



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

Diseño y construcción de un sistema de tracción,
suspensión y chasis para un prototipo de robot de
búsqueda y rescate

Tesis

Que para obtener el título de
Ingeniero en Mecatrónica

Presenta:

José Armando Sánchez Rojas

Director de tesis:

Dr. Alberto Elías Petrilli Barceló

Co-Director de tesis:

Dr. Alberto Antonio García

Huajuapán de León, Oaxaca, Febrero de 2020

A mis padres, con mucho amor.

Agradecimientos

A mis padres, Armando Sánchez y Leticia Rojas, y mi familia por todo su apoyo, amor, sus consejos y por toda su confianza.

Al Dr. Alberto Elías Petrilli Barceló por su apoyo, sus consejos y su amistad durante el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Alberto Antonio García, a la Dra. Esther Lugo Gonzáles y al Dr. Fermín Hugo Ramírez Leyva por su tiempo brindado durante esta investigación.

A mis amigos, Víctor Esteban y Víctor Manuel por brindarme su amistad. Gracias por iniciar este proyecto conmigo.

A Karla por su cariño y motivación que me brindó durante el desarrollo de esta tesis.

A mis amigos, compañeros y a los técnicos de la universidad que me brindaron ayuda durante la construcción del prototipo.

Finalmente, a la Universidad Tecnológica de la Mixteca por brindarme el conocimiento y las herramientas necesarias para desarrollar el prototipo.

Resumen

El principal objetivo de la robótica para desastres es salvar vidas. A causa de esto, se requieren robots capaces de realizar misiones tales como: búsqueda, reconocimiento y mapeo, eliminación de escombros e inspección estructural. Los robots de esta área necesitan sistemas de locomoción confiables y que permitan un alto grado de movilidad.

En este trabajo se presenta el diseño y construcción del sistema de locomoción para un robot de búsqueda y rescate. El robot tiene como objetivo servir para la investigación en el área de la robótica para desastres. Conocer el estado del arte sobre las plataformas existentes y los sistemas de tracción más utilizados permitió generar el planteamiento del problema, en donde se describen los principales problemas dentro del área: la movilidad y confiabilidad de los sistemas principales de un robot de rescate.

El diseño del sistema de locomoción inició con la conceptualización del sistema a partir de requerimientos y especificaciones obtenidas de la investigación del estado del arte. Esta etapa permitió obtener bocetos y dimensiones para generar un diseño preliminar. Después, se realizó el diseño a detalle en donde se especifican las formas y materiales de los componentes del robot. Al final de esta etapa se obtuvieron los dibujos técnicos necesarios para la construcción del sistema de locomoción.

Posteriormente, se presentan los resultados experimentales en donde se explicó el proceso de construcción y las pruebas realizadas para validar el diseño. Estas pruebas incluyen simulaciones en software y pruebas de maniobrabilidad y movilidad utilizando el prototipo construido.

Índice

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Estado del Arte	2
1.1.1. R.U.D.I. (Robot for Urban Disaster Intervention)	2
1.1.2. iRAP Robot	3
1.1.3. Sistemas de tracción	3
1.1.4. Robots Utilizados en zonas de desastres	4
1.2. Planteamiento del Problema	6
1.3. Justificación	8
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo General	8
1.4.2. Objetivos Específicos	8
1.5. Organización de la tesis	9
2. Robótica para desastres	11
2.1. Tareas de los robots de rescate	11
2.1.1. Evaluación de los robots de rescate	13
2.1.2. Pruebas utilizadas en RoboCup Rescue	14
2.2. Características de los desastres e impacto en el diseño de robots	18
2.2.1. Robots utilizados en zonas de desastres	20
2.3. Requerimientos de un robot de rescate móvil	20
2.4. Tipos de robots de rescate	22
2.4.1. Robots de rescate terrestres	22
2.4.2. Robots de rescate aéreos	25
2.4.3. Robots de rescate marinos	25
3. Marco Teórico	29

3.1.	Componentes de un robot móvil de rescate	29
3.2.	Subsistemas de un sistema de locomoción	30
3.2.1.	Propulsión	31
3.2.2.	Transmisión	32
3.2.3.	Dirección	36
3.2.4.	Suspensión	39
3.2.5.	Articulación	39
3.2.6.	Actuación	41
3.3.	Selección del robot a desarrollar	44
3.3.1.	Comparación de sistemas de locomoción	44
3.3.2.	Versatilidad y complejidad	45
4.	Conceptualización y diseño	47
4.1.	Definición de requerimientos	47
4.2.	Determinación de especificaciones	47
4.3.	Generación y evaluación de conceptos	50
4.4.	Diseño preliminar	51
4.4.1.	Dimensionamiento del sistema de tracción	52
4.4.2.	Dimensionamiento y posicionamiento de la suspensión	53
4.4.3.	Dimensionamiento del chasis	54
4.5.	Diseño del sistema de tracción	56
4.5.1.	Selección de orugas	57
4.5.2.	Dimensionamiento de las orugas principales y auxiliares	59
4.6.	Selección de materiales	61
4.7.	Diseño de la suspensión	66
4.8.	Dimensionamiento de actuadores	68
4.8.1.	Selección de actuadores	70
4.8.2.	Selección de sistema de transmisión	71
4.9.	Diseño del chasis	72
4.10.	Dimensionamiento del sistema de transmisión	74
4.11.	Lista de materiales	76
4.12.	Integración de los sistemas mecánicos principales	76
4.13.	Sistema electrónico y software utilizado para pruebas	77
5.	Resultados experimentales	81
5.1.	Manufactura del robot	81
5.1.1.	Maquinado de las placas de Nylomaq	81
5.1.2.	Maquinado de la barra de Nylomaq	84

5.1.3. Fabricación de los ejes	86
5.1.4. Fabricación del chasis	86
5.1.5. Orugas	89
5.1.6. Ensamble final	89
5.2. Evaluación de los componentes mecánicos principales en software	90
5.2.1. Chasis	90
5.2.2. Ejes y bujes	90
5.2.3. Aletas	92
5.3. Evaluación del sistema mecánico	93
5.3.1. Prueba de maniobrabilidad	93
5.3.2. Pruebas de movilidad	93
5.4. Análisis de resultados	96
6. Conclusiones y trabajos futuros	99
6.1. Conclusiones	99
6.2. Trabajos futuros	101
Bibliografía	103
Apéndice	109
A. Vistas explosionadas y dibujos técnicos	109

Índice de figuras

1.1.	Diseño mecánico del CUAS-RoboCup Rescue Robot [1].	3
1.2.	Robot de iRAP utilizado en la RoboCup RRL [2].	3
1.3.	Orugas de cadenas de bicicletas [3], (a) orugas ensambladas, (b) partes del ensamble de las orugas.	4
1.4.	Orugas comerciales prefabricadas, (a) de caucho [4], (b) de plástico [5].	5
1.5.	Orugas (a) de cadenas de rodillos con aditamentos [2] (b) de cadena de tablillas con aditamentos de caucho [6] (c) de bandas dentadas con recubrimiento [7].	5
1.6.	Robots utilizados después del ataque terrorista al World Trade Center [8].	6
1.7.	Robot Soryu III explorando una casa destruida por el terremoto Niigata-Chuetsu [8].	6
1.8.	Robot Kohga 3 inspeccionando un gimnasio [8].	7
1.9.	Robots utilizados en la planta nuclear Fukushima Daiichi [8].	7
2.1.	Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la maniobrabilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando rampas [9].	15
2.2.	Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando un obstáculo de 20 cm de altura [9].	16
2.3.	Aparato utilizado en RoboCup Rescue para la evaluación de movilidad utilizando pendientes de arena y/o grava [9].	16
2.4.	Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando campos de escalones [9].	17
2.5.	Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando rampas elevadas [9].	18
2.6.	Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando escaleras con escombros [9].	18
2.7.	Ejemplos de robots móviles: (a) Man-packable (b) Man-portable (c) Maxi.	23
2.8.	Ejemplos de los robots utilizados en el DRC.	24
2.9.	Robots terrestres biomiméticos.	25
2.10.	Ejemplos de robots aéreos no tripulados: (a) ala fija (b) ala rotatoria (c) más liviano que el aire.	26

2.11. Ejemplos de robots marinos no tripulados: (a) UAV, (b) ROV, (c) USV.	27
3.1. Sistemas de un robot terrestre de rescate [10].	30
3.2. Cadena de escalerilla.	33
3.3. Estructura básica de una cadena de rodillos [11].	34
3.4. Cadena de tiempo [12].	34
3.5. Engranajes rectos.	35
3.6. Engranajes helicoidales.	35
3.7. Engranajes cónicos.	36
3.8. Tornillo sinfín.	36
3.9. Ejemplos de sistemas de dirección de robots con tres ruedas a) sistema diferencial, b) sistema síncrono c) robot omnidireccional con ruedas omnidireccionales d) robot omnidireccional con ruedas giratorias activas e) robot omnidireccional con ruedas orientables activas.	38
3.10. Sistema de dirección Ackerman	39
3.11. Suspensiones para vehículos con orugas: (a) brazo de arrastre sobre un muelle de torsión (b) brazo de arrastre con un resorte de compresión (c) balancín de ballesta.	40
3.12. Robot articulado con ruedas para uso en terrenos irregulares [13].	41
3.13. Ejemplos de robots articulados con orugas [14].	42
3.14. Dos tipos de motores utilizados en el area de robotica: (a) PMDC (b) BLDC [15].	43
3.15. Circuito de un sistema hidráulico, esquemático y dibujos simbólicos [16].	44
3.16. Comparación de versatilidad contra complejidad de distintos sistemas de locomoción [17].	46
4.1. Robots evaluados: (a) PackBot [18], (b) Telemax HYBRID [19], (c) Quince [20].	50
4.2. Bocetos de conceptos para la locomoción del prototipo de robot de búsqueda y rescate.	54
4.3. Dimensiones preliminares del sistema de tracción: (a) longitud mínima del sistema de tracción (b) longitud de las orugas principales y auxiliares.	55
4.4. Vista lateral del sistema de tracción preliminar.	55
4.5. Vista superior del sistema de tracción preliminar.	56
4.6. Diseño preliminar del sistema de suspensión.	56
4.7. Mecanismo de suspensión preliminar (a) sin comprimir (b) en compresión.	57
4.8. Chasis preliminar (a) vista frontal (b) vista isométrica (c) vista lateral.	57
4.9. Ensamble de la oruga fabricada con cadena de tablillas.	59
4.10. Mecanismo de tensión para las aletas.	60
4.11. Mecanismos de tensión para las orugas principales utilizando.	61
4.12. Bujes para el sistema de tracción: (a) buje reductor, (b) buje de acoplamiento.	65
4.13. Ensamble de las chumaceras.	66

4.14. Componentes de las suspensión y de las aletas hechos de nylon tipo 6/6.	67
4.15. Mecanismo final de la suspensión para las ruedas locas (a) suspensión no comprimida (b) suspensión comprimida.	68
4.16. Vista lateral de la suspensión frontal del robot.	68
4.17. Diagrama de cuerpo libre del robot.	69
4.18. Diagrama de cuerpo libre de la oruga auxiliar.	70
4.19. Actuadores de las orugas (a) y las aletas (b).	71
4.20. Dimensiones, en mm, del perfil de aluminio de 20x20mm de la marca Rexroth. . .	72
4.21. Diseño final del chasis.	73
4.22. Unión de dos perfiles de aluminio utilizando perfil en L y pernos M4.	73
4.23. Uniones utilizadas en el chasis.	74
4.24. Distancia entre eje motriz e impulsado del motor (a) izquierdo (b) derecho.	75
4.25. Motor BLDC montado al chasis.	75
4.26. Renderizado del diseño final del robot de búsqueda y rescate.	76
4.27. Subsistemas principales del robot de búsqueda y rescate.	78
4.28. Esquemático simplificado del sistema electrónico, de comunicación y control. . . .	79
5.1. Diagrama de flujo del proceso de maquinado de las placas de Nylomaq.	83
5.2. Fresadora CNC del Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura.	84
5.3. Sistema de suspensión y tensión ensamblado sobre el chasis.	84
5.4. (a) Aletas instaladas sobre el robot, (b) catarinas para transmitir el movimiento a las orugas auxiliares.	85
5.5. (a) Torno paralelo, (b) pieza maquinada montada en las mordazas.	85
5.6. Catarinas montadas sobre el eje de 12mm.	86
5.7. Eje frontal ensamblado con aleta	87
5.8. Vista superior del chasis ensamblado	87
5.9. Chumaceras fabricadas para el robot de rescate.	88
5.10. Cubiertas del robot de rescate.	88
5.11. Orugas del robot de rescate.	89
5.12. Robot manufacturado.	89
5.13. Resultados de simulación del chasis.	90
5.14. Resultados de simulación del eje de tracción.	91
5.15. Resultados de simulación del buje reductor.	91
5.16. Resultados de simulación del buje de acoplamiento.	92
5.17. Resultados de la simulación del eje de las aletas.	92
5.18. Resultados de la simulación de las aletas.	93
5.19. Prototipo sobre el escenario para prueba de maneobrabilidad.	94
5.20. Prototipo sobre el escenario para prueba de movilidad.	94

5.21. Movimiento del robot sobre una superficie plana.	95
5.22. Aceleraciones obtenidas durante las pruebas sobre una superficie plana.	96
5.23. Robot girando sobre su propio eje.	96

Índice de Tablas

2.1. Modalidad, cantidad y éxito de robots utilizados en zonas de desastres [8].	21
3.1. Secciones transversales (con excepción de la banda síncrona) y el intervalo de tamaños de los 4 tipos de bandas.	33
3.2. Comparación de los tres principales sistemas de locomoción.	45
4.1. Requerimientos de un robot de búsqueda y rescate terrestre.	48
4.2. Métricas de evaluación para los requerimientos propuestos.	49
4.3. Evaluación de los robots utilizando las métricas propuestas.	51
4.4. Valores marginales.	52
4.5. Especificaciones.	53
4.6. Evaluación de conceptos.	54
4.7. Evaluación de los distintos tipos de orugas.	58
4.8. Matriz morfológica de materiales.	62
4.9. Matriz morfológica de materiales para el chasis.	63
4.10. Matriz morfológica de materiales para los ejes.	64
4.11. Matriz morfológica de materiales para los bujes.	64
4.12. Matriz morfológica de materiales para los alojamientos.	65
4.13. Matriz morfológica de materiales para el sistema de suspensión.	66
4.14. Materiales seleccionados para las partes del robot.	67
4.15. Matriz morfológica de tipos de transmisiones.	72
4.16. Lista de materiales.	77
5.1. Equipo y herramientas utilizadas para las operaciones de manufactura durante la fabricación del robot.	82

Capítulo 1

Introducción

Durante los últimos diez años (2008-2017), la Base de Datos de Eventos de Emergencia (*EM-DAT* por sus siglas en inglés) ha reportado 3,751 desastres naturales de los cuales los terremotos han causado el mayor número de muertes. Además de los desastres naturales, se reportaron 2,113 desastres tecnológicos que incluyen accidentes en plantas nucleares o explosiones en fábricas [21]. Debido a los distintos tipos de desastres que pueden ocurrir, los robots de exploración y reconocimiento se han convertido en herramientas clave para los cuerpos de primeros auxilios. Después de una catástrofe los robots pueden tener algunas de las siguientes aplicaciones [22]:

1. Recolección de información general sobre la catástrofe.
2. Recolección de información sobre materiales peligrosos y condiciones ambientales.
3. Búsqueda y diagnóstico de los sobrevivientes.
4. Investigación cuantitativa de los daños.

Las aplicaciones que se le pueden dar a estos robots son dependientes del sistema de tracción ya que debe ser adecuado para el terreno que se pretende explorar. El sistema de tracción debe adaptarse al terreno y darle al robot un alto grado de movilidad de tal forma que se optimice la tarea a realizar [22]. Además, el sistema de locomoción de un robot autónomo debe ser diseñado de tal manera que no empeore la situación al molestar las estructuras dañadas [23]. La movilidad es un problema para todas las modalidades de robots de rescate, especialmente para vehículos terrestres. Los retos para los robots terrestres surgen de la complejidad del ambiente en que operan, el cual es una impredecible combinación de elementos verticales y horizontales con características superficiales desconocidas y obstáculos [8]. Es muy difícil para los humanos obtener suficiente conocimiento de los alrededores del robot para guiar al robot de manera óptima en entornos desconocidos y complejos, es aquí donde los robots semi-autónomos y eventualmente completamente autónomos pueden solucionar este problema [24].

1.1. Estado del Arte

En el área de la robótica de búsqueda y rescate, los desastres han sido los impulsores para el avance de esta tecnología. Los inicios de la robótica para desastres fueron en 1995 después del terremoto de Hanshin-Awaki en Kobe Japón y el bombardeo del Edificio Federal Murrah en la ciudad de Oklahoma, Estados Unidos [25]. Estos eventos despertaron el interés de diferentes investigadores e instituciones por desarrollar robots con fines de ayuda humanitaria, especialmente para zonas de desastres o de alto riesgo.

No sólo los desastres han sido impulsores en el área de robótica para desastres, sino también competencias internacionales como la RoboCup Rescue Robot League (RoboCup RRL) [26]. Esta competencia ha existido desde el año 2000 y tiene como objetivo fomentar el desarrollo de robots de rescate que puedan ser utilizados después de desastres como terremotos. La competencia se celebra cada año como parte de el Campeonato Mundial RoboCup y una de sus metas es comparar el rendimiento de los robots actuales en un ambiente simulado pero realístico. Además, busca promover el desarrollo de robots inteligentes, con un alto grado de movilidad y destreza, que puedan mejorar la seguridad y eficiencia de personal de emergencia que realizan tareas peligrosas. La experiencia que obtienen los equipos de esta competencia ha ayudado con el avance en el área de robótica para desastres, la cual ha permitido utilizar robots después de desastres reales, por ejemplo, el de la planta nuclear Fukushima Daiichi [27].

Un aspecto importante dentro de la RoboCup RRL es que los equipos no compiten unos contra otros, sino contra el desastre simulado para finalmente ayudar a los equipos de primeros auxilios a salvar vidas. Para poder acelerar a los equipos nuevos y tener un progreso constante se hacen publicaciones por parte de los equipos cada año, de tal forma que se facilite la entrada de equipos nuevos a la competencia. En estas publicaciones descriptivas de equipos (TDPs por sus siglas en inglés) se muestran diferentes propuestas de diseños para abordar los problemas de la RoboCup RRL. A continuación se describen algunos prototipos y sistemas relevantes para este trabajo.

1.1.1. R.U.D.I. (Robot for Urban Disaster Intervention)

Este robot fue desarrollado en la Universidad de Carintia de Ciencias Aplicadas (CUAS por sus siglas en inglés) para la competencia de RoboCup RRL del 2016. Este robot con orugas de caucho incorpora un sistema de suspensión para aumentar la movilidad y rendimiento de la unidad. Su chasis esta fabricado de diferentes plásticos y laminas metálicas y sus partes fueron diseñadas con *Solid Edge* y maquinadas en maquinas CNC [1]. En la figura 1.1 se muestra el robot R.U.D.I. y sus componentes principales. El sistema consiste de: (A) Sistema de tracción principal, (B) cubierta de batería, (C) transmisión de las aletas, (D) aleta, (E) cubierta de computadora, (F) panel de control, (G) cubierta. Este robot utiliza un sistema de resorte-amortiguador para la suspensión del chasis, lo cual optimiza el comportamiento del sistema en superficies irregulares. El sistema de suspensión se combina con una cadena de rodillos para mejorar la movilidad general dentro de la competencia [28].

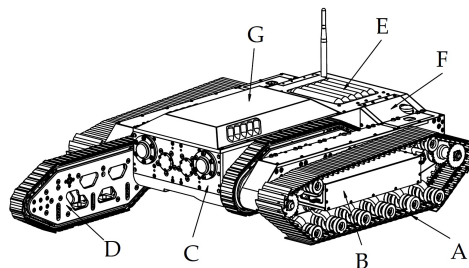


Figura 1.1: Diseño mecánico del CUAS-RoboCup Rescue Robot [1].

1.1.2. iRAP Robot

El equipo iRAP Robot (Invigorating Robot Activity Project) ha participado en RoboCup RRL desde el 2006 utilizando diferentes robots que se van adaptando al cambio de reglas por parte de la RoboCup RRL. Desde el 2006 hasta el 2016 el equipo ha ganado la competencia 9 veces y desde el 2011, cuando se introdujeron premios para destacar ciertos aspectos de los robots, ha ganado cada año el premio de la mejor movilidad en su clase. En el 2010 su robot más actual (figura 1.2) utilizó dos pares de aletas en la parte frontal y trasera y debido a esto el robot no necesitaba darse vuelta para ir en reversa y además le permitió subir escaleras y pasar sobre estructuras colapsadas. Su chasis es de aluminio mecanizado y la colocación de los componentes permite que su centro de gravedad se mantenga bajo, lo que facilita subir rampas de hasta 45 grados [2].

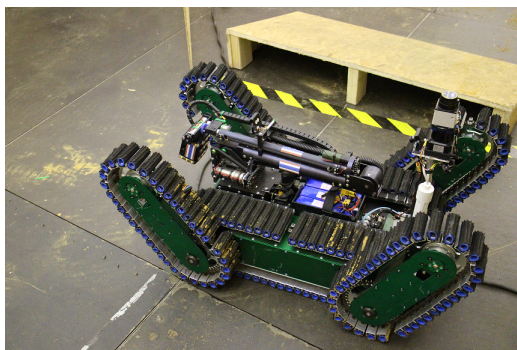


Figura 1.2: Robot de iRAP utilizado en la RoboCup RRL [2].

1.1.3. Sistemas de tracción

Dentro del área de la robótica, las orugas utilizadas suelen tener diferentes formas y estar hechas de distintos materiales. El tipo de oruga que se utiliza en un robot depende del uso que se le dará a la plataforma. Los materiales más utilizados para la fabricación de orugas son: metal, plástico y caucho. Además, existen distintas formas de orugas, las cuales incluyen superficies planas, con

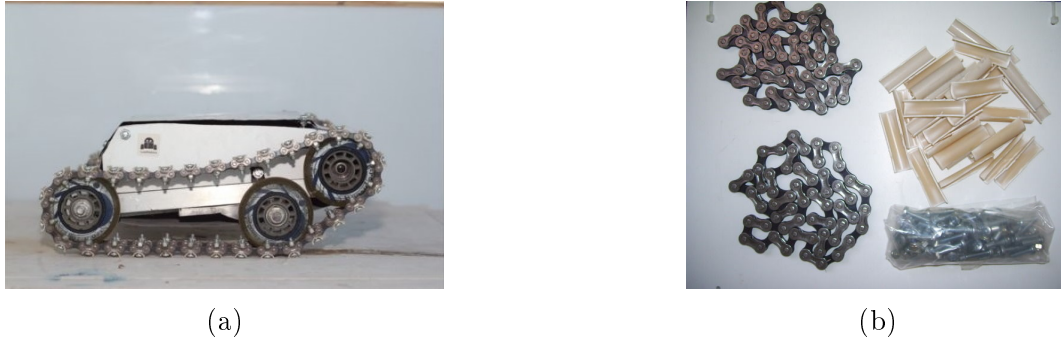


Figura 1.3: Orugas de cadenas de bicicletas [3], (a) orugas ensambladas, (b) partes del ensamble de las orugas.

dientes o con aditamentos de otras formas. Las orugas utilizadas en los robots comerciales son orugas de caucho fabricadas específicamente para la empresa. Sin embargo esto hace que estas sean demasiado costosas y de difícil adquisición. Para reducir costos, muchas veces, las orugas de los robots se construyen utilizando materiales comerciales tales como cadenas de rodillos o bandas transportadoras en conjunto con elementos de unión para agregar aditamentos que mejoren la tracción con la superficie.

De la investigación del estado del arte se obtuvieron los sistemas de orugas más utilizadas en los robots para competencias y en algunos robots comerciales:

- Orugas con cadenas de bicicleta: utilizan pedazos de pvc, tornillos y tuercas para unir dos cadenas en paralelo como se muestra en la figura 1.3. Este sistema utiliza catarinas o ruedas de caucho para guiar y mover la oruga.
- Orugas comerciales: son hechas especialmente para robots. Típicamente pueden ser de caucho, plástico o metal. Ejemplos de estas orugas se muestran en la figura 1.4.
- Orugas con cadenas de rodillos y aditamentos: utiliza una cadena con aditamentos para la sujeción de caucho con la cadena (figura 1.5a).
- Orugas de banda transportadora de plástico: utilizan cadenas de tablillas de plástico y catarinas. Las tablillas proveen una superficie para la sujeción de aditamentos de caucho (figura 1.5b).
- Orugas de banda dentada con recubrimiento: pueden ser hechas con bandas especiales (fabricadas completamente a las medidas y especificaciones del cliente) o bandas dentadas con recubrimientos cortadas a la medida (figura 1.5c).

1.1.4. Robots Utilizados en zonas de desastres

Los robots para desastres aún son una tecnología emergente y no han sido adoptados completamente por la comunidad internacional de respuestas a catástrofes. Sin embargo, hasta el

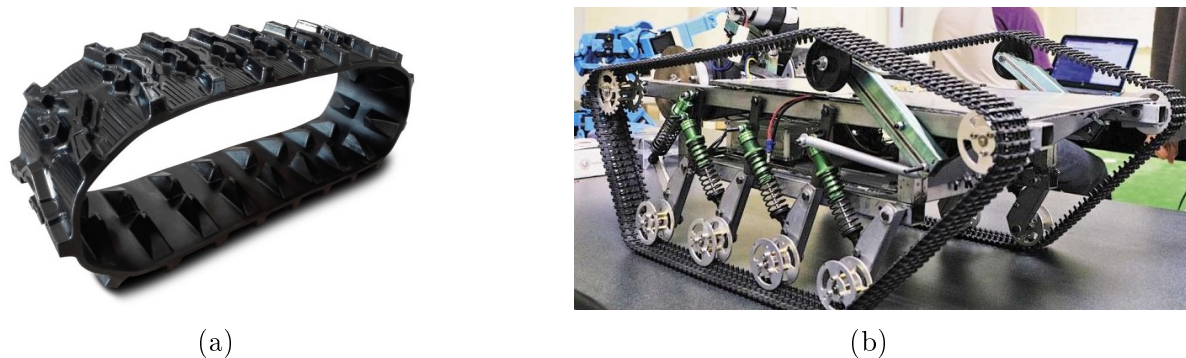


Figura 1.4: Orugas comerciales prefabricadas, (a) de caucho [4], (b) de plástico [5].

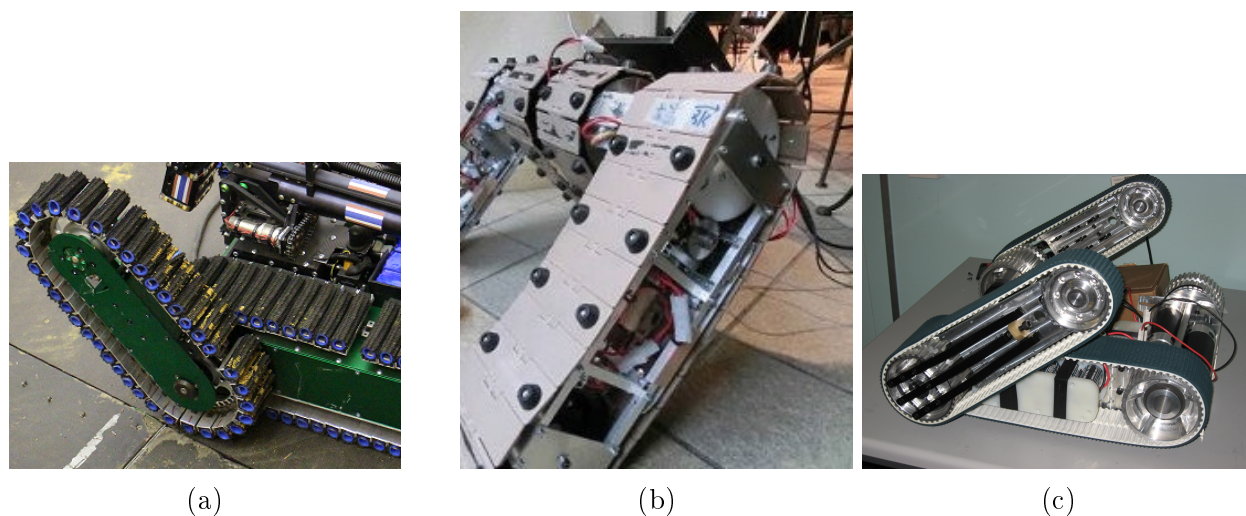


Figura 1.5: Orugas (a) de cadenas de rodillos con aditamentos [2] (b) de cadena de tablillas con aditamentos de caucho [6] (c) de bandas dentadas con recubrimiento [7].

2012, los robots han sido utilizados en 37 desastres, ante todo en desastres mineros y colapsos estructurales o daños a infraestructuras [8].

En el 2001, después del ataque terrorista al World Trade Center, el Centro para la Búsqueda y Rescate Asistida por Robots (*CRASAR* por sus siglas en inglés) desplegó 4 robots de diferentes fabricantes para búsqueda y reconocimiento en los edificios colapsados [8]. Los robots fueron utilizados en un intento para encontrar caminos más cortos al sótano en donde se podrían hallar bomberos sobrevivientes [29]. En la figura 1.6 se muestran los 4 robots (en los óvalos) que se utilizaron en el desastre del 2001. Las herramientas de estos robots permitieron encontrar a más de 10 víctimas, lo cual fue más de 2% de las víctimas encontradas [25].

En el 2004 un robot tipo serpiente llamado Soryu III (figura 1.7) fue utilizado para búsqueda en casas colapsadas. Los robots tipo serpiente consisten en un conjunto de cuerpos pequeños interconectados de tal manera que exista movilidad entre cada unión. A causa de estas uniones, los robots tienen múltiples formas de moverse que permiten que el robot sea robusto en diferentes terrenos y condiciones.

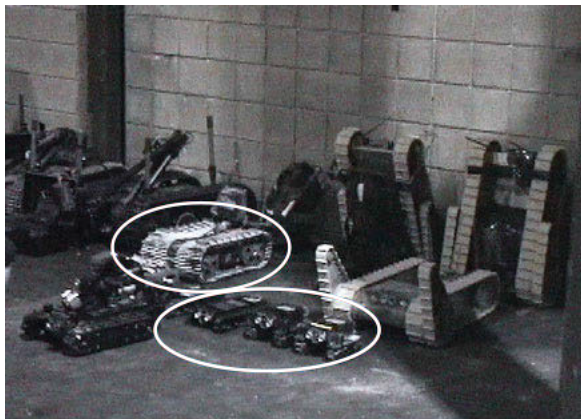


Figura 1.6: Robots utilizados después del ataque terrorista al World Trade Center [8].



Figura 1.7: Robot Soryu III explorando una casa destruida por el terremoto Niigata-Chuetsu [8].

En el 2011, después del terremoto en Sendai, Japón, se utilizaron tres robots para inspeccionar edificios dañados. El robot Kogha 3 (figura 1.8) se utilizó para inspeccionar un gimnasio en peligro de colapsar, sin embargo se se reveló que no fue capaz de encontrar algún sobreviviente [8]. Por otra parte, dentro de los reactores nucleares, el robot Quince (figura 1.9a) se utilizó para inspeccionar los daños y el robot 710 Warrior (figura 1.9b) se utilizó para remover escombros [30].

1.2. Planteamiento del Problema

De acuerdo a un meta-estudio realizado en la Universidad de Florida del Sur, los robots UGVs utilizados en campo muestran una baja confiabilidad y un tiempo promedio entre fallas de 6 a 24 horas. El meta-estudio utilizó 13 estudios de despliegues de robots para obtener las causas más comunes de fallas en los robots para búsqueda y rescate. Las causas más comunes de las fallas son [31]:



Figura 1.8: Robot Kohga 3 inspeccionando un gimnasio [8].



(a) Robot Quince



(b) Robot 710 Warrior

Figura 1.9: Robots utilizados en la planta nuclear Fukushima Daiichi [8].

- Sistemas de control inestables.
- Chasis y efectores diseñados y probados para un rango estrecho de condiciones ambientales.
- Rango de la comunicación inalámbrica limitada en ambientes urbanos.
- Insuficiente ancho de banda inalámbrica para retroalimentación basada en vídeo.

El estudio encontró que los vehículos con orugas están más propensos a fallas de efectores que los vehículos con ruedas. Esto se debe a que piezas de escombros, lo suficiente pequeñas para atascar o dañar las orugas, causan que los robots pierdan sus orugas o fallen por completo. Además, se obtuvo que los efectores y el sistema de control son las fuentes más comunes de fallas físicas [31].

En el área de robótica para desastres han surgido una variedad de diseños de sistemas de locomoción que buscan incrementar la movilidad del robot de búsqueda y rescate, pero la mayoría incrementa la complejidad e incorpora nuevas fallas al sistema. Los sistemas de tracción más utilizados han explotado la configuración básica de un robot de rescate, un sistema de orugas principales con orugas auxiliares [8]. Estos sistemas proveen una plataforma con alta tracción,

pero carece de la habilidad de adaptarse adecuadamente al terreno y reducir las vibraciones que se transmiten a los componentes del robot. Por lo tanto, para incrementar la movilidad y confiabilidad de un robot de búsqueda y rescate, en esta tesis se propone un sistema de tracción con suspensión que permita las tareas de exploración y reconocimiento en zonas de desastre.

1.3. Justificación

En zonas de desastres el tiempo es un factor crítico para salvar vidas. Los robots para los desastres deben de moverse lo suficientemente rápido para llegar a todos los sobrevivientes potenciales, pero lo suficientemente lento para evitar crear colapsos adicionales [8]. Este sistema de tracción facilitará la realización de las tareas de exploración y recolección de información después de un desastre. La importancia de tener un sistema adecuado para las tareas de exploración después de un desastre es clave para aumentar la probabilidad de encontrar sobrevivientes.

Existen varios desafíos para los robots de desastres como la comunicación, el control, los sensores y el sensado, la etapa de potencia, la interacción humano máquina, coordinación entre equipos de robots y otros problemas [8]. Además, estudios muestran que los robots carecen de confiabilidad al ser desplegados en el campo y es claro que para mejorar este aspecto se necesita madurez en el área de robótica para desastres y en los prototipos. Al generar un sistema de tracción estable, se proporciona una plataforma para continuar la investigación dentro del área de robótica para desastres y de tal manera mejorar los demás sistemas de la plataforma como autonomía, interfaz humano máquina, manipulación, etc. Con la investigación en el área de robótica para desastres se puede generar un robot capaz de proporcionar ayuda para los equipos de primeros auxilios y ayudar a las comunidades afectadas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema de tracción, suspensión y chasis para un robot de búsqueda y rescate autónomo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Conceptualizar el sistema de tracción conformado por un tren de rodaje, un sistema de suspensión y un sistema de aletas auxiliares.
- Diseñar el sistema de tracción con herramienta CAD.
- Evaluar el diseño del sistema de tracción mediante simulaciones con software.
- Construir el sistema de tracción del robot de búsqueda y rescate autónomo.
- Proporcionar una plataforma estable para el montaje de sensores y actuadores propios de las labores de búsqueda y rescate.

1.5. Organización de la tesis

El presente documento de tesis esta dividido en seis capítulos, a continuación se exponen las ideas principales de cada capítulo:

Capítulo 2. Presenta qué es la robótica para desastres y expone las posibles tareas de los robots en zonas de desastres. Además se incluyen las características de los desastres que influyen en el diseño de los robots. Finalmente, se presentan los tipos y requerimientos de los robots de rescate.

Capítulo 3. Este capítulo incluye una disección de los robots de rescate en sistemas principales. Cada sistema se describe brevemente y se incluye una descripción más detallada del sistema de locomoción de un robot terrestre. Finalmente, se selecciona el tipo de robot a desarrollar.

Capítulo 4. Incluye la conceptualización del prototipo a partir de requerimientos y especificaciones. Además se hace el diseño preliminar y a detalle del robot.

Capítulo 5. En este capítulo se describe el proceso de manufactura del robot y se muestra el prototipo final. Además, se incluyen las simulaciones y pruebas realizadas para validar el diseño del robot.

Capítulo 6. Se presentan las conclusiones y trabajos a futuro de la investigación.

Capítulo 2

Robótica para desastres

La robótica de rescate se dedica a permitir que los equipos de respuesta y otras partes interesadas perciban y actúen a distancia del lugar de un desastre o un incidente extremo. El impacto de los terremotos, huracanes, inundaciones y accidentes ha incrementado, lo cual incrementa la necesidad de robots para todas las fases de un desastre, desde prevención y preparación hasta respuesta y recuperación. Esta consideración más amplia de los robots para todas las fases de un desastre se denomina robótica para desastres, aunque los términos *robot de búsqueda y rescate*, *robot de rescate* y *robot para desastres* pueden ser utilizados indistintamente [32].

2.1. Tareas de los robots de rescate

El objetivo final de los robots de rescate es salvar vidas, pero las tareas que un robot puede hacer son directamente dependientes de su diseño. Las misiones que estos robots deberían de poder hacer se describen a continuación. Es importante mencionar que muchas tareas son similares a las tareas de robots militares, pero otras son únicas a las tareas de rescate [8]. A continuación se exponen algunas misiones propuestas por [33].

- **Búsqueda:** Se enfoca en la búsqueda de víctimas o peligros potenciales en interiores, cuevas, túneles o en el desierto. La búsqueda tiene de ser rápida y debe ser realizada sin generar riesgos para las víctimas o los rescatistas.
- **Reconocimiento y mapeo:** Es una de de las fases más peligrosas debido a que se puede ocasionar un colapso secundario de la estructura [34]. Es una búsqueda más amplia que provee a los rescatistas una imagen clara del ambiente destruido. Esta tarea busca cubrir una gran área en el menor tiempo y con una resolución apropiada. Los datos obtenidos permiten hacer una mejor toma de decisiones y determina si es seguro el ingreso de equipos de primeros auxilios.
- **Eliminación de escombros:** Busca remover escombros pesados utilizando maquinaria robótica o exoesqueletos. El objetivo principal es remover escombros de manera más rápida que

hacerlo de manera manual pero con una menor huella que utilizando maquinaria pesada.

- Inspección estructural: Esta tarea se puede realizar en interiores o exteriores y ayuda a los rescatistas obtener una mejor vista de la naturaleza de los escombros y de tal manera prevenir colapsos y determinar si es posible la entrada a las estructuras dañadas.
- Evaluación médica e intervención in situ: Permite que los doctores y paramédicos interactúen con las víctimas para inspeccionar visualmente, aplicar sensores de diagnóstico o proveer soporte vital al transportar fluidos o medicamento.
- Extracción y evacuación de víctimas: Esta tarea se enfoca en proveer atención médica a víctimas que aún se encuentren en zonas de peligro y mover a las víctimas a una zona segura. En el caso de un desastre químico, biológico o radioactivo, el número de víctimas es mucho mayor que el número de rescatistas humanos y es aquí donde los robots de rescate pueden ser de gran beneficio.
- Actuando como un beacon móvil o repetidores: Esta tarea permite extender la comunicación inalámbrica, habilita la localización de personal basado en transmisiones de señales de radio al proveer más receptores y además sirven como puntos de referencia que permitan que los rescatistas se localicen.

Las misiones descritas anteriormente toman en cuenta que los robots son capaces de hacer tareas nominales de navegación y tareas nominales de misiones. Las tareas nominales de navegación son la habilidad de [33]:

- Moverse a través de regiones de difícil acceso con capacidades de evasión de obstáculos, negociación de obstáculos.
- Manipular elementos de accesibilidad.
- Manipular obstáculos para removerlos del camino.
- Localizarse y producir un mapa, aún en ambientes en donde no hay GPS.
- Regresar a su lugar de origen después de perder señal en caso de que sea un robot inalámbrico.
- Monitorear y administrar el estado del vehículo.

Por otro lado las tareas nominales de misión son la habilidad de:

- Muestrear las propiedades del ambiente, la cual alienta el uso de mecanismos tipo *plug and play* para que los rescatistas puedan utilizar sensores de su preferencia.

- Apoyar a la percepción cooperativa y fusión de sensores para reducir el trabajo del operador y expertos. Esta tarea incluye mejoramientos de imágenes, indicándole al operador imágenes o lecturas que necesiten una segunda revisión.
- Garantizar la cobertura sensorial de algún espacio u objeto, tal como una persona lesionada. Esto implica que los sensores se puedan mover independientes de la plataforma de navegación tal que si el robot se encuentra restringido en movilidad pueda hacer el sentido.
- Conducir manipulación de investigación para sondar objetos o terreno, proporcionando claves sobre si una substancia es suave o dura, una sombra o líquida, etc.
- Utilizar manipulación para intervenir en el desastre, como posicionando sensores, girando válvulas, o mejorando el ambiente al mover escombros.

2.1.1. Evaluación de los robots de rescate

Los robots desarrollados para ser utilizados en condiciones operacionales difíciles tienen que ser evaluados en un ambiente de prueba que sea lo más semejante a las condiciones reales. Por esta razón es importante tener metodología estandarizada de evaluación para los distintos tipos de robots de rescate. El Instituto Nacional de los Estados Unidos de Estándares y Tecnología (*NIST* por sus siglas en inglés) tiene un rol importante en el desarrollo de pruebas estandarizadas para la robótica de búsqueda y rescate. Las pruebas generadas por el NIST se utilizan principalmente para robots terrestres de menor tamaño y se han extendido a robots de mayor tamaño y robots aéreos. La existencia de estas pruebas estandarizadas permite que los científicos y desarrolladores comparen los desarrollos actuales y además permite que las agencias relevantes elijan robots de acuerdo sus necesidades [35].

Los robots de búsqueda y rescate son una tecnología emergente y los distintos métodos de evaluación permiten que los desarrolladores obtengan retroalimentación para mejorar sus prototipos. La División de Sistemas Inteligentes del NIST ha desarrollado métodos para evaluar robots móviles al operar en una misión de búsqueda y rescate [36]. Estos métodos de evaluación utilizan escenarios simulados de desastres en donde se ponen a prueba las capacidades de movilidad, manipulación, sentido, energía, comunicaciones, dominio del operador y logística de robots aéreos, terrestres y acuáticos. El objetivo de estas pruebas es facilitar comparaciones cuantitativas de distintos modelos de robots que permitan guiar decisiones de compra y entender sus capacidades de despliegue. Además, estas pruebas buscan mejorar las habilidades del operador e impulsar el desarrollo y mejoramiento de las capacidades de los robots móviles [37].

El proceso para desarrollar estos métodos de evaluación se basa en gran medida en competencias robóticas para refinar los aparatos de pruebas y los ejercicios de evaluación para robots en instalaciones de entrenamiento para validar los métodos de evaluación. Los métodos de evaluación resultantes se están estandarizando a través del Comité de Normas Internacionales de ASTM sobre Aplicaciones de Seguridad Nacional [37].

Para generar los aparatos de pruebas, el NIST utilizó requerimientos operacionales dados por equipos de primeros auxilios. Después se generan prototipos de los procedimientos y aparatos de pruebas. Estos prototipos se validan mediante ejercicios robóticos organizados o competencias. Después de la validación, los métodos de prueba se someten para ser estandarizados con ayuda de ASTM Internacional [38].

Dentro del área de movilidad, los robots terrestres más capaces deben atravesar distintos tipos de obstáculos y superficies de terrenos. Los siguientes son algunos métodos de validación que se han propuesto por el NIST [38]:

- Terreno: Superficies planas/pavimentadas
- Terreno: Rampas continuas pitch/roll (cabeceo y alabeo)
- Terreno: Rampas cruzadas pitch/roll (cabeceo y alabeo)
- Terreno: Stepfields (campos de escalones) simétricos
- Terreno: Arena
- Terreno: Grava
- Terreno: Lodo
- Obstáculo: Planos inclinados
- Obstáculo: Escalones de tubos
- Obstáculos: Escaleras
- Tareas de remolque: Trineos agarrados

El NIST ha colaborado estrechamente con la RoboCup RRL para desarrollar métricas de pruebas estandarizadas para robots de respuesta. La RoboCup RRL hace competencias anuales diseñadas alrededor de los métodos estandarizados de pruebas que evalúan, de manera sistemática, las capacidades de los robots [9]. Muchos métodos de evaluación que fueron generados, o refinados en esta competencia se han convertido pruebas estandarizadas [39].

2.1.2. Pruebas utilizadas en RoboCup Rescue

La competencia de RoboCup Rescue se organiza en un formato que asemeja ejercicios de robots para respuestas a catástrofes. Cada robot se evalúa utilizando métodos estandarizados o prototipos de métodos estandarizados durante las rondas preliminares. Los resultados de las pruebas preliminares califica a los equipos para las finales en donde participan en un despliegue dentro de un escenario más complicado. Las finales consta de una búsqueda e identificación de

víctimas simuladas dentro de un laberinto que utiliza los mismos aparatos de evaluación y tareas [9].

La competencia utiliza 20 pruebas para robots terrestres que se dividen en cuatro categorías: Maniobrabilidad (MAN), Movilidad (MOB), Destreza (DEX) y Exploración (EXP). Todas las pruebas se hacen en un espacio confinado de 24m de longitud y un mínimo de 1.1m de ancho. De estas 20 pruebas las que permiten evaluar de mejor manera al sistema de tracción son las pruebas de movilidad y una de maniobrabilidad. A continuación se describen algunas pruebas que se utilizan en la competencia [9].

MAN: Cruce

Esta prueba utiliza rampas de 15 grados de inclinación posicionadas como se muestran en la figura 2.1a. El robot debe entrar en la puerta y cruzar las rampas siguiendo el camino que se muestra en la figura 2.1b. Estas rampas evalúan si el robot tiene suficiente potencia y control para posicionarse y atravesar una superficie irregular. Las rampas que se muestran en la figura 2.1 han sido utilizadas desde los primeros competencias y después de varias iteraciones se crearon las pruebas estandarizadas ASTM E2826 [40] y ASTM E2827 [41], las cuales utilizan configuraciones de estas rampas.

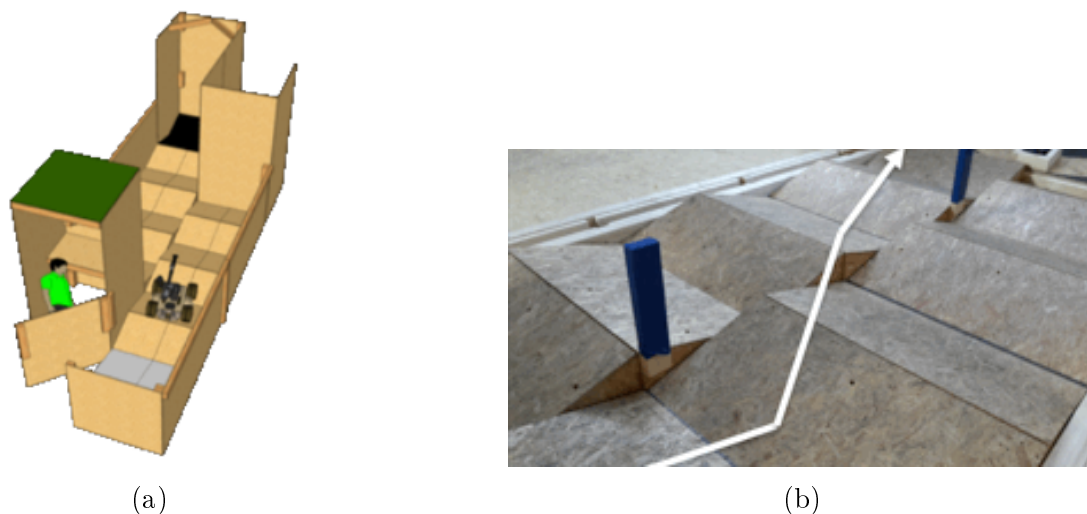


Figura 2.1: Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la maniobrabilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando rampas [9].

MOB 1: Obstáculos

Esta prueba utiliza tubos para crear un obstáculo de 20cm de altura (ver figura 2.2b) [9]. Estos obstáculos se posicionan en el escenario como se muestra en la figura 2.2a. La prueba evalúa la capacidad del robot para atravesar obstáculos verticales en espacios confinados. Esta prueba se basa en la prueba estandarizada ASTM E2802 [42].

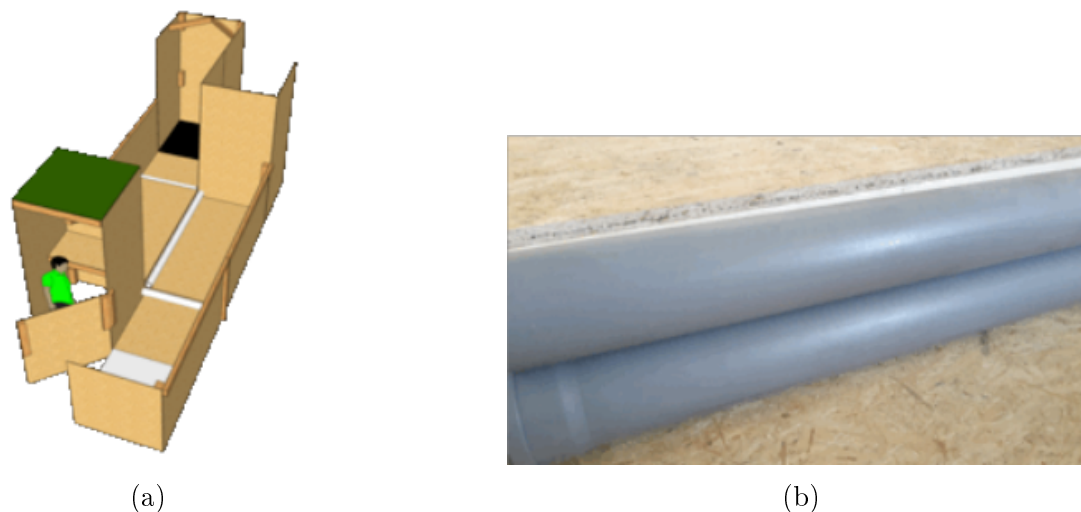


Figura 2.2: Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando un obstáculo de 20 cm de altura [9].

