alina Conduraru Slatineanu. A mobile robot with modified mecanum wheels. *Advanced Materials Research*, 1036:775–780, 2014.

[193] A. Gfrerrer. Geometry and kinematics of the mecanum wheel. *Computer Aided Geometric Design*, 25(9):784–791, 2008.

[194] Xueshan Gao, Yan Wang, Dawei Zhou, and Koki Kikuchi. Floor cleaning robot using omnidirectional wheels. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(2):157–164, 2009.

[195] Ioan Doroftei and Bogdan Stirbu. Design, modeling and control of an omni-directional mobile robot. *Solid State Phenomena*, 166-167:173–178, 2010.

[196] A. Ramirez-Serrano, R. Kuzyk, and G. Solana. Elliptical double mecanum wheels for autonomously traversing rough terrains. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(16):7–12, 2010.

[197] Ying Zhang and Shengli Ge. Analysis of the motion characteristics of marine mecanum transport platform. *MATEC Web of Conferences*, 232:04006, 2018.

[198] B. I. Adamov. Geometry and kinematics of the mecanum wheel on a plane and a sphere. *Nelineinaya Dinamika*, 20(1):43–78, 2024.

[199] Engineering ToolBox. Friction - coefficients for common materials and surfaces. https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html, 2004. Accessed: 2023-06-14.

[200] Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Eml2322l – friction coefficients. https://web.mae.ufl.edu/designlab/Class%20Projects/Background%20Information/Friction%20coefficients.htm, 2004. Archived: 2004-02-09. Accessed: 2023-06-14.

[201] Power Rubber. Rubber friction coefficient. https://powerrubber.com/en/blog/rubber-friction-coefficient, March 2023. Accessed: 2023-06-14.

[202] Mejzlik. Propeller calculators | mejzlik.eu - design and manufacturing top-quality propellers. Sitio Web, Julio 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.mejzlik.eu/technical-data/propeller_calculator. [Fecha de acceso: 05 de agosto de 2024].

[203] GEPRC. Geprc speedx2 2806.5 1350kv/1760kv motor - geprc. Sitio Web, Octubre 2022. [En línea]. Disponible en: https://geprc.com/product/geprc-speedx2-2806-5-1350kv-1760kv-motor/. [Fecha de acceso: 23 de octubre del 2024].

[204] M.A Stamate, A. F. Nicolescu, and C. Pupaza. Mathematical model of a multi-rotor drone prototype and calculation algorithm for motor selection. In *Proceedings in Manufacturing Systems*, volume 12, pages 119–128. ICMAS Association, 2017.

[205] Marcin Biczyski, Rabia Sehab, James F. Whidborne, Guillaume Krebs, and Patrick Luk. Multirotor sizing methodology with flight time estimation. *Journal of Advanced Transportation*, 2020:1–14, 2020.

[206] Ashleigh Townsend, Immanuel N. Jiya, Christiaan Martinson, Dmitri Bessarabov, and Rupert Gouws. A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements. *Heliyon*, 6(11):e05285, 2020.

[207] Huimin Song, Konrad Münch, Xu Liu, Kaier Shen, Ruizhuo Zhang, Timo Weintraut, Yuriy Yusim, Dequan Jiang, Xufeng Hong, Jiashen Meng, Yatao Liu, Mengxue He, Yitao Li, Philip Henkel, Torsten Brezesinski, Jürgen Janek, and Quanquan Pang. All-solid-state li–s batteries with fast solid–solid sulfur reaction. *Nature*, 637(8047):846–853, 2025.

[208] MISUMI Corporation. Misumi méxico: Tienda industrial de componentes configurables. Sitio Web, Junio S.F. [En línea]. Disponible en: https://mx.misumi-ec.com/es/. [Fecha de acceso: 23 de junio de 2024].

[209] ANSYS. Granta edupack 2023, 2023. Disponible en: https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack.

[210] Shruti Deepak Kamdar. Design and manufacturing of a mecanum wheel for the magnetic climbing robot. Master's thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, 2015.

[211] Rahco Rubber. Materials - rahco rubber. Sitio Web, Junio S.F. [En línea]. Disponible en: https://rahco-rubber.com/materials/. [Fecha de acceso: 27 de junio de 2024].

[212] White Cross Rubber Products. Rubber properties table. Sitio Web, Junio S.F. [En línea]. Disponible en: https://www.wcrp.uk.com/technical/material-selection/rubber-properties-table/. [Fecha de acceso: 27 de junio de 2024].

[213] Thomas Schneider, Guillaume Ducard, Rudin Konrad, and Strupler Pascal. Fault-tolerant Control Allocation for Multirotor Helicopters Using Parametric Programming. In *Proceedings of International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV)*, Braunschweig, Germany, July 2012.