MOB 2: Pendiente de arena y/o grava

Esta prueba utiliza rampas, con una superficie de arena y grava, alternadas con una pendiente de 15 grados como se muestra en la figura 2.5 [9]. La superficie de este terreno evalúa el sistema de tracción al validar que la arena y/o grava no produzcan atascamientos, derrapes extremos u otras fallas que afecte la movilidad del robot. Este método de evaluación a evolucionado hasta que obtener la prueba estandarizada ASTM E2991/E2991M-17 [43] y ASTM E2992/E2992M-17 [43].

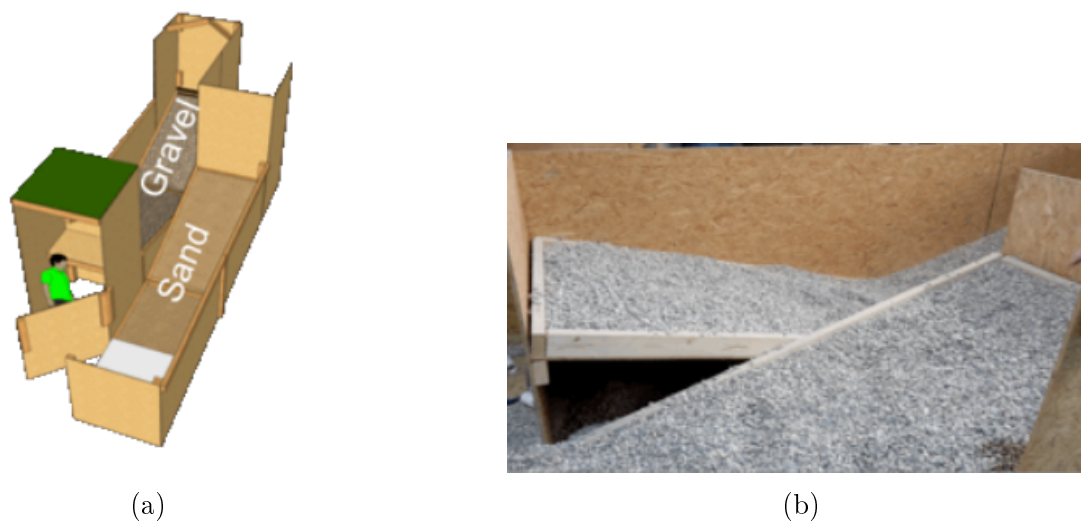
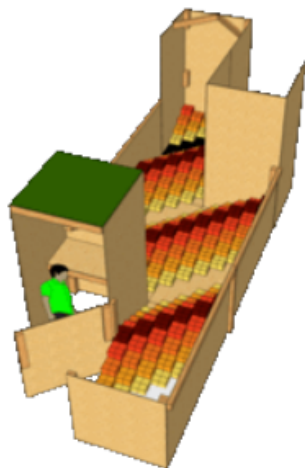


Figura 2.3: Aparato utilizado en RoboCup Rescue para la evaluación de movilidad utilizando pendientes de arena y/o grava [9].

MOB 3: Campo de escalones

Esta prueba utiliza una superficie en diagonal que consiste de escalones cuadrados de 20cm de ancho (ver figura 2.4. La prueba que se utiliza en la competencia de RoboCup Rescue se basa en la prueba estandarizada ASTM E2828-11 [44] que tiene como objetivo evaluar la movilidad del robot en una superficie compleja compuesta de escalones acomodados simétricamente en un espacio confinado. Este terreno representa terrenos con discontinuidades extensivas que existen en zonas de desastres o en otros ambientes similares.



(a)



(b)

Figura 2.4: Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando campos de escalones [9].

MOB 4: Rampas elevadas

Esta prueba utiliza un terreno en pendiente diagonal que consiste de rampas de 60cm de altura con cimas inclinadas (ver figura 2.5) [9]. Este prueba es más compleja y muestra como las pruebas continúan evolucionando para impulsar a los equipos a que mejoren sus prototipos. Esta prueba se basa en el concepto de utilizar rampas para generar un terreno demandante para los sistemas de locomoción de los robots de rescate.

MOB 5: Escaleras con escombros

Esta prueba utiliza un escenario con escaleras de 35 y 45 grados parcialmente bloqueadas con escombros, por ejemplo tablonces en ángulo en ubicaciones definidas (ver figura 2.6) [9]. Esta prueba se basa en la prueba estandarizada ASTM E2804-11 [45] que consiste en utilizar escaleras para representar un obstáculo que puede encontrarse en una zona de desastre, por ejemplo dentro de la planta nuclear de Fukushima Daiichi.

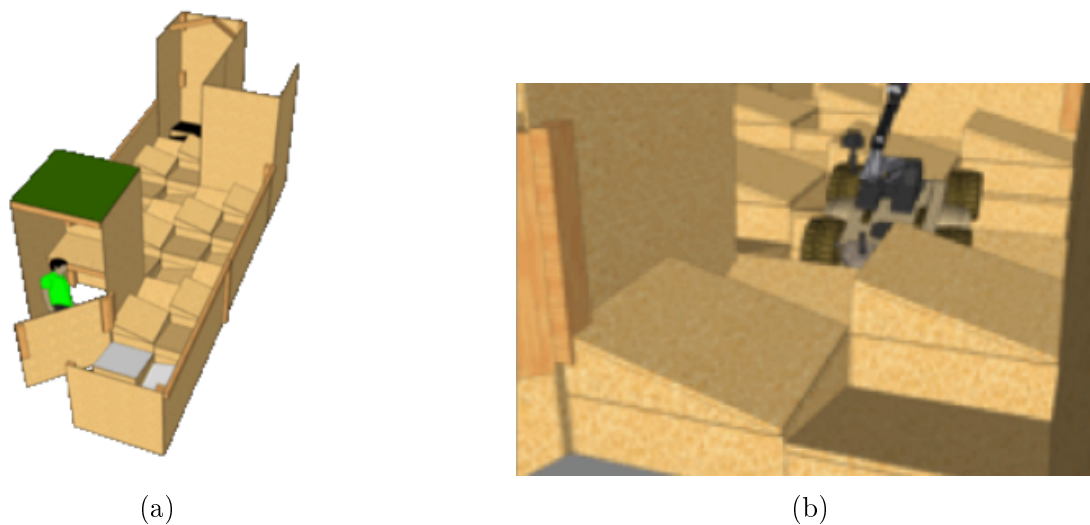


Figura 2.5: Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando rampas elevadas [9].

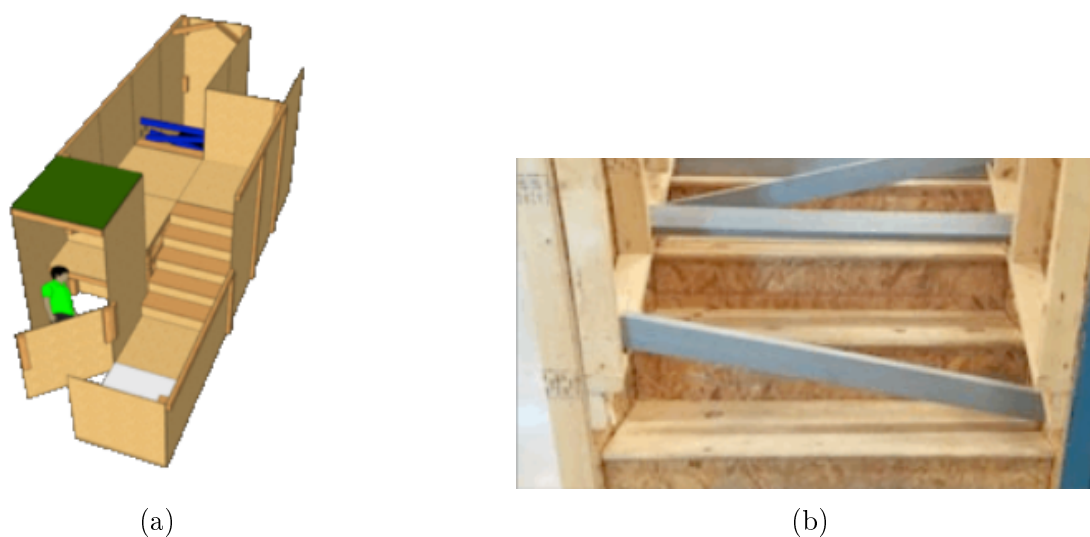


Figura 2.6: Aparato utilizado en RoboCup Rescue para evaluar la movilidad de robots de búsqueda y rescate utilizando escaleras con escombros [9].

2.2. Características de los desastres e impacto en el diseño de robots

Las características y el patrón general de los desastres influyen en el robot que se utiliza y su tamaño. Existen diferentes tipos de desastres en donde robots pueden ser prácticos. Existen dos tipos principales de desastres: desastres naturales y los desastres provocados por el hombre. Ambos tipos de desastres presentan retos para la tecnología actual y es claro que la investigación en esta área aún sigue madurando. Es clave mencionar que los robots no tienen como objetivo

eliminar los trabajadores de búsqueda y rescate, sino servir como herramientas para permitir un mejor trabajo de manera más rápida y segura.

Los robots de búsqueda y rescate permiten que los equipos de primeros auxilios obtengan una mejor conciencia situacional al proporcionar una mejor vista del ambiente en que trabajan. Un ejemplo es el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAVs por sus siglas en inglés) para proporcionar una vista aérea en una zona de desastre y de tal forma proveer información para una mejor toma de decisiones en operaciones de rescate. Otro ejemplo es el uso de vehículos marinos no tripulados (UMVs por sus siglas en inglés) para mapear escombros o buscar restos humanos dentro del agua, tareas esenciales cuando no existen puertos o vías de agua. El tipo de robot que se utiliza debe ser diseñado adecuadamente para ser exitoso en el ambiente que se va a utilizar.

Un sitio de desastre puede ser dividido en tres zonas. La zona *caliente*, *cálida* y *fría*. La zona caliente es la zona de rescate, y generalmente solamente personas y equipo esencial se permite dentro de esta zona. La zona caliente puede extenderse aún más del área de búsqueda. Esto se debe a que vibraciones u otras perturbaciones pueden generar colapsos o daños secundarios. La zona cálida es donde los operarios tienen sus estaciones de comando, rehabilitación, y equipo. Además, familia de las víctimas pueden estar dentro de esta zona para evitar contacto con los medios de comunicación. La zona fría es la zona abierta al público y a los medios de comunicación [34].

Los robots de rescate enfocados para reconocimiento e identificación y localización de víctimas deben estar diseñados para trabajar en la zona caliente de un sitio de desastre. En la zona caliente los equipos de rescate trabajan en espacios confinados con mala ventilación donde el movimiento es limitado. Además, existen riesgos inminentes, tales como derrumbes secundarios o gases tóxicos, que retrasa el trabajo de rescate y ocasionalmente obliga la evacuación de equipos de rescate. La zona caliente puede estar expuesta a la intemperie y los robots pueden enfrentarse a lluvia, nieve, u otras condiciones ambientales que dificulten las labores de rescate.

Desastres naturales

Desastres naturales tales como terremotos, tsunamis, huracanes, tifones, volcanes, derrumbes, deslizamientos e inundaciones presentan muchos retos para los robots de rescate. Este tipo de desastres tienen un impacto inmediato sobre casas, edificios comerciales, canales e infraestructura de transporte y comunicación. Esto implica que los rescatistas tienen un gran número de estructuras para revisar y buscar sobrevivientes. Este tipo de desastres generalmente favorece a los UAVs debido a que permiten generar una vista panorámica de la zona afectada.

Desastres creados por el humano

Los desastres creados por el humano incluyen ataques terroristas o accidentes industriales. Estos generalmente ocurren en una área pequeña, sin embargo pueden tener impactos en las zonas adyacentes, por ejemplo en caso de liberación de gases tóxicos o radiación. Durante este

tipo de desastres, los cuerpos de primeros auxilios se enfocan más en la búsqueda de sobrevivientes dentro de los escombros en un sitio en específico. Este tipo de desastres favorece a los robots capaces de entrar en huecos muy pequeños en donde una persona o un animal no puede.

2.2.1. Robots utilizados en zonas de desastres

En la tabla 2.1 se muestran los tipos de robots que se han utilizado en algunos desastres del 2001 al 2012 [8]. Los desastres se agruparon de acuerdo al tipo de evento: meteorológico, geológico, minero o causado por el hombre. De los 37 despliegues del 2001 al 2012, hubo 7 eventos en donde el despliegue del robot no fue exitoso debido a que no pudo alcanzar la zona de interés. Los UGVs han sido los robots más utilizados, seguido por los UAVs y los UMVs.

2.3. Requerimientos de un robot de rescate móvil

Las características de los desastres tienen un impacto significativo en la movilidad del robot de rescate. En [34] y [33] se presentan algunos requerimientos de movilidad para robots móviles terrestres.

- Las plataformas deben ser pequeñas para caber en huecos, sin embargo altamente móviles y flexibles.
- Las plataformas deben ser auto-correctibles.
- Las plataformas deben estar selladas del medio ambiente, a prueba de agua y polvo.
- Los robots para USAR deben ser de alta movilidad.
- El vehículo no debe de perder tracción en superficies como grava, arena, escombros, etc.
- La plataforma debe evitar atascamientos a causa de un chasis demasiado bajo.
- La plataforma debe tener alta estabilidad y capacidades para auto-correctirse en caso de volcadura.
- La plataforma debe tener un color de alta visibilidad.
- La plataforma debe de tener una carga útil mínima de una cámara de vídeo a color, audio bidireccional, y luces de baja temperatura.
- La plataforma y sus sensores deben de formar un paquete suave para evitar atascamientos con obstáculos irregulares.
- El robot no debe levantar polvo o hacer ruidos fuertes.

Tabla 2.1: Modalidad, cantidad y éxito de robots utilizados en zonas de desastres [8].

	Desastre	Tipo de desastre	Robots Utilizados			Éxito
			Terrestre	Aéreo	Marino	
2001	World Trade Center (USA)	Causado por el hombre	4			✓
2001	Jim Walters No. 5 Mine (USA)	Minero	1			✗
2002	Barrick Gold Dee mine (USA)	Minero	1			✓
2004	Brown's Fork mine (USA)	Minero	1			✓
2004	Niigati Chuetsu earthquake (Japan)	Geológico		1		✓
2004	Hurricane Charley (USA)	Meteorológico	1			✗
2004	Excel 3 Mine (USA)	Minero	1			✓
2005	DR No. 1 mine (USA)	Minero	1			✓
2005	McClane Canyon mine (USA)	Minero	1			✓
2005	La Conchita mudslides (USA)	Geológico	1			✗
2005	Hurricane Katrina (USA)	Meteorológico	1	3		✓
2005	Hurricane Wilma (USA)	Meteorológico		1	1	✓
2006	Sago mine (USA)	Minero	1			✗
2006	California wildfires (USA)	Meteorológico		1		✓
2007	Midas gold mine (USA)	Minero	2			✓
2007	Crandall Canyon mine (USA)	Minero	1			✓
2007	I-35 Minnesota bridge collapse (USA)	Causado por el hombre			2	✓
2007	Berkman Plaza II collapse (USA)	Causado por el hombre	2	1		✓
2008	Hurricane Ike (USA)	Meteorológico			1	✓
2009	Cologne State Archives collapse (Germany)	Causado por el hombre	2			✗
2009	L'aquila earthquake (Italy)	Geológico		1		✓
2010	Haiti earthquake (Haiti)	Geológico		1	1	✓
2010	Wangjialing coal mine (China)	Minero	1			✗
2010	Upper Big Branch mine (USA)	Minero	1			✗
2010	Deepwater Horizon (USA)	Causado por el hombre			16	✓
2010	Prospect Towers (USA)	Causado por el hombre	2			✓
2010	Missing balloonists (Italy)	Causado por el hombre			1	✓
2010	Pike River mine (NZ)	Minero	1			✓
2011	Christchurch earthquake (NZ)	Geológico	1	1		✓
2011	Tohoku earthquake (Japan)	Geológico	3	1		✓
2011	Tohoku tsunami (Japan)	Geológico			9	✓
2011	Fukushima nuclear emergency (Japan)	Causado por el hombre	7	2		✓
2011	Naval base explosion (Cyprus)	Causado por el hombre		2		✓
2011	Thailand floods (Thailand)	Meteorológico		2		✓
2012	Costa Concordia (Italy)	Causado por el hombre			2	✓
2012	Finale Emilia earthquake (Italy)	Geológico		2		✓
2012	Missing person RCMP (Canada)	Causado por el hombre		1		✓
Total	37		23	13	8	37

2.4. Tipos de robots de rescate

Los robots de rescate son sistemas tácticos no tripulados que permiten que los equipos de emergencia perciban y actúen a distancia en tiempo real, o bien permiten que los equipos tengan presencia remota en una zona de desastre [32]. Los robots de rescate se pueden categorizar basados en su modalidad, su tamaño y los modos de locomoción [33]. Aunque también se ha propuesto una ontología de robot compleja con 230 clases y que mezcla la modalidad, el tamaño, y la tarea a realizar [46]. Para este trabajo se utilizara la taxonomía propuesta en [33].

Los robots móviles suelen ser referidos como sistemas no tripulados para distinguirlos de los robots que se utilizan en las fabricas. Los robots de rescate son una categoría de robots móviles que generalmente son lo suficiente pequeños para ser transportados, usados y operados por un grupo que necesita información de zonas afectadas por desastres [33].

Existen tres modalidades de robots de rescate: terrestres, aéreos, y marinos. Estas modalidades pueden ser divididas aún más dependiendo de sus tamaños. Además, cada modalidad puede ser categorizada por otros criterios tales como su método de locomoción y la zona en donde operan. La modalidad y el tamaño determina el tipo de tareas que puede realizar un robot y que tan pronto puede ser utilizado en una zona de desastre. Los robots pequeños son más adecuados para el uso justo después de un desastre debido a que pueden ser transportados por rescatistas fácilmente, mientras que equipo de mayor tamaño tiene que esperar hasta que hayan caminos lo suficiente grandes. Los robots portátiles se utilizan en espacios designados para humanos como por ejemplo túneles de minas. Los robots de gran tamaño requieren remolques para transportarlos y esto limita su uso en zonas de alto riesgo justo después del desastre.

2.4.1. Robots de rescate terrestres

En el sentido más amplio, un UGV es cualquier pieza de equipo mecanizado que se mueve a través de la superficie del suelo y sirve como medio para transportar o cargar algo, pero explícitamente no lleva un ser humano. El termino UGV se utiliza comúnmente dentro del área militar, sin embargo un UGV es simplemente un robot móvil terrestre [47]. Los UGVs son una clase de robots que se han colocado en distintas áreas de trabajo debido a la flexibilidad que proveen.

A partir de estas características se han generado distintos UGVs destinados a alguna tarea propuesta por el humano. El primer gran esfuerzo de robots móviles fue *Shakey*, desarrollado a finales de la década 1960 para ser utilizado como una plataforma de pruebas de inteligencia artificial (AI por sus siglas en inglés) financiado por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA por sus siglas en inglés) en el Instituto de Investigación de Standford (SRI por sus siglas en inglés) [48]. A partir de este robot se fueron desarrollando plataformas para diferentes aplicaciones, una de ellas siendo la robótica para desastres.

Dentro de la robótica para desastres, los UGVs se pueden dividir en tres categorías generales: robots móviles, robots biomiméticos, y motas. Robots móviles es el término utilizado para los robots mecánicos tradicionales tal como de manejo de bombas o rovers. Los robots biomiméticos



(a) 110 FIRSTLOOK [49]. (b) 510 PACKBOT [18]. (c) Remotec ANDROS Wolverine V2 [8].

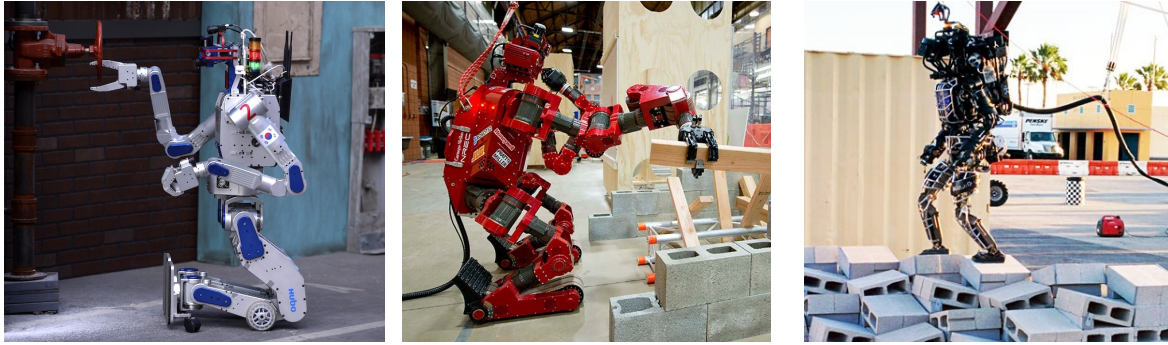
Figura 2.7: Ejemplos de robots móviles: (a) Man-packable (b) Man-portable (c) Maxi.

son aquellos que imitan sistemas biológicos, particularmente en términos de locomoción. Los robots humanoides, con piernas y tipo serpiente son ejemplos claros de esta categoría. Finalmente, las motas son robots tan pequeños que su movilidad depende del viento u otras influencias en el medio ambiente [33].

Robots móviles

Robots móviles es el termino que se utiliza para los robots mecánicos tradicionales, estos son los robots con el mayor número de despliegues. Los robots dentro de esta categoría varían en tamaño, pero generalmente utilizan algún sistema de orugas o ruedas para su locomoción. Para este trabajo se utiliza la clasificación creada por [33] la cual utiliza el factor de desplegabilidad: como los operadores llevan a los robots al punto de ingreso de la misión. En la figura 2.4.1 se muestran los tres tipos de robots móviles dentro del área de robótica para desastres:

- **Man-packable:** Son los robots que pueden ser llevados dentro de una o dos mochilas. Además, estos robots deben de tener un centro de gravedad que permita que una persona lo cargue en zonas de escombros. Esta categoría puede ser dividida aún más en micro y mini robots. Los micro y mini robots caben completamente dentro de una mochila y pueden ser desplegados en espacios en donde los humanos o caninos no entran.
- **Man-portable:** Estos sistemas de robots son aquellos que pueden ser cargados por una o dos personas, pero no caben en una mochila. Estos robots son tienen forma de tanques y típicamente tienen un brazo manipulador. Estos robots trabajan en espacios en donde una persona pequeña podría entrar.
- **Maxi:** Estos sistemas son demasiado grandes y pesados para ser llevados manualmente y generalmente son transportados en remolques. Estos robots raramente son utilizados en zonas de desastres debido a que su peso podrían causar un colapso secundario.



(a) Robot HUBO [52].

(b) Robot Tartan [53].

(c) Robot Atlas [54].

Figura 2.8: Ejemplos de los robots utilizados en el DRC.

Robots biomiméticos

Los robots biomiméticos solamente han sido utilizados en dos despliegues, pero la tecnología actual se enfoca principalmente en el movimiento de la plataforma y no en las cuestiones clave asociadas con construir un robot capaz de realizar una misión.

Un ejemplo claro son los robots tipo serpiente que buscan replicar la habilidad de una serpiente para moverse rápidamente a través de terrenos difíciles. Estos robots pueden moverse de manera libre o bien estar sujetos a una plataforma y ser utilizados para sondar espacios pequeños. Además de los robots tipo serpiente, existen los robots con piernas los cuales han madurado hasta el punto en que pueden caminar sobre escombros. Estos robots permiten una gran movilidad y son plataformas que en un futuro podrían reemplazar a los humanos.

El DARPA Robotics Challenge (DRC) [50] ha sido un gran impulsor para los robots con piernas y esta competencia se enfocó en utilizar pruebas en donde los robots trabajan en espacios hechos para humanos, con herramientas hechas para humanos. El DRC se enfoca en generar robots capaces de operar en ambientes similares a el desastres de la planta nuclear de Fukushima [51]. La mayoría de los robots utilizados en esta competencia son robots humanoides, pero algunos utilizaban una combinación de piernas, orugas y/o ruedas. Algunos de los robots biomiméticos de rescate utilizados en esta competencia se muestran en la figura 2.8.

Además de los robots humanoides, existen otros robots biomiméticos tales como los robots robots tipo serpiente y los robots rastros de patas. Los robots tipo serpiente tienen uniones que permiten movimiento entre cada cuerpo (ver figura 2.9a). Estos vehículos segmentados tienen ciertas dificultades debido a que tienen a su gran número de grados de libertad lo cual ocasiona problemas relacionados con la potencia y el control [55].

El robot de la figura 2.9b muestra un robot hexapodo tipo rastroso que copia algunas características de las cucarachas. Este utilizar piernas en forma de C, lo cual lo hace adecuado para caminar en terreno irregular y sobre obstáculos [56].



(a) Unified Snake Robot [57].

(b) Robot rHex [58].

Figura 2.9: Robots terrestres biomiméticos.

2.4.2. Robots de rescate aéreos

Los robots de rescate aéreos representan la tecnología robótica más avanzada en uso, y conceptos nuevos siguen emergiendo. Los vehículos aéreos no tripulados han incrementado en popularidad para aplicaciones de rescate, pero de igual manera atraen atención de parte de las agencias que controlan el espacio aéreo. De los 37 incidentes documentados (ver tabla 2.1), los UAVs han estado presentes en 13 de ellos. Esto pone en segundo lugar a los UAVs en frecuencia de uso de despliegues.

Los robots aéreos pueden ser divididos en *ala fija* (como un avión), *ala rotatoria* (como un helicóptero), más livianos que el aire (dirigibles), y plataformas atadas (cometas) [8]. Estos robots pueden ser subdivididos de acuerdo a su tamaño, ya sea tamaño *pequeño* o *micro*. Los robots aéreos pequeños tienen un peso menor a 25kg y son capaces de alturas limitadas. Un micro UAV es menor a un metro en cualquier medida característica y pesa menos de 1kg. En la figura 2.10 se muestran los tipos de robots aéreos que pueden ser utilizados después de un desastre.

Los robots de rescate aéreos permiten que los equipos de rescate obtengan un mejor panorama de la situación y los peligros existentes en el área afectada. La información recaudada por estos robots permite que los equipos de rescate pueden generar planes de rescate de manera más rápida y eficiente [35].

2.4.3. Robots de rescate marinos

De los 37 incidentes reportados en donde se desplegaron robots, los UMVs han estado presentes en ocho de ellos. Los UMVs se pueden clasificar en tres categorías: vehículos submarinos autónomos (AUVs, por sus siglas en ingles), vehículos remotamente operados (ROVs por sus siglas en ingles), y vehículos de superficie no tripulados (USVs por sus siglas en ingles) [33]. En la figura 2.11 se muestran ejemplos de los diferentes tipos de UMVs.



(a) Robot Aerovironment [8].



(b) Robot iSENSYS IP3 [8].



(c) Robot de tipo dirigible [59].

Figura 2.10: Ejemplos de robots aéreos no tripulados: (a) ala fija (b) ala rotatoria (c) más liviano que el aire.

Vehículos Submarinos Autónomos

Los AUVs típicamente navegan sin ataduras, lo cual les da el nombre de *autónomos*, y esto implica un mayor número de habilidades de inteligencia artificial. Los AUVs por lo general se mueven debajo del agua utilizando rutas preprogramadas y evadiendo obstáculos utilizando sus sensores abordo tales como sonares. Estos robots tienen algunas ventajas y desventajas para la robótica para desastres. Primero, estos robots pueden ser utilizados sin restricciones en zonas de desastres debido a que no interfieren con las tareas de otros rescatistas o de envío de suministros a las zonas afectadas. Debido al tamaño de los AUVs, estos pueden ser transportados fácilmente a la zona en donde se utilizará. Una de las desventajas de estos vehículos es que no se pueden comunicar con los operadores en tiempo real debido a su ancho de banda insuficiente y la falta de potencia para transmitir estos datos. Estos vehículos generalmente no tienen localización exacta y esto hace que su movimiento no sea impredecible [33].

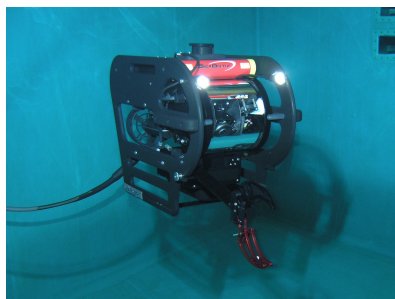
Vehículos remotamente operados

Los ROVs son robots submarinos teleoperados con ataduras. Estos robots son utilizados para operaciones en estructuras submarinas como de aceite o gas y para la acuicultura. Los ROVs se clasifican por tamaño, peso o potencia. Todos los ROVs conocidos llevan a bordo una cámara y algún tipo de sonar para proveer al operador con datos en tiempo real para poder navegar.

Debido a que estos robots utilizan cables para comunicación y alimentación, esto puede ser una desventaja ya que se puede enredar en obstáculos. Además, al tener ataduras, se limita el área de trabajo del robot. Sin embargo, la utilización de cables permite la comunicación entre el operador y el robot en tiempo real y sirve como una línea de seguridad en caso de fallas.



(a) YSI Ocean mapper UAV [60].



(b) SeaBotix SARbot [61].



(c) AEOS Sea-RAI USV [62].

Figura 2.11: Ejemplos de robots marinos no tripulados: (a) UAV, (b) ROV, (c) USV.

Vehículos de superficie no tripulados

Los USVs son robots barco y aunque no existe una clasificación ampliamente aceptada, los USVs para búsqueda y rescate típicamente tienen una longitud de línea de flotación de menos de 3 metros. Estos robots son demasiado pequeños para transportar a una persona, pero lo suficientemente grandes para llevar a bordo suficientes sensores y sistemas de computo.

Los USVs comerciales se utilizan principalmente para biología marina, pero también se están explorando sus usos para misiones de seguridad nacional. Algunas ventajas de estos robots es que debido a que están en la superficie del agua, estos no necesitan cableado de alimentación o comunicación y esto permite que puedan operar de manera completamente autónoma o teleoperada, y al mismo tiempo transmitir datos en tiempo real. Sin embargo, el tamaño de los USVs hace que sean difíciles de transportar. Además, los operadores son responsables de seguir las regulaciones dentro del área marina.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Componentes de un robot móvil de rescate

Los robots de rescate terrestres incorporan muchos elementos de software y hardware para su funcionamiento. Dentro del área de robótica para desastres se busca que un robot móvil tenga cierto grado de autonomía que facilite el uso del robot y mejore su probabilidad de éxito en misiones de búsqueda y rescate. En la figura 3.1 se muestran los sistemas principales de un robot para búsqueda y rescate [10]. A continuación se describe cada sistema:

- Locomoción: permite la movilidad del robot a través de terrenos con superficies variadas.
- Comunicaciones: permite que haya comunicación entre el robot y el operador para informar sobre peligros o víctimas.
- Batería o fuente de alimentación: alimenta a los componentes electrónicos.
- Controlador: regula al resto de los sistemas y los mantiene trabajando juntos.
- Sensores: son utilizados para que el robot pueda navegar, detectar peligros y/o detectar objetivos.
- Manipulador: permite que el robot pueda mover obstáculos, como puertas o escombros, o llevar material de primeros auxilios a víctimas.
- Percepción: utiliza los datos de los sensores para permitir al robot estar *consciente* de sus alrededores.
- Conocimiento: engloba la habilidad del robot para modelar el mundo utilizando información a priori e información recién adquirida.
- Planeación: utiliza el conocimiento y los componentes de sentido para generar comportamientos como evasión de obstáculos, toma de decisiones y/o búsqueda de rutas alternas que pueden ser más rápidas y/o seguras.

- **Autonomía:** permite que el robot colabore con el humano/operador de manera eficiente y eficaz.
- **Colaboración:** determina las capacidades del robot para colaborar con otros robots.
- **Interfaz humano-máquina:** Permite que el operador tenga una conciencia situacional remota a través del robot.

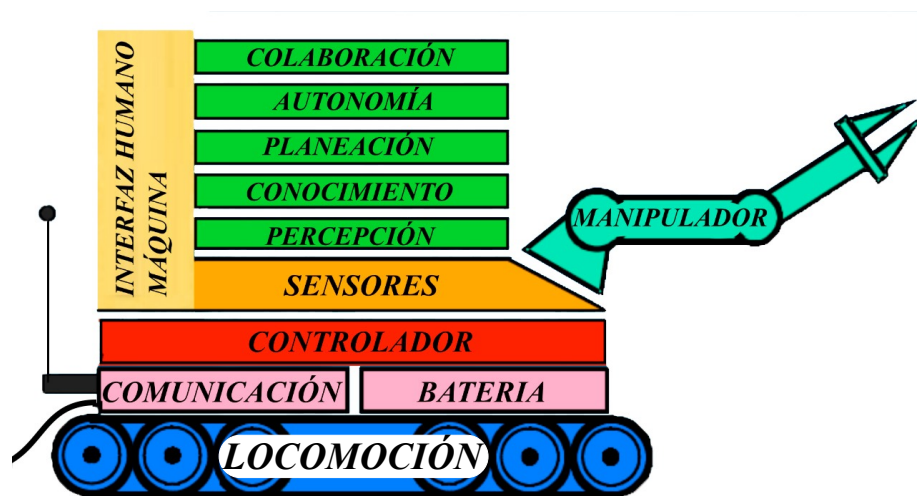


Figura 3.1: Sistemas de un robot terrestre de rescate [10].

3.2. Subsistemas de un sistema de locomoción

Un sistema de locomoción son todas las partes de un vehículo, que permite el movimiento de un lugar a otro. Este sistema es una de las partes más vitales de un robot móvil e incluye motores, cajas de engranajes, piezas de suspensión, transmisiones, ruedas, llantas, orugas, resortes, piernas, pies, mecanismos para mover el centro de gravedad, mecanismos para cambiar la forma o geometría, articulaciones para dirección, etc. [14].

Un sistema de locomoción genérico se puede dividir en seis subsistemas: propulsión, transmisión, dirección, suspensión, articulación y actuación. El subsistema de *propulsión* se encarga de generar la tracción para mover al robot. El torque y potencia se transmiten a los elementos de tracción a través de la *transmisión*. La maniobrabilidad y el cambio de dirección es realizado por el subsistema de *dirección* y el subsistema de *suspensión* minimiza los efectos del terreno irregular sobre el robot. Las funciones de locomoción están habilitadas por el subsistema de actuación. La *actuación* es necesaria para conducir y dirigir el robot, pero la suspensión puede ser pasiva, sin ninguna actuación involucrada. Cualquier forma de *articulación* puede asistir en el posicionamiento del robot y control de movimientos sobre superficies irregulares. Finalmente, el *chasis* conecta a todos los subsistemas de locomoción [63].

3.2.1. Propulsión

Existen distintos métodos de propulsión, algunos de ellos se mencionaron en la sección 2.4.1 para la clasificación de los robots de rescate terrestres. Ahora, se describen los principales sistemas de propulsión (también conocidos como sistemas de *tracción*) más utilizados en los robots móviles.

Patas o piernas

Este sistema de propulsión están generalmente inspirado en sistemas biológicos y se mueven utilizando una serie de puntos de contacto entre el robot y el suelo. Una forma común de clasificar los robots con este tipo de propulsión es dependiendo del número de patas.

Debido al número de puntos de contacto con el suelo, estos sistemas tienen muchas ventajas. Las ventajas principales de este método de propulsión incluyen adaptabilidad y maniobrabilidad en terrenos irregulares [64]. Sin embargo, existen algunas desventajas que surgen de este método de propulsión, una de ellas es la complejidad del sistema de potencia y/o electrónico. Esto se debe a que cada pierna debe de cargar parte del peso total del robot y moverse de tal manera que el sistema se mantenga en equilibrio. Además, dependiendo del número de grados de libertad y la configuración de las piernas, el control para mantener el equilibrio y/o moverse se vuelve más complejo.

Ruedas

Este método de propulsión es el más popular dentro de los robots móviles. Este sistema puede alcanzar una gran eficiencia debido a su simplicidad. Además, el equilibrio no es un problema de investigación para estos robots. Esto se debe a que siempre se busca tener las ruedas en contacto con el suelo. Tres ruedas son suficientes para garantizar un equilibrio estable que permita al robot ser funcional. Sin embargo, cuando más de tres ruedas se utilizan, un sistema de suspensión es necesario para permitir un contacto con el terreno cuando el robot se mueve por terreno irregular.

Orugas

Este es el método de propulsión más utilizado dentro del área de robótica para desastres. Este tipo de sistema de tracción tiene una gran superficie de contacto con el suelo comparado con otros sistemas de tracción. La superficie de contacto incrementa la maniobrabilidad en terrenos irregulares y sueltos. Sin embargo, la gran superficie de contacto con el suelo hace que, durante el cambio de dirección, parte de la oruga tenga que deslizarse sobre el terreno. A causa de este deslizamiento, es difícil de predecir exactamente el centro de rotación y además el cambio exacto de posición y orientación están sujetas a variaciones dependiendo de la fricción del suelo. Aún más, el deslizamiento y a la alta tracción de este método de propulsión hace que el sistema requiera más potencia en terrenos con alta fricción [64].

3.2.2. Transmisión

Los tres mecanismos de transferencia de potencia y/o torque más utilizados en el área de robótica son [14]:

1. Bandas
2. Cadenas
3. Engranajes

Bandas

Estas son duraderas, generalmente silenciosas, y pueden manejar cierta desalineación. Además, se pueden emplear para distancias grandes entre centros, pero en algunos casos se requiere de una polea guía o tensora para evitar ajustes en la distancia entre centros [65]. Las bandas se pueden encontrar en al menos cuatro tipos principales [14]:

- Plana: utiliza poleas abombadas y este tipo de bandas son utilizadas principalmente para aplicaciones de baja potencia.
- Redonda: utiliza poleas ranuradas o acanaladas, son de muy bajo costo y se utilizan principalmente en juguetes y dispositivos electrónicos como tocadiscos.
- Tipo V: este tipo de banda también utiliza poleas ranuradas y pueden transmitir potencia hasta algunas decenas de caballos de fuerza, pero con el tiempo tienden a deslizarse sobre las poleas.
- De sincronización: estas bandas utilizan poleas dentadas o catarinas y no se estiran ni se deslizan, por lo que transmiten potencia con una relación constante de velocidad angular [65].

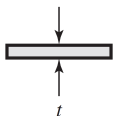
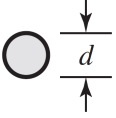
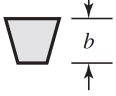
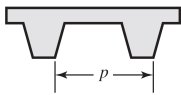
En la tabla 3.1 se muestra las secciones transversales de la banda plana, redonda, tipo V y la vista lateral de la banda de sincronización. Además se incluyen los tamaños estándar en los que se pueden encontrar las bandas.

Cadenas

Existen tres tipos básicos de cadenas:

- Cadenas de escalera o escalerilla: generalmente utilizadas para la transmisión de menos de 1/4 caballo de potencia.
- Cadenas de rodillos: utilizadas para transmisión de potencia de cientos de caballos de fuerza.

Tabla 3.1: Secciones transversales (con excepción de la banda síncrona) y el intervalo de tamaños de los 4 tipos de bandas.

Tipo de banda	Figura	Intervalo de tamaños
Plana		$t = 0.03$ a 0.20 pulg (0.75 a 0.5 mm)
Redonda		$d = \frac{1}{8}$ a $\frac{3}{4}$ pulg
Tipo V		$b = 0.31$ a 0.91 pulg (8 a 19 mm)
De sincronización		$p = 2$ mm y mayor

- Cadenas de tiempo: también llamadas cadenas silenciosas, utilizadas para aplicaciones de baja potencia y altas revoluciones.

Las cadenas de escalera se llaman así debido a que tienen un aspecto de escalera. Estas cadenas son de muy bajo costo debido a que son extremadamente simples. La construcción de este tipo de cadena no es muy fuerte y por lo tanto esta cadena se utiliza en aplicaciones de muy baja transmisión de potencia y/o de bajo costo. En la figura 3.2 se muestra la cadena de escalerilla montada sobre una rueda dentada.

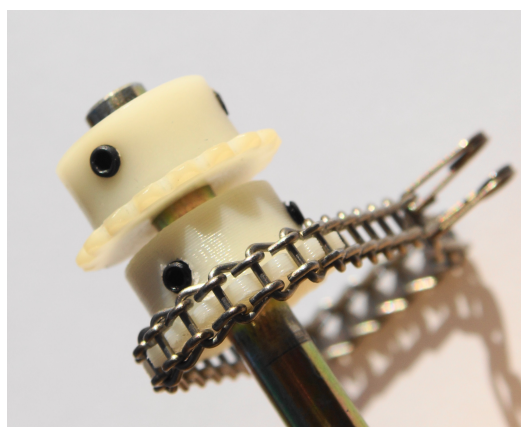


Figura 3.2: Cadena de escalerilla.

Las cadenas de rodillos son un método de transferencia de potencia eficiente que utiliza rodillos que giran sobre los eslabones que están sujetos por pasadores. La cadena de rodillos es robusta

y puede soportar desalineación entre sus catarinas. Dos de sus desventajas es que no soporta la arena y puede ser ruidosa [14]. Las cadenas de rodillos vienen en una variedad de tamaños y formas. Los tamaños han sido estandarizados a través del Instituto Americano de Normas Nacionales (ANSI, por sus siglas en ingles) [66]. En la figura 3.3 se muestra la estructura básica de una cadena de rodillos.

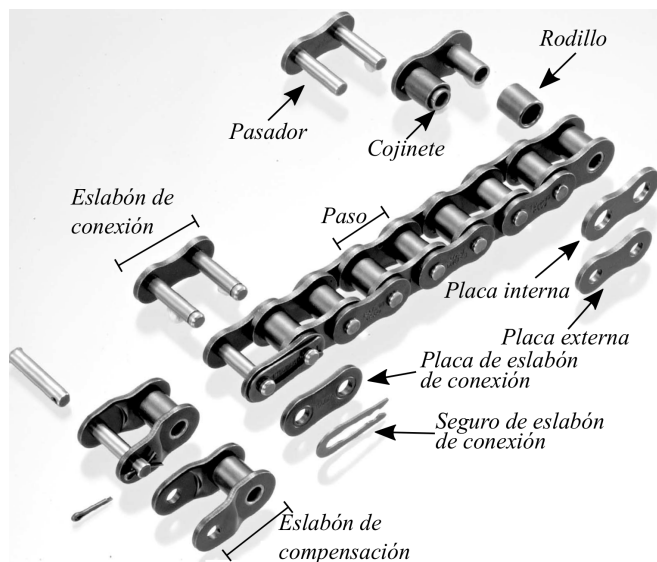


Figura 3.3: Estructura básica de una cadena de rodillos [11].

Las cadenas de tiempo son muy silenciosas, aún a altas velocidades y alto torque. Además, son más eficientes que las cadenas de rodillos debido a la forma de sus eslabones. Este tipo de cadenas es intolerante a la arena, es más costoso y requiere una alineación precisa entre sus catarinas. En la figura 3.4 se muestra la cadena de tiempo y las catarinas necesarias para este sistema.

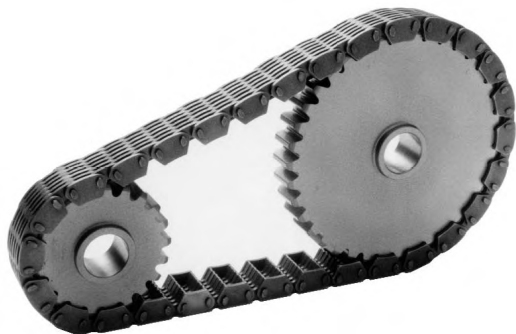


Figura 3.4: Cadena de tiempo [12].

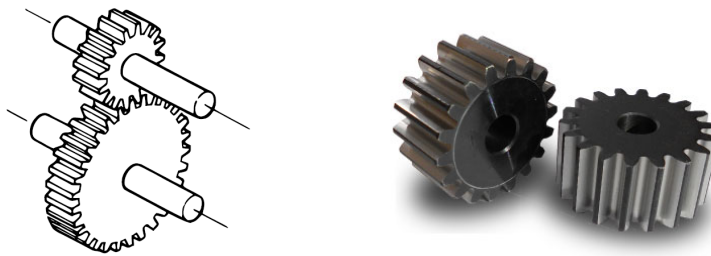


Figura 3.5: Engranés rectos.

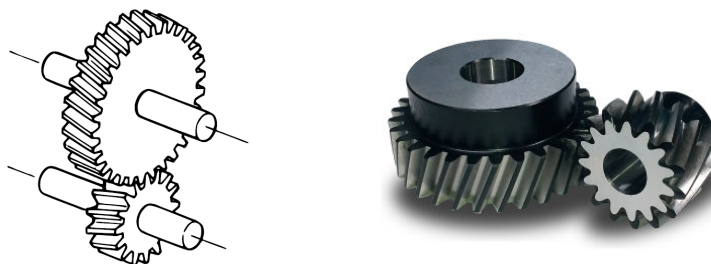


Figura 3.6: Engranés helicoidales.

Engranés

Este método de transmisión es el más utilizado debido a los tamaños que pueden tomar los engranes y las altas cantidades de potencia que pueden transmitir. Cuando funcionan bajo condiciones óptimas, estos pueden transmitir potencia de manera eficiente y silenciosa. Pueden transmitir potencia entre ejes paralelos, perpendiculares o sesgados. Para que los engranes puedan trabajar de manera óptima, estos deben tener dientes precisos y la distancia entre engranes debe ser la adecuada. Debido a la precisión, estos sistemas no toleran la arena y usualmente están dentro de una caja sellada con algún tipo de lubricación.

Existen cuatro tipos principales de engranes: rectos, helicoidales, cónicos y sinfín. Cada tipo de engrane se emplea para transmitir movimiento de rotación a ejes en distintas configuraciones. Los engranes rectos son los engranes más comunes debido a su simplicidad. Estos engranes tienen dientes paralelos a su eje de rotación, los cuales se utilizan para transmitir movimiento entre ejes paralelos. En la figura 3.5 se muestra este tipo de engranes y su forma de acoplamiento [65], [67].

Los engranes helicoidales que se muestran en la figura 3.6 tienen dientes inclinados con respecto al eje de rotación. Esta inclinación hace que este tipo de engranes sea más silencioso que los engranes rectos y además reduce la vibración durante su movimiento. Sin embargo, este diseño de dientes genera una fuerza axial debido a la configuración de sus dientes.

Los engranes cónicos rectos de la figura 3.7 tienen dientes formados sobre una superficie cónica. Estos engranes se utilizan para transmitir movimiento entre ejes que se intersectan. Además, dependiendo de sus dientes, estos se pueden clasificar en engranes cónicos rectos o helicoidales.

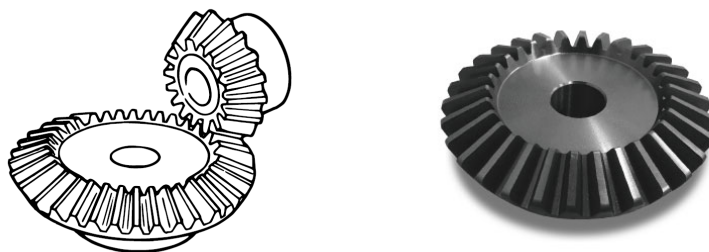


Figura 3.7: Engranés cónicos.

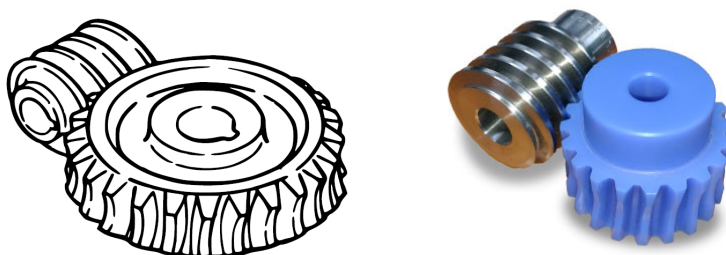


Figura 3.8: Tornillo sinfín.

Finalmente, el tornillo sin fin o de gusano que se muestran en la figura 3.8 utiliza un tornillo para transmitir movimiento a un engrane. Este tipo de engranaje se utiliza para ejes no paralelos y que no se intersectan. Los engranajes de sinfín proveen una gran reducción de velocidad y además son autobloqueables.

3.2.3. Dirección

Cuando un robot móvil se mueve en una línea recta, todas las ruedas o orugas se fijan en la misma dirección y giran con la misma velocidad, pero solamente si las ruedas son del mismo tamaño. Si se busca un cambio de dirección, entonces es necesario algún cambio del sistema para realizarlo. Una bicicleta muestra el mecanismo más intuitivo para realizar este cambio. Al girar la rueda frontal el sistema, incluyendo la rueda trasera, sigue esa dirección. Al enderezar la rueda frontal, la bicicleta se mueve en línea recta una vez más. Si ahora se observa las dos ruedas traseras de un triciclo, se obtiene que la rueda interna gira a una velocidad menor que la externa. Este detalle se puede trasladar a vehículos con orugas o ruedas. De estas observaciones se obtienen dos formas generales de cambio de dirección [14]:

- Si las ruedas del vehículo son colineales, entonces debe existir alguno método que permita que las ruedas puedan estar en distintas direcciones.
- Si el vehículo tiene ruedas en dos lados, estas ruedas deben ser capaces de girar a diferentes velocidades.

- Cualquier desviación de lo anterior, el vehículo tendrá que derrapar para girar.

De las observaciones mencionadas anteriormente, se obtienen algunos métodos de cambio de dirección en los robots móviles.

Dirección diferencial

Este método utiliza una diferencia de velocidad entre dos ruedas laterales de un vehículo para realizar el cambio de dirección. Este método es utilizado en la mayoría de robots con orugas, pero también se utiliza en un gran porcentaje en vehículos con cuatro, seis y hasta ocho ruedas. Una desventaja que existe es que este método produce un deslizamiento de las orugas o ruedas sobre la superficie. Este deslizamiento causa un gasto de energía innecesario, lo cual hace que este método sea ineficiente comparado con los otros métodos.

Configuraciones en robots con 3 ruedas

Los robots con tres ruedas es uno de los diseños más utilizados para robots con ruedas. Estos robots pueden tener muchas configuraciones para realizar el cambio de dirección. En la figura 3.9 se muestran las cinco configuraciones más populares para vehículos con tres ruedas: diferencial, síncrono, ruedas omnidireccionales, ruedas giratorias activas y ruedas orientables activas [8].

Los robots de tres ruedas con sistema diferencial (ver figura 3.9a) utilizan dos ruedas fijas que giran con una diferencia de velocidad para realizar cambios de dirección. La tercer rueda es pasiva y permite que el robot mantenga el equilibrio y gire sin algún derrape de las ruedas. Este diseño es muy simple, de bajo costo y su movimiento es eficiente en superficies planas y sin irregularidades. Una de las desventajas de este mecanismo es la dificultad para moverse en terrenos irregulares o superficies desiguales.

Los sistemas síncronos activos (ver figura 3.9b) utilizan ruedas que giran de manera síncrona para cambiar de dirección. Este mecanismo permite realizar movimientos omnidireccionales con solamente dos actuadores, uno para el motor conductor y otro para girar las ruedas. Debido al mecanismo, el cual utiliza poleas y bandas para girar y mover las ruedas, este sistema es relativamente complejo y se pueden generar diferencias de velocidad entre cada rueda.

El robot omnidireccional con ruedas omnidireccionales de la figura 3.9c es un sistema fácil de construir ya que no utiliza actuadores para girar sus ruedas. Sin embargo, el diseño y complejidad de estas ruedas hace que este tipo de robot se utilice frecuentemente en superficies planas y sin irregularidades. Una desventaja del diseño de este robot es que existen vibraciones causadas por las discontinuidades en sus ruedas. Además, la durabilidad de estas ruedas, en comparación con ruedas convencionales, es mucho menor.

Los robots omnidireccionales con ruedas giratorias activas utilizan una rueda pasiva y dos ruedas activas giratorias para generar velocidades lineales o angulares (ver figura 3.9d). Las desventajas de este diseño es que si las ruedas se posicionan demasiado cerca, el robot puede ser inestable. También, si el robot cambia de dirección para ir en reversa se puede generar un cambio

abrupto en la orientación de las ruedas giratorias. Además, si el motor conductor se encuentra montado directamente sobre la rueda, los cables de alimentación se enrollaran cuando esta rueda gire.

Finalmente, los robots omnidireccionales con ruedas orientables activas (figura 3.9e) utilizan ruedas orientables centradas para hacer el cambio de dirección. Este sistema es similar al sistema que utiliza ruedas giratorias y la diferencia más notable es que las ruedas orientables centradas deben de estar alineadas con la dirección de la velocidad deseada. Uno de los inconvenientes de este sistema es que utiliza demasiados actuadores y estructuras mecánicas complicadas. Muchas veces se limitan los ángulos de dirección ya que los cables de alimentación de los motores se pueden enrollar debido a que estos se encuentran montados directamente a la rueda.

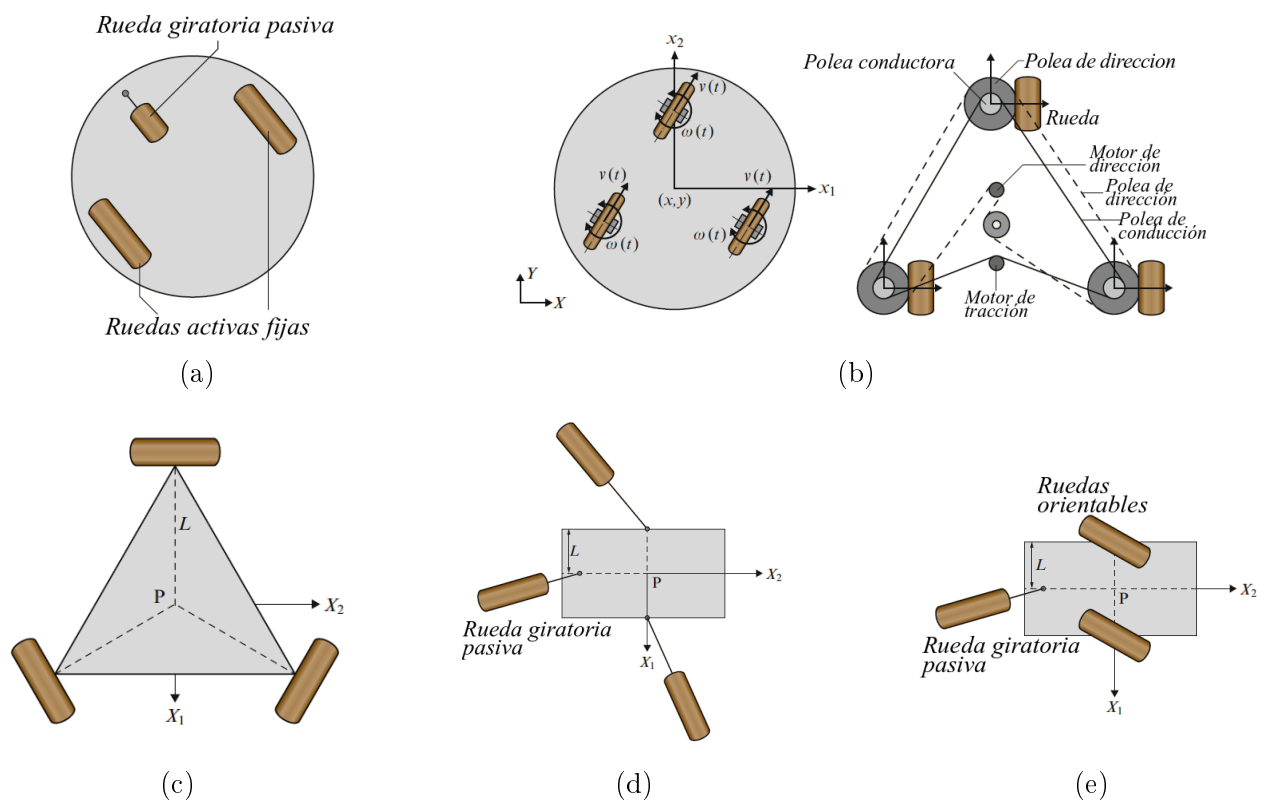


Figura 3.9: Ejemplos de sistemas de dirección de robots con tres ruedas a) sistema diferencial, b) sistema síncrono c) robot omnidireccional con ruedas omnidireccionales d) robot omnidireccional con ruedas giratorias activas e) robot omnidireccional con ruedas orientables activas.

Los sistemas descritos anteriormente se pueden extender a sistemas con cuatro ruedas para mejorar la estabilidad y utilizar sistemas de dirección como el de dirección Ackerman. En este mecanismo las dos ruedas frontales son orientadas de tal manera que ambas mantengan el mismo centro instantáneo de rotación (CIR) (ver figura 3.10). Este sistema de dirección hace que el robot sea estable a altas velocidades, sin embargo esto requiere un mecanismo de dirección relativamente complejo. Si las ruedas traseras de este sistema son accionadas, entonces es necesario un engranaje

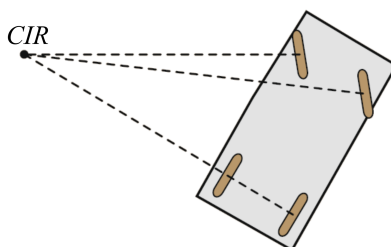


Figura 3.10: Sistema de dirección Ackerman

diferencial que permita el giro de las ruedas traseras sin deslizamiento. Además, si las ruedas frontales no pueden girar 90 grados, el radio de giro del robot se vuelve diferente a cero [8].

3.2.4. Suspensión

Los sistemas de suspensión son necesarios en distintos robots móviles cuando se pretende recorrer superficies irregulares y desiguales. Este sistema permite que las ruedas de un robot se mantengan en contacto con el suelo al cruzar terrenos irregulares e incrementa la tracción del sistema. Además, las suspensiones ayudan a mitigar el efecto de las perturbaciones en el movimiento del cuerpo del robot, y así permitiendo una mejor negociación de obstáculos y estabilización de sensores o carga útil. Para el diseño de una suspensión es necesario tomar en cuenta la cinemática de los eslabones y la correcta elección del elemento de carga y de disipación.

Una suspensión es un sistema de articulaciones, resortes, amortiguadores y actuadores que gobiernan el movimiento relativo entre las ruedas del robot y la carrocería [8]. Los mecanismos para las suspensiones se diseñan para permitir cierto desplazamiento vertical de las ruedas. Los mecanismos más comunes incluyen uniones prismáticas y/o rotaciones con una rueda unida a un brazo tirado y mecanismos de cuatro barras. En los sistemas con orugas, existen tres tipos de sistemas de suspensión:

- Brazo tirado sobre un muelle de torsión.
- Brazo tirado con un resorte de compresión.
- Balancín de ballesta.

En la figura 3.11 se muestran estos sistemas de suspensión en robots con orugas.

3.2.5. Articulación

La articulación en un robot móvil permite un mejor manejo de obstáculos y asiste con la postura del robot en movimientos sobre planos irregulares. Este sistema puede estar presente

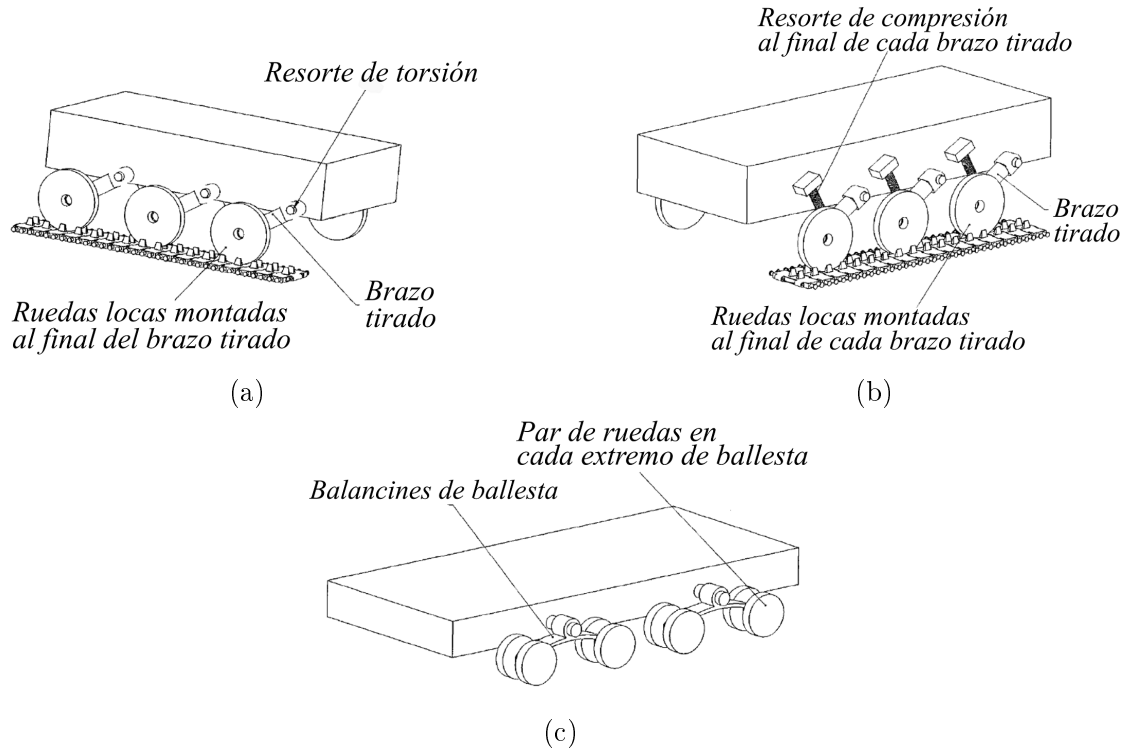


Figura 3.11: Suspensiones para vehículos con orugas: (a) brazo de arrastre sobre un muelle de torsión (b) brazo de arrastre con un resorte de compresión (c) balancín de ballesta.

en los distintos tipos de robots que existen (con ruedas, orugas o patas) y toman diferentes configuraciones dependiendo de la función.

Robots articulados con ruedas

Los robots con ruedas pueden estar articulados de distintas formas. El robot articulado más simple utiliza un robot y remolques para generar un sistema reconfigurable dependiendo de la tarea que pretende realizar. Este sistema utiliza remolques que siguen el camino del robot remolcador de manera pasiva. Aunque también existen sistemas que utilizan actuadores en los remolques y/o en las articulaciones para moverse en el camino deseado. Al utilizar uniones activas, se pueden generar movimientos similares al de las serpientes.

Los robots con ruedas también pueden utilizar mecanismos para moverse en terrenos irregulares y con obstáculos como escaleras. En estos sistemas se utilizan mecanismos y actuadores en cada rueda que permite que el robot adapte su configuración dependiendo del terreno que pretende cruzar [8]. En la figura 3.12 se muestra un ejemplo de estos robots articulados y su modo de operación al momento de subir escalones.

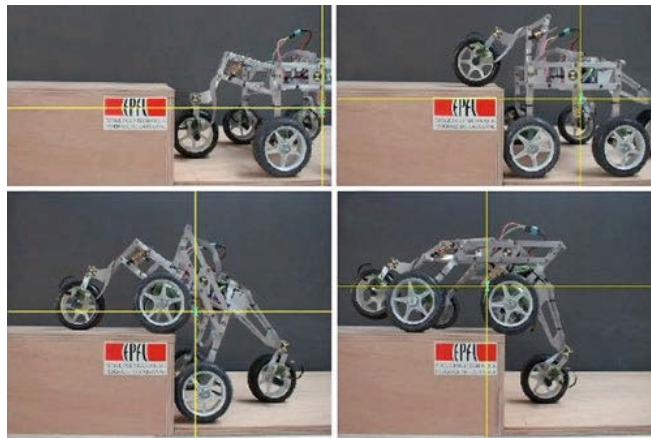


Figura 3.12: Robot articulado con ruedas para uso en terrenos irregulares [13].

Robot articulados con orugas

Los robots con orugas pueden tener diferentes configuraciones que permiten incrementar la movilidad en terrenos irregulares. Las articulaciones más comunes utilizadas en los robots con orugas se muestran en la figura 3.13 [14]. El sistema con dos orugas de la figura 3.13a utiliza una articulación para unir las orugas y permitir movimiento entre ellas. Cada oruga tiene su propio motor para la conducción y se utilizan actuadores en la articulación para girar al robot en movimiento. La estabilidad de este sistema se obtiene al hacer las orugas lo suficiente ancho y se utilizan soportes en ambos lados de cada oruga.

La plataforma que se muestra en la figura 3.13b es la configuración más simple de un robot con cuatro orugas. Este sistema es reconfigurable y permite que el robot tenga mejor movilidad debido a una mayor longitud de la plataforma. A causa de esta reconfigurabilidad, el robot puede retraer las orugas auxiliares (también conocidas como aletas) para disminuir la longitud total del sistema cuando sea necesario. Además, las aletas pueden ser utilizadas para subir obstáculos más altos que la altura de la oruga principal.

Finalmente, en la figura 3.13c se muestra una extensión del robot con cuatro orugas. Esta plataforma utiliza seis orugas (cuatro aletas) que permiten una mejor movilidad, pero la complejidad del sistema incrementa debido a un mayor número de actuadores. Las aletas se pueden desplegar para obtener una mejor tracción y retraer para hacer al robot más compacto.

3.2.6. Actuación

Los actuadores suministran la fuerza motriz de los robots. La mayoría de actuadores existentes son componentes comerciales que se adaptan o modifican para las distintas aplicaciones robóticas. Los tres tipos de actuadores comúnmente utilizados son electromagnéticos, hidráulicos y neumáticos.

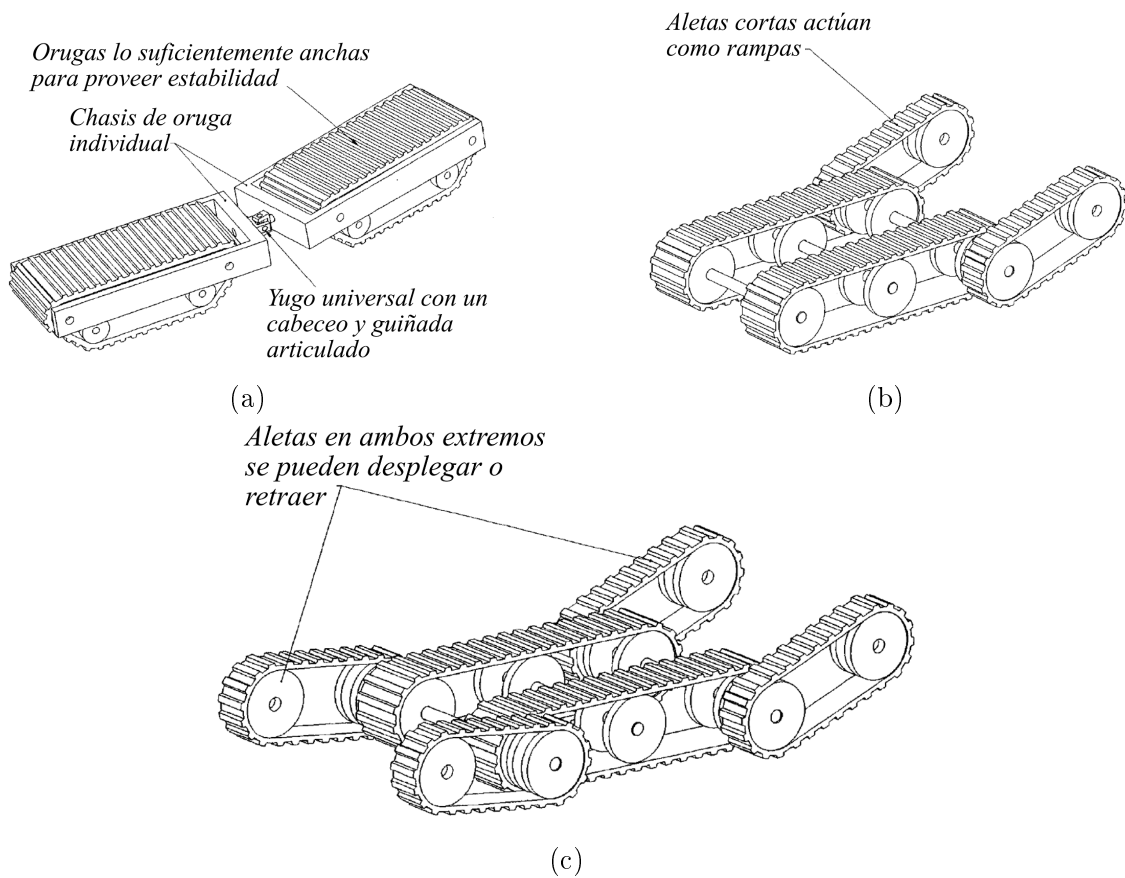


Figura 3.13: Ejemplos de robots articulados con orugas [14].

Actuadores electromagnéticos

Los motores de corriente directa de imán permanente (*PMDC* por sus siglas en inglés) y sin escobillas (*BLDC* por sus siglas en inglés) son los dos tipos de motores electromagnéticos más utilizados dentro del área de la robótica (figura 3.14).

Los motores PMDC son ampliamente utilizados debido a sus características: un alto par, control de velocidad en un amplio rango, un buen comportamiento de relación torque-velocidad y adaptabilidad a diversos tipos de métodos de control. Este motor convierte energía eléctrica a energía mecánica rotacional o lineal. Además, se encuentra en diferentes tipos y configuraciones y usualmente son de bajo costo. En la figura 3.14a se muestra la estructura básica de un motor de imán permanente con escobillas.

Los motores BLDC sustituyen sensores magnéticos u ópticos y circuitos de conmutación electrónica para las escobillas de grafito y conmutadores de cobre utilizados en los PMDC, lo cual elimina la fricción, las chispas y el desgaste en las partes del conmutador (ver figura 3.14b). Los motores BLDC usualmente tienen un mejor rendimiento a bajo costo debido a una complejidad reducida del motor. Sin embargo, los controladores de estos motores son más complejos y costosos que los que se utilizan en los motores PMDC [8].

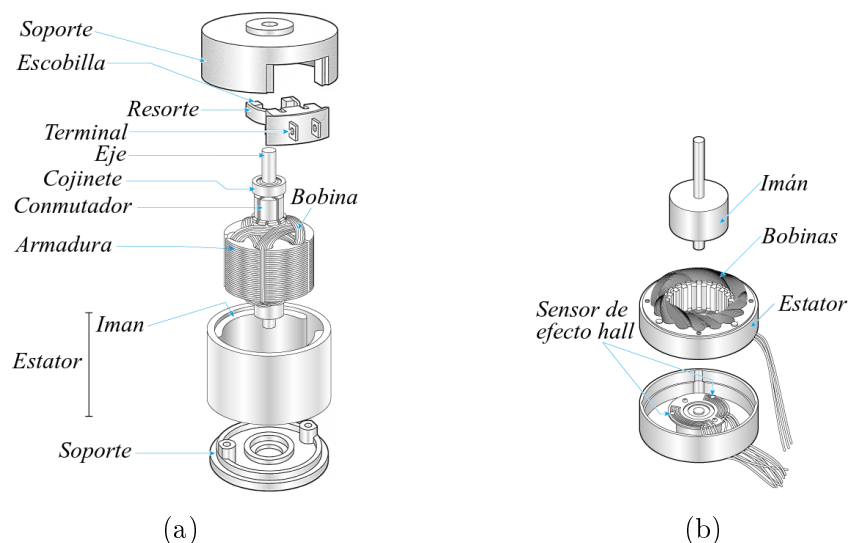


Figura 3.14: Dos tipos de motores utilizados en el área de robotica: (a) PMDC (b) BLDC [15].

Actuadores hidráulicos

Estos actuadores convierten la energía hidráulica en energía mecánica lineal en cilindros hidráulicos o rotacional en motores hidráulicos. Este tipo de actuadores ofrecen una gran fuerza o torque, sin embargo el sistema de alimentación hidráulica de estos sistemas tienden a ser voluminosos. Este tipo de actuadores están sujetos a problemas de fugas y mantenimiento. El uso de estos actuadores en la robótica es limitado a sistemas con un alto requerimiento de fuerza. En la figura 3.15 se muestra un circuito hidráulico básico compuesto de un depósito, un filtro, una bomba hidráulica, una válvula de alivio, una válvula de control direccional, una válvula de control de flujo y un cilindro hidráulico.

Actuadores neumáticos

Los actuadores neumáticos convierten la energía (en forma de aire comprimido) en movimiento mecánico, el cual puede ser lineal o rotatorio. El funcionamiento de los sistemas neumáticos es similar al de los sistemas hidráulicos. Los actuadores neumáticos se encuentran primordialmente en manipuladores simples debido a que ofrecen poco control de movimiento, son fáciles de controlar y son de bajo costo.

Estos actuadores se pueden utilizar en aplicaciones que no requieren altas fuerzas o torques. Normalmente se utilizan en manos robóticas o músculos artificiales, los cuales requieren una alta relación de potencia-peso. Además, debido a sus características, estos pueden ser utilizados en robots médicos y en robots utilizados en ambientes explosivos [8].

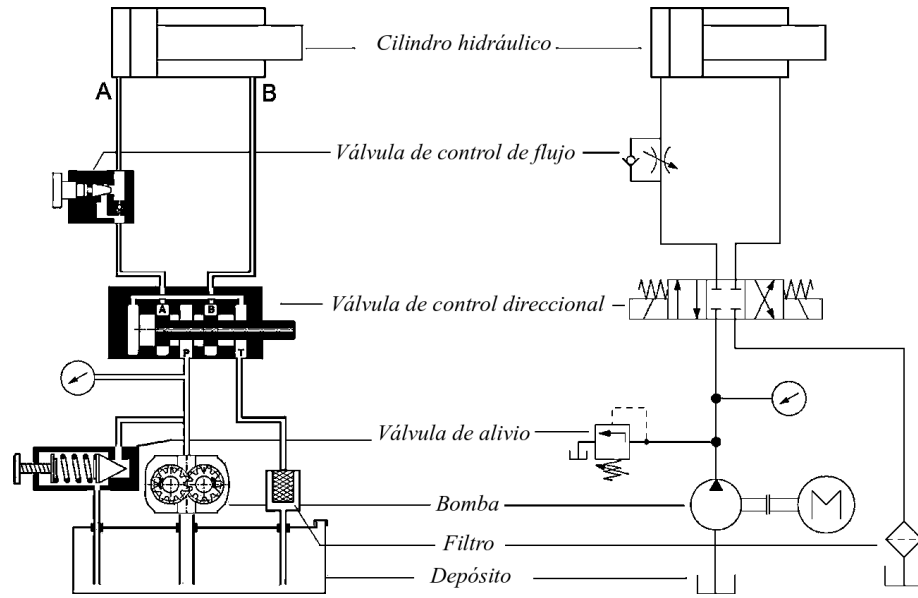


Figura 3.15: Circuito de un sistema hidráulico, esquemático y dibujos simbólicos [16].

3.3. Selección del robot a desarrollar

El robot a desarrollar es una plataforma terrestre que permita continuar la investigación en el área de robótica para desastres. Para la correcta selección del sistema es necesario tomar en cuenta todos los subsistemas del sistema de locomoción y realizar una elección de acuerdo a las capacidades del sistema, sus ventajas y desventajas.

3.3.1. Comparación de sistemas de locomoción

Existen tres principales tipos de locomoción dentro del área de robótica móvil, los robots con ruedas, con orugas y los caminantes. En la tabla 3.2 se muestran las ventajas y desventajas principales de cada tipo de locomoción. Existen métodos de evaluación estandarizados que permiten evaluar la movilidad de los sistemas de locomoción, pero también se puede hacer una comparación al investigar las ventajas y desventajas de cada tipo de locomoción. Algunos de los aspectos de los sistemas de locomoción que se toman en cuenta son [14]:

- Tamaño: La longitud, ancho, altura y longitud diagonal del robot.
- Eficiencia: Cantidad de energía que utiliza el robot para hacer ciertos movimientos. Un menor peso y número de partes en movimiento incrementa la eficiencia.
- Complejidad: número de piezas, número de actuadores y mecanismos que se utilizan para controlar al robot.
- Velocidad y costo: Que tan rápido se puede mover y el precio de sus componentes y fabricación.

Tabla 3.2: Comparación de los tres principales sistemas de locomoción.

Sistema	Ventajas	Desventajas
Orugas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alta tracción debido a la alta área de contacto de la oruga. ■ Capacidad de cruzar grietas de mayor tamaño. ■ Mejor capacidad de subir escaleras. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mayor consumo de energía debido a un mayor número de partes en movimiento. ■ Sufren de problemas como descarrilamiento o atascamiento en las orugas. ■ Debido a su alta superficie de contacto, el giro del vehículo requiere arrastrar parte de las orugas.
Ruedas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Son sistemas simples y con alta confiabilidad. ■ Alta eficiencia. ■ Bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Baja tracción debido a la baja área de contacto de la rueda. ■ Puede surgir atascamiento a causa de obstáculos de mayor tamaño. ■ Centro de gravedad alto al incrementar superficie de contacto.
Piernas/ patas	<ul style="list-style-type: none"> ■ Alta movilidad. ■ Alta agilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistema de control complejo debido al número de partes en movimiento y grados de libertad. ■ Sistema de estabilidad debe ser robusto para evitar caídas. ■ Generalmente son más lentos que los otros tipos de locomoción.

3.3.2. Versatilidad y complejidad

La versatilidad y complejidad son dos conceptos más que hay que tomar en cuenta al momento de iniciar el desarrollo de una plataforma móvil. Para este trabajo la versatilidad examina directamente el sistema de locomoción y se utiliza como una medida de movilidad y maniobrabilidad del sistema de locomoción. Por otro lado, la complejidad solamente se utilizará como medida de complejidad del sistema mecánico.

En la figura 3.16 se muestra una comparación de distintos sistemas de locomoción tomando en cuenta la versatilidad y complejidad del sistema [17]. En esta figura se observa que en los distintos sistemas de locomoción existe una similitud, al aumentar la versatilidad, se aumenta la complejidad. La versatilidad de un sistema de locomoción se puede mejorar cuando se incrementa el número de articulaciones, grados de libertad y/o actuadores, sin embargo esto también aumenta

el nivel de complejidad del sistema.

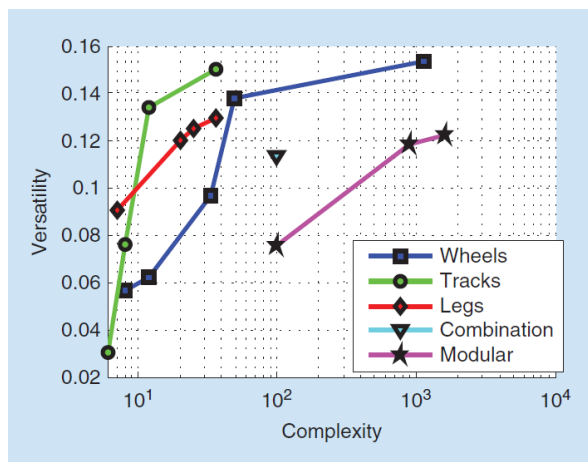


Figura 3.16: Comparación de versatilidad contra complejidad de distintos sistemas de locomoción [17].

Utilizando las bases teóricas presentadas en este capítulo se analizaron y compararon los sistemas de locomoción de los robots terrestres, tomando en cuenta la complejidad y versatilidad del sistema de locomoción. A partir de la comparación hecha, entre los sistemas principales de locomoción, se decidió que los robots con orugas son los más aptos para iniciar y continuar la investigación dentro del área de robótica para desastres en la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Capítulo 4

Conceptualización y diseño

4.1. Definición de requerimientos

Para la obtención de los requerimientos se tomaron en cuenta aspectos tales como el ambiente en que se utilizará el robot, los despliegues pasados de UGVs en zonas de desastres y el usuario final. Además, se utilizaron los requerimientos propuestos por [33] y [34], los cuales fueron obtenidos a través de retroalimentación de grupos de primeros auxilios.

El conocimiento de las pruebas estandarizadas existentes para la evaluación de robots de rescate permiten generar ciertos requerimientos de diseño. Para el diseño del sistema de tracción también se tomarán en cuenta las pruebas estandarizadas hechas por el NIST y adaptadas por RoboCup. Estas pruebas requieren que el robot sea de cierto tamaño y tenga ciertas habilidades de movilidad y maniobrabilidad. Además, las pruebas permiten evaluar la confiabilidad del robot al tomar en cuenta el número de repeticiones que se pueden hacer sin percances en el sistema de locomoción.

Este prototipo será utilizado para la investigación en el área de robótica para desastres con el propósito de obtener una plataforma capaz de entrar en zonas afectadas por algún siniestro y realizar alguna tarea asignada por los equipos de primeros auxilios. Debido a la poca investigación en el área de robótica para desastres en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, los requerimientos y especificaciones se enfocan en generar un prototipo estable para la investigación.

Al tomar en cuenta estos aspectos se obtuvieron los requerimientos de la tabla 4.1 para el diseño del prototipo de robot de búsqueda y rescate.

4.2. Determinación de especificaciones

Los requerimientos planteados anteriormente deben traducirse a especificaciones de ingeniería, o bien en especificaciones cuantificables y medibles, las cuales son clave para el desarrollo de conceptos. De igual manera, hay que tomar en cuenta todos los sistemas del robot para mejorar la integración del prototipo.

Tabla 4.1: Requerimientos de un robot de búsqueda y rescate terrestre.

Requerimientos	
A	El robot debe tener alta movilidad.
B	El robot debe poder ser cargado por dos personas.
C	El robot debe poder girar sobre si mismo.
D	El robot debe poder recorrer terrenos irregulares y con distintas superficies.
E	El robot debe poder subir escaleras.
F	El robot debe ser de fácil mantenimiento.
G	El robot debe ser confiable.
H	El robot debe ser contra el agua.
I	El robot debe tener espacio para el montaje de sensores de navegación.
J	El robot debe tener un color fácil de reconocer en zonas de desastres.
K	El robot debe permitir el montaje de un brazo manipulador.
L	El robot debe ser pequeño para entrar en los escenarios de prueba.
M	El robot debe ser resistente.
N	El robot debe poder cargar sensores que permitan la identificación de víctimas y/o peligros.
O	El robot debe poder realizar las pruebas de movilidad y maniobrabilidad de RoboCup Rescue basadas en las pruebas estandarizadas del NIST.
P	El robot no debe ser sensible al polvo.
Q	El robot debe ser simple.
R	El robot debe ser invertible o autocorregible.
S	El robot debe ser fácil de transportar.
T	El robot debe ser fácil de desplegar.

Primero, a partir de los requerimientos, se generan métricas que permitan relacionar las especificaciones con los requerimientos del prototipo [68]. En la tabla 4.2 las métricas se relacionan con los requerimientos, se pondera un nivel de importancia y se establecen las unidades de medición de cada métrica.

Las métricas propuestas en la tabla 4.2 permiten evaluar robots similares y generar especificaciones de diseño. Para la evaluación de los robots es necesario la obtención de cada robot que se pretende evaluar, pero debido a la dificultad de adquisición, se utilizaron las especificaciones que provee el fabricante. Aunque algunas métricas no existen en las paginas del fabricante, las especificaciones más relevantes permitieron tener un panorama de los sistemas actuales y encontrar áreas de oportunidad.

Los robots que fueron evaluados son: el robot PackBot de Endeavour Robotics [18] (subfigura 4.1a), el robot Telex HYBRID de Telerob [19] (subfigura 4.1c) y el robot Quince de Future Robotics Technology Center [20] (subfigura 4.1b). En la tabla 4.3 se muestra la evaluación de estos productos.

Tabla 4.2: Métricas de evaluación para los requerimientos propuestos.

No.	REQs.	Métrica	Imp.	Unidades
1	A, B, D	Masa total del sistema de locomoción	5	kg
2	L, S, D	Altura total	4	cm
3	L, S, D	Anchura total	4	cm
4	L, S, D	Longitud total	4	cm
5	G, M, P	Tiempo promedio entre fallas	3	hrs
6	F	Tiempo de desensamble/ensamble para mantenimiento	2	min
7	F	Herramientas especiales para mantenimiento	2	lista
8	H	Protección contra el agua	1	IP Rating
9	P	Protección contra el polvo	3	IP Rating
10	I	Volumen interno del chasis	3	cm ³
11	A, O	Tiempo para recorrer pruebas estandarizadas	3	min
12	I, K, N	Carga útil	4	kg
13	I, K, N	Área para montaje de sensores/actuadores exteriores	3	cm ²
14	T	Tiempo de preparación para despliegue	4	min
15	C	Radio de giro	5	cm
16	D, E	Ángulo máximo de superficie que puede subir	4	grados
17	A, O	Velocidad máxima sobre superficie plana	4	m/s

El robot PackBot es un robot comercial, fácil de transportar y diseñado primordialmente para tareas militares, tales como manejo de bombas, vigilancia y reconocimiento. Este robot es uno de los más utilizados, con más de 4,000 robots distribuidos alrededor del mundo. Debido a su diseño, se puede desplegar en menos de 2 minutos y puede operar en cualquier clima. Por otra parte, el robot telemax HYBRID es un robot teleoperado comercial compacto y resistente. Este robot incluye un manipulador con una carga útil de 37 kg que permite un manejo de herramientas pesadas. Este sistema es de alta movilidad, con capacidad de superar escaleras, pendientes, brechas y obstáculos de hasta 50 cm de altura. Finalmente, el robot Quince es un robot enfocado para el uso después de desastres. Debido a su diseño, este robot ha sido utilizado para examinar el interior de la planta nuclear de Fukushima Daiichi. Este robot ha participado en competencias como RoboCup RRL y su nivel de autonomía es mucho mayor comparado con los otros dos robots evaluados.

Tomando en cuenta estos tres robots, se decidió enfocarse en el desarrollo de un robot móvil portable. En comparación con los robots comerciales, los cuales son productos finales y completamente desarrollados, este robot pretende tener flexibilidad con el usuario, permitiendo mejoras y adaptaciones de manera fácil y económica. El precio de los robots evaluados es de alrededor de \$250,000 USD [69], [70], lo que los hace de difícil adquisición para investigadores y desarrolladores. Este factor fue clave para desarrollar los valores marginales de la tabla 4.4 y las especificaciones de la tabla 4.5.

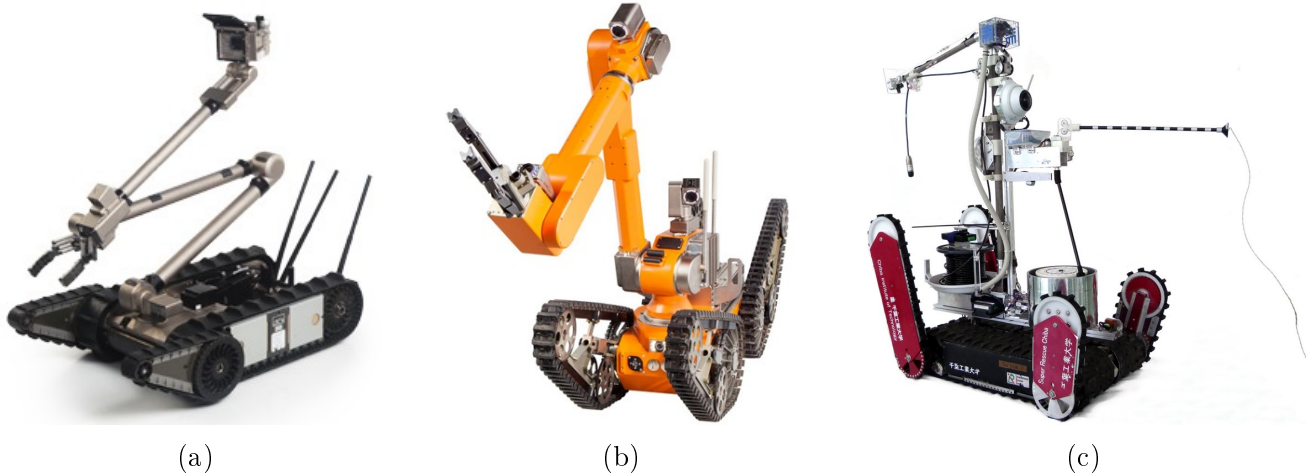


Figura 4.1: Robots evaluados: (a) PackBot [18], (b) Telemex HYBRID [19], (c) Quince [20].

Los valores de las especificaciones toman en cuenta los distintos tipos de obstáculos que existen y los escenarios propuestos en [9], [17] y [37] para la evaluación de los robots de rescate. Estas especificaciones se basan en el hecho que el robot aún no se utilizará en un despliegue real debido al costo que esto implicaría. Además, ya que este prototipo será utilizado en ambientes controlados, ciertos aspectos tales como los índices de protección de ingreso (IP Rating) no fueron priorizados.

4.3. Generación y evaluación de conceptos

Utilizando las especificaciones finales que se establecieron en la sección 4.2 se generaron los bocetos que se muestran en la figura 4.2. El concepto A de la figura 4.2a se basa en el diseño establecido en [28]. Este concepto es un sistema angosto debido a que las orugas auxiliares se posicionan dentro de la orugas principales. Sin embargo, este sistema no puede retraer sus aletas por completo y el espacio para la colocación de actuadores y transmisión es mínimo. El concepto B utiliza un sistema de orugas principales similar al concepto A, pero se posicionan las orugas auxiliares en la parte exterior de las orugas principales. Este cambio permite una retracción total de las aletas y un mayor espacio dentro del chasis para los componentes electrónicos, actuadores y transmisiones. Finalmente, el concepto C tiene una geometría que permite generar una rampa en la parte frontal del robot y montar aletas en la parte trasera. A causa de esto, el robot puede subir obstáculos de manera frontal o en reversa. Sin embargo, debido a la geometría de este concepto, el sistema de suspensión y el chasis se vuelen complejos. En la tabla 4.6 se muestra la evaluación de los tres conceptos propuestos. Esta tabla establece las principales ventajas y desventajas de cada concepto. Al analizar cada propuesta se eligió el concepto B para el desarrollo del prototipo.

Tabla 4.3: Evaluación de los robots utilizando las métricas propuestas.

No.	Métrica	Imp.	Unids.	PackBot 510	Telemax HYBRID	Quince
1	Masa total del sistema de locomoción	5	kg	14.3	78	32
2	Altura total	4	cm	17.8	75	22.5
3	Anchura total	4	cm	52.1	40	48cm
4	Longitud total	4	cm	68.6-88.9	81	66.5-109.9
5	Tiempo promedio entre fallas	4	min	NA	NA	NA
6	Tiempo de desensamble/en-samble para mantenimiento	3	min	NA	NA	NA
7	Herramientas especiales para mantenimiento	2	lista	NA	NA	NA
8	Protección contra el agua	5	IP Rating	IPX7	IPX7	NA
9	Protección contra el polvo	5	IP Rating	IP6X	IP6X	NA
10	Volumen interno del chasis	4	cm ³	NA	NA	NA
11	Tiempo para recorrer pruebas estandarizadas	5	min	NA	NA	NA
12	Carga útil	4	kg	20.9	31	20
13	Área para montaje de sensores exteriores	3	cm ²	NA	NA	NA
14	Tiempo de preparación para despliegue	4	min	<2	NA	NA
15	Radio de giro	5	cm	0	0	0
16	Ángulo máximo de superficie que puede subir	4	grados	43	45	45
17	Velocidad máxima sobre superficie plana	4	m/s	9.3	10	1.6

4.4. Diseño preliminar

Para el diseño preliminar del sistema de locomoción se tomaron en cuenta las funciones de cada subsistema establecido en la sección 3.2. El diseño de cada subsistema se hizo de manera paralela a causa de la dependencia que existe entre ellos. Establecer un diseño preliminar permite obtener dimensiones claves necesarias para después detallar los diseños, tomando en cuenta los materiales, dimensiones e interacciones finales.

Tabla 4.4: Valores marginales.

No.	Métrica	Unidades	Valor Marginal	Valor Ideal
1	Masa total	kg	<45	30
2	Altura total	cm	<50	30
3	Ancho total	cm	<100	55
4	Longitud total	cm	<100	80
5	Tiempo promedio entre fallas	hr	>3	>6
6	Tiempo de desensamble/ensamble para mantenimiento	hr	<3	<2
7	Herramientas especiales para mantenimiento	lista	<10	<5
8	Protección contra el agua	IP Rating	IP53	IP68
9	Protección contra el polvo	IP Rating	IP53	IP68
10	Volumen interno del chasis	cm ³	>6240	10000
11	Tiempo para recorrer pruebas estandarizadas	min	<2	<1
12	Carga útil	kg	>5	>10
13	Área para montaje de sensores exteriores	m ²	>.03	>0.04
14	Tiempo de preparación para despliegue	min	<30	<20
15	Radio de giro	cm	<10	0
16	Ángulo máximo de superficie que puede subir	grados	>30	>45
17	Velocidad máxima sobre superficie plana	m/s	>0.5	>2

4.4.1. Dimensionamiento del sistema de tracción

El sistema de tracción consiste de dos ensamblajes principales, las orugas principales y las orugas auxiliares o mejor conocidas como aletas. Las dimensiones de las orugas principales y auxiliares se deben de establecer para realizar el diseño adecuado.

Uno de los obstáculos más difíciles para los robots de rescate son las escaleras. Estas pueden tener distintas dimensiones, pero para el dimensionamiento del sistema de tracción se utilizaron escaleras con las dimensiones promedio que se muestran en la figura 4.3a. Con estas escaleras, la longitud mínima del sistema de tracción debe de ser de 72cm. Para poder subir estas escaleras, el robot debe de poder subir el primer escalón, el cual es un obstáculo de 20cm de altura. Tomando en cuenta esto se obtiene que las orugas auxiliares necesitan tener una longitud mínima de 29cm para generar una rampa de 35 grados sobre la horizontal que permita al robot subir el primer escalón. En la figura 4.3a y 4.3b se muestran las dimensiones preliminares de las orugas principales y auxiliares.

Además de las longitudes de las orugas, es necesario tomar en cuenta el ancho de cada oruga. Al analizar otros diseños de robots similares, se propusieron orugas auxiliares de 5cm y orugas principales de 7cm de ancho. En la figura 4.4 y 4.5 se muestran las dimensiones preliminares del sistema de tracción y los componentes principales que lo compone.

Tabla 4.5: Especificaciones.

No.	Métrica	Unidades	Valor
1	Masa total	kg	<35
2	Altura total	cm	<30
3	Ancho total	cm	<60
4	Longitud total	cm	<80
5	Tiempo promedio entre fallas	hr	>6
6	Tiempo de desensamble/ensamble para mantenimiento	hr	<2
7	Herramientas especiales para mantenimiento	lista	<10
8	Protección contra el agua	IP Rating	NA
9	Protección contra el polvo	IP Rating	IP5X
10	Volumen interno del chasis	cm ³	6240
11	Tiempo para recorrer pruebas estandarizadas	min	<2
12	Carga útil	kg	10
13	Área para montaje de sensores exteriores	m ²	>0.040
15	Tiempo de preparación para despliegue	min	<30
16	Ángulo máximo de superficie que puede subir	grados	>30
17	Velocidad máxima sobre superficie plana	m/s	0.5

4.4.2. Dimensionamiento y posicionamiento de la suspensión

Un sistema de locomoción con orugas generalmente utiliza ruedas locas fijas para soportar el peso del robot y permitir que la oruga se mueva fácilmente. Sin embargo, al incorporar el sistema de suspensión se puede mejorar el comportamiento del robot en zonas con obstáculos incrementando la tracción del sistema de locomoción y reduciendo las vibraciones del chasis.

De los tres tipos de suspensiones descritas en la sección 3.2.4 se decidió utilizar un sistema de brazo tirado con resorte y amortiguador. En la figura 4.6 se muestran los componentes principales del sistema de suspensión preliminar. Este sistema es simple, de fácil fabricación y los componentes son de fácil adquisición. Debido al tamaño del robot, se utilizaron amortiguadores hechos para coches a escala. A causa de la poca disponibilidad de tamaños de amortiguadores, se utilizaron amortiguadores con una distancia de 92mm y 120mm de centro a centro. En la figura 4.7 se muestra el funcionamiento básico del sistema de rueda tirada.

Para soportar las orugas y el peso del robot, se decidió utilizar cuatro ruedas locas en cada lado, cada una con su sistema de suspensión. Además, la rueda dentada frontal incorporaría su propia suspensión, lo que permitiría que todo el chasis se encuentre suspendido. El movimiento de las ruedas con suspensión causa que la tensión de la oruga disminuya. Esta disminución de tensión puede causar brincos o deslizamientos sobre la rueda conductora. Para mantener la tensión de la oruga fue necesario incorporar un sistema de tensión (ver figura 4.6) que disminuya los efectos negativos causados por el sistema de suspensión del robot.

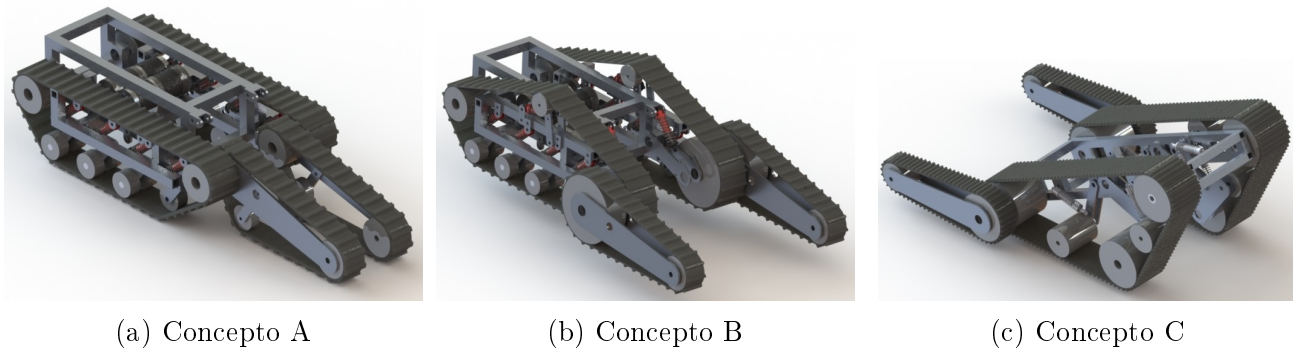


Figura 4.2: Bocetos de conceptos para la locomoción del prototipo de robot de búsqueda y rescate.

Tabla 4.6: Evaluación de conceptos.

Concepto	Ventajas	Desventajas
A	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de tracción compacto. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajo recorrido de la suspensión. ▪ Existen puntos entre la oruga auxiliar y principal que no hacen contacto con el suelo. ▪ Bajo volumen interno del chasis.
B	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Superficie de contacto de las orugas auxiliares y principales es continua. ▪ Sistema de suspensión simple. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de control complejo debido al número de partes en movimiento y grados de libertad. ▪ Sistema de suspensión frontal relativamente complejo. ▪ Altura baja de la parte trasera del sistema de tracción.
C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema con <i>rampas</i> frontales y traseras que permiten una mejor movilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dificultad para montaje de manipulador debido al chasis irregular. ▪ Sistema de suspensión complejo y difícil de integrar. ▪ Tamaño total del sistema es mayor al de los otros conceptos. ▪ Baja distancia al suelo del chasis.

4.4.3. Dimensionamiento del chasis

El chasis une todos los subsistemas del sistema de locomoción de un robot. Dentro del área de la robótica existen dos métodos para fabricar un chasis de vehículos terrestres no tripulados: maquinados de placas de aluminio o de elementos estándares tales como perfiles estructurales.