[214] Hussein Mazeh, Majd Saied, Hassan Shraim, and Clovis Francis. Fault-tolerant control of an hexarotor unmanned aerial vehicle applying outdoor tests and experiments. *IFAC-PapersOnLine*, 51(22):312–317, 2018.

[215] Koorosh Aslansefat, Francisco Marques, Ricardo Mendonça, and José Barata. *A Markov Process-Based Approach for Reliability Evaluation of the Propulsion System in Multi-rotor Drones*, pages 91–98. Springer International Publishing, 2019.

[216] Adam Jacoff, Satoshi Tadokoro, Johannes Pellenz, Tetsuya Kimura, Ehsan Mihankhah, Andreas Birk, Jackrit Suthakorn, Michael Hofbaur, Benjamin Lopez Valdivia, and Ahmet Onat. Robocuprescue arena assembly guide, 2011.

[217] Jon Jon. Designing waterproof enclosures: A simple guide. Sitio Web, April 2025. [En línea]. Disponible en: https://jiga.io/injection-molding/designing-waterproof-enclosure-a-guide/. [Fecha de acceso: 23 de abril del 2025].

Anexo A

Anexos

A.1. Artículo publicado

Ingeniería Mecatrónica en México 2016
ISBN 978-607-9394-073, Asociación Mexicana de Mecatrónica, A. C.

Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate

García García Rafael Adrian[1,*], Arias Montiel Manuel[2]

[1]Universidad Tecnológica de la Mixteca, División de Estudios de Posgrado.
[2]Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Electrónica y Mecatrónica.
*rafagarcia.0810@gmail.com

Resumen

La robótica de rescate es un campo emergente de la robótica móvil cuyo objetivo se centra en proveer a los rescatistas de herramientas tecnológicas que les permitan tiempos rápidos de acción para dar respuesta y manejar la etapa de búsqueda y rescate durante un desastre de tipo natural o antrópico, salvando así la mayor cantidad de víctimas sin exponer a nuevos peligros a los rescatistas. Este campo presenta diversos retos a resolver dado su reciente desarrollo, tales como: la movilidad, el sistema sensorial, la fuente de alimentación, los sistemas de comunicación, el control e interacción humano-robot, entre otros. En este trabajo se plantea el diseño de un prototipo virtual de robot móvil capaz de operar por aire o tierra, desplazándose en diversos entornos de desastre mediante la reconfiguración de su sistema de locomoción, permitiéndole así, mejorar la movilidad del robot al realizar tareas de búsqueda, reconocimiento y mapeo, y ampliación de cobertura en comunicaciones, las cuales representan un factor clave en los tiempos de monitoreo y acción. Al ser un prototipo virtual, la validación del diseño del robot móvil se encuentra en desarrollo mediante programas computacionales de simulación y análisis de sistemas multicuerpos, lo cual permitirá exportar un diseño validado a un simulador de entornos de desastre para evaluar su comportamiento y rendimiento con el fin de determinar la factibilidad para su construcción física.

Palabras clave: Robótica de rescate, diseño integral, locomoción multi-modal, robot reconfigurable.

1. Introducción

A través de su historia, la humanidad se ha visto afectada por una gran cantidad de desastres. La Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja (IFRC, por sus siglas en inglés) define un desastre como un suceso repentino y catastrófico que altera significativamente el funcionamiento de una comunidad o sociedad y que genera pérdidas humanas, materiales, económicas y/o ambientales [1]. Los desastres suelen clasificarse principalmente en dos tipos: desastres naturales (terremotos, tsunamis, huracanes, deslaves, inundaciones, etc.), y desastres antrópicos u ocasionados por la acción humana o relacionados con la tecnología (bombardeos, incendios, derrames químicos, descarrilamientos, etc.). Sin embargo, independientemente del origen del desastre, las zonas urbanas son las más propensas a sufrir grandes pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales. Además, se considera que aproximadamente el 80% de los sobrevivientes de desastres en zonas urbanas son víctimas superficiales; es decir, personas que permanecen en la superficie de los escombros o zonas visibles por los rescatistas, mientras que el 20% de los sobrevivientes provienen del interior de los escombros, siendo en estos lugares donde se encuentran la mayoría de víctimas [2, 3], por lo que, bajo estas condiciones, el tiempo de localización, atención médica y extracción de víctimas juega un rol muy importante contra la tasa de mortalidad, considerándose primordiales las primeras 48 horas después de ocurrido el desastre. Es por este motivo, que el uso de robots móviles como herramientas y extensiones de las capacidades de los rescatistas ha ganado gran aceptación en los últimos años.

A.2. Base de datos - Granta EduPack®

Carpeta con la base de datos de los materiales evaluados



Figura A.1: QR para la carpeta con la base de datos de materiales de Granta EduPack®.