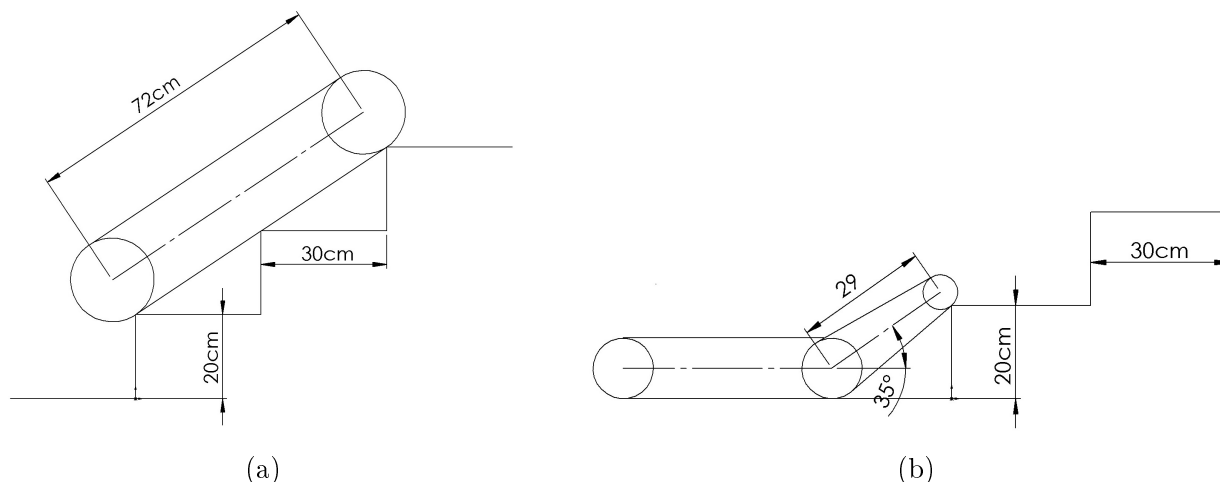


Figura 4.3: Dimensiones preliminares del sistema de tracción: (a) longitud mínima del sistema de tracción (b) longitud de las orugas principales y auxiliares.

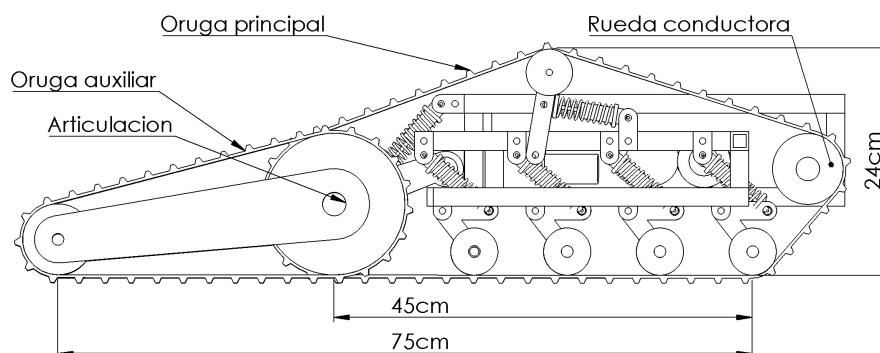


Figura 4.4: Vista lateral del sistema de tracción preliminar.

Los chasis maquinados usualmente son más caros debido a que el maquinado es más especializado y su diseño es más complejo. Además, estos ofrecen menos flexibilidad en caso de cambios en el diseño. Este tipo de chasis se prefiere cuando el prototipo es altamente estable y ha pasado por varias iteraciones de diseño. En comparación, un chasis hecho de perfiles estructural es más fácil de diseñar y construir. Además, dependiendo del tipo de unión, estos pueden ser modificados fácilmente sin tanto desperdicio de material.

Debido a los puntos descritos anteriormente, se decidió utilizar un chasis que utilice perfil estructural. Este chasis debe permitir la integración de todos los subsistemas del sistema de locomoción y permitir cambios fáciles en caso de que surjan mejorar en el diseño.

Durante el diseño preliminar, se establecieron dimensiones tentativas de acuerdo a los requerimientos de tamaño dados por las dimensiones totales del robot. Además, las dimensiones del chasis son dependientes de las dimensiones del sistema de tracción y suspensión establecidas anteriormente. Durante el diseño preliminar se establecieron las dimensiones del chasis adecuadas

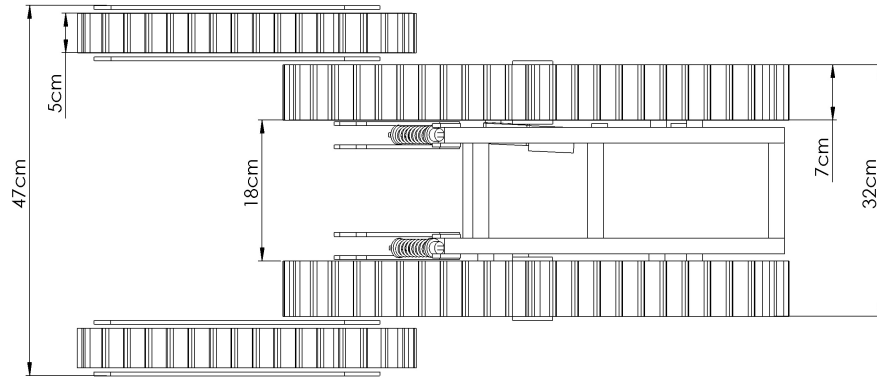


Figura 4.5: Vista superior del sistema de tracción preliminar.

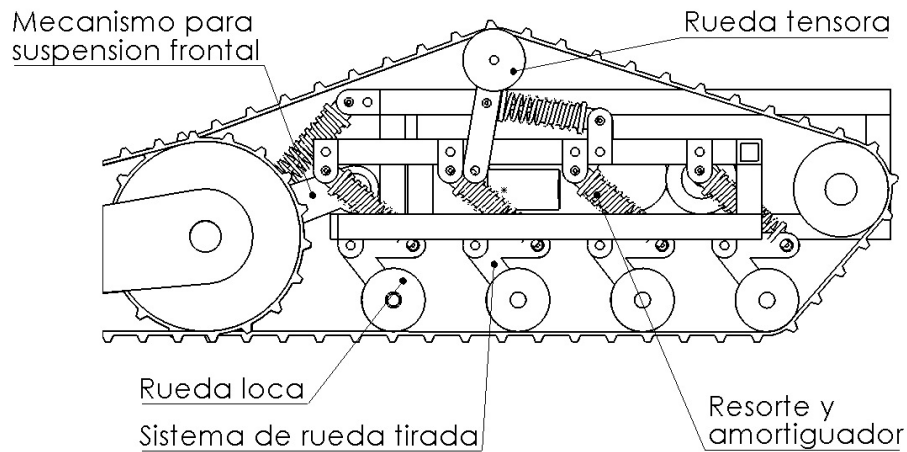


Figura 4.6: Diseño preliminar del sistema de suspensión.

para cumplir con las especificaciones establecidas. Sin embargo, estas dimensiones pueden cambiar debido a el posicionamiento de los actuadores y la selección de los componentes del sistema de tracción y suspensión.

El chasis preliminar que se muestra en la figura 4.8 muestra las dimensiones preliminares del chasis y el posicionamiento de los soportes y ejes principales.

4.5. Diseño del sistema de tracción

Con el diseño preliminar establecido se realizó el diseño a detalle del robot, el cual toma en cuenta materiales, procesos de manufactura y costo total del prototipo. En esta etapa se establece la forma y geometría final del robot y además se obtienen los dibujos técnicos necesarios para la fabricación y construcción del prototipo.

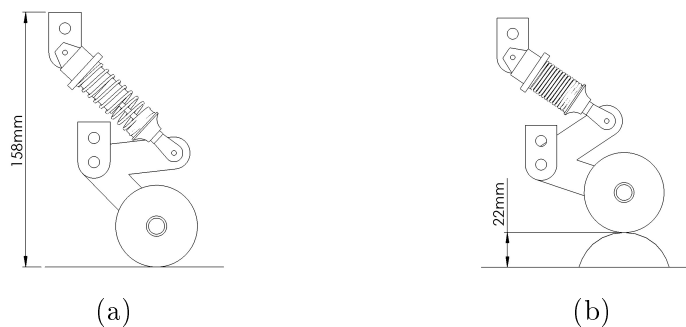


Figura 4.7: Mecanismo de suspensión preliminar (a) sin comprimir (b) en compresión.

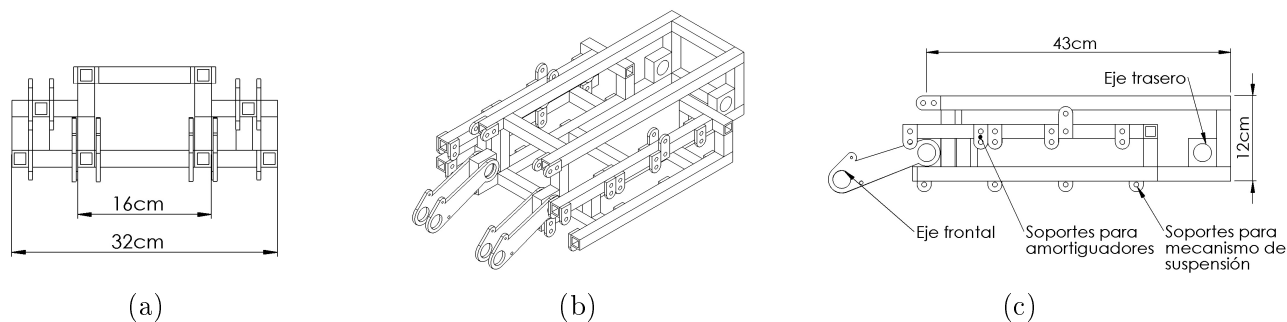


Figura 4.8: Chasis preliminar (a) vista frontal (b) vista isométrica (c) vista lateral.

4.5.1. Selección de orugas

Con las dimensiones preliminares del sistema de tracción establecidas, se hizo la selección del tipo de orugas que se utilizarían en el robot de rescate. De la investigación del estado del arte se obtuvo un panorama de las orugas que se pueden construir y se realizó una comparación entre ellas para decidir cuáles son las más aptas para el prototipo.

La utilización de un sistema de suspensión afecta a todos los tipos de orugas, sin embargo, afecta de manera mínima a las que utilizan cadenas de tablillas. Esto se debe a que estas tienen un paso mayor en comparación con las otras orugas y, por lo tanto, las catarinas para este sistema tienden a ser de un tamaño mayor. Debido a esto, las cadenas de tablillas requieren menos tensión para su funcionamiento y las hace aptas para utilizar con un sistema de suspensión.

Las orugas hechas de cadenas de bicicleta son las menos aptas para el robot ya que estas cadenas son relativamente angostas y son muy susceptibles a un descarrilamiento debido a desalineación o una tensión inadecuada de las mismas. Al utilizar cadenas de rodillos con un paso mayor se puede mejorar el funcionamiento de las orugas, sin embargo, también se aumenta el peso y el problema de descarrilamiento aún sigue siendo un factor.

Finalmente, las orugas de caucho fabricadas a medida o de banda transportadora suelen ser las orugas de mayor costo, sin embargo, estos sistemas son utilizados debido a su alta tracción y la disponibilidad de tamaños. Estas orugas se utilizan primordialmente en robots sin suspensiones ya que requieren una tensión muy alta, la cual interferiría con el sistema de suspensión. Además,

debido a que estas orugas están hechas a medida, estas son más adecuadas para prototipos en su etapa final de desarrollo ya que, una vez fabricadas, estas son difíciles de modificar.

Tabla 4.7: Evaluación de los distintos tipos de orugas.

Tipo de oruga	Ventajas	Desventajas
Orugas de cadenas de bicicleta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de muy bajo costo. ▪ El PVC se entierra en suelos blandos y genera una alta tracción. ▪ Longitud puede ser modificada con facilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alineación de la cadena con la catarina debe de ser precisa para evitar descarrilamiento. ▪ Tensión de la cadena debe ser adecuada para evitar brincos sobre las catarinas.
Orugas comerciales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Están hechas especialmente para uso en la robótica. ▪ Disponibles en distintos materiales tales como caucho, plástico y metal. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La mayoría de orugas están hechas para cargas útiles bajas. ▪ Las orugas hechas para altas cargas útiles son de difícil adquisición dentro del país y, frecuentemente, de alto costo.
Orugas de cadenas de rodillos con aditamentos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta durabilidad ▪ Versátil debido al tipo de aditamentos que se le pueden agregar. ▪ Longitud puede ser modificada con facilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alineación de la cadena con la catarina debe de ser precisa para evitar descarrilamiento. ▪ Tensión de la cadena debe ser adecuada para evitar brincos sobre las catarinas.
Orugas de banda transportadora de plástico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poco sensibles a la desalineación de sus catarinas. ▪ Debido al tamaño de sus catarinas, el sistema requiere menos tensión. ▪ Las bandas son de bajo peso, duraderas y fuertes. ▪ Su longitud puede ser modificada con facilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Necesita aditamentos en su superficie debido a su bajo coeficiente de fricción. ▪ Es necesario ajustar el diseño del robot a los tamaños estandarizados.
Orugas de banda transportadora de caucho	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ofrecen alta tracción a causa de los distintos recubrimientos que existen. ▪ Pueden ser altamente personalizadas para cumplir requerimientos de diseño. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las bandas suelen ser de alto costo, especialmente si son bandas hechas a la medida. ▪ Requieren de una alta tensión para evitar que la banda se patine sobre sus poleas.

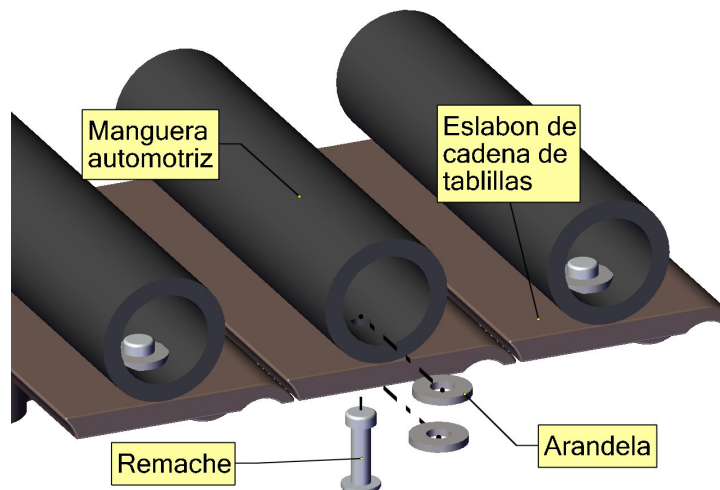


Figura 4.9: Ensamble de la oruga fabricada con cadena de tablillas.

Utilizando las ventajas y desventajas de la tabla 4.7 se evaluó cada sistema de orugas y se decidió utilizar orugas hechas con banda transportadora de plástico (cadenas de tablillas). Estas orugas se mejoran al agregar aditamentos de caucho para incrementar la fricción sobre distintas superficies. Para la fabricación de las orugas, utilizando cadenas de tablillas y aditamentos de caucho, se decidió utilizar remaches como elementos de unión ya que son ligeros, de bajo costo y rápidos de instalar. Para los aditamentos de caucho se utilizó manguera automotriz cortada a medida para montarla a lo ancho de cada eslabón de la cadena. Para el ensamble es necesario barrenar cada eslabón de la cadena de tablillas y la manguera para hacer la unión utilizando remaches y arandelas. En la figura 4.9 se muestra el ensamble de la cadena de tablillas con los pedazos de manguera automotriz.

4.5.2. Dimensionamiento de las orugas principales y auxiliares

Las dimensiones del sistema de tracción son dependientes del tipo de orugas que se seleccionaron. Ya que las orugas se construirán con cadena de tablillas, se buscaron las cadenas con las dimensiones más cercanas a las dimensiones preliminares.

Las cadenas de tablillas se pueden ajustar a la longitud deseada mientras que esta longitud sea un múltiplo del paso de la cadena. Utilizando un catalogo de la empresa Rexnord [71] se obtuvo que las cadenas de tablillas más adecuadas para las orugas principales y auxiliares tienen un paso de 1.5 pulgadas (38.1 mm) y un ancho de 3.25 y 2.5 pulgadas (82.5 mm y 63.5 mm) respectivamente.

Al establecer el paso de las cadenas de tablillas se puede establecer el número de eslabones y la distancia de centro a centro de las catarinas. De acuerdo al diseño preliminar, las catarinas más cercanas a las dimensiones establecidas son las catarinas con un paso de 1.5 pulgadas y de 21 y 25 dientes (129.26mm y 153.21mm de diámetro respectivamente).

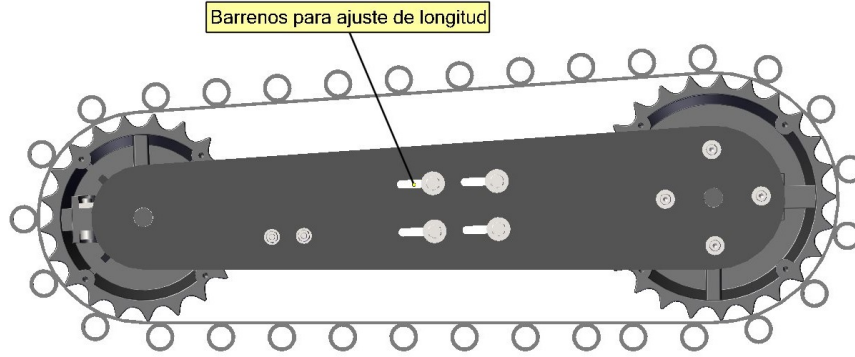


Figura 4.10: Mecanismo de tensión para las aletas.

Al definir el número de dientes de las catarinas, se puede establecer la longitud total, L , de las orugas y la distancia entre centros, C , de las catarinas para orugas auxiliares. La longitud total, en número de pasos, de las orugas auxiliares esta dada por [65]:

$$L \doteq 2C + \frac{N_1 + N_2}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 C} \quad (4.1)$$

donde

N_1 = número de dientes de la catarina de menor tamaño

N_2 = número de dientes de la catarina de mayor tamaño

Además, la distancia de centro a centro de las catarinas del sistema de la oruga auxiliar se obtiene utilizando la ecuación 4.2. Para establecer longitudes viables, tomando en cuenta el paso de la cadena, se propone una distancia inicial de centro a centro $C = 300 \text{ mm} \approx 7.87$ pasos. Con esta distancia inicial se obtiene que la longitud de las orugas (en número de pasos) es $L = 27.4$ pasos. Sin embargo, la longitud de la oruga debe de ser un número entero, por lo tanto, para obtener la distancia de centro a centro correcta se resuelve para C utilizando $L = 28$ pasos y se obtiene que la distancia entre centros de las catarinas es de $C = 8.24$ pasos $\approx 314.1 \text{ mm}$

$$C = \frac{1}{4} \left[L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right)^2 - \frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad (4.2)$$

Debido a que las orugas están hechas de cadenas de tablillas, fue necesario implementar un sistema que permitiera regular la tensión de las mismas. Esto se realizó utilizando un sistema para cambiar la distancia entre centros de las catarinas. Este movimiento también permite incrementar la longitud total de las aletas en caso de ser necesario. Para lograr este movimiento se incorporaron ranuras rectas sobre las aletas como se muestran en la figura 4.10.

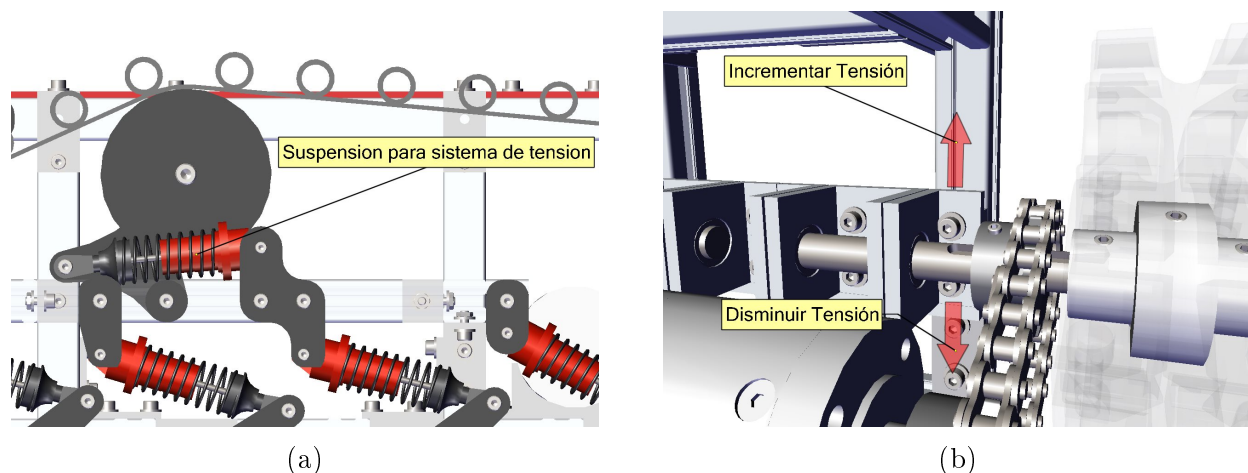


Figura 4.11: Mecanismos de tensión para las orugas principales utilizando.

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 no se pueden utilizar para las orugas principales debido a el posicionamiento irregular de las catarinas y de las ruedas locas. Por lo tanto, para obtener la longitud de la cadena de las orugas principales, fue necesario utilizar el dibujo CAD del sistema de tracción.

Del diseño preliminar se obtiene que la oruga principal tiene una longitud de 1414.64 mm \approx 37.1 pasos. Sin embargo, la longitud de la oruga, en pasos, debe de ser un número entero. Por lo tanto se obtiene que la longitud mínima de las orugas principales es de 38 pasos = 1447.8 mm.

Además del tensor de las orugas principales de la figura 4.11a, es necesario tener otro mecanismo que permita regular la tensión de la oruga. Este mecanismo permitiría obtener la tensión correcta de la oruga cuando el sistema de suspensión se encuentra sin compresión. Para hacer esto se montaron los soportes de los ejes sobre el perfil estructural de tal manera que se puedan mover para regular la tensión de las cadenas de tablillas. En la figura 4.11b se muestra la manera de tensar y destensar las orugas principales.

4.6. Selección de materiales

Para la selección de materiales se tomaron en cuenta características clave tales como: la densidad, el costo y la resistencia a la fluencia y a la tensión. Estas características se utilizan para hacer la comparación entre distintos materiales y permitir la elección de material para cada parte del robot. La matriz 4.8 muestra las tres alternativas principales para las partes del robot y sus características más relevantes. Algunas propiedades del acero y aluminio muestran un rango debido a que existe un gran número de aleaciones y tratamientos y dependiendo de la parte se hace una selección más específica.

Tabla 4.8: Matriz morfológica de materiales.

Aspecto:	Material		
Característica	Acero	Aluminio	Nylon, tipo 6/6
Resistencia última a la tensión (MPa)	400 - 1000	110-570	75
Resistencia a la fluencia (MPa)	250-800	95-500	45
Densidad (kg/m ³)	7860	2710	1140
Costo por peso (\$/kg)	0.3-0.6	1-1.1	1.2-1.3
Costo por volumen (\$/m ³)	12000-14000	12500-13500	12500-13000
Facilidad de maquinado	Media	Media	Alta
Ventajas	Variedad de perfiles Disponibilidad	Variedad de perfiles Inoxidable	Baja fricción Resistente al impacto
Desventajas	Peso	Costo	Alta expansión térmica

Chasis

Para fabricar el chasis se necesita un material que sea ligero, de bajo costo y resistente al impacto. Además, el material debe permitir la manufactura del chasis dentro de la universidad. Por otro lado, tomando en cuenta que esta es la primer versión del prototipo, es necesario tener cierto grado de flexibilidad para realizar cambios e iteraciones sobre el diseño del chasis. En la tabla 4.9 se muestran las ventajas y desventajas de los posibles materiales para fabricar el chasis. Estas alternativas son las más utilizadas dentro de la robótica y esto se debe a su costo, disponibilidad, maquinabilidad y otras propiedades físicas.

El perfil rectangular galvanizado (PTR) se utiliza comúnmente para estructuras o chasis debido a su bajo costo en comparación con otros materiales. Sin embargo, este material suele ser pesado y requiere soldadura para sus uniones. Esta soldadura dificultaría realizar cambios al chasis en caso de que se requieran modificaciones. Por otro lado, el perfil estructural de aluminio es más ligero que el PTR en dimensiones similares (20×20 mm) y además se utilizan uniones mecánicas, lo que permitiría hacer uniones entre elementos y soportes de manera directa.

Además del PTR y el perfil estructural, se propuso utilizar placa de aluminio o placa de Nylon tipo 6/6. Ambos materiales tendrían que ser maquinados utilizando la fresadora CNC, lo cual incrementaría la complejidad del chasis y se desperdiciaría material en caso de que sea necesario hacer un diseño enfocado en la reducción de peso. Estas opciones dificultan el rediseño utilizando el mismo material y la fabricación de soportes y uniones son más especializadas, lo que aumenta la complejidad del sistema.

Tabla 4.9: Matriz morfológica de materiales para el chasis.

Aspecto:	Material para chasis	
Alternativa	Ventajas	Desventajas
PTR galvanizado	Bajo costo Maleable	Uniones Peso y recubrimiento
Perfil estructural de aluminio	Bajo peso y costo Uniones mecánicas	Alto número de uniones
Placa de aluminio	Alta maquinabilidad Inoxidable	Se requiere de gran cantidad de maquinado Desperdicio de material debido al maquinado
Placa de Nylon tipo 6/6	Baja fricción Bajo peso	Alta flexión elástica Alto costo

Utilizando las características de la tabla 4.9 se decidió utilizar perfil estructural de aluminio debido a las ventajas que este material ofrece en comparación con las otras alternativas. En particular, se eligió este material debido a la facilidad para fabricar el chasis y los soportes y también tomando en cuenta que el chasis puede sufrir cambios a causa de futuros rediseños.

Ejes

Para fabricar los ejes de transmisión de potencia del robot se busca un material rígido (para evitar flexión), ligero y de bajo costo. Tomando en cuenta estos requerimientos se propusieron los materiales de la tabla 4.10. En esta tabla se muestran las principales alternativas: acero 1045, aluminio 6061 y Nylon tipo 6/6. De las tres alternativas, el acero es el más resistente, sin embargo, también es el más pesado. En comparación, el aluminio ofrece una resistencia media y es más ligero, pero tiene un costo mayor al del acero. Por otra parte, el Nylon tipo 6/6 es el material más ligero, pero su principal desventaja es que sufre de una alta deformación elástica debido a cargas radiales.

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas de cada alternativa se decidió utilizar varilla rectificada de acero 1045. Esta varilla se encuentra en un tamaño estándar de 12 mm de diámetro, lo que elimina la necesidad de rectificar la varilla para la fabricación de los ejes. Además, este tipo de varilla es de bajo costo y al utilizar este material se disminuiría el tiempo de fabricación del robot al disminuir la cantidad de operaciones necesarias para fabricar los ejes del mismo. Por otro lado, el diámetro de la varilla permite utilizar rodamientos 6001 (diámetro interno de 12 mm) para la fabricación de las chumaceras.

Bujes de reducción y acoplamiento

Debido al tipo de material seleccionado para los ejes del robot (varilla de acero 1045 de 12 mm de diámetro) fue necesario utilizar bujes de reducción para la unión entre las catarinas y los ejes motrices del sistema de tracción. Estos bujes de reducción son necesarios ya que el barrenado de las catarinas del sistema de tracción tienen un diámetro de 1 pulgada. Además de

Tabla 4.10: Matriz morfológica de materiales para los ejes.

Aspecto:	Material para ejes	
Alternativa	Ventajas	Desventajas
Varilla rectificada de acero 1045	Prefabricada Bajo costo	Peso Oxidable
Aluminio 6061	Bajo costo Alta maquinabilidad	Costo debido a longitudes mínimas
Nylon, tipo 6/6	Baja fricción Resistente al impacto	Alta deformación elástica Alto costo

Tabla 4.11: Matriz morfológica de materiales para los bujes.

Aspecto:	Material para bujes	
Alternativa	Ventajas	Desventajas
Acero	Bajo costo Rigidez	Alto peso Oxidable
Aluminio 6061	Bajo costo Alta maquinabilidad	Costo debido a longitudes mínimas
Nylon, tipo 6/6	Baja fricción Resistente al impacto	Alta deformación elástica Alto costo

los bujes reductores, se necesitan bujes de acoplamiento para unir las catarinas frontales del robot. Estos bujes de acoplamiento permitirían la transmisión de potencia de las orugas principales a las orugas auxiliares. Para ambos bujes se busca un material resistente, ligero y de alta maquinabilidad.

Tomando en cuenta estas características se propusieron las tres alternativas de la tabla 4.11. Debido a el número de bujes necesarios para el robot y a causa de sus dimensiones, se decidió utilizar Nylon tipo 6/6. Al utilizar este material, en lugar de las otras alternativas, se logra reducir el peso total del robot y, debido a su alta maquinabilidad, se disminuye el tiempo de fabricación de los bujes.

En la figura 4.12a se muestra el ensamble entre el buje reductor y el eje conducido por los motores. En la figura 4.12b se muestra el buje de acoplamiento necesario para unir las dos catarinas frontales de 25 dientes.

Alojamientos de las chumaceras

Tomando en cuenta el espacio dentro del chasis, se decidió fabricar las chumaceras para los ejes del robot. Esto se debe a que las chumaceras prefabricadas son para aplicaciones industriales en donde las cargas y tiempo de uso son muchos mayores. Por lo tanto, las chumaceras prefabricadas tienden a ser voluminosas y pesadas y a causa de esto no son aptas para el prototipo de robot de rescate.

Tabla 4.12: Matriz morfológica de materiales para los alojamientos.

Aspecto:	Material para alojamientos	
Alternativa	Ventajas	Desventajas
Placa de acero	Bajo costo Alta rigidez	Peso Corrosión
Perfil de aluminio 6061	Buena relación resistencia/peso Disponibilidad de perfiles	Disponibilidad de tamaños
Placa de Nylon, tipo 6/6	Inoxidable Resistente al impacto	Alta expansión térmica Alto costo

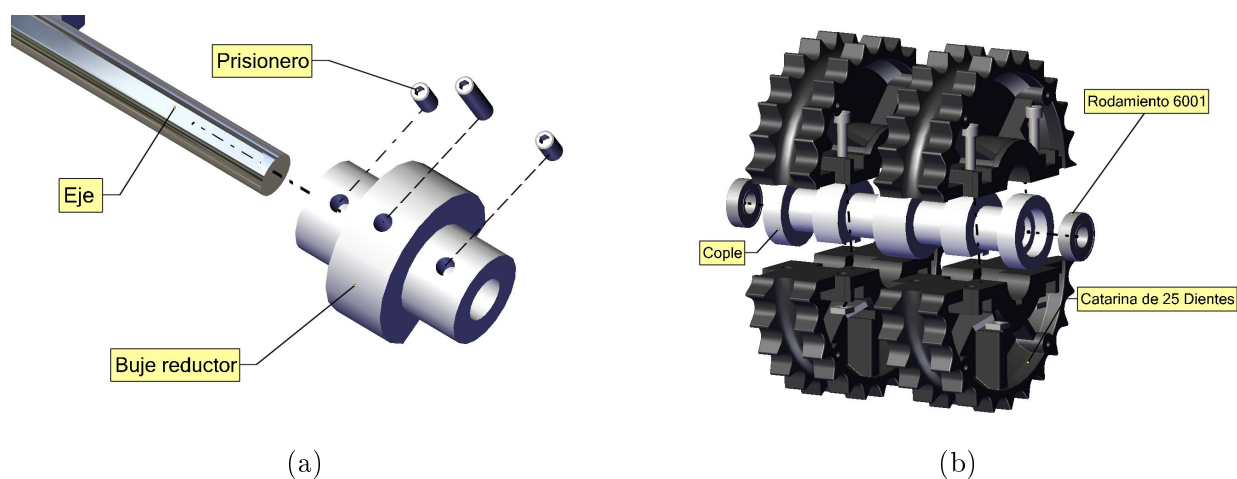


Figura 4.12: Bujes para el sistema de tracción: (a) buje reductor, (b) buje de acoplamiento.

Para fabricar las chumaceras se propusieron rodamientos 6001 (para los ejes de 12 mm), los cuales tienen un diámetro externo de 25 mm. El tamaño de estos rodamientos permite maquinar alojamientos más compactos y obtener chumaceras con dimensiones menores a las de chumaceras prefabricadas. Las ventajas y desventajas de los posibles materiales para fabricar los alojamientos se muestran en la tabla 4.12.

Tomando en cuenta los aspectos de la tabla 4.12, se decidió utilizar aluminio 6061 debido a su alta disponibilidad, rigidez, maquinabilidad y su bajo peso. Además, se encontró que el perfil de aluminio en L sería la opción más adecuada para fabricar los alojamientos ya que su forma facilitaría el ensamblaje de las chumaceras y el montaje de las chumaceras al chasis. En la figura 4.13 se muestra la vista explosiva de las chumaceras, en donde se observan los alojamientos, los rodamientos y la base para los alojamientos.

Soportes, mecanismos y ruedas locas del sistema de suspensión

A causa del número considerable de soportes, eslabones y ruedas locas del robot, es necesario un material ligero que permita un ensamble rápido y con el menor número de piezas. Además, es preferible que se maquinen del mismo material para disminuir el costo y tiempo de maquinado.

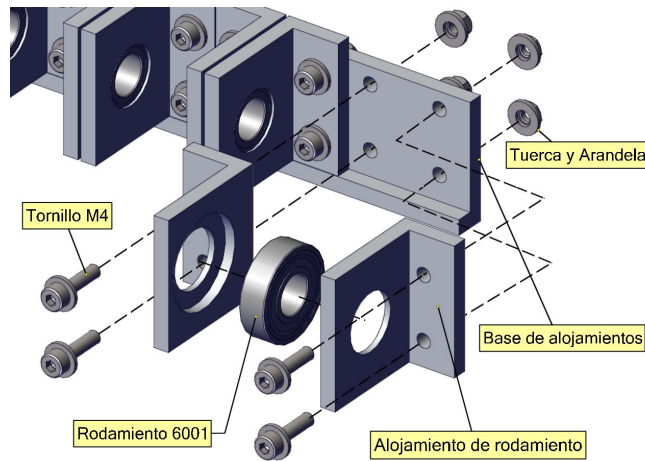


Figura 4.13: Ensamble de las chumaceras.

Tabla 4.13: Matriz morfológica de materiales para el sistema de suspensión.

Aspecto:	Piezas del sistema de suspensión y aletas	
Alternativa	Ventajas	Desventajas
Acero	Costo	Peso Oxidable
Placa de aluminio 6061	Inoxidable Peso	Tiempo de maquinado Costo
Nylon, tipo 6/6	Baja densidad Maquinabilidad	Alta deformación elástica Alto costo

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas de las principales alternativas que se muestran en la tabla 4.13, se decidió utilizar Nylon, tipo 6/6 para todas las piezas mencionadas. El bajo coeficiente de fricción de este material permite un deslizamiento adecuado de las ruedas locas sobre sus ejes y un movimiento fluido del mecanismo de la suspensión sin utilizar rodamientos. Por otra parte, la baja densidad del mismo reduce considerablemente el peso total del robot. Esta característica permite que también se utilice para la fabricación de las aletas. En la figura 4.14 se muestran las piezas que se maquinarían de Nylon tipo 6/6.

4.7. Diseño de la suspensión

El diseño preliminar de la suspensión se ajustó debido a los cambios de diseño que se hicieron sobre otros sistemas del robot. El espacio que se utilizó para implementar la suspensión fue el volumen interno de las orugas principales, el cual es de aproximadamente $400 \times 170 \times 82.5 \text{ mm}^3$. Además, el sistema de suspensión para las catarinas frontales de 25 dientes se posicionó en la parte frontal del chasis.

A causa del paso de la cadena de tablillas, fue necesario utilizar ruedas locas con un diámetro

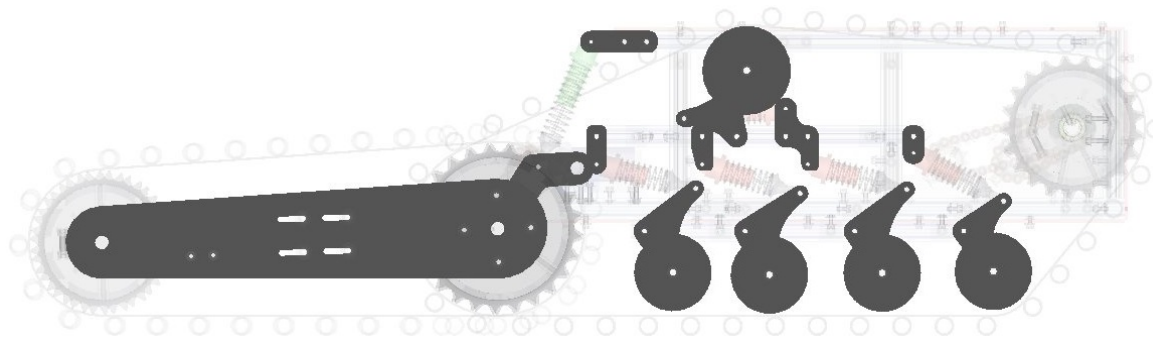


Figura 4.14: Componentes de las suspensión y de las aletas hechos de nylon tipo 6/6.

Tabla 4.14: Materiales seleccionados para las partes del robot.

No.	Parte	Material	Presentación y dimensión
1	Eje motriz e impulsado	Acero 1045	Eje rectificado, \varnothing 12mm
2	Cople trasero y frontal	Nylon, tipo 6/6	Barra, \varnothing 1 3/4"
3	Chumaceras	Aluminio 6061	Ángulo, 1.5"x1/5"
4	Soportes de chumaceras	Aluminio 6061	Ángulo, 1.5"x1.5" de 3/16" de espesor
5	Soportes de motores	Aluminio 6061	Ángulo, 1.5"x1.5" de 3/16" de espesor
6	Soportes de suspensión y mecanismos	Nylon, tipo 6/6	Placa de 1/4" de espesor
7	Ruedas locas	Nylon, tipo 6/6	Placa de 1/4" de espesor
8	Aletas	Nylon, tipo 6/6	Placa de 1/4" de espesor
9	Cople de aletas	Acero	Placa, calibre 14

que permitiera un deslizamiento adecuado de la cadena y al mismo tiempo evitara interferencia entre las ruedas durante la compresión del amortiguador. Utilizando el catálogo de la empresa Rexnord [71] se eligió un diámetro de 70 mm, el cual es el tamaño más cercano al propuesto por el fabricante que permitiría evitar las interferencias descritas anteriormente.

Además, a causa de la baja constante de rigidez del resorte del amortiguador utilizado, fue necesario diseñar un sistema que incrementara la fuerza necesaria para comprimir la suspensión. Mediante el uso de CAD fue posible incrementar, esta variable y obtener un sistema compacto y simple. En la figura 4.15 se muestra el mecanismo utilizado para el sistema de suspensión. Este mecanismo consiste de un amortiguador de 92 mm de longitud y una rueda loca de 70 mm de diámetro. Estos dos se unen utilizando un eslabón en en L, el cual permite un movimiento de la rueda loca cuando se acciona el amortiguador.

Para el diseño de la suspensión frontal, se utilizó un amortiguador de 122 mm de longitud. Este se incorporó en la parte frontal del chasis y utilizó un sistema de rueda tirada para el mecanismo. En la figura 4.16 se muestran los componentes del sistema de suspensión frontal y las partes del robot que interactúan con él. Este sistema consiste de un eslabón con una unión al

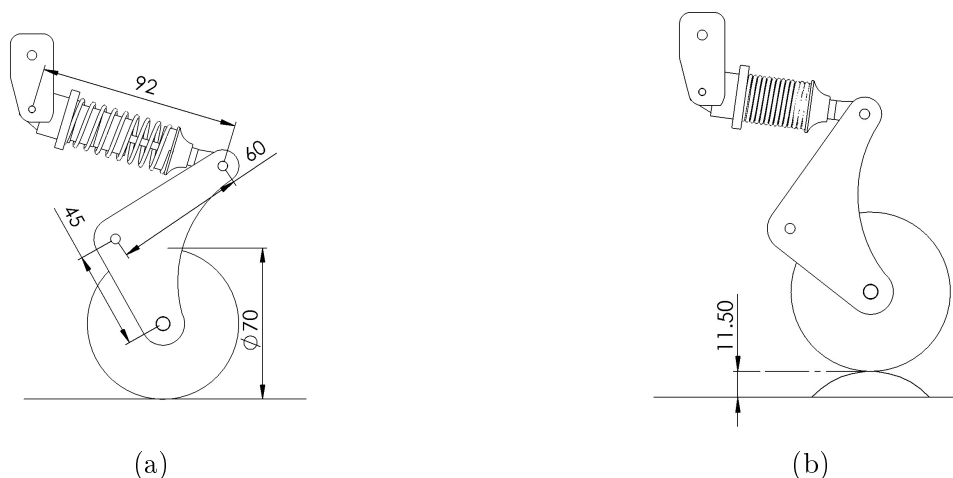


Figura 4.15: Mecanismo final de la suspensión para las ruedas locas (a) suspensión no comprimida (b) suspensión comprimida.

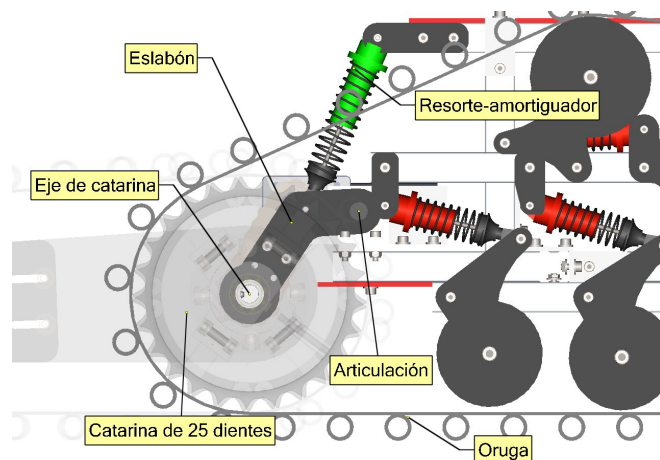


Figura 4.16: Vista lateral de la suspensión frontal del robot.

chasis utilizando rodamientos y un eje de 12 mm. Esta unión permite un movimiento con baja fricción cuando se comprime el amortiguador y además es capaz de soportar el peso total del robot. El eslabón une a las aletas con el chasis y utiliza rodamientos de bola para permitir que las catarinas de 25 dientes puedan girar libremente cuando el robot se mueve.

4.8. Dimensionamiento de actuadores

El dimensionamiento y selección de actuadores depende de las condiciones en las que se pretende operar el robot y el funcionamiento que los actuadores tendrán dentro del mismo. Para el sistema de locomoción, son necesarios dos actuadores idénticos para mover las catarinas de las orugas. La potencia de cada actuador se transmitirá a través de un sistema de transmisión,

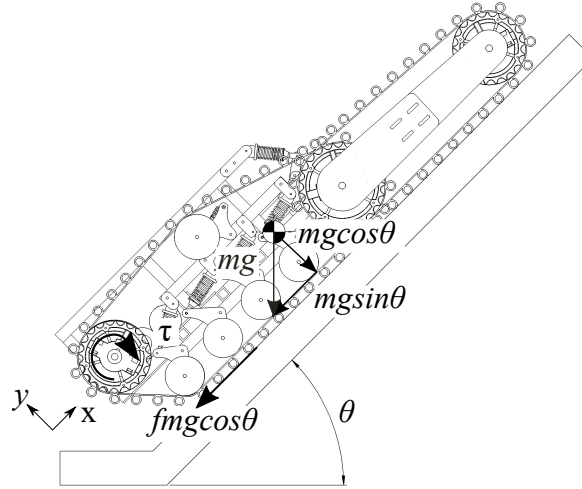


Figura 4.17: Diagrama de cuerpo libre del robot.

por lo tanto, es necesario seleccionar un actuador que permita este acoplamiento. Además, se requieren dos actuadores más que permitan mover las aletas frontales del robot.

El par necesario para mover las orugas se obtiene al considerar el peor de los escenarios, cuando el robot se encuentra acelerando en una pendiente con un terreno arenoso. Esta consideración permite obtener el par que permitiría al robot moverse adecuadamente en terrenos irregulares y difíciles. En la figura 4.17 se muestran las fuerzas que actúan sobre el robot en estas condiciones. En este escenario existen dos fuerzas actuando sobre el robot, la fuerza motriz, F_d , proveniente de los motores y la fuerza de resistencia al movimiento, F_r . La fuerza de resistencia al movimiento es la suma de la resistencia al rodamiento F_f y la resistencia debido a la pendiente F_s . Utilizando la segunda ley de Newton se obtiene que:

$$\sum F_x = F_d - F_r = ma_x \quad (4.3)$$

donde

$$F_r = F_f + F_s \quad (4.4)$$

$$F_f = fmg \cos \theta \quad (4.5)$$

$$F_s = mg \sin \theta \quad (4.6)$$

Considerando que la tensión de las orugas es igual a la fuerza que se ejerce sobre los dientes de la catarina conductura, se puede multiplicar la ecuación 4.3 por el radio R de la catarina impulsora para obtener el torque total requerido:

$$\tau_d = R(F_r + ma_x) \quad (4.7)$$

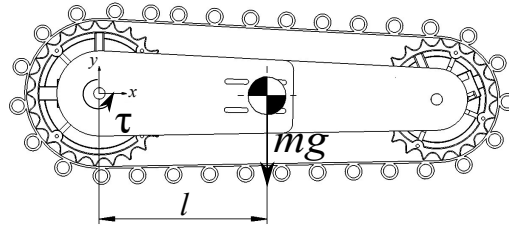


Figura 4.18: Diagrama de cuerpo libre de la oruga auxiliar.

Finalmente, para obtener los requerimientos de par de los motores se estableció que el robot debe de poder alcanzar una aceleración $a_x = 0.3m/s^2$ en una pendiente arenosa (coeficiente de fricción $f = 0.3$) de $\theta = 30$ grados. El par requerido por cada motor para alcanzar esto, dado que $g = 9.81m/s^2$, la masa $m = 30kg$, el radio de la rueda dentada $R = 0.0646m$, la eficiencia $\varepsilon = 0.8$, y el numero de motores $N = 2$, esta dado por:

$$\tau_d = \frac{R(m(g(f \cos \theta + \sin \theta) + a_x))}{\varepsilon N} \approx 9.39 \text{ Nm} \quad (4.8)$$

Para dimensionar los actuadores de cada aleta es necesario tomar en cuenta la masa y la ubicación de su centro de masa. En la figura 4.18 se muestran las fuerzas actuado sobre la oruga auxiliar. Al sumar momentos sobre el eje z se obtiene que el torque requerido por cada motor para alzar la aleta, dado que $g = 9.81m/s^2$, la masa $m = 2.148kg$, la distancia $l = 0.177m$, esta dado por:

$$\tau = mgl \approx 3.730 \text{ Nm} \quad (4.9)$$

4.8.1. Selección de actuadores

Para seleccionar los actuadores apropiados para el robot se utilizaron los requerimientos de fuerza establecidos anteriormente. Además, se tomó en cuenta el tamaño del actuador, la forma de montaje del actuador, la potencia que consume, las revoluciones por minuto de salida y otras características que los hace adecuados para su uso dentro del prototipo.

De acuerdo a estos requerimientos, se eligieron los actuadores que se muestran en la figura 4.19. El motorreductor de la figura 4.19a consiste de un motor PMDC acoplado a un sistema de engranajes con tornillo sinfín. Este motorreductor tiene una alta etapa de reducción de 1:522 y una velocidad nominal de salida de 12 rpm. Por otra parte, este se alimenta a 24 V y tiene un par de salida de 70 kgcm. Debido al tipo de sistema de reducción, este motorreductor es autobloqueable, lo cual permite que se mantenga la posición del motor aún con una carga aplicada. Ya que este actuador se utilizó para mover las aletas, la baja velocidad de salida es adecuada. Además, al ser autobloqueable, se evita el uso de algún método de control de posición para mantener su posición durante el movimiento del robot. Por otro lado, la corriente pico de cada motor es de 4.4 A, por lo tanto, se decidió utilizar un modulo prefabricado para controlar los motores. El

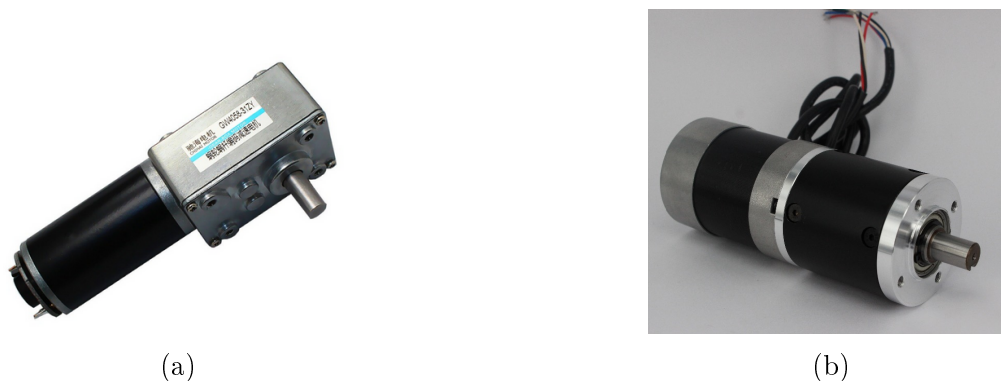


Figura 4.19: Actuadores de las orugas (a) y las aletas (b).

módulo es capaz de soportar una corriente de pico de 60 A. Además, contiene dos puente H, recibe señales de control digitales de 3.3 o 5 V y su frecuencia máxima es de 60kHz.

Para mover las cuatro orugas del sistema de tracción se utilizó el motorreductor de la figura 4.19b. Este actuador es un motor BLDC acoplado con un sistema de engranajes planetarios con una reducción de 1:50 y una velocidad nominal de salida de 80rpm. Este actuador se alimenta con 24V y a este voltaje se obtiene un par nominal de 12.88Nm con una corriente de 6.4A.

Debido al tipo de motor de este actuador, se obtiene una gran eficiencia y un bajo pico de corriente. Además, el tamaño del actuador permite el acoplamiento con una transmisión de potencia. Por otra parte, el tipo de montaje del actuador facilita la integración con el chasis del robot. Para mover estos motores se utilizaron 2 controladores BLD-300B. Estos módulos soportan una corriente nominal de 15A y una corriente máxima de 35A. Estos módulos permiten que los motores se controlen utilizando señales digitales de 5V.

4.8.2. Selección de sistema de transmisión

Después de la selección de los actuadores para el sistema de tracción y las aletas fue necesario seleccionar el tipo de transmisión para cada sistema. En la tabla 4.15 se muestran las alternativas para transmitir la potencia de los actuadores a las orugas y a las aletas. La transmisión de potencia de los motores BLDC a las orugas requiere de un sistema capaz de transmitir potencia a distancia entre centros considerable y entre ejes que pueden sufrir desalineaciones. Además, debido al ambiente en que el robot se utilizará, pequeñas partículas solidas, como arena, pueden afectar al sistema de transmisión.

Por otro lado, para mover las aletas del robot es necesario un sistema de transmisión que transmita el movimiento de los motores DC de tornillo sin-fin a los ejes de las aletas. Debido a que el movimiento de las aletas no tiene que ser preciso, se puede utilizar un sistema simple pero que cumpla con los requerimientos de par de los motores. De igual manera, el sistema de transmisión de potencia para las aletas transmitirá movimiento entre ejes con una distancia considerable.

Tabla 4.15: Matriz morfológica de tipos de transmisiones.

Aspecto:	Transmisiones para orugas y aletas	
Alternativa	Ventajas	Desventajas
Banda dentada	Silenciosas Ligeras	Costo Requiere tensor o tensar adecuadamente
Cadena de rodillo	Bajo costo Sistema simple y confiable	Ruidosa Peso
Engranajes rectos	Peso Disponibilidad	Intolerantes a la arena Alto costo

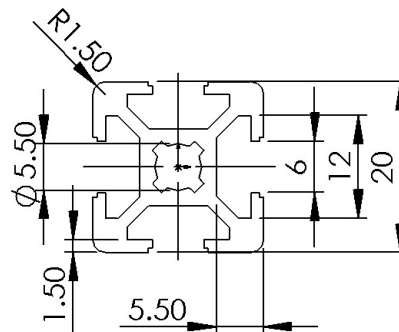


Figura 4.20: Dimensiones, en mm, del perfil de aluminio de 20x20mm de la marca Rexroth.

Tomando en cuenta los aspectos mencionados anteriormente se decidió utilizar cadenas de rodillos para ambos sistemas. Esto debido a su simplicidad, su bajo costo y la facilidad de montaje sobre los ejes. Además, este sistema de transmisión no es tan sensible a la desalineación de los ejes y esto disminuye el riesgo de fallas a causa de impactos sobre los ejes.

4.9. Diseño del chasis

Para mantener el peso del robot al mínimo y además permitir un sistema fácil de ensamblar se decidió utilizar perfil cuadrado de aluminio de 20x20mm (ver figura 4.20) [72]. Este perfil tiene ranuras en sus cuatro lados que permiten uniones entre perfiles y soportes a través de elementos de unión mecánica, tales como tornillos y tuercas. Además, el perfil permite generar un chasis flexible, que permitiría cambiar dimensiones en caso de que se hagan modificaciones al prototipo.

El chasis se dimensionó de acuerdo al posicionamiento de los demás componentes y tomando en cuenta el tamaño final del robot. Este consiste de tramos de perfil estructural unidos mediante los elementos de unión que se muestran en la figura 4.22. Cada elemento de unión se posicionó para facilitar el ensamblaje y permitir que las fuerzas se distribuyan adecuadamente y así evitar daños en los elementos de unión (ver figura 4.23). El chasis se puede dividir en tres subensambles, el subensamble principal y los subensambles para el sistema de suspensión (ver figura 4.21). El

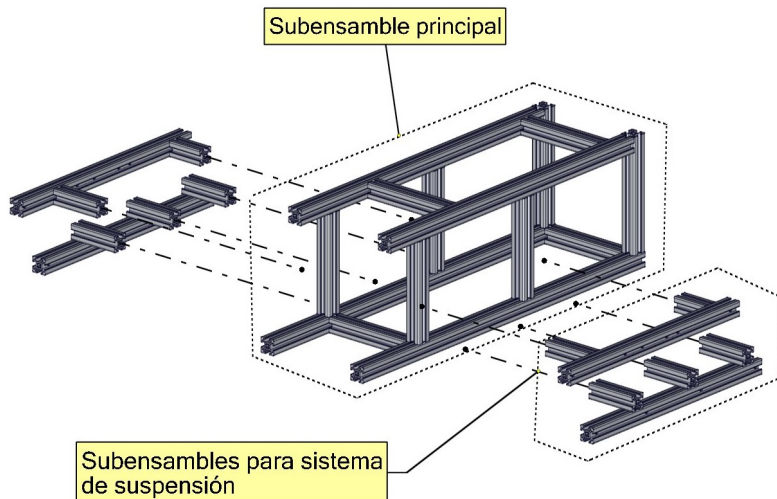


Figura 4.21: Diseño final del chasis.

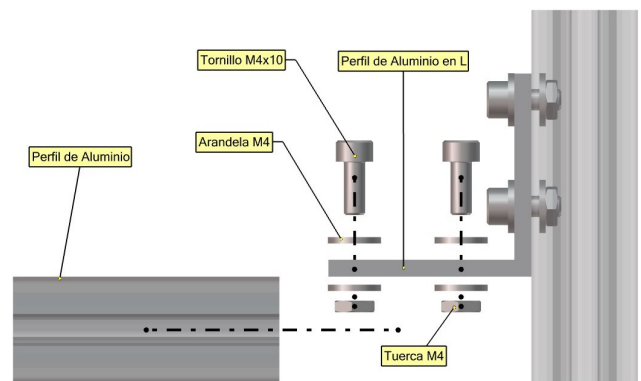


Figura 4.22: Unión de dos perfiles de aluminio utilizando perfil en L y pernos M4.

subensamble principal es un ensamblaje simple que provee el espacio suficiente para montar los actuadores, soportes, chumaceras, ejes y componentes electrónicos principales necesarios para el movimiento del robot. Por otra parte, los subensambles para el sistema de suspensión proveen la unión de las suspensiones y el sistema de tensión al ensamblaje principal del chasis. Esto permite que el ensamblaje principal este suspendido completamente y se reduzca al máximo el efecto que tienen las vibraciones sobre los componentes críticos.

Para hacer las uniones del perfil de aluminio se propuso utilizar perfil en L con barrenos que permitan la unión como se muestra en la figura 4.22. El canal del perfil de aluminio de 20x20 permite que se inserten tuercas y arandelas, las cuales se utilizan para hacer la unión utilizando tornillos M4 y el perfil en L. Este tipo de unión es simple, económico y fácil de implementar.

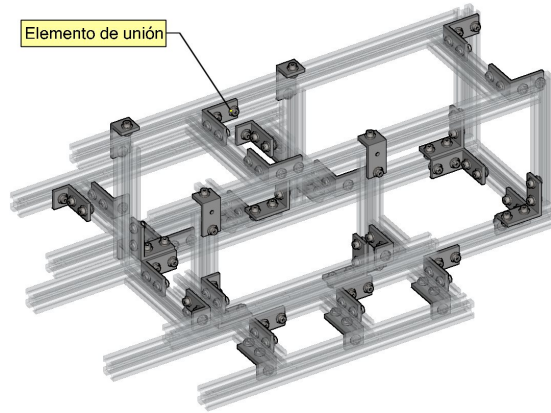


Figura 4.23: Uniones utilizadas en el chasis.

4.10. Dimensionamiento del sistema de transmisión

Con las especificaciones de los motorreductores seleccionados se establecieron las dimensiones del sistema de transmisión por cadena. Tomando en cuenta un factor de servicio 1.3, se obtiene que la potencia de diseño esta dada por [73]:

$$P_d = FS(P_{BLDC}) = 130W \approx 0.17HP$$

Debido al par de salida del motorreductor con motor BLDC, no fue necesaria otra etapa de reducción y por lo tanto se establece una relación de 1:1 entre las catarinas. Utilizando tablas de selección se obtuvo que la cadena adecuada para la transmisión es de paso 35. Tomando en cuenta el espacio dentro del chasis y el tamaño del eje, se propusieron catarinas de 11 dientes para la transmisión de potencia entre el motorreductor y las catarinas de las orugas.

De acuerdo al posicionamiento de los ejes motrices e impulsados se puede establecer la distancia de centro a centro de las catarinas. En la figura 4.24 se muestran las posiciones de los motores y de los ejes impulsados del robot. Utilizando la ecuación 4.1 y las distancias preliminares entre centros:

$$C_{ip} = 60.20mm \approx 6.32 \text{ pasos}$$

$$C_{dp} = 113.87mm \approx 11.95 \text{ pasos}$$

se obtienen las longitudes preliminares de las cadenas:

$$L_{ip} = 23.64 \text{ pasos}$$

$$L_{dp} = 34.90 \text{ pasos}$$

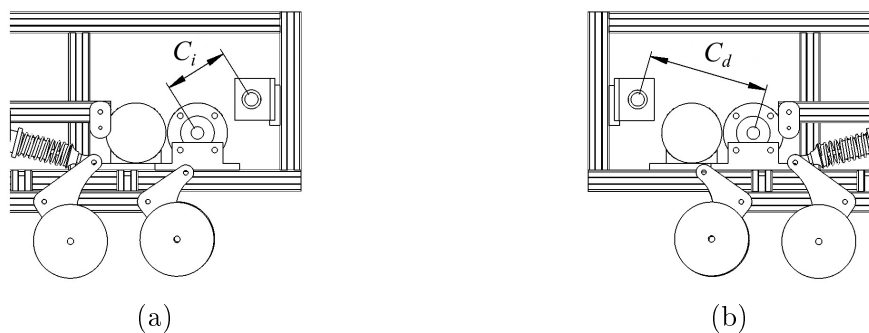


Figura 4.24: Distancia entre eje motriz e impulsado del motor (a) izquierdo (b) derecho.

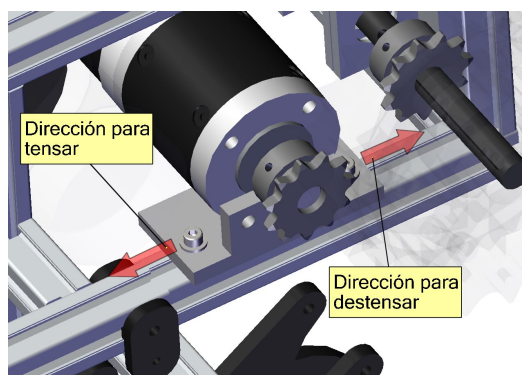


Figura 4.25: Motor BLDC montado al chasis.

Sin embargo, la longitud, en pasos, de una cadena de rodillos tiene que ser un número par. Por lo tanto se establecen las longitudes de cadenas finales: $L_i = 24$ pasos y $L_d = 36$ pasos. Con estas longitudes se obtienen las distancias entre centros finales $C_i = 6.50$ pasos ≈ 59.71 mm y $C_d = 12.50$ pasos ≈ 114.84 mm.

Debido al uso, las cadenas pueden sufrir desgaste y alargamiento de sus eslabones. A causa de esto, un sistema de transmisión con cadenas requiere de una distancia entre centros variable para poder ajustar la tensión de la cadena. Para hacer esto se utilizaron soportes que se unen con el chasis de tal manera que se puedan deslizar sobre el perfil de aluminio. En la figura 4.22 se muestra la unión del motor con el chasis utilizando un soporte atornillado al perfil de aluminio. Las flechas muestran las direcciones posibles para mover el soporte y cambiar la distancia de centro a centro del eje motriz e impulsor.

De igual manera, utilizando las ecuaciones 4.2 y 4.1 se obtuvo la longitud de las cadenas y la distancia de centro a centro de los ejes necesaria para los motorreductores de las aletas. La distancia entre centros C_a y longitud de la cadena L_a es de 4.9 y 20 pasos respectivamente.

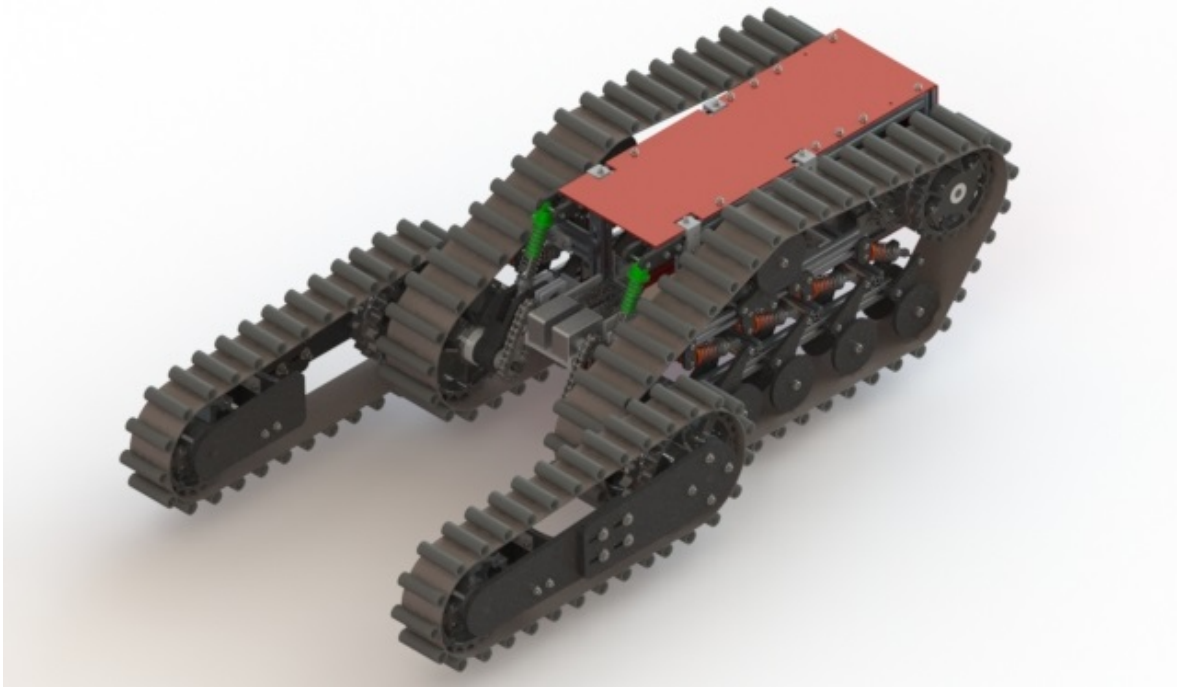


Figura 4.26: Renderizado del diseño final del robot de búsqueda y rescate.

4.11. Lista de materiales

Con el diseño final (figura 4.26) se obtuvo la lista de materiales y los dibujos técnicos (ver apéndice A) para construir el robot. En la tabla 4.16 se incluye el material principal para la fabricación del robot. También se incluye la cantidad y la descripción de cada parte.

4.12. Integración de los sistemas mecánicos principales

Utilizando los diseños finales de los sistemas principales, se hizo la integración de los subsistemas dentro del chasis. Esta integración consiste en verificar tolerancias, interferencias y uniones. A causa del perfil de aluminio que se eligió para el chasis, se facilitó la integración de los subsistemas. Además, las uniones hechas entre los distintos subsistemas permiten que el robot se pueda desensamblar para ser transportado. En la figura 4.27 se muestran los subsistemas principales del robot de búsqueda y rescate. Por otra parte, los dibujos explosionados del robot se encuentran en el apéndice A.

El renderizado muestra el prototipo del robot y muestra la integración de los subsistemas principales. Cada lado del robot tiene dos orugas, la oruga principal y auxiliar, las cuales se mueven de manera síncrona al ser impulsadas por el sistema de transmisión de potencia por cadena. Los motores para mover estas orugas se encuentran en la parte trasera del robot para reducir el tamaño necesario para las cadenas de transmisión. Los motores para levantar las aletas se encuentran en la parte frontal y permiten mover las aletas para generar una rampa necesaria

Tabla 4.16: Lista de materiales.

No.	Descripción	Cant.	Unidad
1	Placa de Nylomaq 6/6 6.4 mm, 610x610 mm	3	Pieza
2	Barra redonda de Nylomaq 6/6 \varnothing 1 3/4"	1	Pieza
3	Perfil de aluminio estructural 20x20 mm	2	m
4	Perfil de aluminio en escuadra 1.5x1/5"	2	m
5	Varilla de acero 1045 \varnothing 12 mm	1	m
6	Cadena de tablilla 820 K250	1	Caja
7	Cadena de tablilla 820 K325	2	Caja
8	Catarina paso 820, 21 dientes	4	Pieza
9	Catarina paso 820, 25 dientes	4	Pieza
10	Manguera automotriz de 3/4"	10	m
11	Cadena de rodillos paso 35	1	Pieza
12	Catarina paso 35, 11 dientes	4	Pieza
13	Catarina paso 35, 9 dientes	4	Pieza
14	Rodamiento 6001	20	Pieza
15	Motorreductor DC	2	Pieza
16	Motorreductor BLDC	2	Pieza
17	Controlador para motor DC	1	Pieza
18	Controlador para motor BLDC	2	Pieza
19	Amortiguador de 92 mm	10	Pieza
20	Amortiguador de 122 mm	2	Pieza

para atravesar obstáculos. El sistema de suspensión se encuentra integrado dentro del espacio de la oruga principal y el sistema de tensión de la oruga se posicionó arriba del sistema de suspensión para obtener un sistema compacto. En el apéndice A se muestran los dibujos técnicos y las vistas explosionadas del prototipo.

4.13. Sistema electrónico y software utilizado para pruebas

El desarrollo del sistema electrónico y software de pruebas no formó parte de esta tesis, sin embargo, se utilizó para realizar las pruebas del sistema de locomoción y así validar el diseño. Estos sistemas son simples y se enfocan en permitir el movimiento del robot en escenarios de pruebas. En la figura 4.28 se muestran los elementos utilizados, las conexiones y el tipo de conexiones que existen entre ellos.

El sistema electrónico de pruebas del robot consiste de un circuito de alimentación, microcontrolador, computadora y los módulos de control para los motores. Los controladores utilizados para los motores de DC y BLDC son capaces de soportar la corriente pico de los motores y son

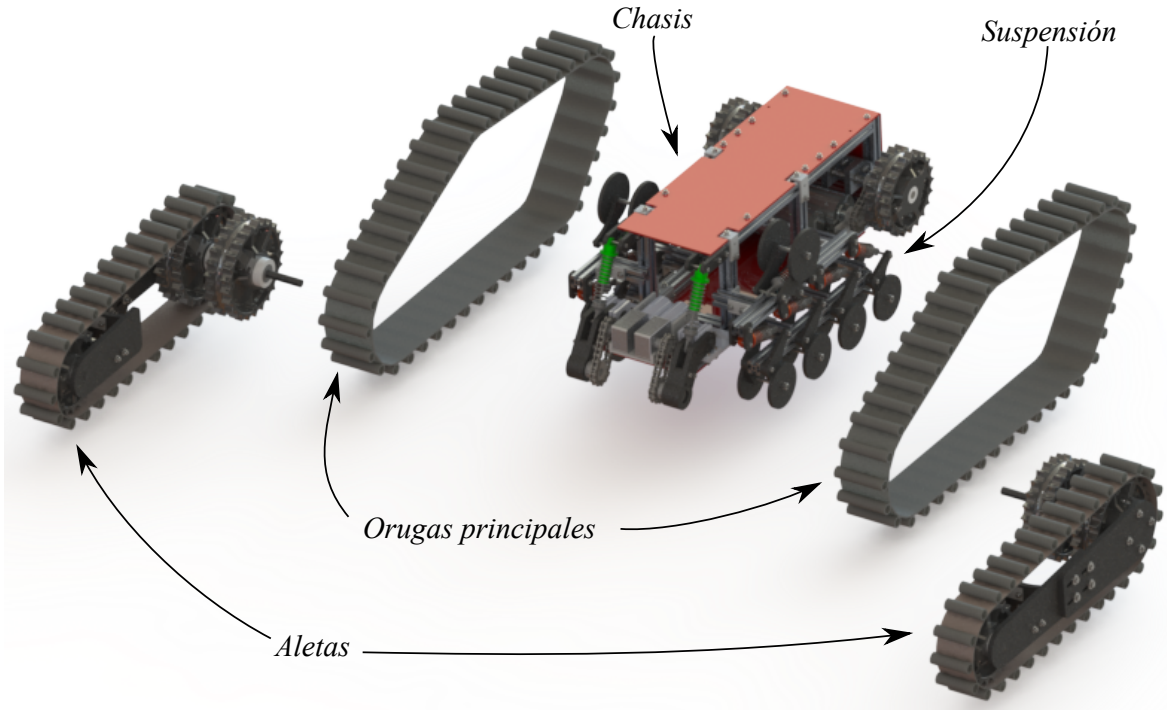


Figura 4.27: Subsistemas principales del robot de búsqueda y rescate.

fáciles de utilizar debido a que permiten controlar al motor utilizando un microcontrolador.

La unidad de computadora a bordo del robot (*OCU* por sus siglas en inglés) utilizada fue una Barebone de Gateway. Para alimentarla se utilizó un convertidor reductor CD/CD. El convertidor facilita la alimentación de la OCU debido a que permite la regulación de voltaje de salida. Este convertidor CD/CD se conecta a la batería LiPo 1, la cual se utiliza para la alimentación de la computadora, el microcontrolador y los drivers.

Para controlar a los motores se utilizó un Arduino Nano, el cual envía señales digitales a los controladores de cada motor. El programa hecho para el MCU utilizó la librería de ROS para recibir comandos de la OCU.

La alimentación de los componentes se hace utilizando dos baterías de polímero de litio (LiPo por sus siglas en inglés), una se utiliza para alimentar a los motores y otra para los elementos de control tales como la OCU, el MCU, y los controladores de motores. Utilizando baterías separadas reduce las posibilidades de afectar a los componentes de control (OCU, MCU, controladores) cuando los motores generan picos de corriente.

Se utiliza una computadora portátil y un mando de videojuegos para la estación del operador. La computadora portátil utiliza el sistema operativo Ubuntu y el middleware ROS (Robot Operating System) para controlar dispositivos y enviar mensajes entre procesos. Específicamente, ROS se utilizó para obtener comandos de dirección del mando, dados por el operador, y transmitirlos a la OCU para mover los motores.

La comunicación entre las computadoras se realizó de manera inalámbrica utilizando una red

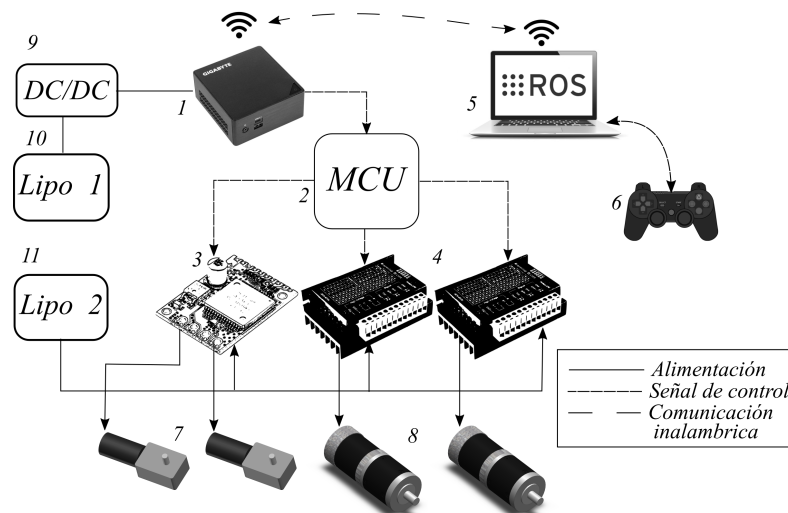


Figura 4.28: Esquemático simplificado del sistema electrónico, de comunicación y control.

AdHoc, creada por la OCU. Esta red permite que la computadora del operador se comunique directamente con la OCU para controlar al robot. Este método de comunicación es simple y evita que se utilice un router inalámbrico.

Utilizando el diseño CAD obtenido en este capítulo, se generaron los dibujos técnicos necesarios para la construcción del robot. Estos son necesarios para la etapa de fabricación y ensamblaje de las partes. Además, el sistema electrónico y software de pruebas permitirá realizar las pruebas físicas hechas con el prototipo.

Capítulo 5

Resultados experimentales

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de la investigación. Primero, se expone el proceso de manufactura del robot y en ensamblaje final. Después, se incluyen las pruebas por software realizadas para validar el diseño de los componentes críticos. Posteriormente, se incluyen las pruebas físicas realizadas para validar los subsistemas del prototipo. Finalmente, se realizó un análisis de los resultados experimentales.

5.1. Manufactura del robot

Los procesos de manufactura se pueden dividir en dos tipos, operaciones de procesamiento y operaciones de ensamble. Las operaciones de procesamiento utilizan energía para modificar la forma, propiedades físicas o apariencia de una pieza. Estas modificaciones permiten que la pieza o material cambie de un estado a otro estado más cercano al producto que se desea. Por otro lado, las operaciones de ensamble utilizan uniones permanentes o semipermanentes para unir dos piezas y formar una entidad nueva (ensamble o subensamble) [74].

Los procesos de manufactura se realizan utilizando máquinas y herramientas especiales que permiten modificar las propiedades de los materiales o piezas. Para fabricar el robot se utilizaron las máquinas y herramientas disponibles en los laboratorios de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. En la tabla 5.1 se presentan los procesos y las máquinas utilizadas para la de manufactura del robot.

5.1.1. Maquinado de las placas de Nylomaq

Para la fabricación de los componentes que constituyen al sistema de suspensión y a las aletas se utilizó la sierra cinta y la fresadora CNC. A causa del tamaño original de las placas de Nylomaq, fue necesario cortarlas a un tamaño menor para facilitar el transporte y el manejo de las mismas. Con los cortes, el tamaño se redujo de 610 mm x 610 mm a 300 mm x 200 mm.

Por otra parte, se utilizó la fresadora CNC para obtener las piezas necesarias para los sistemas.

Tabla 5.1: Equipo y herramientas utilizadas para las operaciones de manufactura durante la fabricación del robot.

Proceso	Equipo	Material	Herramientas especiales
Fresado	Fresadora CNC	Nylomaq	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cono portaboquillas ▪ Boquillas ▪ Cortadores verticales ▪ Accesorios (sujetadores, tuercas, llave mixta)
Torneado	Torno paralelo	Nylomaq	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Butil (afilado dependiendo del tipo de corte y acabado)
Corte	Sierra cinta	Nylomaq y acero	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Accesorios
Barrenado	Fresadora vertical manual	Nylomaq y acero	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Portaboquillas R8 ▪ Cortadores verticales ▪ Brocas
Fresado	Fresadora vertical manual	Nylomaq	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Portaboquillas R8 ▪ Cortadores verticales ▪ Llave mixta
Soldadura	Planta para soldar	Acero	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Electrodos ▪ Accesorios de soporte

En la figura 5.1 se muestran los pasos necesarios para realizar el maquinado de las placas de Nylomaq. En la figura 5.2a se muestra la fresadora CNC utilizada para las operaciones de corte y barrenado de las piezas y en la figura 5.2b se muestra la placa de Nylomaq durante su maquinado. A continuación se describen los pasos de la figura 5.1.

1. Importación del modelo 3D a VISI: las piezas generadas en Solidworks[®] durante la etapa de diseño a detalle se importan al software VISI[®] para ser procesadas. Estas piezas se acomodan dentro de un espacio de trabajo de 300mm x 200mm.
2. Generación de secuencias de maquinado: dentro del software VISI[®] se configuran las trayectorias de las operaciones de corte, barrenado, y desbaste necesarias para obtener las piezas finales.
3. Configuración de parámetros de maquinado: se selecciona el tipo de cortador (diámetro y forma), las velocidades de corte, la profundidad de cada corte, la velocidad de la herra-

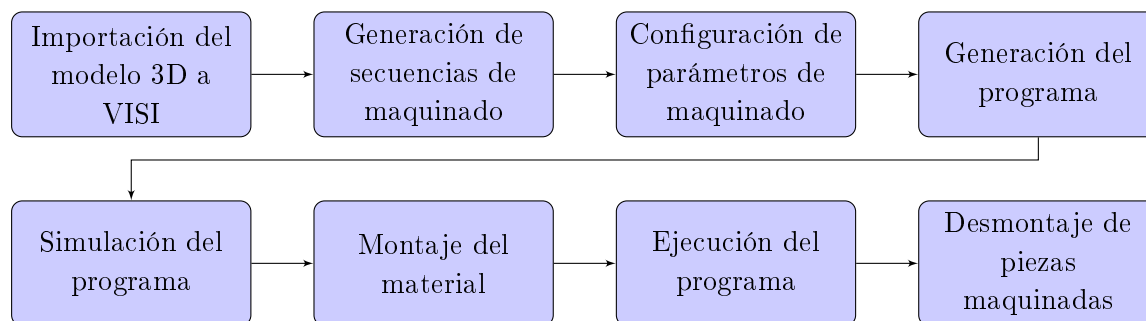


Figura 5.1: Diagrama de flujo del proceso de maquinado de las placas de Nylomaq.

mienta y se habilita el refrigerante. Debido al tipo de operaciones utilizadas, se configuró la velocidad de avance a 500 mm/min, la velocidad de la herramienta a 6000 rpm, y la profundidad de corte se configuró dependiendo del tamaño del cortador y el tipo de operación. Por lo general se utiliza una profundidad de corte menor a la mitad del diámetro del cortador.

4. Generación del programa: utilizando el software CAM se genera el programa, en código G, requerido para el maquinado.
5. Simulación del programa: sobre el panel de control de la fresadora CNC, se realiza una simulación del programa para verificar las trayectorias y parámetros previamente programados.
6. Montaje del material y de herramienta: utilizando los accesorios de sujeción de la fresadora CNC se monta la materia prima (placa de Nylomaq) sobre la mesa de trabajo. Además, se monta la herramienta de corte en el husillo de la máquina.
7. Ejecución del programa: se ejecuta el programa utilizando el panel de control de la fresadora CNC y se supervisa el proceso.
8. Desmontaje de piezas maquinadas: al finalizar el programa, se extraen las piezas de la mesa de trabajo.

Ensamble del sistema de suspensión

Con las piezas de Nylomaq, obtenidas del proceso de maquinado, se ensambló el sistema de suspensión del robot. El sistema principal se genera a partir de la unión de las ruedas locas, los eslabones y los soportes para los amortiguadores. De igual manera, la suspensión frontal se ensambla utilizando eslabones y montándolos sobre los ejes que los sujetan al chasis.

Para todos los ensambles del sistema de suspensión se utilizaron uniones mecánicas. Estas uniones consisten de tornillos y tuercas de seguridad, las cuales evitan que los ensambles se desarmen a causa de las vibraciones. En la figura 5.3 se muestran los ensambles del sistema de suspensión y el mecanismo de la suspensión frontal.



(a) Vista frontal.



(b) Maquinado de placa de Nylomaq

Figura 5.2: Fresadora CNC del Laboratorio de Tecnología Avanzada de Manufactura.

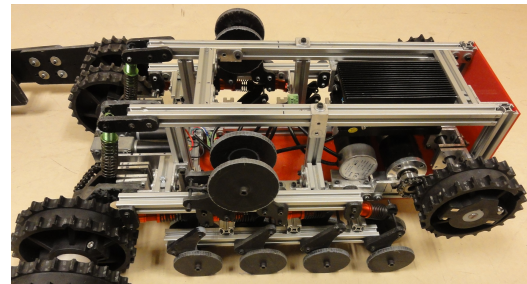
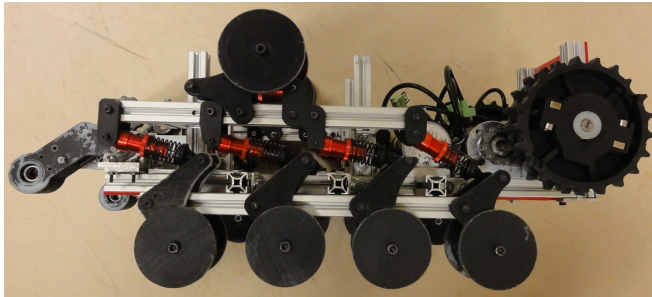


Figura 5.3: Sistema de suspensión y tensión ensamblado sobre el chasis.

Ensamble de las aletas

Del maquinado de las placas de Nylomaq también se obtuvieron las piezas necesarias para el ensamble de las aletas. Estas piezas se ensamblaron utilizando tornillos y tuercas de seguridad. Además, para montar las catarinas se utilizaron dos ejes, uno para la catarina de 25 dientes y otro para la catarina de 21 dientes. La unión de estos ejes a las piezas de Nylomaq se hizo a través de uniones por interferencia. En la figura 5.4a se muestran las aletas montadas sobre los eslabones de las suspensiones frontales.

5.1.2. Maquinado de la barra de Nylomaq

Para fabricar los coples de las catarinas del sistema de tracción se utilizó el torno paralelo que se muestra en la figura 5.5a. El torneado de los coples se realizó de manera manual, por lo tanto, para realizar la operación de maquinado fueron necesarios los siguientes pasos:

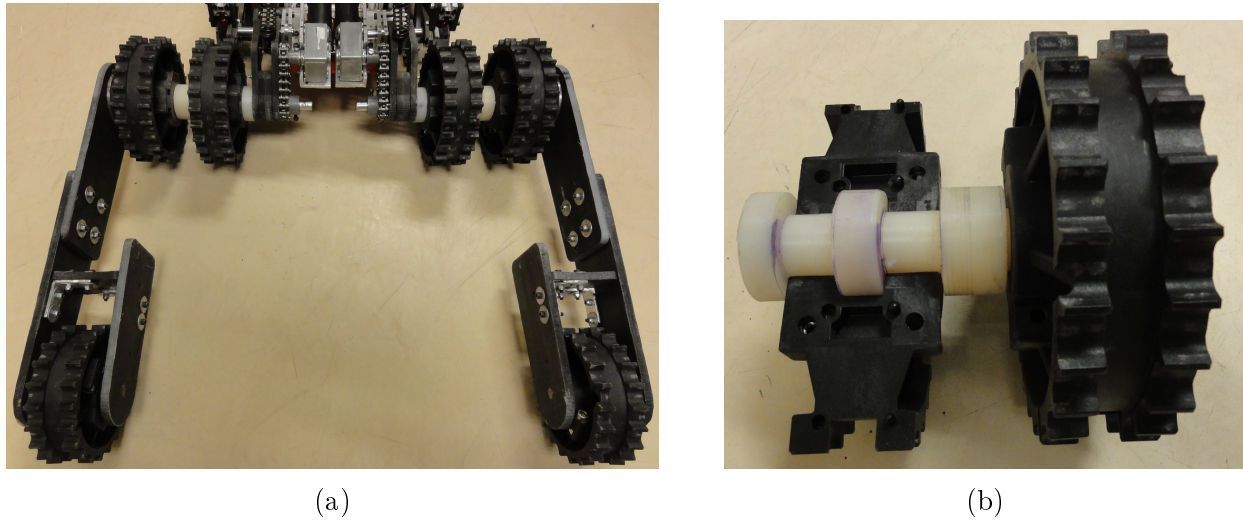


Figura 5.4: (a) Aletas instaladas sobre el robot, (b) catarinas para transmitir el movimiento a las orugas auxiliares.

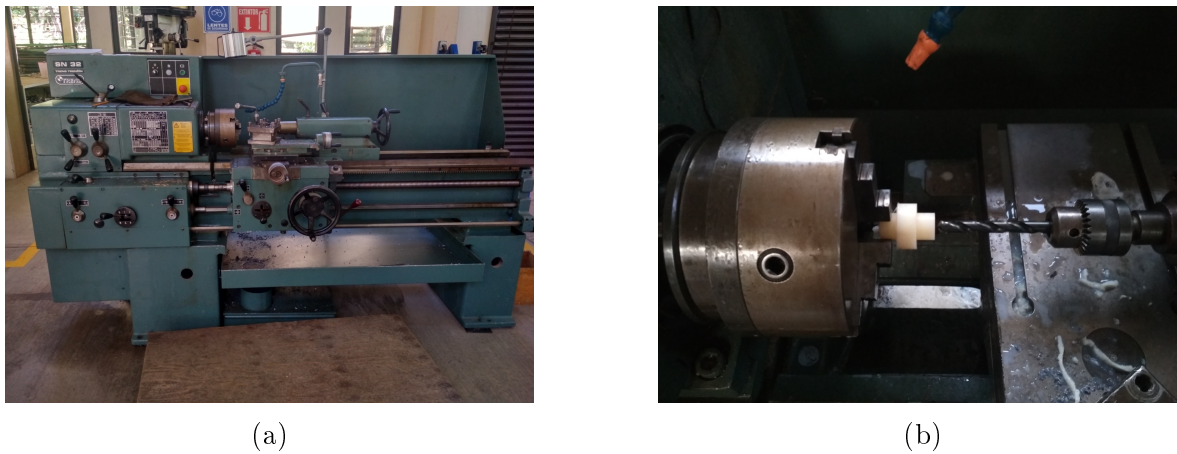
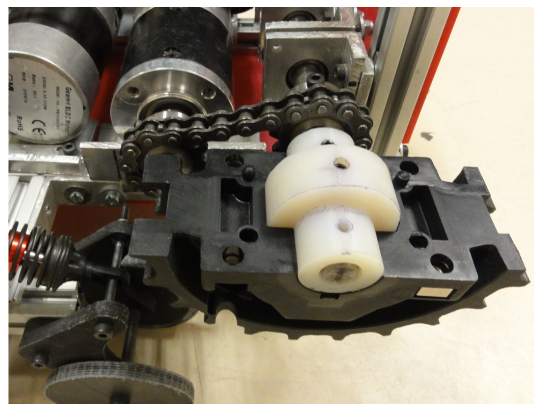


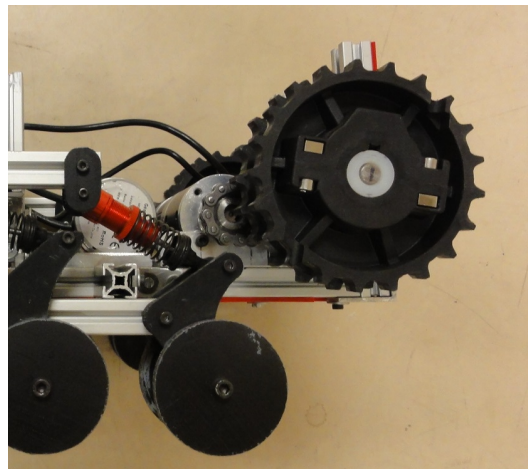
Figura 5.5: (a) Torno paralelo, (b) pieza maquinada montada en las mordazas.

1. Se utilizó Solidworks® para generar los dibujos técnicos, en donde se especifican dimensiones, formas y tolerancias.
2. Se montó la barra de Nylomaq sobre el chuck del torno.
3. Se sujetó el buril sobre el carro portaherramientas del torno.
4. Se desbastó el material hasta obtener la pieza deseada.

Con el maquinado de la barra de Nylomaq se obtuvieron los coples reductores para las catarinas traseras que se muestran en la figura 5.6a y el cople para la unión de las orugas principales con las orugas auxiliares (figura 5.4b). Al cople frontal que se muestra en la figura 5.4b se le instalaron dos rodamientos, uno en cada extremo, utilizando uniones por interferencia. Estos rodamientos del cople frontal son necesarios para que las ruedas giren libremente sobre el eje de las aletas.



(a) Catarina bipartida



(b) Ensamble

Figura 5.6: Catarinas montadas sobre el eje de 12mm.

5.1.3. Fabricación de los ejes

Para fabricar los ejes del robot se utilizó varilla de acero 1045, con un diámetro de 12 mm. Al utilizar la varilla previamente rectificadas se eliminó la necesidad de realizar la operación de rectificado. Además, el recubrimiento de la varilla permite tener una superficie endurecida y sin imperfecciones. Durante la fabricación de los ejes del robot, solamente fueron necesarias dos operaciones:

1. Corte de la varilla utilizando la sierra eléctrica de cinta para obtener la longitud deseada de cada eje.
2. Perforación del eje utilizando la fresadora vertical manual.

Ensamblaje de los ejes y catarinas

Con los ejes, coples y catarinas se obtuvieron los subensambles necesarios para la tracción del robot. Ya que las catarinas utilizadas en el robot de rescate son termoplásticas y bipartidas, fue posible hacer la unión del eje de 12mm con la catarina utilizando los bujes de acoplamiento hechos de Nylamaq, tornillos opresores y uniones por interferencia. En la figura 5.6 se muestra el ensamble de los tres elementos.

Para la unión de los ejes frontales con las aletas fue necesario soldar un cople en un extremo del eje. Este cople permitió la unión utilizando tornillos y tuercas M5. En la figura 5.7 se muestra el ensamble del eje frontal con la aleta.

5.1.4. Fabricación del chasis

Para construir el chasis se cortó y barrenó el perfil de aluminio estructural. Ambos, el perfil estructural y en L se cortaron utilizando una ingletadora y un disco de sierra para aluminio. Los

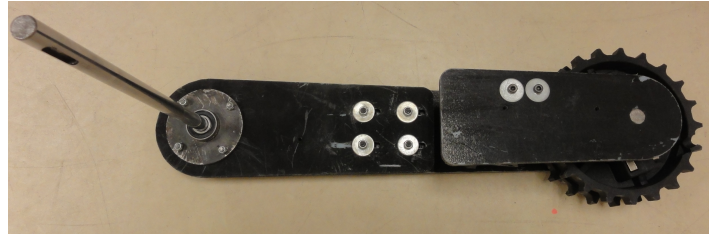
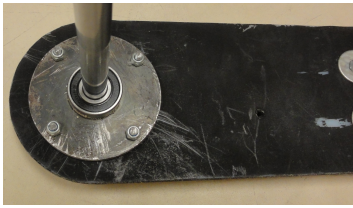


Figura 5.7: Eje frontal ensamblado con aleta .

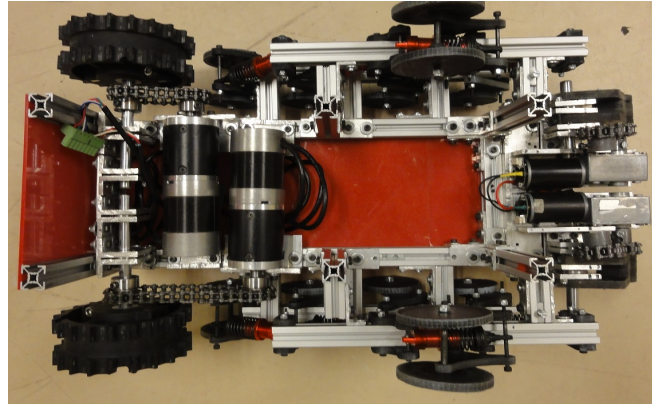


Figura 5.8: Vista superior del chasis ensamblado

perfiles se barrenaron utilizando la fresadora vertical manual para obtener los barrenos necesarios para las uniones mecánicas.

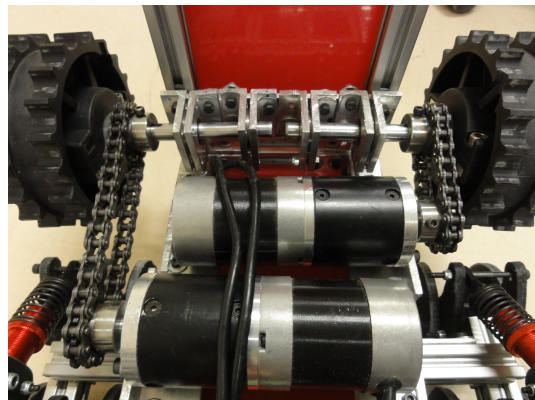
Los elementos de unión necesarios para el ensamble del chasis también se fabricaron utilizando perfil de aluminio en L. Este perfil fue cortado cada 2 cm y barrenado para permitir el ensamble utilizando tornillos M4. En la figura 5.8 se muestra la vista superior del chasis, en donde se pueden observar las uniones de los perfiles estructurales.

Soportes de motores

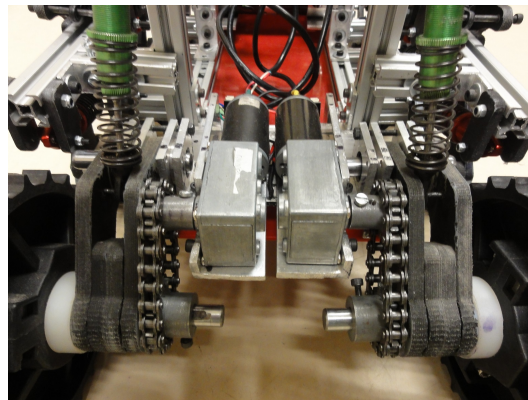
Los soportes de los motores de tracción y de las aletas se fabricaron de perfil de aluminio en L de 3/16" de espesor. Después, cada soporte se barrenó utilizando la fresadora vertical manual para obtener los barrenos necesarios para el montaje de los motores al chasis. Finalmente, la unión de los motores a los soportes y los soportes al chasis se hizo mediante tornillos M4 y tuercas dentro de la ranura del perfil estructural.

Chumaceras

Debido a el espacio reducido dentro del chasis, se decidió fabricar las chumaceras necesarias para los ejes de 12 mm. Las chumaceras utilizan rodamientos 6001, con un diámetro externo de 25 mm. La elección de estos rodamientos permitió fabricar los alojamientos utilizando perfil de aluminio en L de 3/16" de espesor. El maquinado y barrenado de los alojamientos se realizó

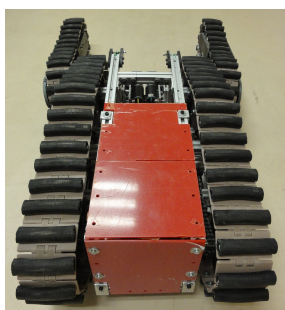


(a) Chumaceras traseras

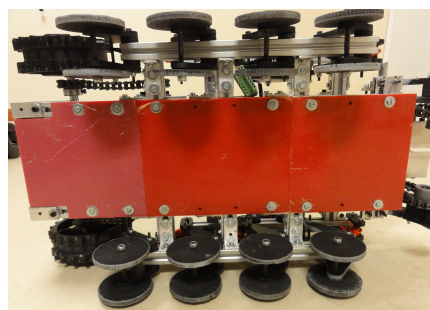


(b) Chumaceras frontales

Figura 5.9: Chumaceras fabricadas para el robot de rescate.



(a) Cubiertas superiores y traseras.



(b) Cubiertas inferiores

Figura 5.10: Cubiertas del robot de rescate.

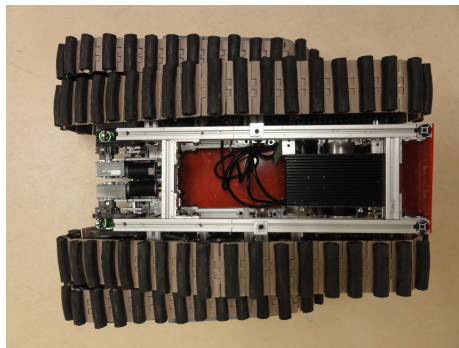
utilizando la fresadora CNC. Cada alojamiento consiste de dos piezas simétricas que encapsulan al rodamiento de tal manera que este gire libremente y que el eje pueda ser montado sobre el rodamiento. Además, los alojamientos se montan sobre un soporte que después se ensambla al chasis utilizando tornillos y tuercas M4. En la figura 5.9a y 5.9b se muestran las chumaceras fabricadas.

Cubiertas del chasis

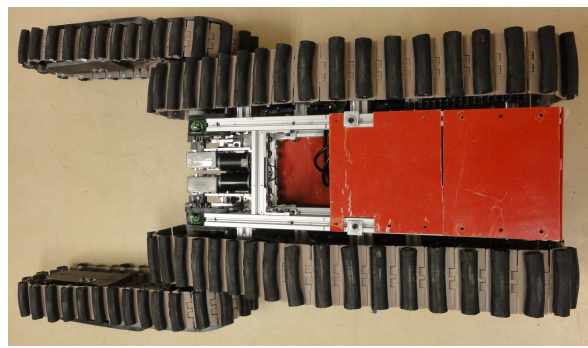
Las cubiertas del chasis se fabricaron de acrílico color rojo de 4 mm. Este acrílico se cortó fuera de las instalaciones de la universidad. A causa del diseño del chasis, se decidió utilizar uniones mecánicas (tuercas y tornillos) que permitirían quitar las cubiertas para el mantenimiento o modificaciones del robot. En la figura 5.10 se muestran las cubiertas del robot montadas sobre el chasis.



Figura 5.11: Orugas del robot de rescate.



(a) Aletas retraídas



(b) Aletas extendidas

Figura 5.12: Robot manufacturado.

5.1.5. Orugas

Para construir las orugas se barrenó cada eslabón de la cadenas de tablillas y se utilizó una remachadora manual para instalar los remaches de tal manera que se obtuviera una unión semi-permanente entre la manguera automotriz y la cadena de tablillas. Con cada remache se incorporó un par de arandelas, las cuales evitan que la manguera se afloje y se caiga. En la figura 5.11 se muestran las orugas ensambladas con la manguera automotriz.

5.1.6. Ensamble final

En la figura 5.12 se muestra el prototipo con todos sus componentes mecánicos y los actuadores necesarios para el sistema de tracción. El robot ensamblado tiene un ancho de 60 cm y una longitud de 75 cm con sus aletas retraídas (figura 5.12a) y una longitud de 1 m con sus aletas extendidas (figura 5.12b).

Además, cada aleta tiene un peso de 4.155 kg y el ensamble del chasis con el sistema de suspensión y actuadores tiene un peso de 12.775 kg. Por otra parte, las orugas principales tienen un peso de 2.265 kg cada una. Con todos sus componentes mecánicos, la plataforma construida tiene un peso total de 25.615 kg.

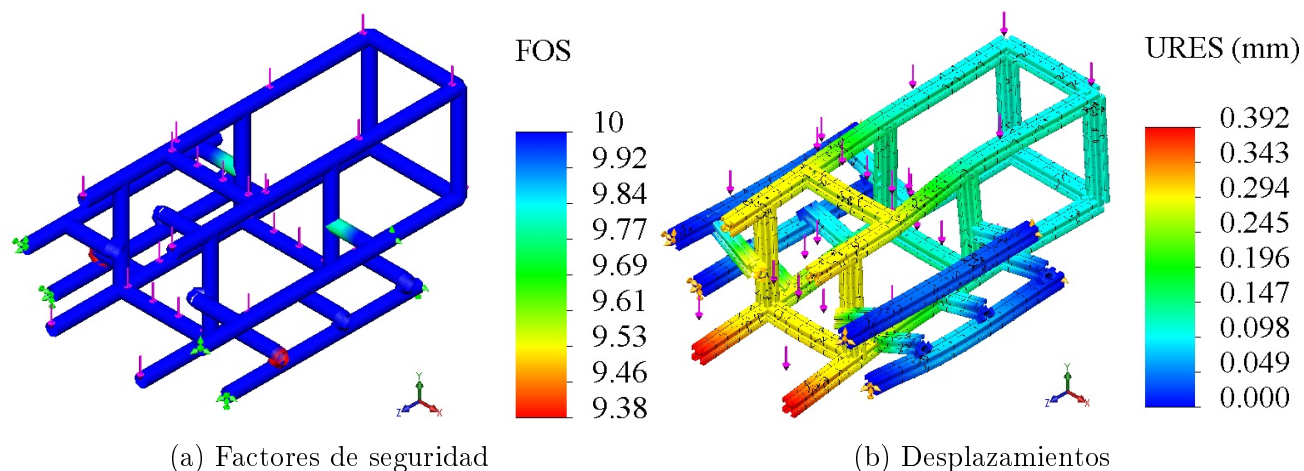


Figura 5.13: Resultados de simulación del chasis.

5.2. Evaluación de los componentes mecánicos principales en software

Para validar el diseño de los componentes, se realizaron simulaciones de cargas estáticas y se obtuvieron los factores de seguridad y los desplazamientos de cada parte. Para estas simulaciones en software se utilizaron los componentes críticos del robot y se simplificaron ciertas interacciones. Al hacer esto se disminuyó el tiempo de simulación sin afectar significativamente los resultados.

5.2.1. Chasis

Para determinar el factor de seguridad del chasis, se tomaron en cuenta las cargas que actuarían sobre él. Primero, se utilizó una carga de 200 N sobre la parte superior del chasis para representar el peso del manipulador y la carga útil que podría llevar el robot. Además, se consideró una carga de 150 N en la parte interna del chasis para representar el peso de los componentes adicionales. Con estas cargas aplicadas al robot, se obtuvieron los resultados de la figura 5.13. De estos resultados se puede observar que el factor de seguridad mínimo es de 9.38, lo que significa que el diseño del chasis es adecuado para el uso que se le pretende dar. Además, tomando en cuenta las cargas aplicadas, el desplazamiento máximo es de 0.392 mm.

5.2.2. Ejes y bujes

Eje y buje del sistema de tracción

Durante la evaluación del eje conducido principal se tomó en cuenta la situación crítica en donde el robot se encuentra atascado y el motor de tracción ejerce su potencia pico de 40 Nm. Además, el eje está soportado por los rodamientos y no existen fuerzas axiales ejercidas sobre él. En esta situación, se ejercen fuerzas en las superficies de contacto entre los prisioneros y el

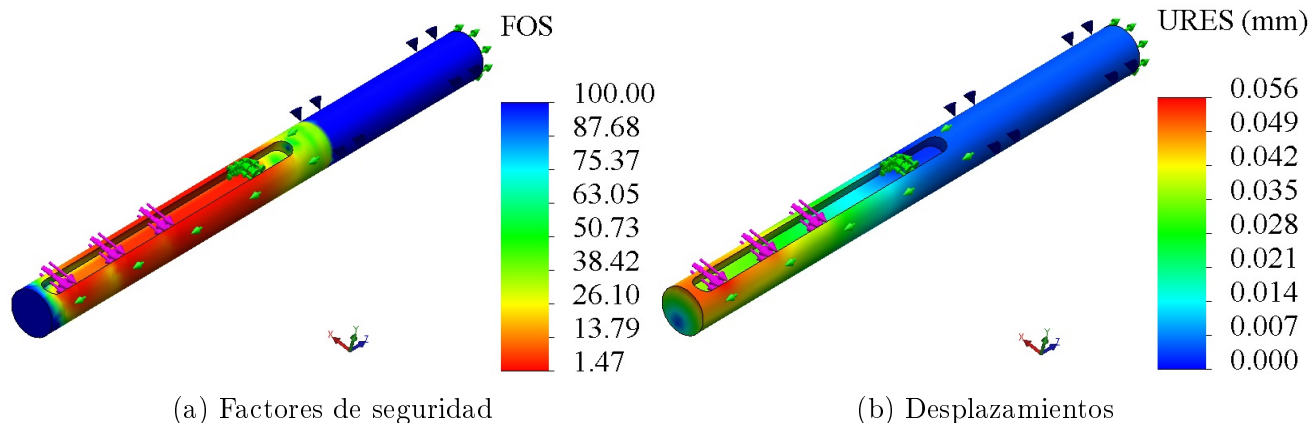


Figura 5.14: Resultados de simulación del eje de tracción.

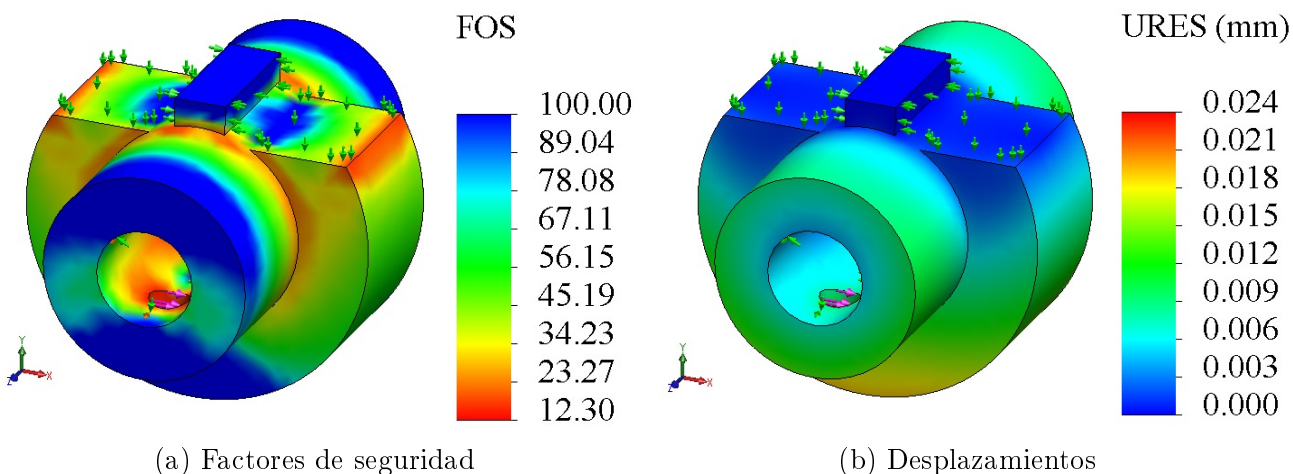


Figura 5.15: Resultados de simulación del buje reductor.

barreno de los ejes. En la figura 5.14 se muestran los resultados obtenidos mediante software. Debido a la superficie de contacto que existe entre los prisioneros y el eje, se observa que el factor de seguridad mínimo es de 1.47 (figura 5.14a). Además, el desplazamiento máximo a causa de esta carga es de 0.056 mm (figura 5.14b).

Tomando en cuenta las mismas consideraciones hechas para el eje conducido principal, se hizo el análisis del buje reductor y de acoplamiento para las catarinas termoplásticas. El buje reductor se utilizó para unir el eje conducido a la catarina principal y el buje de acoplamiento para acoplar las dos catarinas frontales y de tal manera transmitir la potencia de las orugas principales a las auxiliares. Al hacer el análisis se obtuvieron los resultados de las figuras 5.15 y 5.16. De estas figuras se obtienen los factores de seguridad mínimos de 12.3 (figura 5.15a) y 1.63 (figura 5.16a) y los desplazamientos máximos de 0.024 mm (figura 5.15b) y 0.609 (figura 5.16b) mm para el buje reductor y el de acoplamiento respectivamente.

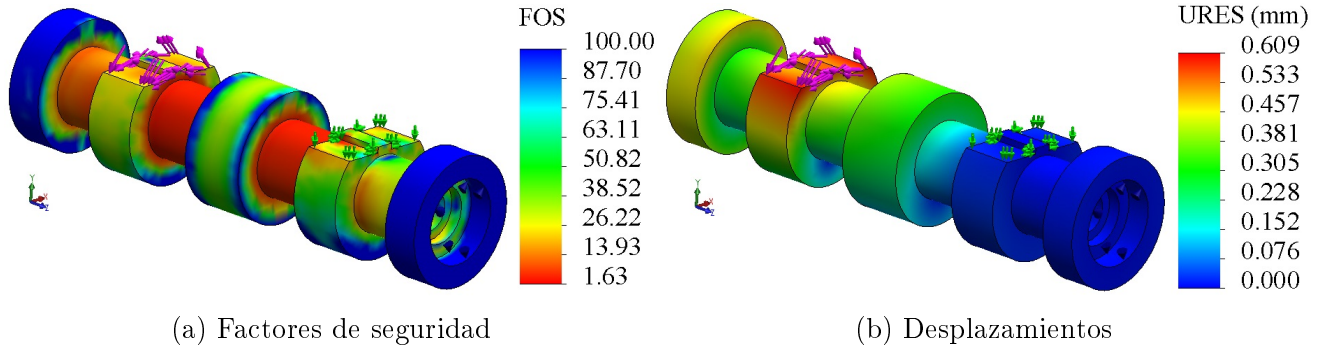


Figura 5.16: Resultados de simulación del buje de acoplamiento.

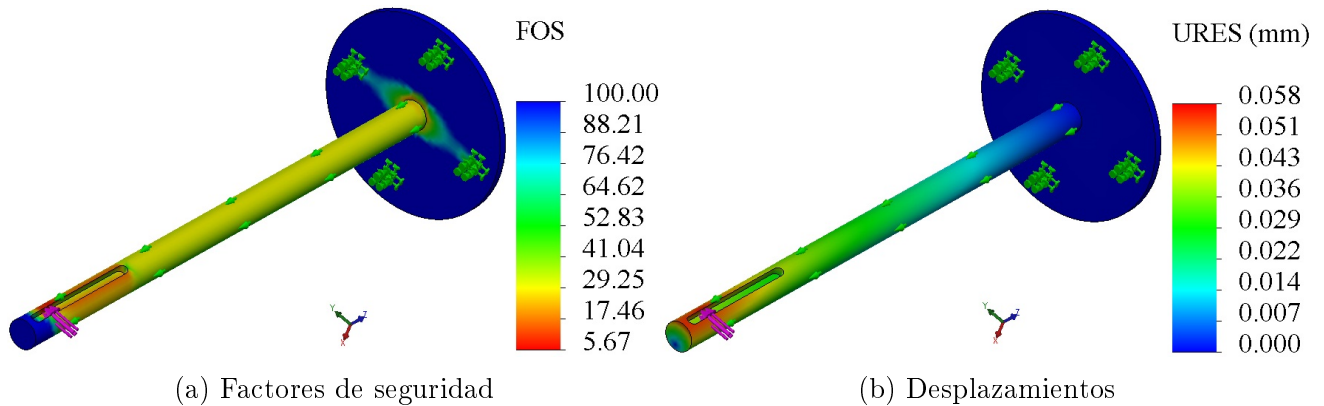


Figura 5.17: Resultados de la simulación del eje de las aletas.

Eje de las aletas

Al igual que los ejes de tracción, los ejes de las aletas se evaluaron en la situación crítica, cuando las aletas se encuentran atascadas y todo el par de los motores se transfiere al eje. En este caso, el motor puede ejercer un par máximo de 8 Nm. El par se transfiere de las catarinas a los ejes a través del tornillo prisionero. Con esta consideración se simula una fuerza aplicada sobre la superficie de contacto del eje y el prisionero. En la figura 5.17a se observa que el factor de seguridad mínimo es de 5.67 y además de la figura 5.17b se observa que existe un desplazamiento máximo de 0.058 mm.

5.2.3. Aletas

Para evaluar el diseño de las aletas se tomó en cuenta la situación en donde las aletas se encuentran estáticas y existe una carga sobre el extremo frontal. Esta carga representa el peso de la catarina, el buje, los rodamientos y el eje. De la figura 5.18a se obtiene que el factor de seguridad mínimo es 18.2. De igual manera, de la figura 5.18b se obtiene que el desplazamiento máximo es de 0.975 mm. Con este desplazamiento las catarinas no se desalinearían lo suficiente para causar un descarrilamiento de las orugas.

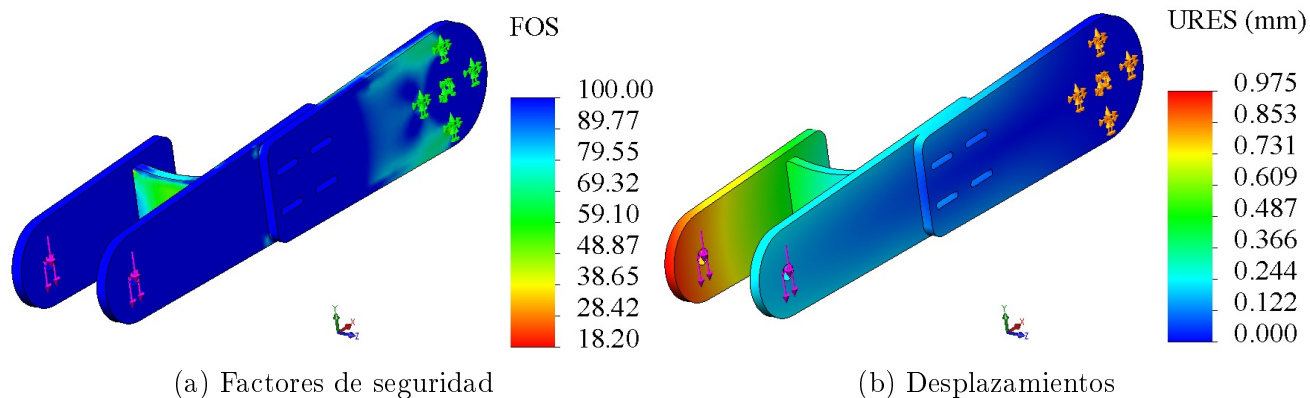


Figura 5.18: Resultados de la simulación de las aletas.

5.3. Evaluación del sistema mecánico

La evaluación del sistema de locomoción del robot consistió en utilizar pruebas basadas en las pruebas estandarizadas propuestas por el NIST. Estas pruebas se enfocaron en verificar funcionamiento del sistema mecánico y obtener retroalimentación para futuras versiones. A continuación se hace una descripción de las pruebas realizadas para la evaluación del sistema de tracción.

5.3.1. Prueba de maniobrabilidad

Para evaluar la maniobrabilidad del robot se utilizó el escenario de la figura 2.1b. La prueba consistió en teleoperar al robot desde la entrada del escenario hasta el final del mismo. Después, el robot tenía que regresar al inicio del escenario. Esta prueba se realizó durante la competencia de RRL del Torneo Mexicano de Robótica. En la figura 5.19 se muestra el robot entrando al escenario, atravesando las rampas y alcanzando el final del escenario.

Para realizar la prueba el robot tuvo que pasar por encima de las rampas y maniobrar de tal forma que no se atorara. Sin embargo, el robot solamente fue capaz de llegar a un extremo del escenario. Al intentar regresar a su punto de inicio el sistema electrónico falló y se terminó la prueba.

5.3.2. Pruebas de movilidad

Las pruebas de movilidad consisten en evaluar la capacidad del robot de atravesar obstáculos de diferentes formas y tamaños. Para el robot de rescate se utilizaron pruebas en donde se combinan las superficies y los obstáculos que el robot debe atravesar. A continuación se describen las pruebas hechas para validar la movilidad del robot.

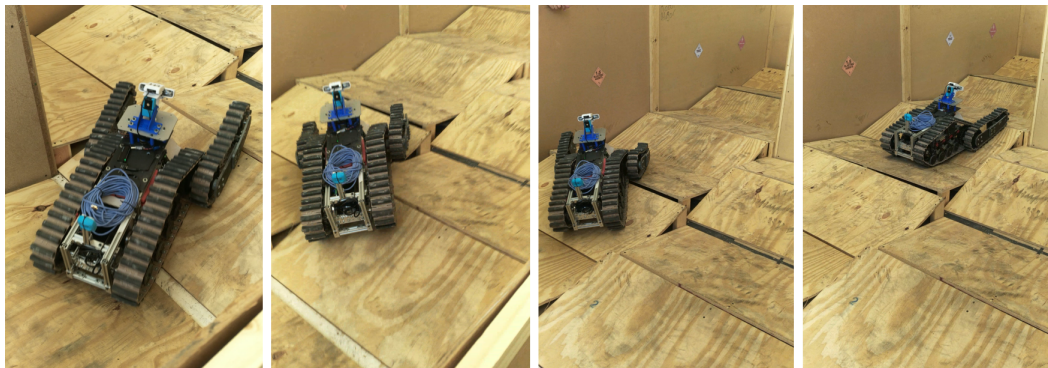


Figura 5.19: Prototipo sobre el escenario para prueba de maneobrabilidad.

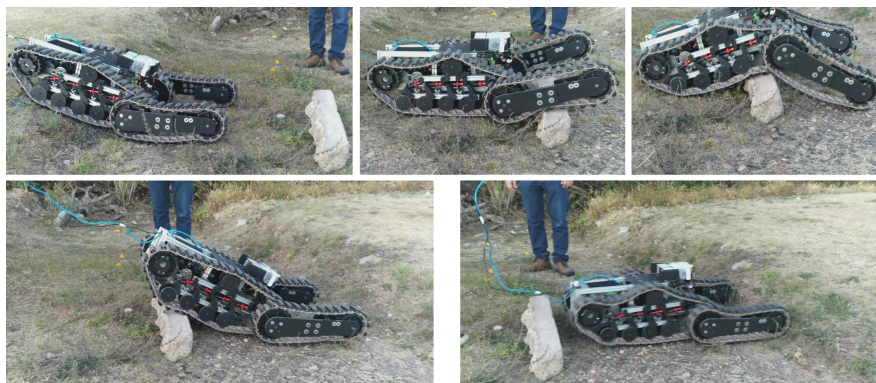


Figura 5.20: Prototipo sobre el escenario para prueba de movilidad.

Obstáculo de 5 pulgadas

En la figura 5.20 se muestra la primer prueba de movilidad, la cual utilizó un poste cuadrado de concreto de 5 pulgadas de ancho. El poste se situó en una superficie de tierra en el camino del robot con el propósito de verificar que fuera capaz de atravesar el obstáculo.

Durante la prueba, el robot fue capaz de atravesar el obstáculo y además se movió sin problemas sobre superficie ondulada en donde se realizó la prueba. En la figura 5.20 se logra observar que la suspensión se comprimió durante el movimiento y el sistema de tensión evitó que los dientes de las orugas saltaran sobre sus catarinas.

Superficies de arena y grava

En esta prueba se teleoperó al robot sobre una superficie plana con arena o grava. Sobre la superficie con grava, se observó que las suspensiones cumplían su funcionamiento al reducir las vibraciones que se transmitían al chasis. Debido al diseño de las orugas, estas no sufrieron daños o descarrilamiento a causa del ingreso de la grava al sistema de tracción.

Por otra parte, al operar el robot sobre una superficie con arena, este se movió sin estancarse. La alta superficie de contacto de las orugas permitió que este se moviera sobre la arena a una velocidad constante.

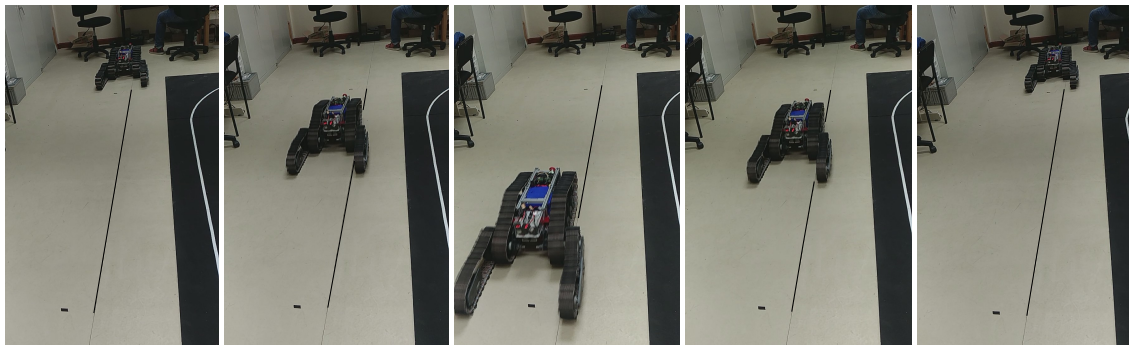


Figura 5.21: Movimiento del robot sobre una superficie plana.

Movimiento sobre superficie lisa y plana

Para validar el diseño de la suspensión se decidió utilizar pruebas en donde el robot se mueve sobre una superficie plana y se miden las vibraciones que se transmiten al chasis del robot. Para esto, se hicieron dos pruebas: una con la suspensión completamente bloqueada y otra con las suspensiones desbloqueadas y con su funcionamiento normal. Para cada prueba, el robot inicia en reposo sobre una línea recta y se mueve tres metros hasta llegar al final de la línea. Después, se mueve en reversa hasta llegar al lugar en donde inició su recorrido. En la figura 5.21 se muestra el movimiento del robot sobre la línea recta. Durante cada prueba, el robot acelera hasta obtener una velocidad constante de aproximadamente 0.6 m/s.

En la figura 5.22a se muestran las gráficas de las aceleraciones verticales cuando el robot se mueve con el sistema de suspensión bloqueado. Para analizar las gráficas de aceleración fue necesario realizar la transformada rápida de Fourier y obtener la señal en el dominio de la frecuencia. Al hacer esto se observó que existe una acumulación de energía alrededor de los 16Hz. Esta se puede atribuir a las vibraciones generadas por las orugas, las cuales tienen una superficie irregular para incrementar la tracción y movilidad.

Por otra parte, en la figura 5.22b se muestran las gráficas de las aceleraciones verticales cuando el robot se mueve con su sistema de suspensión desbloqueado. En la gráfica en el dominio del tiempo se observó que las aceleraciones tienen menor amplitud en comparación con los resultados obtenidos con el sistema de suspensión bloqueado. Además, en la gráfica en el dominio de la frecuencia, se observa una reducción de energía en la frecuencia de 16Hz. Esta reducción se puede atribuir a que el sistema de suspensión absorbe las vibraciones generadas por las orugas.

Por otra parte, también se validó que el robot fuera capaz de girar sobre su propio eje. Para esto, el robot inició sobre una línea recta y se movieron las orugas en direcciones opuestas. Al hacer esto, el robot hace un giro de 360 grados hasta regresar a su posición inicial. En la figura 5.23 se muestra la secuencia del movimiento. De la prueba se observó que el robot se desplaza cantidades pequeñas a su derecha cada vez que hace una rotación sobre su eje.

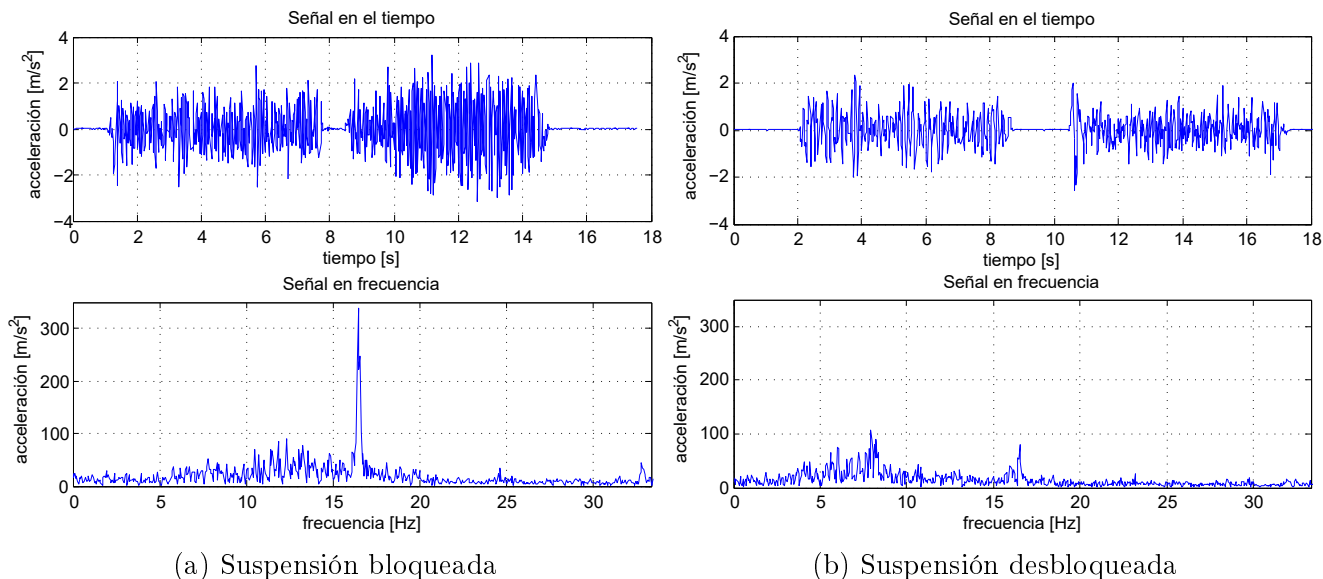


Figura 5.22: Aceleraciones obtenidas durante las pruebas sobre una superficie plana.

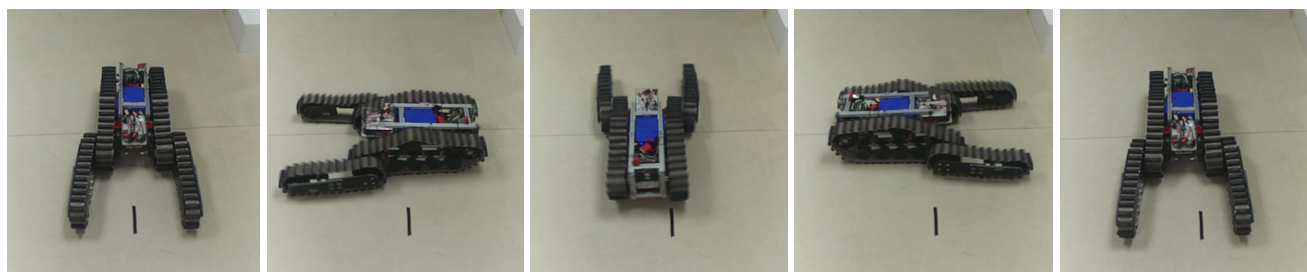


Figura 5.23: Robot girando sobre su propio eje.

5.4. Análisis de resultados

La evaluación por software permitió validar que las partes críticas del robot no sufrirán daño a causa de las fuerzas a las que se someterán. Las simulaciones muestran que las dimensiones y el material de las partes son adecuadas para la aplicación. Todas las partes evaluadas mostraron un factor de seguridad adecuado y un desplazamiento mínimo al aplicarles cargas estáticas. Además, durante las pruebas de movilidad, los componentes que se evaluaron en simulación se revisaron frecuentemente y se verificó que no sufrieran algún daño. Durante las pruebas del sistema de locomoción se observó una flexión lateral considerable de las aletas. Sin embargo, a causa de el diseño de las orugas, esta flexión no generó descarrilamiento o fallas en las orugas auxiliares.

Tomando en cuenta el poco tiempo de operación del robot de rescate, las cargas dinámicas no se tomaron en cuenta para este prototipo. Sin embargo, para un prototipo más cercano al producto final, la simulación de cargas dinámicas servirían para considerar la fatiga de sus componentes mecánicos en su diseño.

Por otra parte, durante las pruebas de movilidad y maniobrabilidad se observó que el sistema de locomoción cumple con los requerimientos de movilidad mínimos para un robot de rescate. Este fue capaz de realizar las pruebas de maniobrabilidad y movilidad, las cual tenían obstáculos con un tamaño considerable.

Las pruebas de movilidad mostraron que el robot es capaz de atravesar obstáculos de 5 pulgadas y moverse por distintas superficies irregulares. Durante todas las pruebas de movilidad se observó que el sistema de suspensión funcionaba correctamente y reducía las vibraciones causadas por las orugas y superficies irregulares. Esto se validó al medir las aceleraciones verticales que sufre el chasis del robot. El funcionamiento de las suspensiones y su simplicidad permite que se aumente la confiabilidad del robot sin incrementar considerablemente la complejidad del sistema de locomoción.

Después de cada prueba se inspeccionaba el robot para verificar que no existiera algún daño de las uniones o de los elementos mecánicos a causa de las vibraciones y de los impactos que sufre el robot. El robot no mostró daños durante las pruebas, sin embargo es necesario realizar un mayor número de pruebas para verificar la confiabilidad del robot a largo plazo.

Cabe mencionar que durante las primeras pruebas surgió un descarrilamiento de las orugas al intentar girar sobre su propio eje. Este problema surge a causa de la alta fricción sobre una superficie de concreto rugoso. Esto se solucionó al incrementar la tensión del sistema de orugas.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

Se diseñó y construyó el sistema de locomoción de un prototipo de robot de búsqueda y rescate. El diseño partió de la investigación del estado del arte para obtener requerimientos establecidos por expertos en el área. Otros requerimientos surgieron al considerar reglas de competencias robóticas y pruebas estandarizadas existentes. Sin embargo, algunos requerimientos no se tomaron en cuenta debido al costo y complejidad que implicarían en el diseño del robot. A causa de esto, las especificaciones finales del robot se enfocaron en proporcionar una plataforma mecánica capaz de ser utilizada dentro de la investigación y en competencias de robótica.

El diseño del chasis facilitó el ensamblaje y el montaje de actuadores, lo que evitó procesos de manufactura adicionales y el uso de soportes complejos. Esto disminuyó el costo y el tiempo necesario para fabricar el prototipo y permite que otros componentes, como sensores y manipulador, se monten directamente al chasis con uniones mecánicas simples. También, el chasis posee un alto grado de flexibilidad, lo que permite que se hagan cambios en su diseño si surgen actualizaciones en los requerimientos a causa de los cambios en las reglas de las competencias o a causa del desarrollo de otros sistemas del robot.

El chasis permitió incorporar un sistema de suspensión simple que mejoró la movilidad del robot al permitir que este se desplace en terrenos irregulares. Además, el sistema de suspensión, reduce las vibraciones que se transmiten a los componentes principales del robot. A largo plazo, esto incrementará la confiabilidad del robot durante las competencias y al realizar pruebas dentro del laboratorio. El funcionamiento de la suspensión se validó midiendo las aceleraciones verticales que sufre el robot a causa de las orugas. Estas aceleraciones son mayores cuando el sistema de suspensión se encuentra bloqueado.

Por otra parte, las orugas fabricadas permitieron la integración del sistema de suspensión y lograron evitar el descarrilamiento cuando los amortiguadores se comprimen. De igual manera, estas tienen un menor costo, en comparación con orugas prefabricadas y su simplicidad permite que se fabriquen en poco tiempo. Las vibraciones que generan las orugas se absorben por el sistema

de suspensión, por lo tanto, estas orugas son viables para el uso en las superficies comunes que existen en competencias de robótica, tales como la RRL.

La construcción del prototipo fue la etapa más tardada debido al gran número de partes del mismo y la poca experiencia que se tenía fabricando componentes. Por otra parte, una de las etapas más complicadas fue generar el concepto y plasmarlo en bocetos. Para facilitar esta tarea se realizó una evaluación de algunos robots existentes utilizando métricas generadas a partir de los requerimientos de diseño. Después, tomando en cuenta las evaluaciones, se dibujaron múltiples bocetos, de los cuales solamente tres se consideraron para continuar el desarrollo.

En comparación con los robots comerciales evaluados para la determinación de especificaciones, el prototipo obtenido es un sistema de bajo costo. Las especificaciones mecánicas del robot lo hace adecuado para continuar la investigación en el área de la robótica para desastres. Además, la complejidad de construir un robot de rescate funcional hace que aún existen muchos sistemas por desarrollar para obtener un prototipo capaz de brindar ayuda a equipos de búsqueda y rescate. Por lo tanto, este prototipo cumple con el objetivo de brindar una plataforma mecánica estable para iniciar el desarrollo de los demás sistemas de un robot de búsqueda y rescate autónomo.

Las partes diseñadas se evaluaron utilizando software para obtener su factor de seguridad y verificar que no sufrirían daños durante su funcionamiento. Con las simulaciones se validó el diseño de las partes críticas del robot. También, se hicieron pruebas con la plataforma mecánica construida. Estas pruebas permiten validar el grado de movilidad que el robot posee y el funcionamiento de los componentes principales del sistema de locomoción.

Mediante las pruebas realizadas, fue posible verificar el funcionamiento del sistema de tracción, chasis y suspensión. Las pruebas de movilidad y maniobrabilidad mostraron que el robot es capaz de desplazarse sobre diferentes superficies irregulares, lo cual es necesario para todas las tareas del robot. Este prototipo se utilizó en dos competencias de robótica, de las cuales se obtuvo retroalimentación para optimizar el diseño mecánico.

6.2. Trabajos futuros

La retroalimentación obtenida a través de pruebas y competencias permite plantear algunos trabajos futuros para optimizar la plataforma. Estos se enfocan en mejorar el diseño actual, tomando en cuenta los resultados de las evaluaciones.

- Optimización del sistema de aletas para permitir que el robot se levante a si mismo. Esto implica utilizar actuadores de mayor potencia y que permitan implementar un control de posición.
- Implementar un sistema electrónico estable que permita iterar el diseño del chasis y disminuir su tamaño.
- Optimizar el sistema de suspensión para utilizar orugas de caucho hechas a la medida.
- Simulación del sistema de suspensión para verificar su funcionamiento por software.
- Implementación de un sistema de medición de vibraciones para optimizar el sistema de suspensión.

La complejidad que presenta el desarrollo de un robot de búsqueda y rescate hace que existan muchos problemas a resolver. A continuación se presentan algunos trabajos que se pueden realizar con la plataforma desarrollada.

- Implementación de una interfaz gráfica de usuario para facilitar la teleoperación y monitoreo del robot.
- Implementación de algoritmos de navegación autónoma para mejorar la movilidad del robot.

Bibliografía

- [1] Patrick Hofer, Stefan Quendler, Martin Sereinig, and Wolfgang Werth. Robocup rescue 2016 team description paper cuas rrr. 2016.
- [2] Sanem Sarel Daniel D. Lee (eds.) Sven Behnke, Raymond Sheh. *RoboCup 2016: Robot World Cup XX*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 9776. Springer International Publishing, 1st edition, 2017.
- [3] How to make custom and strong tank tracks for very cheap. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/How-to-make-custom-and-strong-tank-tracks-for-very/>. Accedido: 2019-04-25.
- [4] Rubtrack. Robot tracks. Disponible en: <http://www.rubtrack.com/rubber-tracks/robot-tracks/>. Accedido: 2019-04-26.
- [5] Alondra Olivera. Crean un robot topo en el tecnológico de la mixteca, oaxaca. Disponible en: <https://www.nvinoticias.com/nota/90380/crean-un-robot-topo-en-el-tecnologico-de-la-mixteca-oaxaca>. Accedido: 2019-02-18.
- [6] Noritaka Sato, Katsuma Torii, and Yoshifumi Morita. Development of crawler type rescue robot with 2 dof flipper arms. In *Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pages 850–854. IEEE, 2013.
- [7] Warwick Mobile Robotics. Drive test assembly. Disponible en: <https://warwick.ac.uk/fac/sci/eng/meng/wmr/media/images/drivetestass>. Accedido: 2019-04-26.
- [8] Oussama Khatib (eds.) Bruno Siciliano. *Springer Handbook of Robotics*. Springer International Publishing, 2nd edition, 2016.
- [9] RoboCup Rescue Robot League. Robocup rescue rulebook. Disponible en: <https://rrl.robocup.org/rules/>. Accedido: 2019-02-18.
- [10] Adam Jacoff, Elena Messina, and John Evans. Experiences in deploying test arenas for autonomous mobile robots. Technical report, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg MD Intelligent Divisions, 2001.

-
- [11] Tsubaki. Drive chains and sprockets. Disponible en: http://tsubaki.ca/pdf/library/Tsubaki_Drive_Chain__Sprockets.pdf. Accedido: 2019-05-17.
- [12] Mechanical Power Transmission Association. Silent chain disconnect. Disponible en: <http://mpta.org/resources/chain-documents/>. Accedido: 2019-05-17.
- [13] Roland Siegwart, Pierre Lamon, Thomas Estier, Michel Lauria, and Ralph Piguet. Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain. *Robotics and Autonomous systems*, 40(2-3):151–162, 2002.
- [14] Paul Sandin. *Robot mechanisms and mechanical devices illustrated*. McGraw Hill Professional, 2003.
- [15] Nidec Corporation. Basic motor information. Disponible en: <https://www.nidec.com/en-NA/technology/motor/basic/>. Accedido: 2019-05-18.
- [16] M Galal Rabie. *Fluid power engineering*. McGraw-Hill, 2009.
- [17] Chenghui Nie, Xavier Pacheco Corcho, and Matthew Spenko. Robots on the move: Versatility and complexity in mobile robot locomotion. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(4):72–82, 2013.
- [18] Endeavour Robotics. Packbot. Disponible en: <http://endeavorrobotics.com/products#510-packbot>. Accedido: 2019-03-28.
- [19] Telerob. Telemax hybrid. Disponible en: <https://www.telerob.com/en/products/telemax-family/telemax-hybrid>. Accedido: 2019-03-28.
- [20] Future Robotics Technology Center. Quince. Disponible en: <https://furo.org/en/works/quince.html>. Accedido: 2019-03-28.
- [21] *World disasters report 2018: leaving no one behind*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2018.
- [22] Satoshi Tadokoro. *Rescue robotics: DDT project on robots and systems for urban search and rescue*. Springer, 2009.
- [23] Jennifer L Casper, Mark Micire, and Robin R Murphy. Issues in intelligent robots for search and rescue. In *Unmanned ground vehicle technology II*, volume 4024, pages 292–303. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [24] Adam Jacoff, Elena Messina, and John Evans. Performance evaluation of autonomous mobile robots. *Industrial Robot: An International Journal*, 29(3):259–267, 2002.
- [25] Angela Davids. Urban search and rescue robots: from tragedy to technology. *IEEE Intelligent systems*, 17(2):81–83, 2002.

- [26] RoboCup Rescue Robot League. League overview. Disponible en: <https://rrl.robocup.org/league-overview/>. Accedido: 2019-02-14.
- [27] Johannes Pellenz, Adam Jacoff, Tetsuya Kimura, Ehsan Mihankhah, Raymond Sheh, and Jackrit Suthakorn. Robocup rescue robot league. In *Robot Soccer World Cup*, pages 673–685. Springer, 2014.
- [28] Werner Isop, Stefan Quendler, Martin Sereinig, and Wolfgang Werth. Robocuprescue 2013 - robot league team cuas rrr - team (austria). 2013.
- [29] Robin R Murphy. A decade of rescue robots. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5448–5449. IEEE, 2012.
- [30] Hisashi Osumi. Application of robot technologies to the disaster sites. *The Japan Society of Mechanical Engineers, Report on the Great East Japan Earthquake Disaster*, 2014.
- [31] Jennifer Carlson. Analysis of how mobile robots fail in the field. Master’s thesis, University of South Florida, United States, 2004.
- [32] Robin R Murphy. *Disaster robotics*. Intelligent robotics and autonomous agents. MIT press, 2014.
- [33] Robin R Murphy, Satoshi Tadokoro, and Alexander Kleiner. Disaster robotics. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 1577–1604. Springer, 2016.
- [34] Robin Murphy, Jennifer Casper, Jeffery Hyams, Mark Micire, and Brian 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.
- [35] Geert De Cubber (eds.). *Search and Rescue Robotics - From Theory to Practice*. InTech Publishing, 1st edition, 2017.
- [36] Adam Jacoff, Elena Messina, and John Evans. A standard test course for urban search and rescue robots. *NIST special publication SP*, pages 253–259, 2001.
- [37] Standard test methods for response robots. Disponible en: <https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/response-robots>. Accedido: 2019-02-18.
- [38] 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*, pages 161–168. ACM, 2010.

- [39] 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*, pages 182–189. ACM, 2012.
- [40] ASTM International. Astm e2826-11, standard test method for evaluating emergency response robot capabilities: Mobility: Confined area terrains: Continuous pitch/roll ramps. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [41] ASTM International. Astm e2827-11, standard test method for evaluating emergency response robot capabilities: Mobility: Confined area terrains: Continuous pitch/roll ramps. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [42] ASTM International. Astm e2802-11, standard test method for evaluating emergency response robot capabilities: Mobility: Confined area obstacles: Hurdles. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [43] ASTM International. Astm e2991/e2991-17, standard test method for evaluating response robot mobility: Traverse gravel terrain. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [44] ASTM International. Astm e2828-11, standard test method for evaluating emergency response robot capabilities: Mobility: Confined area terrains: Symmetric stepfields. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [45] ASTM International. Astm e2804-11, standard test method for evaluating emergency response robot capabilities: Mobility: Confined area obstacles: Stairs/landings. Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [46] Craig Schlenoff and Elena Messina. A robot ontology for urban search and rescue. In *Proceedings of the 2005 ACM workshop on Research in knowledge representation for autonomous systems*, pages 27–34. ACM, 2005.
- [47] Phuoc-Nguyen Nguyen-Huu, Joshua Titus, Dawn Tilbury, and G Ulsoy. Reliability and failure in unmanned ground vehicle (ugv). *GRRC Technical Report*, 2009.
- [48] Nils J Nilsson. A mobile automaton: An application of artificial intelligence techniques. Technical report, SRI International Menlo Park CA Artificial Intelligence Center, 1969.
- [49] Endeavour Robotics. Firstlook. Disponible en: <http://endeavorrobotics.com/products#110-firstlook>. Accedido: 2019-04-06.
- [50] Defense Advanced Research Projects Agency. Darpa robotics challenge (drc). Disponible en: <https://www.darpa.mil/program/darpa-robotics-challenge>. Accedido: 2019-05-16.

- [51] Matthew Spenko, Stephen Buerger, and Karl Iagnemma. *The DARPA Robotics Challenge Finals: Humanoid Robots To The Rescue*, volume 121. Springer, 2018.
- [52] Erico Guizzo and Evan Ackermann. How south korea's drc-hubo robot won the darpa robotics challenge. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/how-kaist-drc-hubo-won-darpa-robotics-challenge>, 2015. Accedido: 2019-04-05.
- [53] Carnegie Mellon University. Tartan rescue team. Disponible en: <https://www.nrec.ri.cmu.edu/solutions/defense/other-projects/tartan-rescue-team.html>. Accedido: 2019-04-05.
- [54] Florida Institute for Human and Machine Cognition. Ihmc giving atlas a leg up. Disponible en: <https://www.ihmc.us/ihmc-giving-atlas-a-leg-up/>. Accedido: 2019-04-05.
- [55] Bradley E Bishop, Frederick L Crabbe, and Bryan M Hudock. Design of a low-cost, highly mobile urban search and rescue robot. *Advanced Robotics*, 19(8):879–899, 2005.
- [56] Uluc Saranlı, Martin Buehler, and Daniel E Koditschek. Rhex: A simple and highly mobile hexapod robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7):616–631, 2001.
- [57] Cornell Wright, Austin Buchan, Ben Brown, Jason Geist, Michael Schwerin, David Rollinson, Matthew Tesch, and Howie Choset. Design and architecture of the unified modular snake robot. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 4347–4354. IEEE, 2012.
- [58] Boston Dynamics. Rhex. Disponible en: <https://www.bostondynamics.com/rhex>. Accedido: 2019-04-06.
- [59] Ronald D Hochstetler, John Bosma, Girish Chachad, and Matthew L Blanken. Lighter-than-air (lta)“airstation”-unmanned aircraft system (uas) carrier concept. In *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, page 4223, 2016.
- [60] YSI. i3xo ecomapper auv. Disponible en: <https://www.ysi.com/ecomapper>. Accedido: 2019-04-06.
- [61] Johannes Maurer, Gerald Steinbauer, Peter Lepej, and Suzana Uran. Tedusar white book-state of the art in search and rescue robots. *Graz University of Technology, University of Maribor, Tech. Rep.*, 2014.
- [62] Robin R Murphy, Eric Steimle, Chandler Griffin, Charlie Cullins, Mike Hall, and Kevin Pratt. Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane wilma. *Journal of Field Robotics*, 25(3):164–180, 2008.

- [63] Dimitrios Apostolopoulos. *Systematic configuration of robotic locomotion*. Carnegie Mellon University, the Robotics Institute, 1996.
- [64] Roland Siegwart; Illah Reza Nourbakhsh; Davide Scaramuzza. *Introduction to autonomous mobile robots*. Intelligent Robotics and Autonomous Agents. MIT Press, 2nd edition, 2011.
- [65] Richard G Budynas and J Keith Nisbett. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw Hill Mexico, 9th edition, 2012.
- [66] American National Standards Institute. American national standards institute. Disponible en: <https://www.ansi.org/>. Accedido: 2019-04-17.
- [67] KHK Stock Gears. Types of gears. Disponible en: https://khkgears.net/new/gear_knowledge/introduction_to_gears/types_of_gears.html. Accedido: 2019-05-18.
- [68] Karl T Ulrich. *Product design and development*. Tata McGraw-Hill Education, 6th edition, 2015.
- [69] Joe Mario Pedersen. Bomb squads face off in 'robot rodeo' competition, hosted by orange county sheriff's office. Disponible en: <https://www.orlandosentinel.com/news/breaking-news/os-ne-robot-rodeo-ocso-20181206-story.html>. Accedido: 2019-05-23.
- [70] Army Guide. 510 packbot. Disponible en: <http://www.army-guide.com/eng/product2717.html>. Accedido: 2019-05-23.
- [71] Rexnord. Rex 820 table top chain. Disponible en: <http://cadenasyequiposind.com/rexnord/tt/8rx820pp-en.pdf>. Accedido: 2019-04-29.
- [72] Aluminum profiles: Products. Rexroth a bosch company. Disponible en: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/product-groups/assembly-technology/topics/aluminum-profiles-solutions-components/aluminum-profiles-products/index>. Accedido: 2019-05-01.
- [73] Robert L Mott. *Diseño de elementos de máquinas*. 4th edition, 2006.
- [74] Mikell P Groover. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. McGraw-Hill, 3rd edition, 2007.

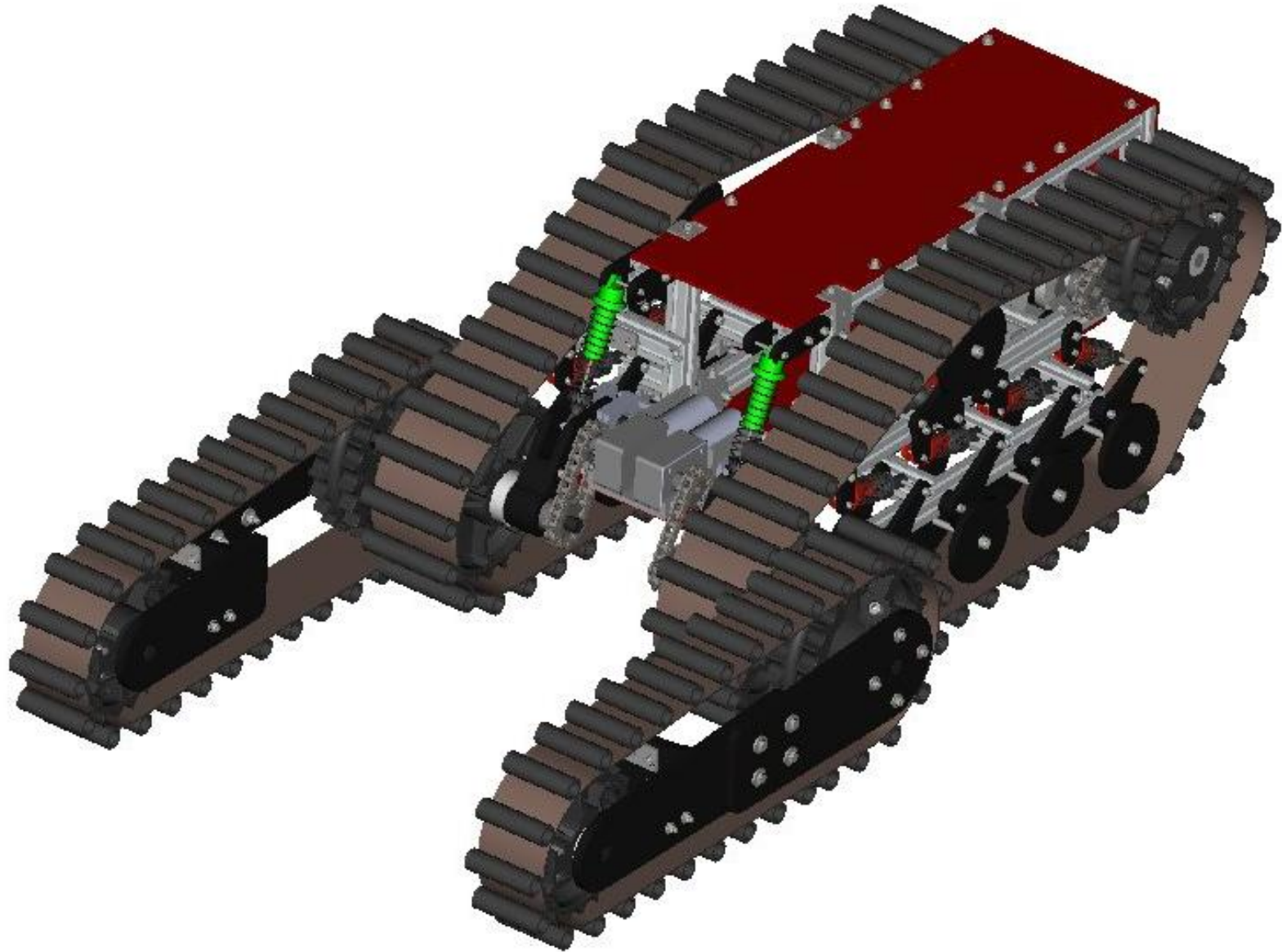
Apéndice A

Vistas explosionadas y dibujos técnicos

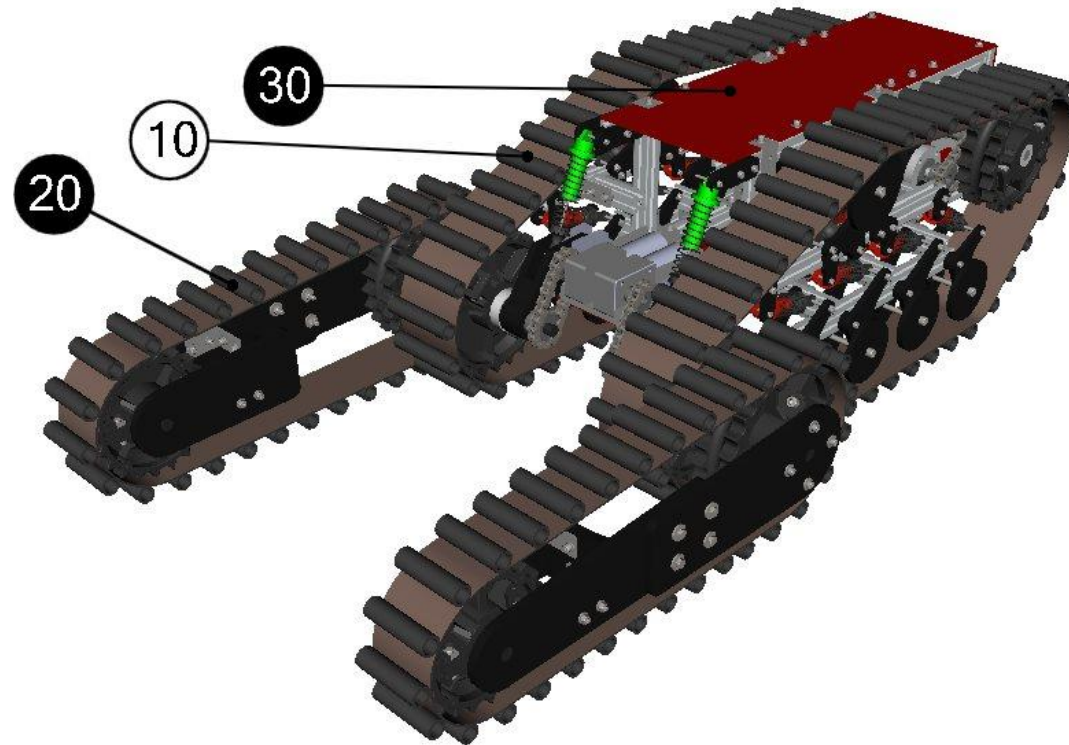
A continuación se presentan las vistas explosionadas y los dibujos técnicos necesarios para la construcción del robot. Para realizar las vistas explosionadas y las listas de materiales se inició con el robot completamente ensamblado y se divide el robot en subensambles para mostrar con mayor detalle las partes.

Vistas Explosionadas

Prototipo de Robot de Rescate

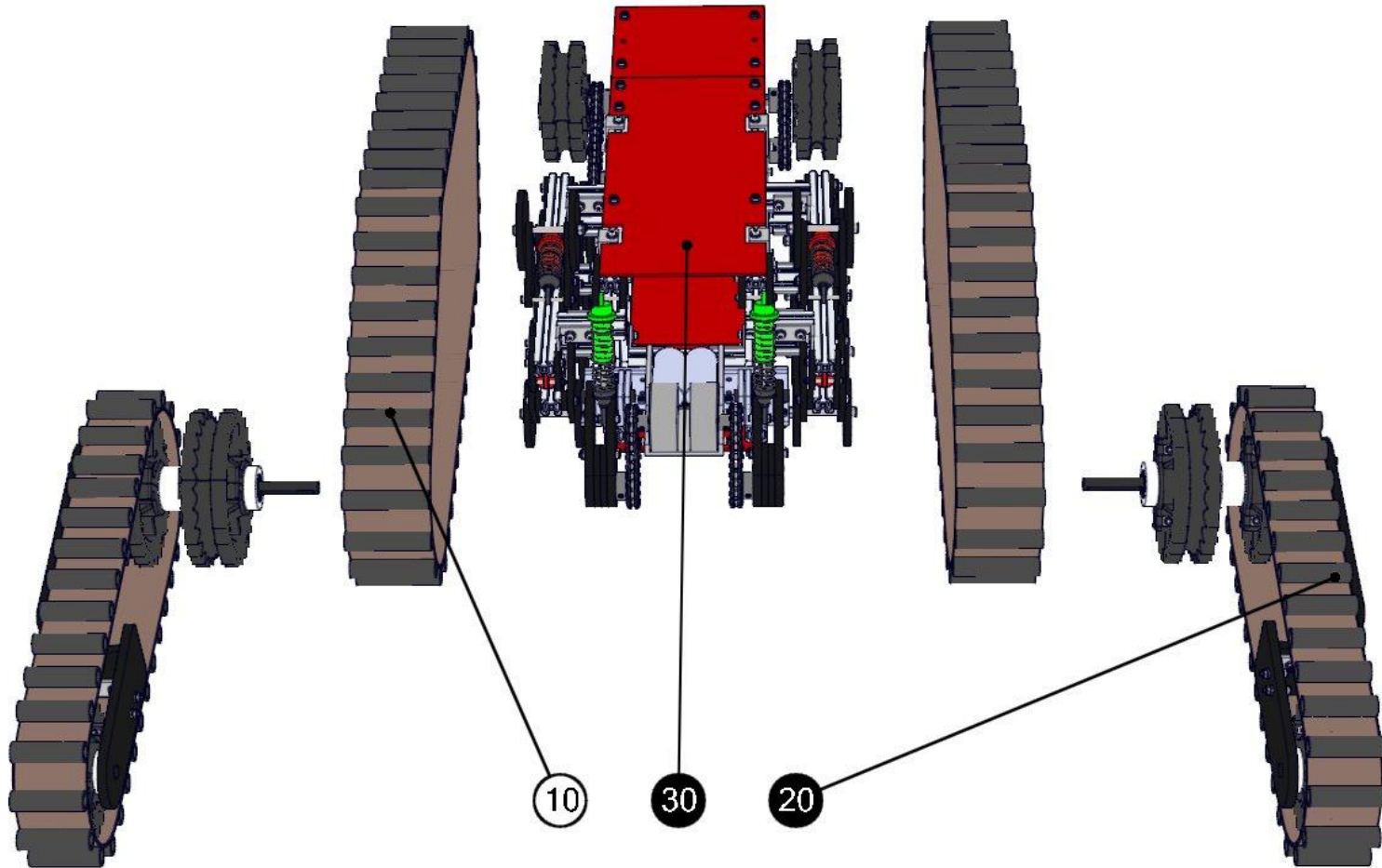


Subensambles principales



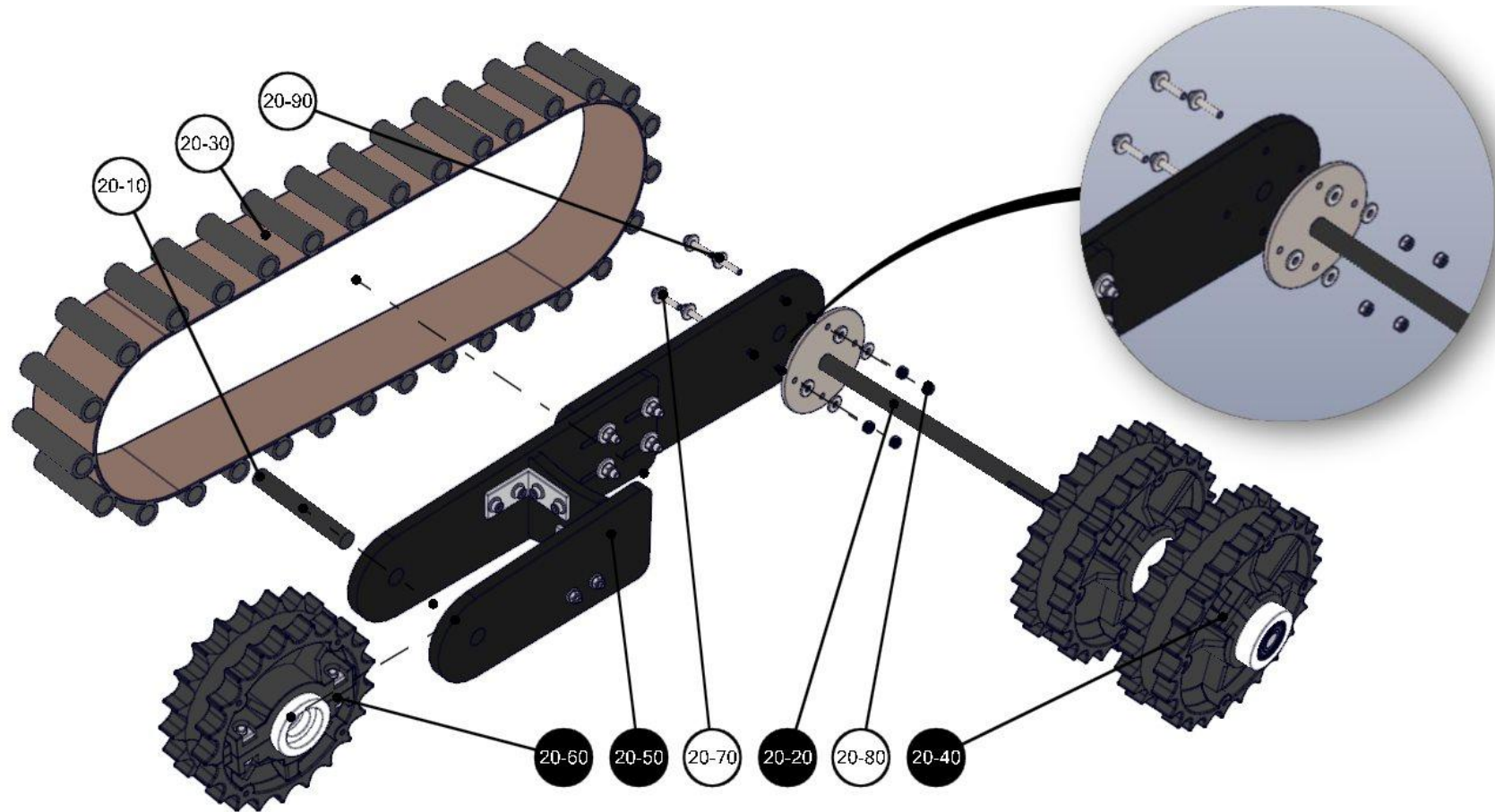
BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
10	Oruga	2	Predeterminado
30	Chasis y subensambles	1	Default
20	Aleta	2	Default

Subensambles principales



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
10	Oruga	2	Predeterminado
30	Chasis y subensambles	1	Default
20	Aleta	2	Default

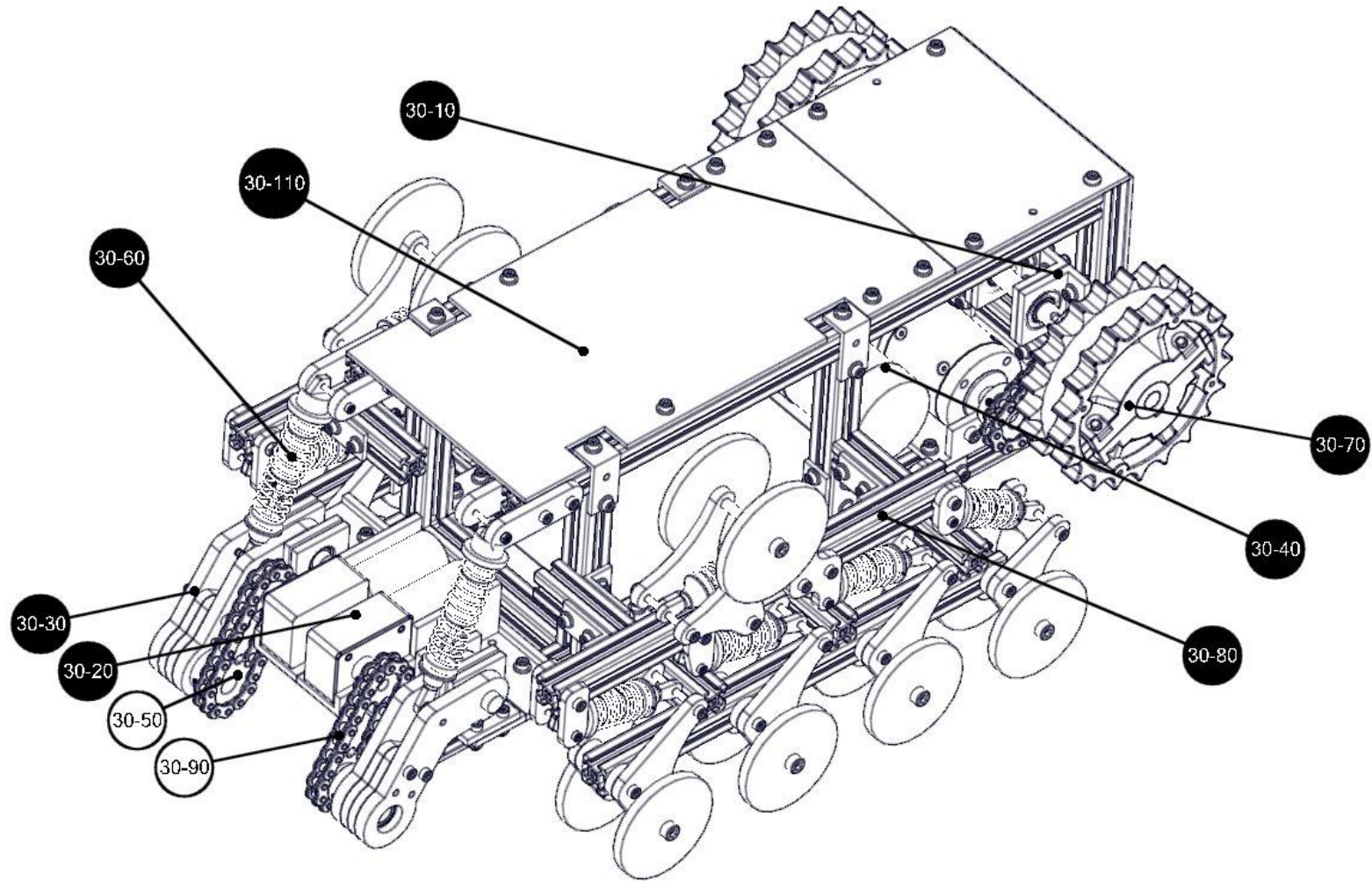
Vista explosiva de la aleta (oruga auxiliar) derecha



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
20-80	Tuerca	4	AM-M4-N
20-90	Tornillo	4	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 20 Hex SHCS -- 20NHX
20-50	Subensamble de aleta	1	Default
20-30	Oruga	1	Predeterminado
20-20	Eje y cople	1	Default

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
20-10	Eje	1	Predeterminado
20-40	Catarinas	1	Default
20-60	Catarina	1	Default
20-70	Arandela	8	B18.22M - Plain washer, 4 mm, regular

Chasis y subensambles principales

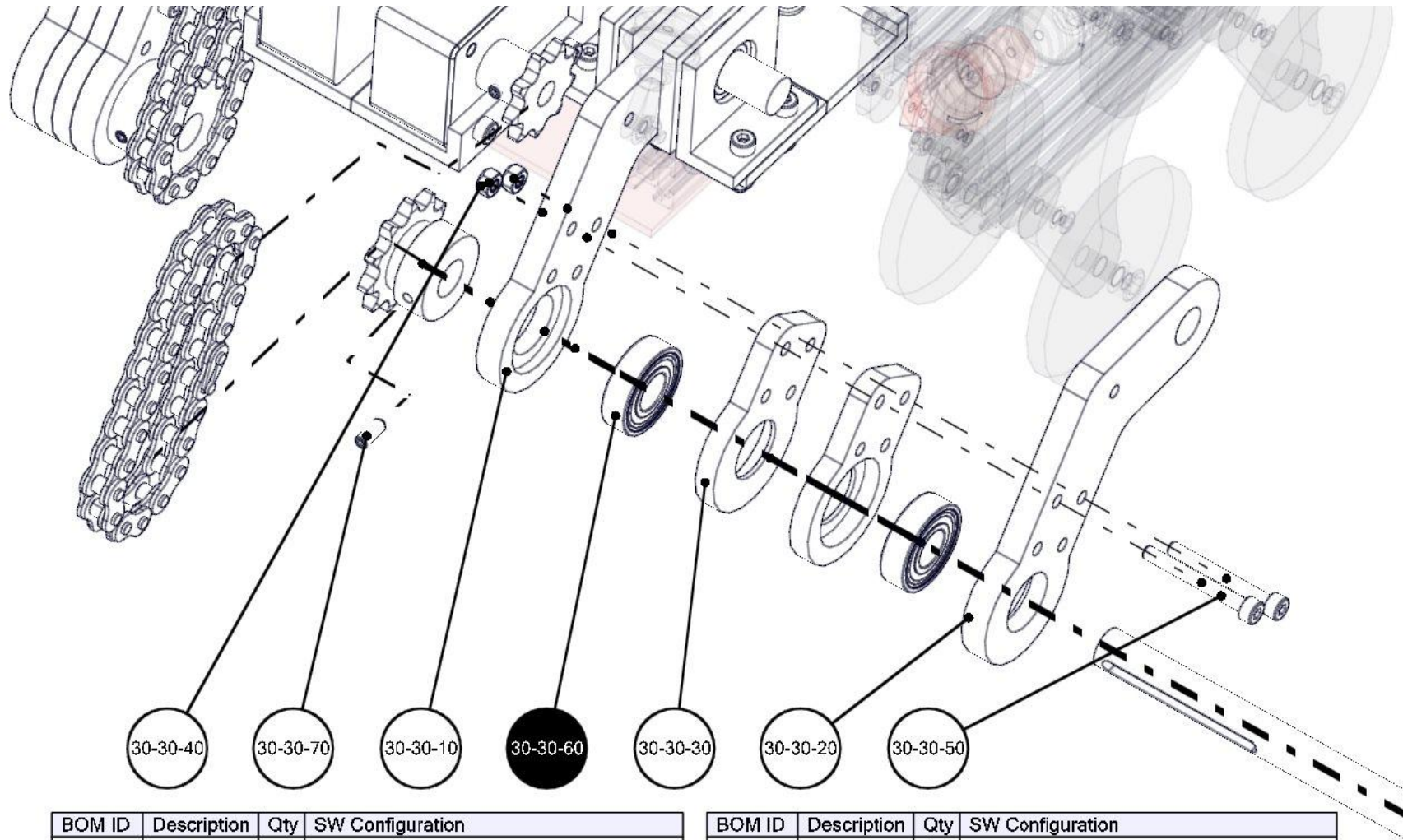


BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-40	Motor y soporte	2	Default
30-30	Eslabón	2	Default
30-110	Cubierta	1	Default
30-20	Chumacera y motores	1	Default

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-10	Chumacera	1	Default
30-80	Chasis y suspensión	1	Default
30-70	Catarina y eje	2	Default
30-50	Catarina	6	Default

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-90	Cadena	2	Default
30-60	Amortiguador	2	Predeterminado

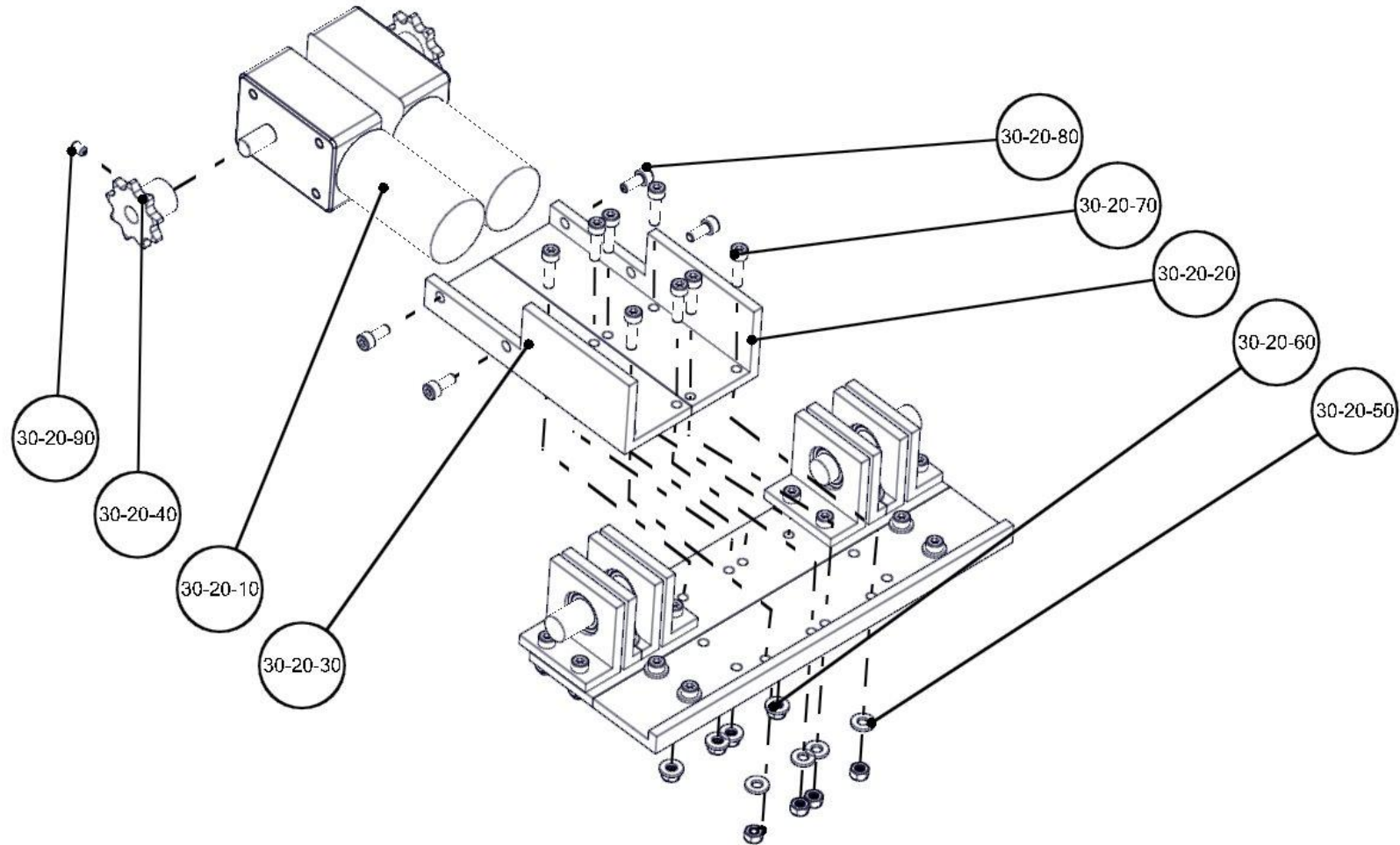
Eslabon frontal



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-30-40	Tuerca	4	AM-M4-N
30-30-50	Tornillo	4	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 35 Hex SHCS -- 20NHX
30-30-60	Rodamiento	4	Predeterminado
30-30-70	Opresor	2	DIN 916 - M4 x 10-N

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-30-20	Eslabón	2	Predeterminado
30-30-10	Eslabón	2	Predeterminado
30-30-30	Alojamiento	4	Predeterminado

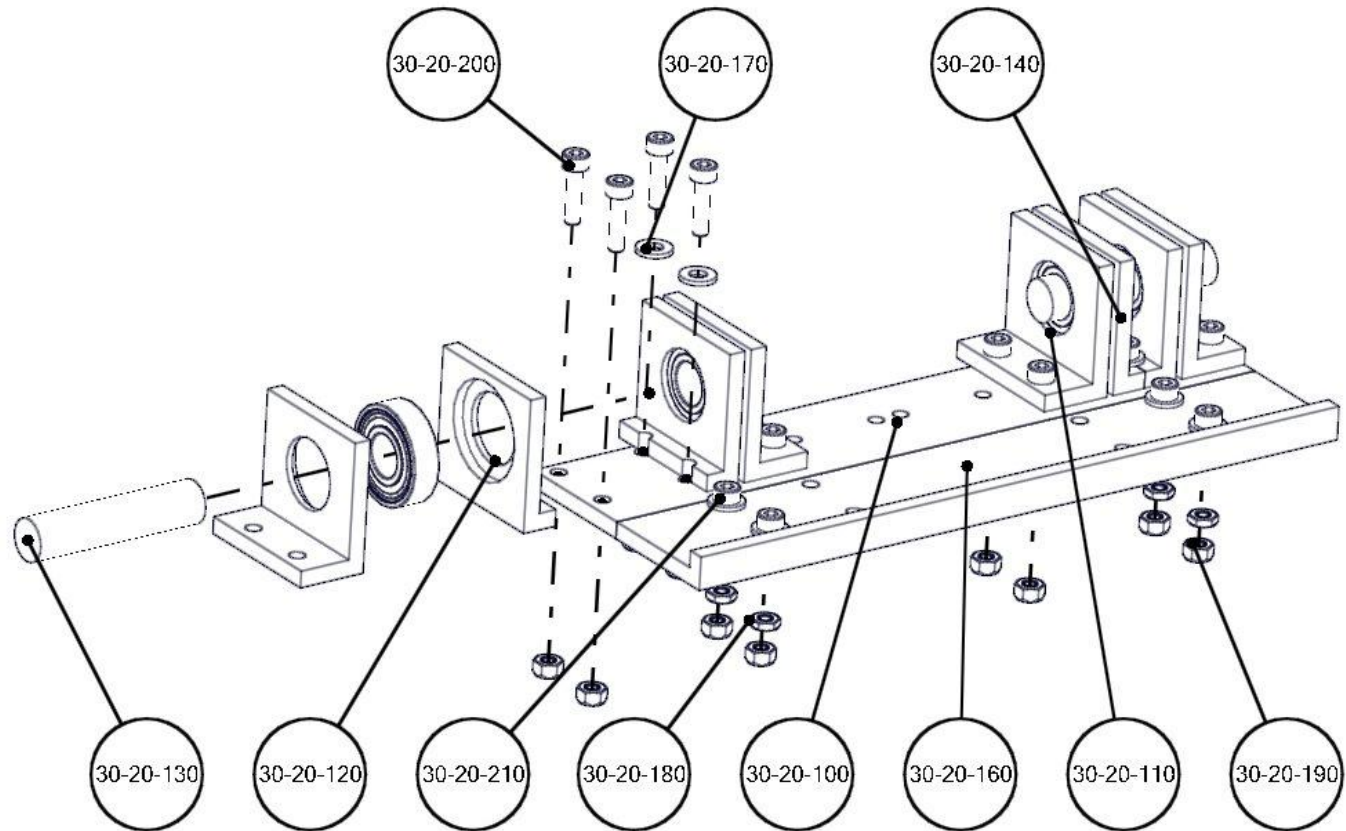
Soportes de motor y chumaceras frontales



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-20-60	Tuerca	8	AM-M4-N
30-20-90	Tornillo opressor	2	DIN 916 - M4 x 6-N
30-20-80	Tornillo	4	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 10 Hex SHCS -- 10NHX
30-20-70	Tornillo	8	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 16 Hex SHCS -- 16NHX
30-20-20	Soporte de motorreductor	1	Default

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-20-30	Soporte de motorreductor	1	Default
30-20-10	Motorreductores	2	Predefinido
30-20-40	Catrina	2	Default
30-20-50	Arandela	8	B18.22M - Plain washer, 4 mm, narrow

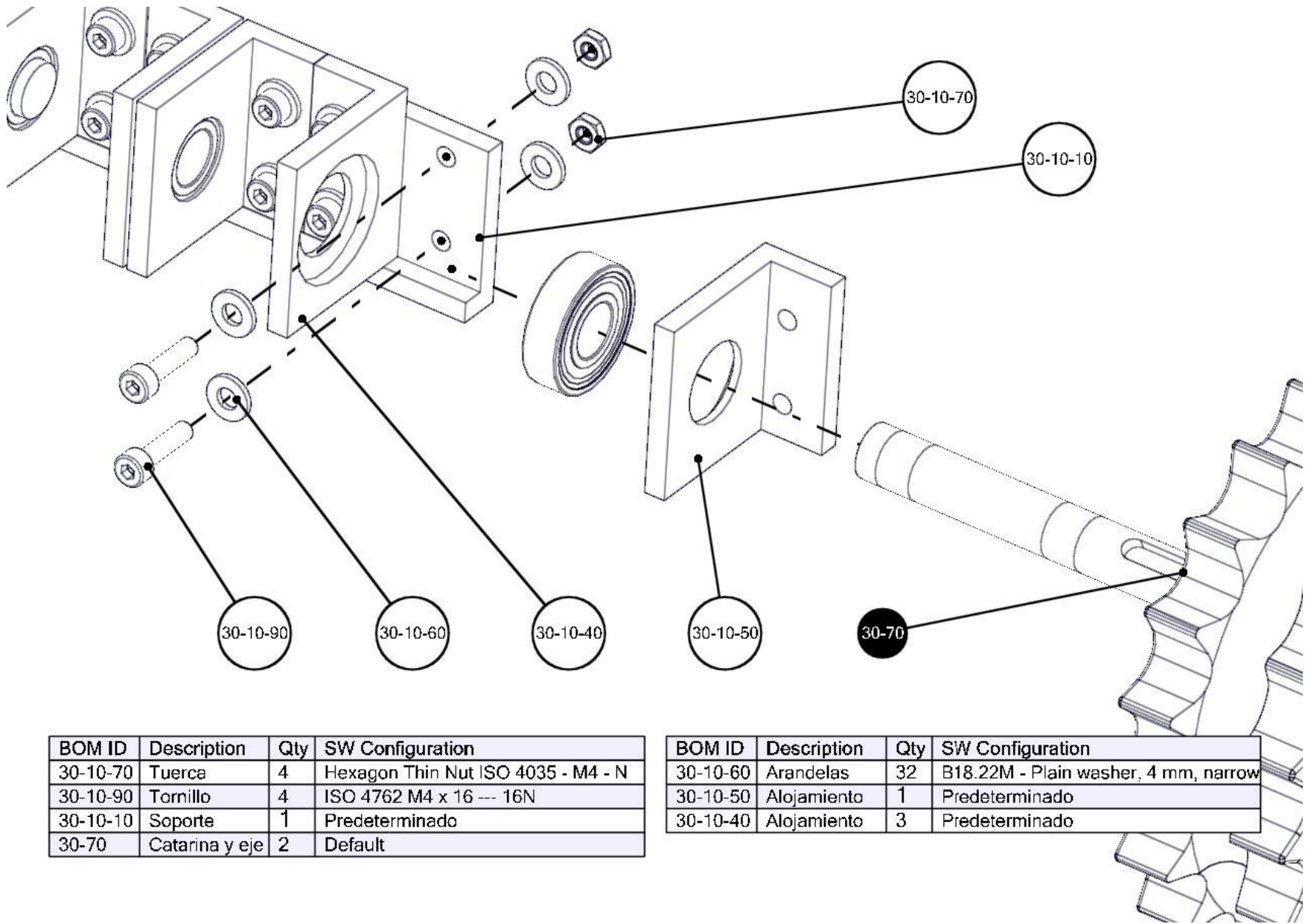
Chumaceras frontales



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-20-190	Tuerca	8	AM-M4-N
30-20-180	Tuerca	8	Hexagon Thin Nut ISO 4035 - M4 - N
30-20-210	Tornillo	4	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 12 Hex SHCS -- 12NHX
30-20-200	Tornillo	12	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 16 Hex SHCS -- 16NHX
30-20-160	Soporte	1	Predeterminado
30-20-100	Soporte	1	Predeterminado

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-20-130	Eje	2	Predeterminado
30-20-170	Arandela	16	B18.22M - Plain washer, 4 mm, narrow
30-20-140	Alojamiento	2	Predeterminado
30-20-120	Alojamiento	2	Predeterminado
30-20-110	Alojamiento	2	Predeterminado

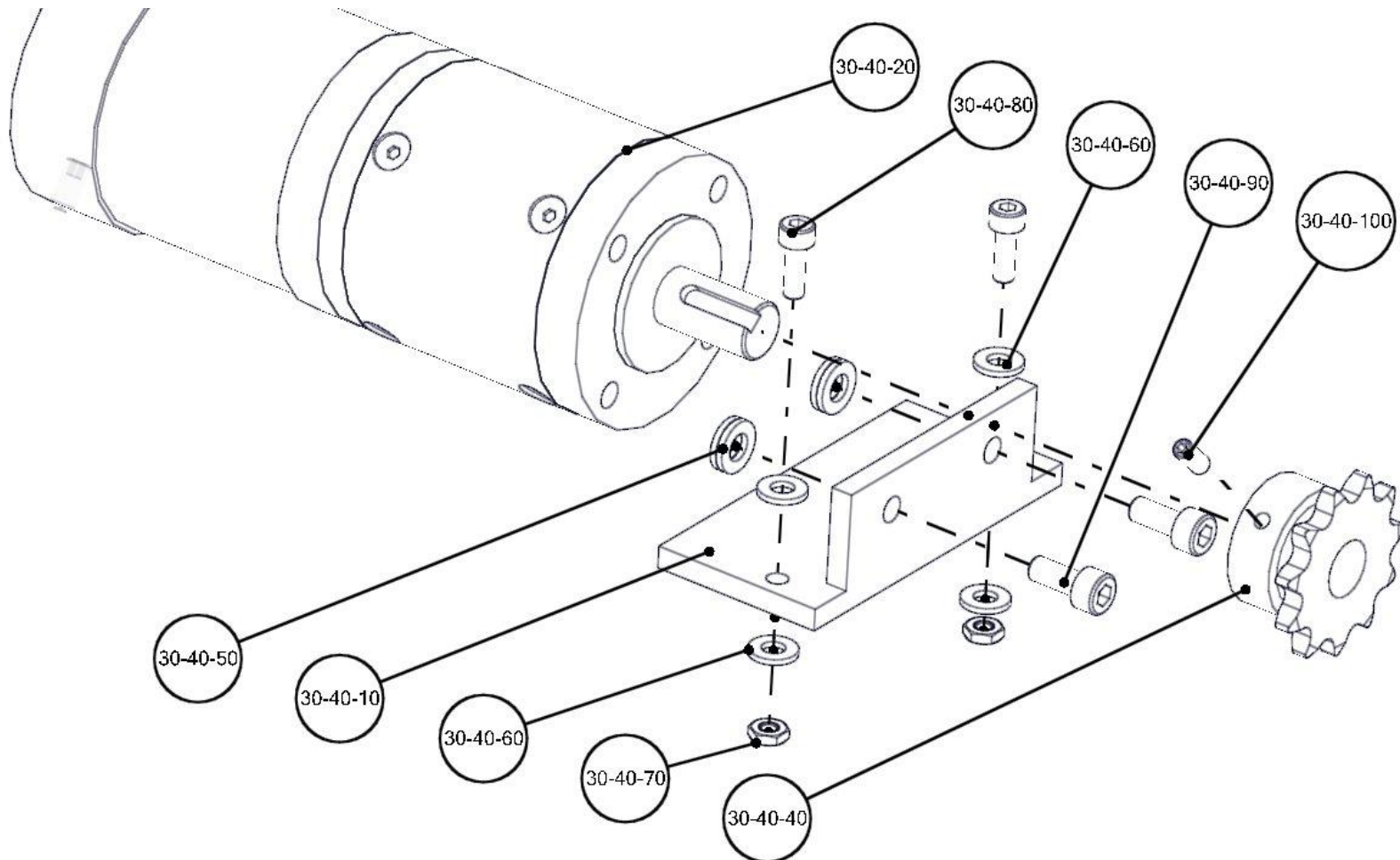
Chumaceras traseras



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-10-70	Tuerca	4	Hexagon Thin Nut ISO 4035 - M4 - N
30-10-90	Tornillo	4	ISO 4762 M4 x 16 --- 16N
30-10-10	Soporte	1	Predeterminado
30-70	Catarina y eje	2	Default

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-10-60	Arandelas	32	B18.22M - Plain washer, 4 mm, narrow
30-10-50	Alojamiento	1	Predeterminado
30-10-40	Alojamiento	3	Predeterminado

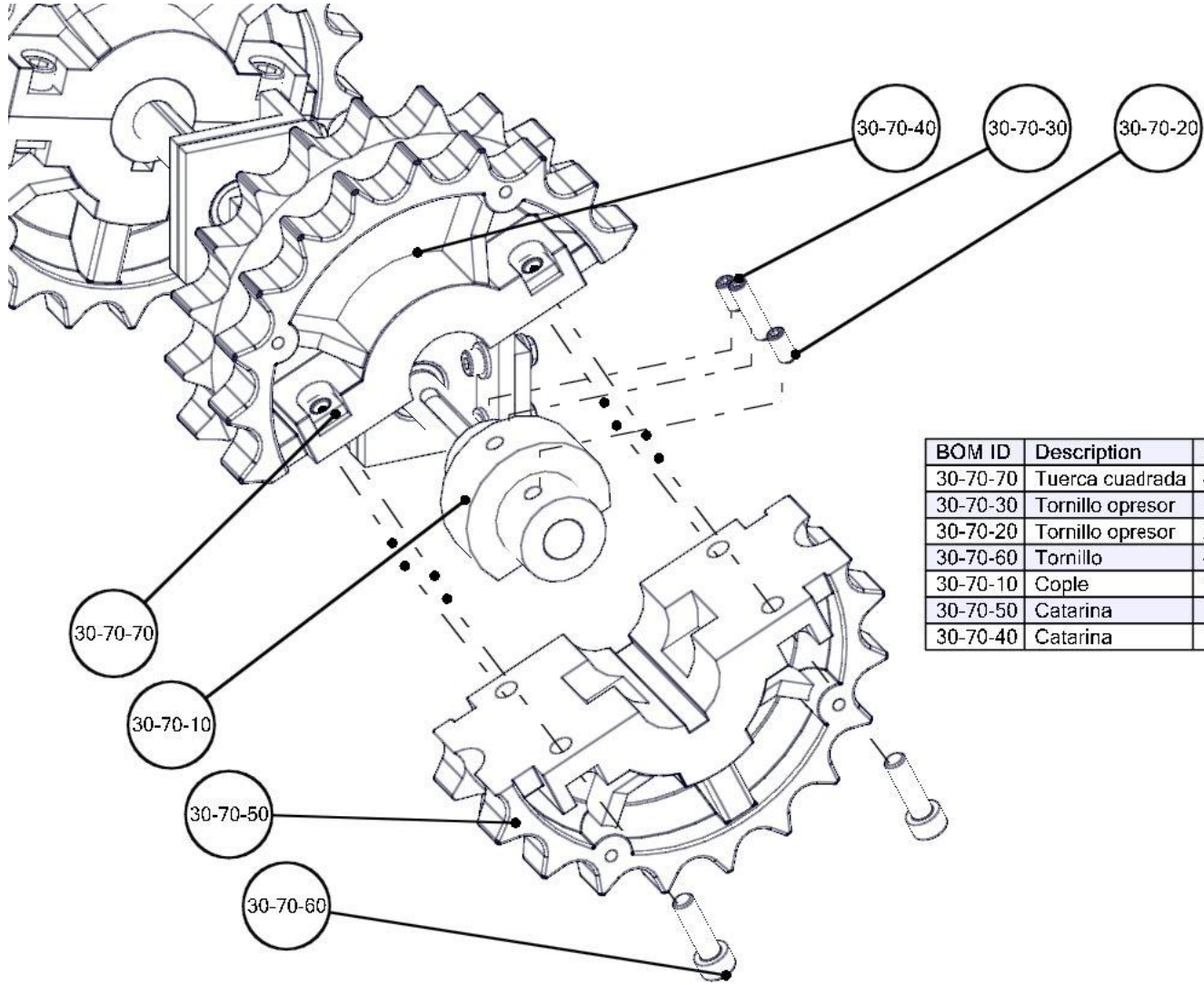
Motorreductor y su soporte



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-40-70	Tuerca	2	Hexagon Thin Nut ISO 4035 - M4 - N
30-40-100	Tornillo opresor	1	DIN 916 - M4 x 10-N
30-40-90	Tornillo	2	B18.3.1M - 5 x 0.8 x 12 Hex SHCS -- 12NHX
30-40-80	Tornillo	2	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 12 Hex SHCS -- 12NHX
30-40-10	Soporte	1	Default

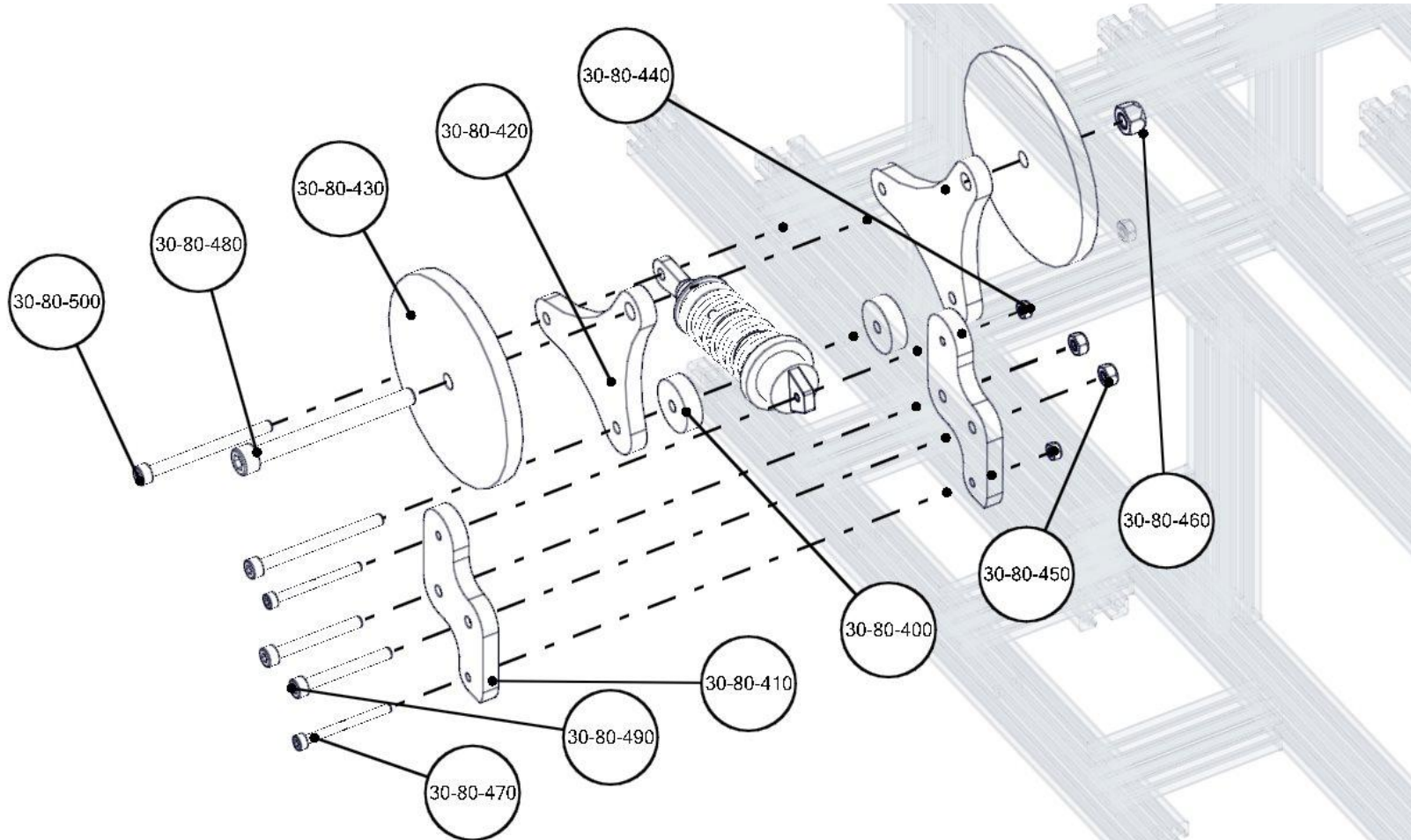
BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-40-20	Motor	1	Predeterminado
30-40-40	Catarina	1	Default
30-40-60	Arandela	4	B18.22M - Plain washer, 4 mm, narrow
30-40-50	Arandela	4	B18.22M - Plain washer, 5 mm, narrow

Catarina trasera de 21 dientes



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-70-70	Tuerca cuadrada	4	Square nut DIN 562 M6 -N
30-70-30	Tornillo opresor	1	DIN 916 - M5 x 20-N
30-70-20	Tornillo opresor	2	DIN 916 - M5 x 10-N
30-70-60	Tornillo	4	ISO 4762 M6 x 20 --- 20N
30-70-10	Cople	1	Predeterminado
30-70-50	Catarina	1	Predeterminado
30-70-40	Catarina	1	Predeterminado

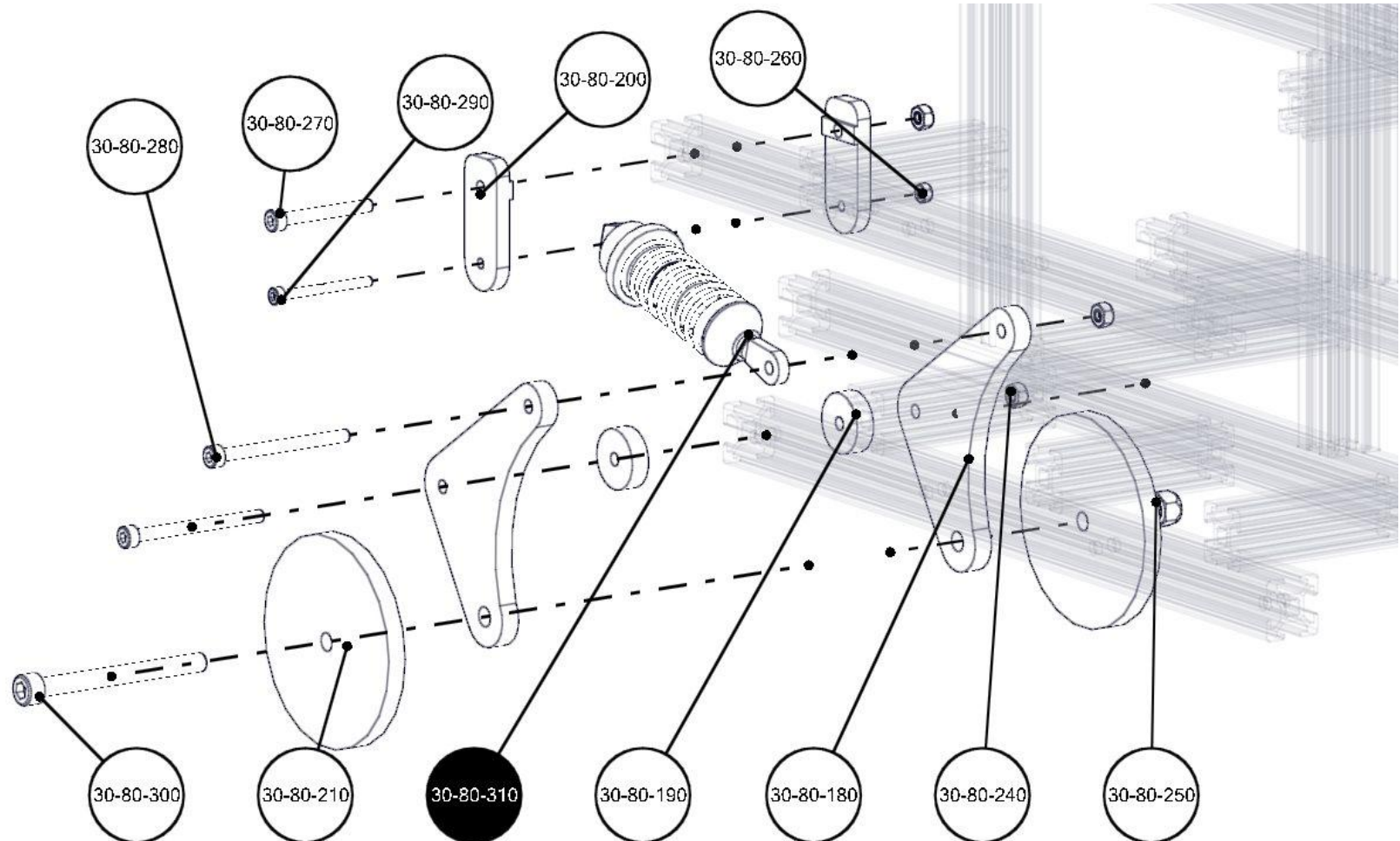
Sistema de tensión de oruga



BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-80-460	Tuerca	1	AM-M6-N
30-80-450	Tuerca	4	AM-M4-N
30-80-440	Tuerca	2	AM-M3-N
30-80-500	Tornillo	2	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 50 Hex SHCS -- 20NHX
30-80-490	Tornillo	2	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 35 Hex SHCS -- 20NHX
30-80-480	Tornillo	1	B18.3.1M - 6 x 1.0 x 65 Hex SHCS -- 24NHX

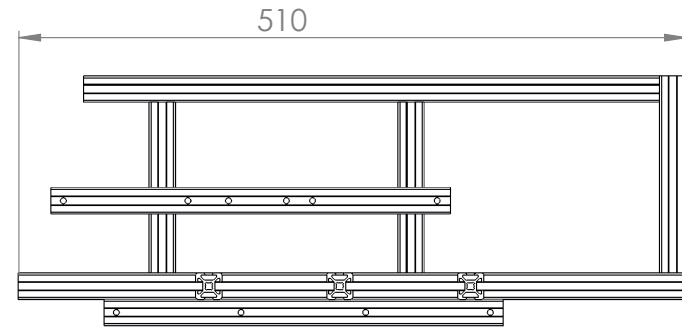
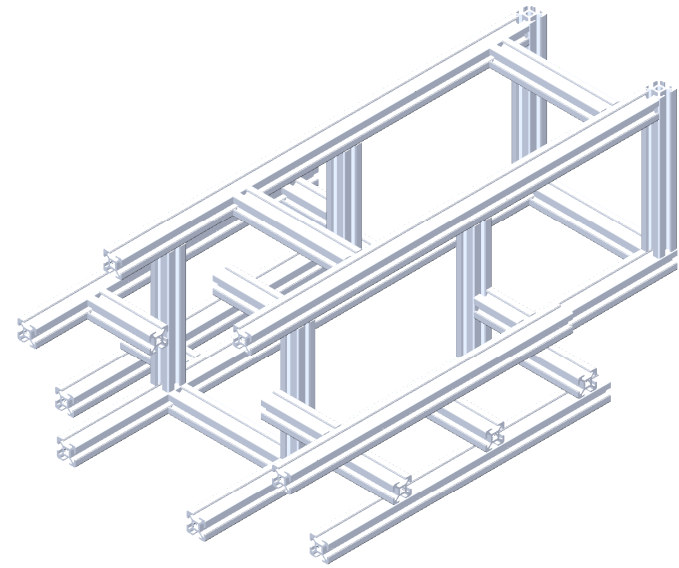
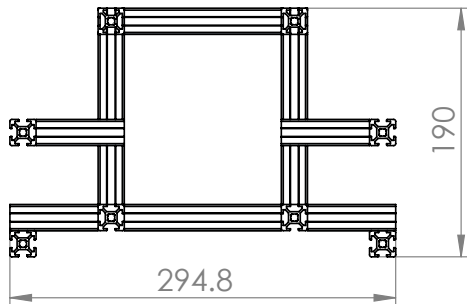
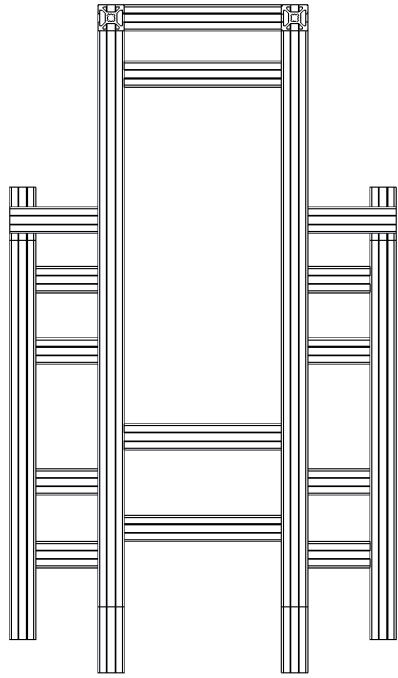
BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-80-470	Tornillo	2	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 35 Hex SHCS -- 18NHX
30-80-410	Soporte	2	Predeterminado
30-80-430	Rueda loca	2	Predeterminado
30-80-400	Espaciador	2	Predeterminado
30-80-420	Eslabon	2	Predeterminado

Sistema de suspensión



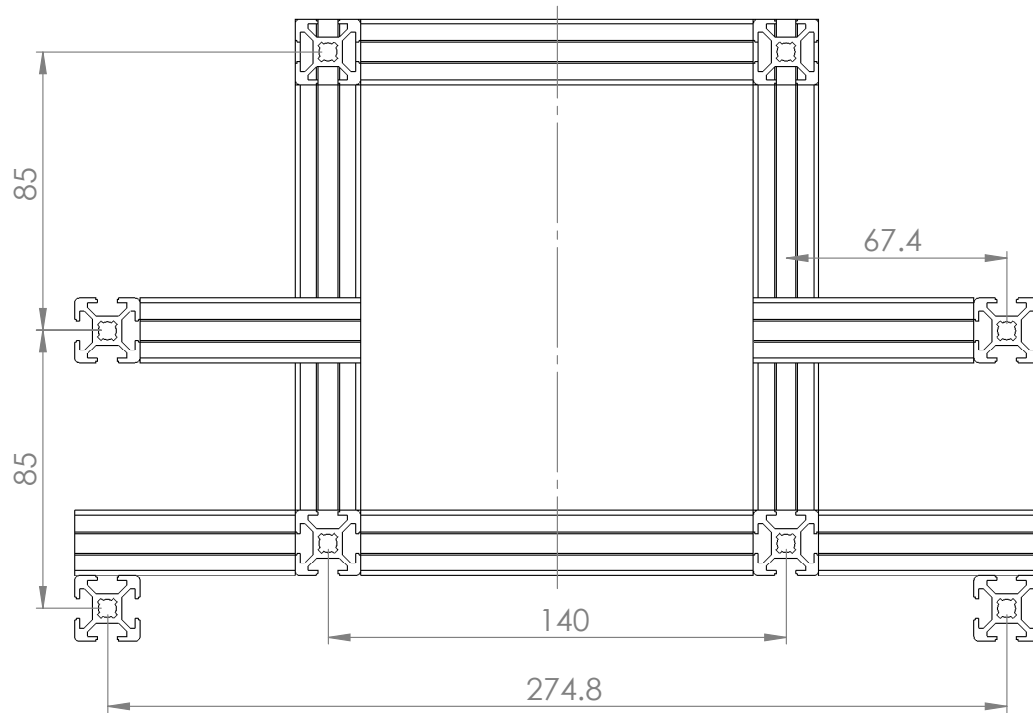
BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-80-260	Tuerca	1	AM-M3-N
30-80-250	Tuerca	1	AM-M6-N
30-80-240	Tuerca	3	AM-M4-N
30-80-300	Tornillo	1	B18.3.1M - 6 x 1.0 x 65 Hex SHCS -- 24NHX
30-80-290	Tornillo	1	B18.3.1M - 3 x 0.5 x 35 Hex SHCS -- 18NHX
30-80-280	Tornillo	2	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 50 Hex SHCS -- 20NHX
30-80-270	Tornillo	1	B18.3.1M - 4 x 0.7 x 35 Hex SHCS -- 20NHX

BOM ID	Description	Qty	SW Configuration
30-80-310	Suspensión	1	Predeterminado
30-80-200	Soporte	2	Predeterminado
30-80-210	Rueda loca	2	Predeterminado
30-80-190	Espaciador	2	Predeterminado
30-80-180	Eslabon	2	Predeterminado



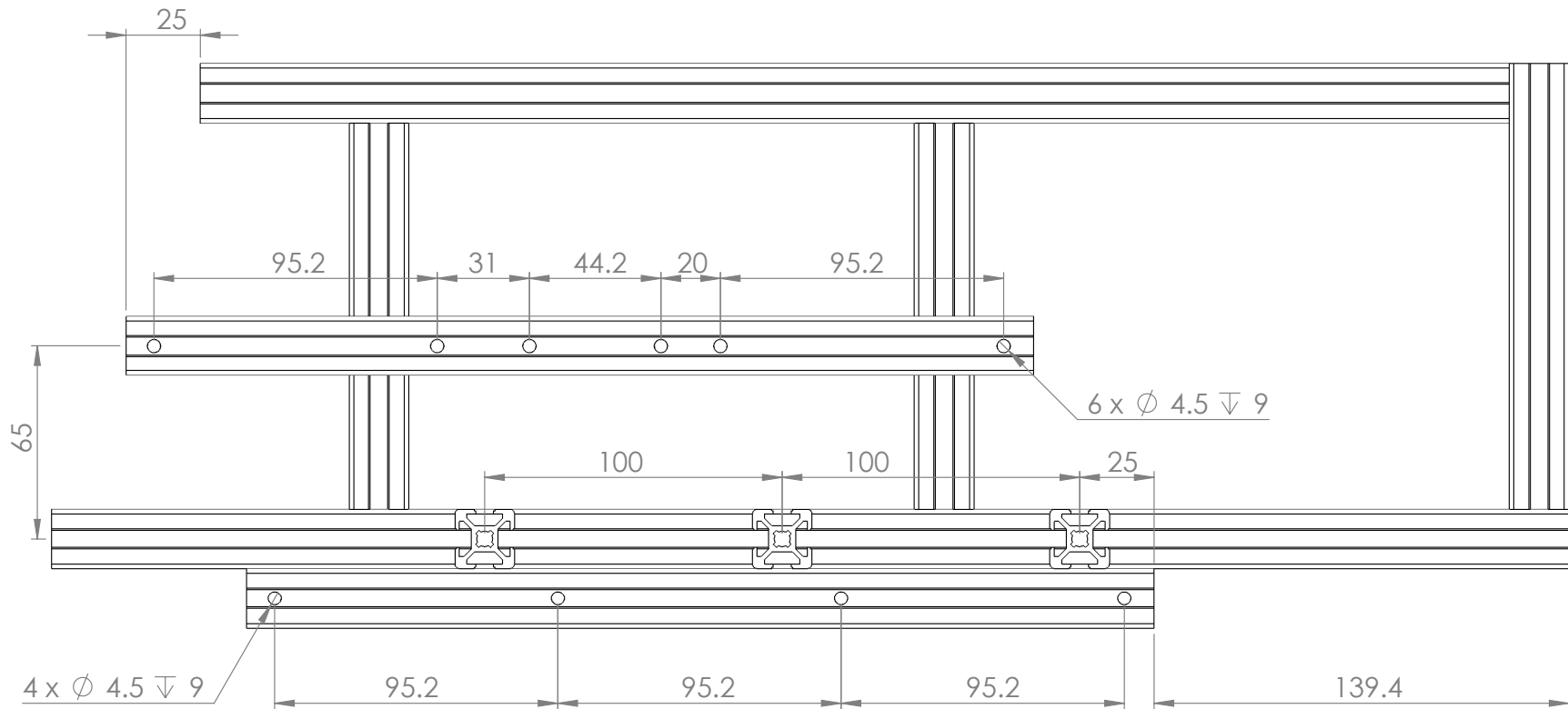
Materiales: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 100A-001B-chassis	A4
	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 3

Vista frontal

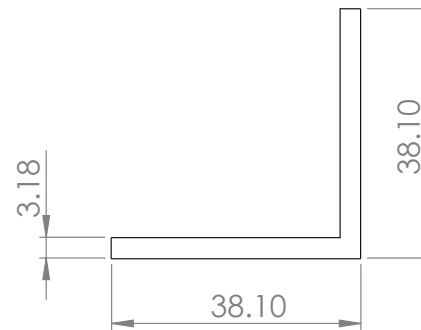
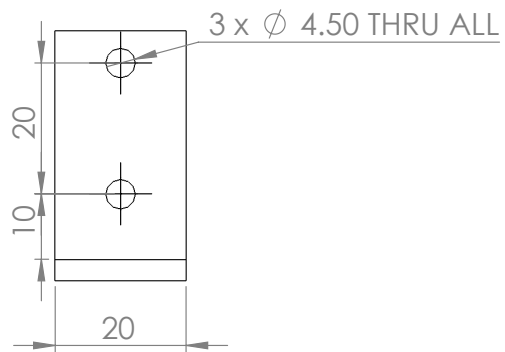
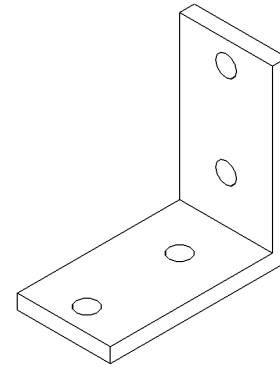
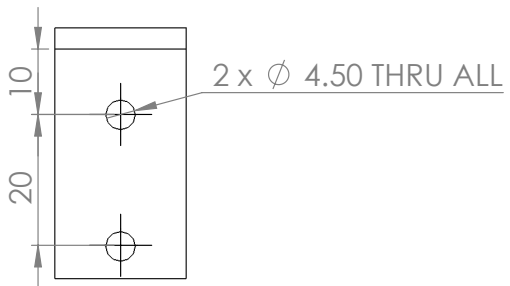


Materiales: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 100A-001B-chassis	A4
	ESCALA:1:2	HOJA 2 DE 3

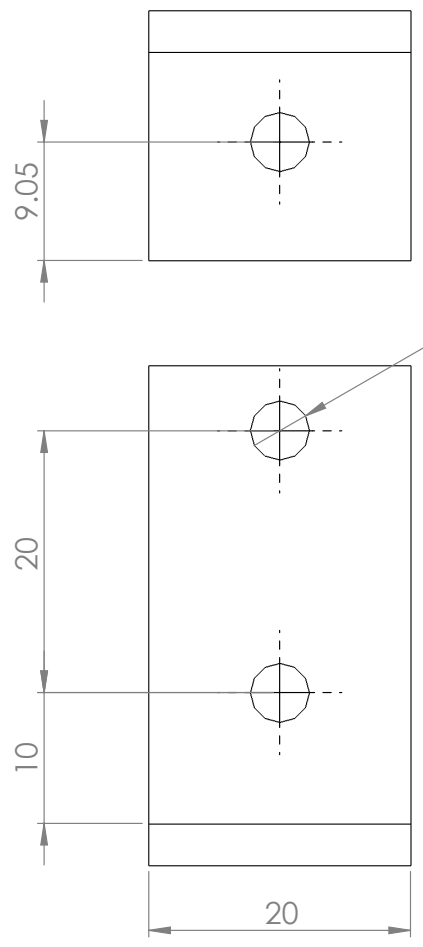
Vista derecha



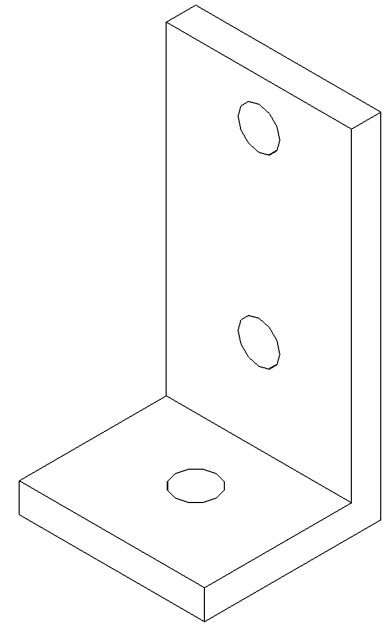
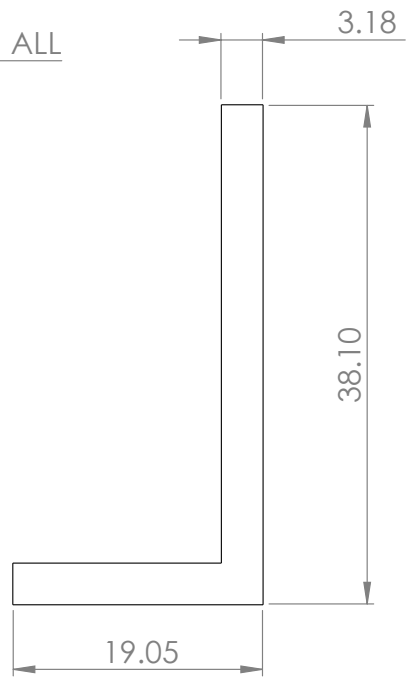
Materiales: Eje: acero Cople: acero	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
	Nombre de parte: 100A-001B-chassis	A4
1. Unidades: mm	ESCALA:1:2	HOJA 3 DE 3



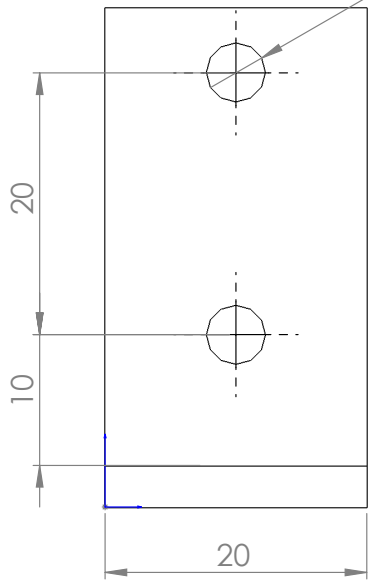
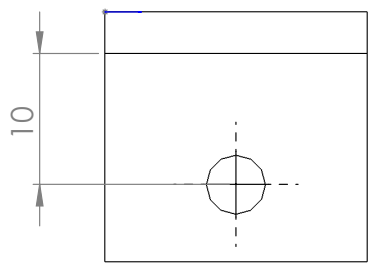
MATERIAL: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 100A-002A-L-profile	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



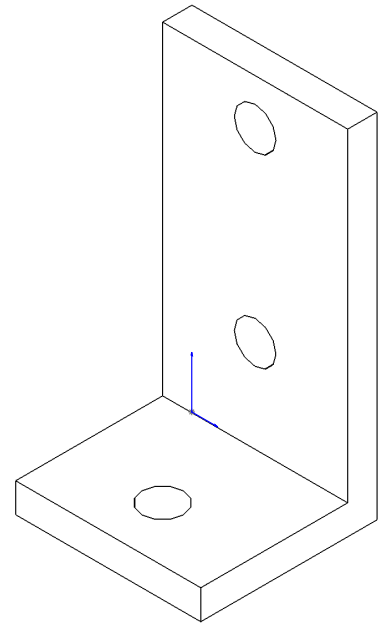
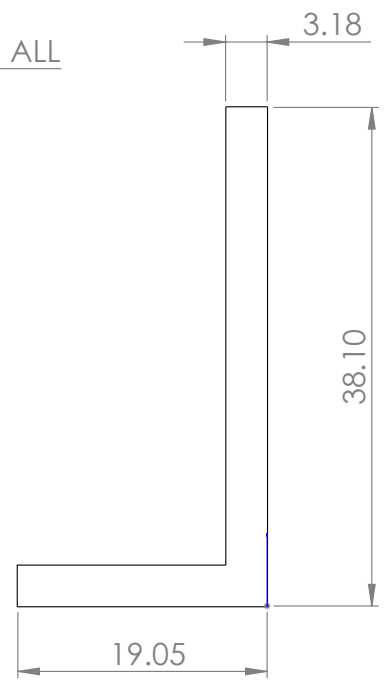
3 x Ø 4.50 THRU ALL



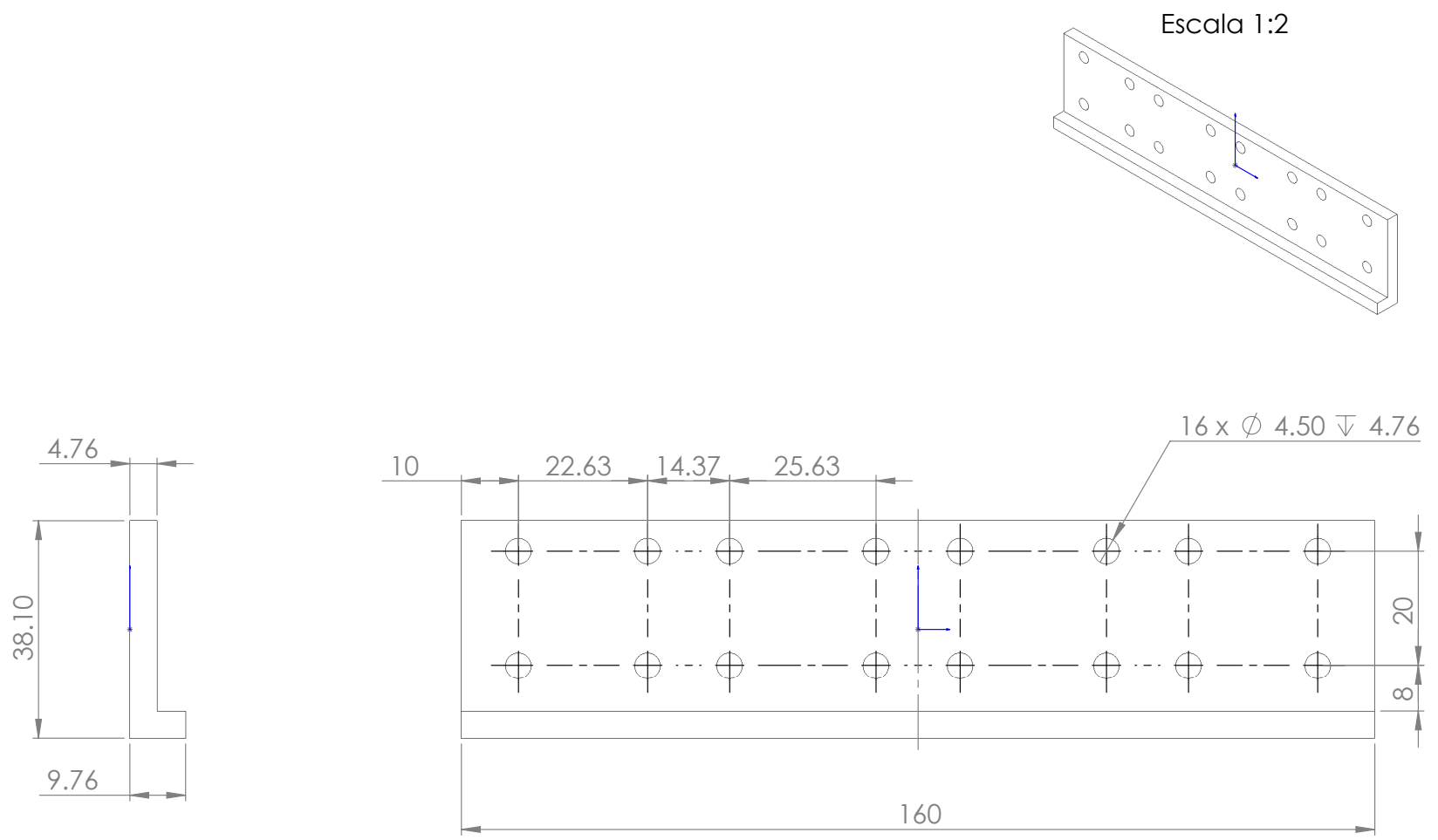
Materiales: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 100A-003A-L-profile	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



3 x ϕ 4.50 THRU ALL

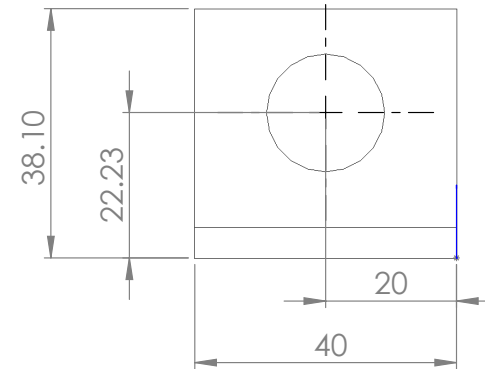
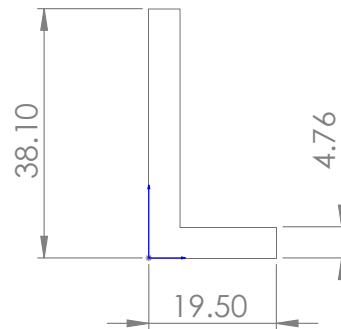
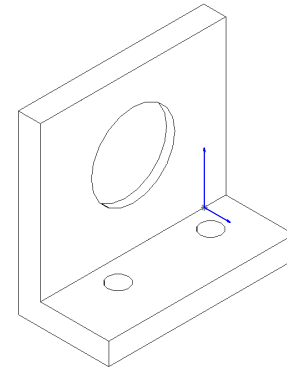
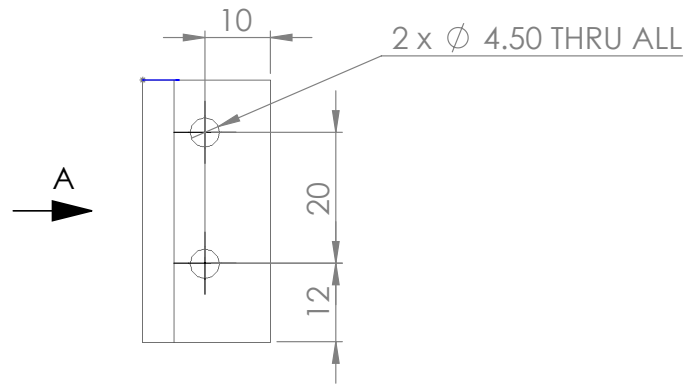
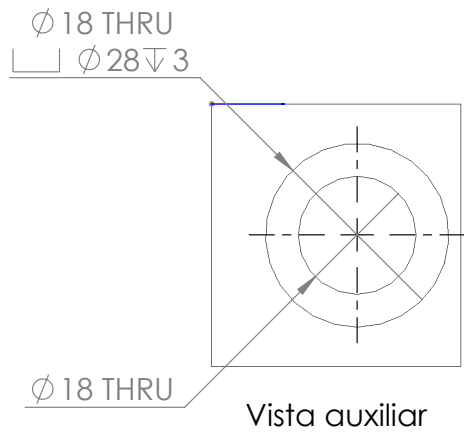


Materiales: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 100A-004A-L-profile	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

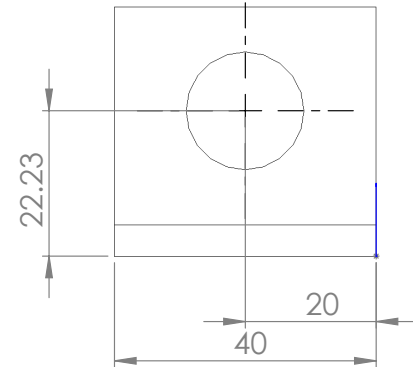
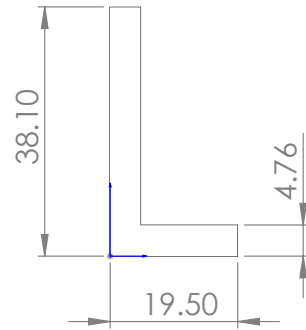
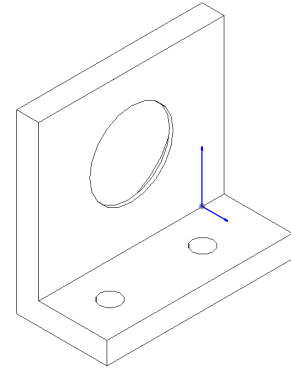
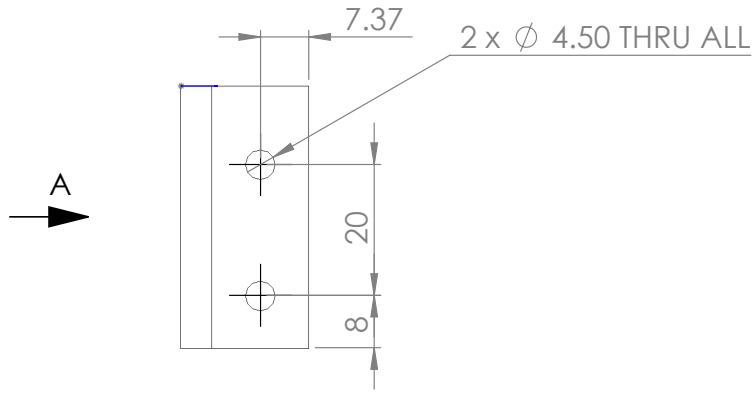
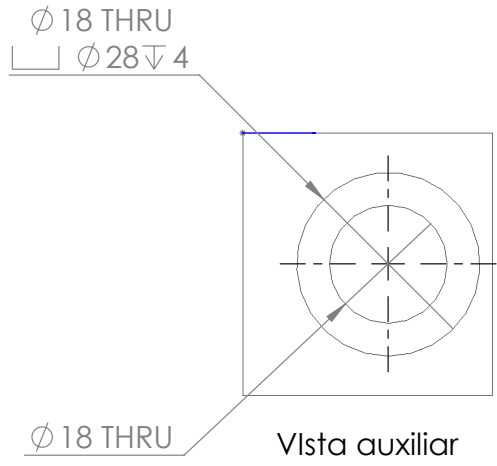


Escala 1:2

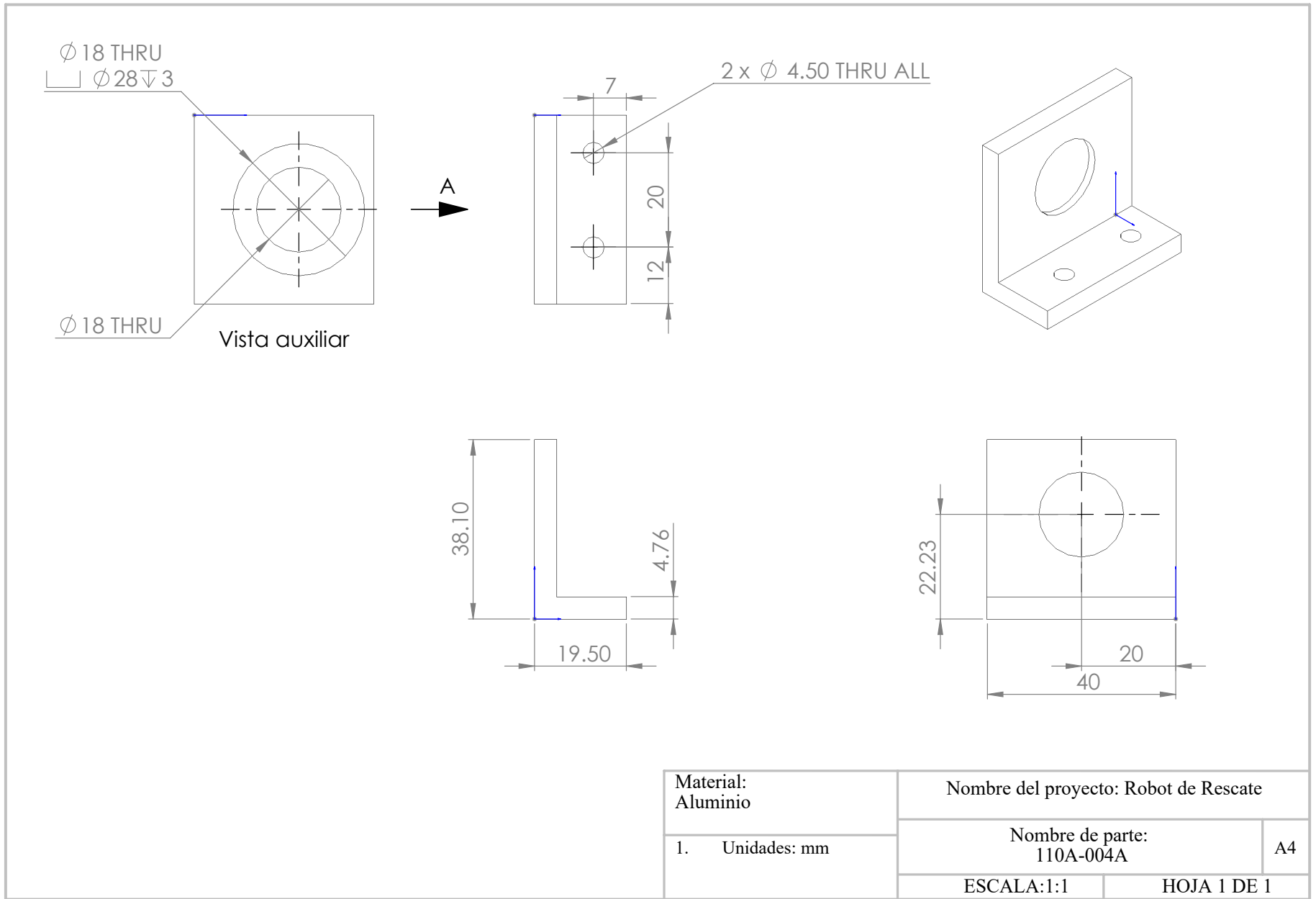
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 110A-001A	A4
	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



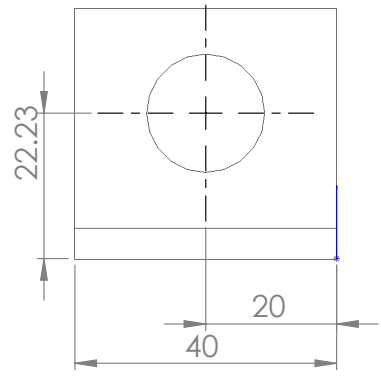
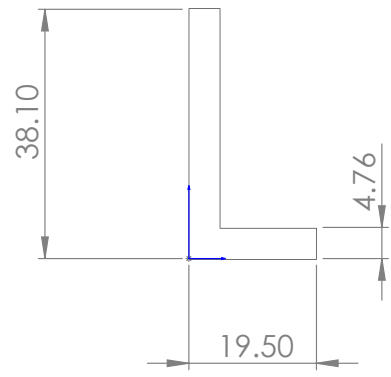
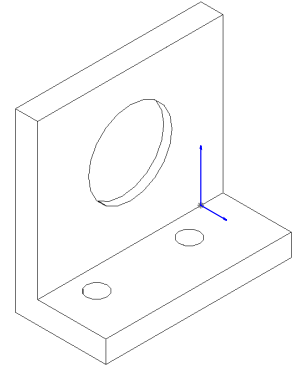
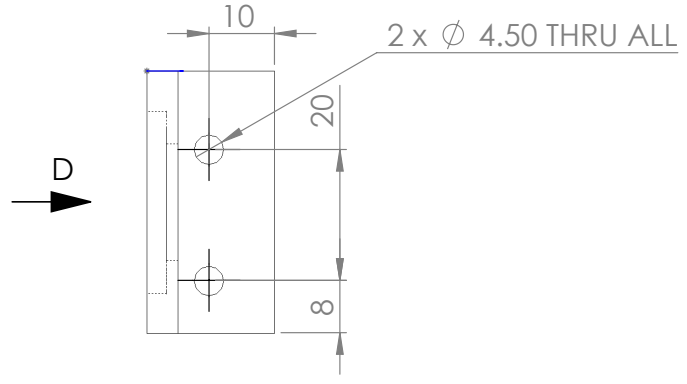
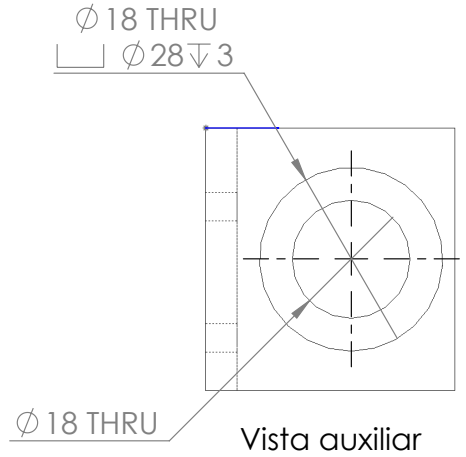
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 110A-002A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



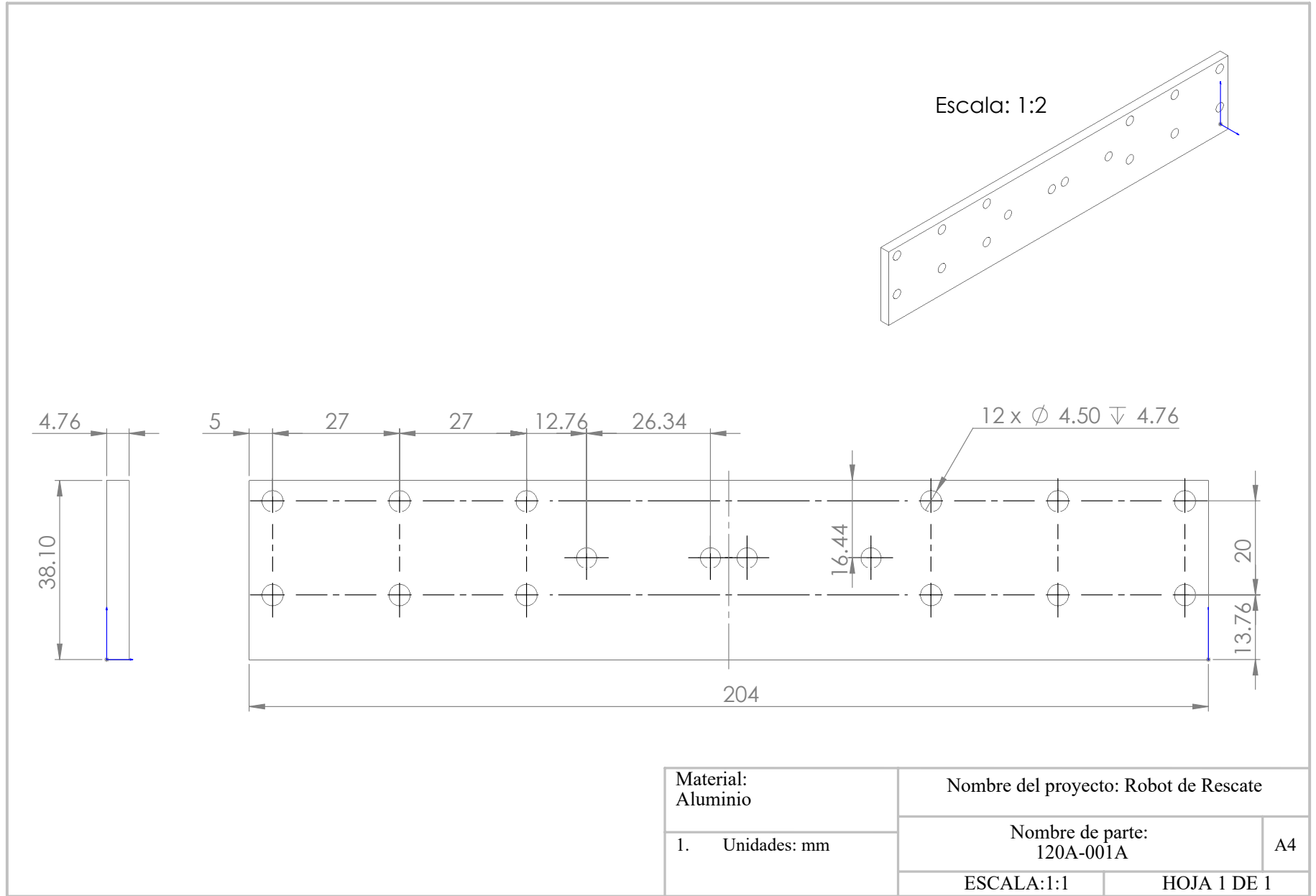
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 110A-003A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

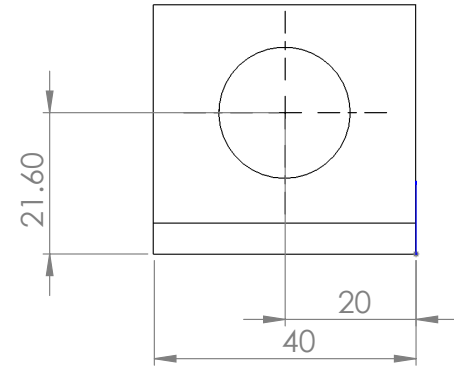
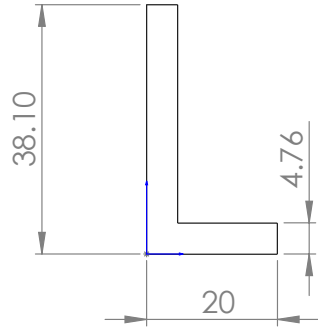
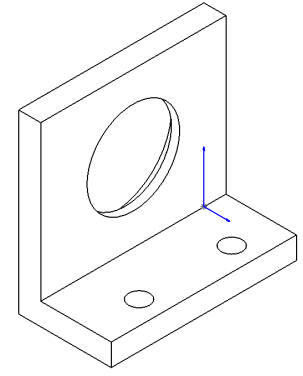
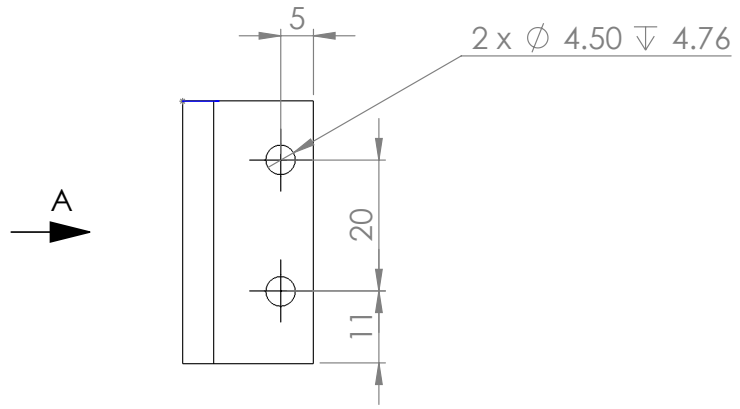
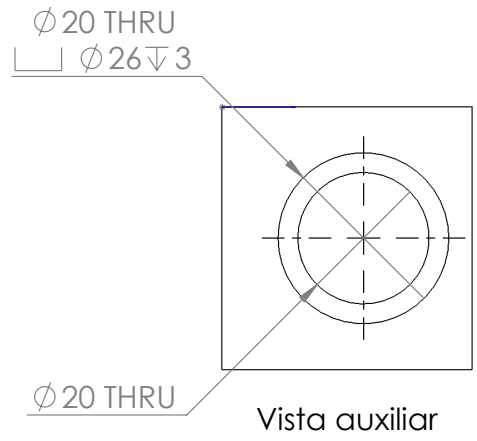


Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 110A-004A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

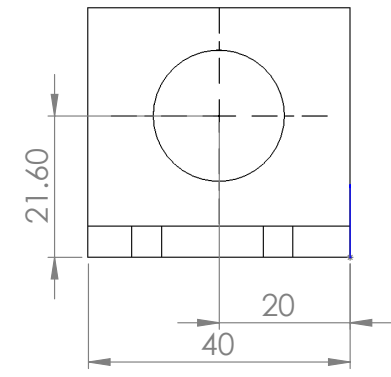
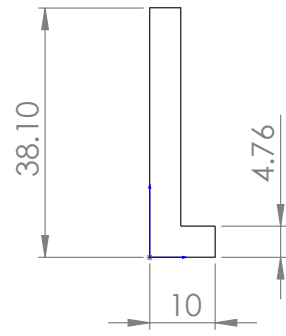
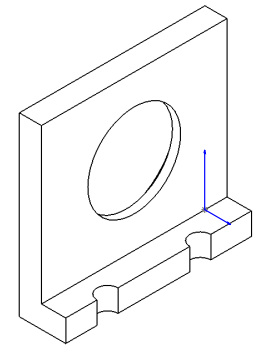
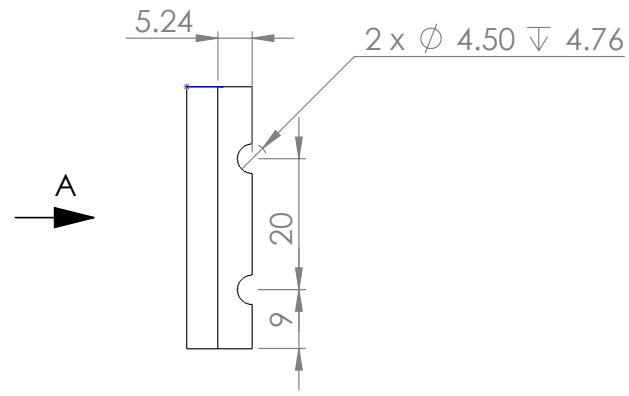
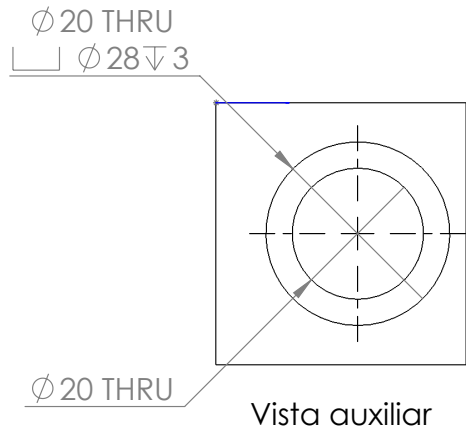


Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 110A-005A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

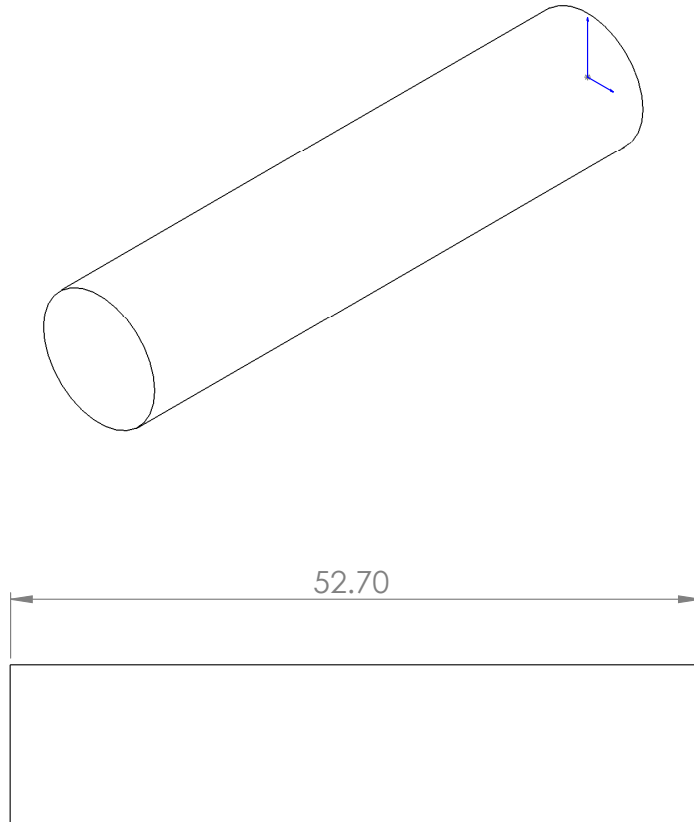
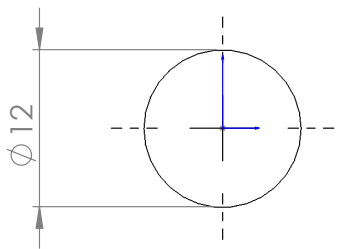




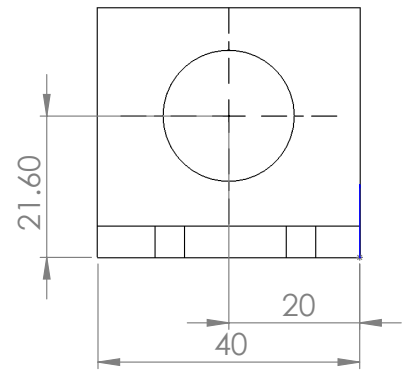
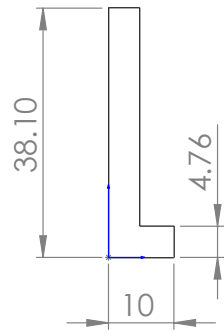
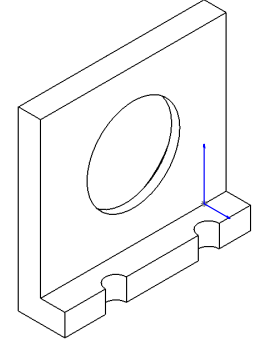
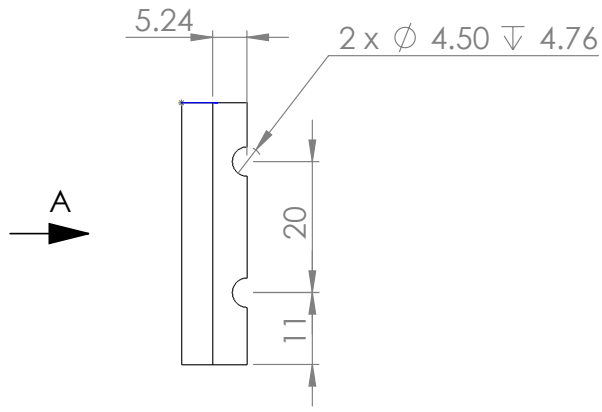
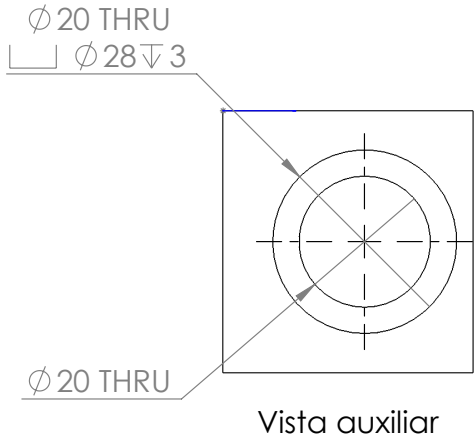
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-002A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



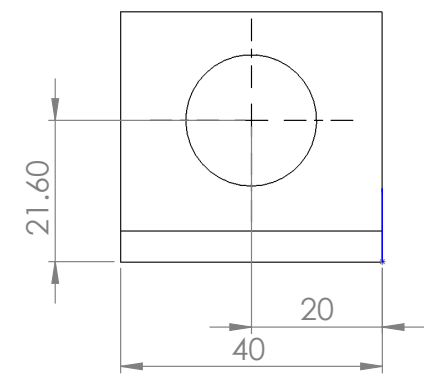
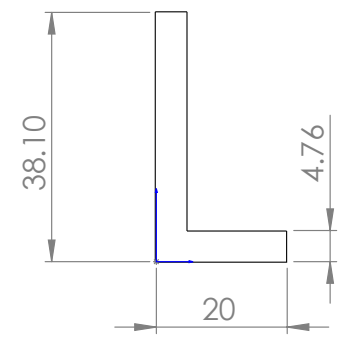
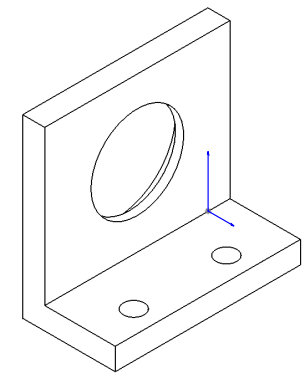
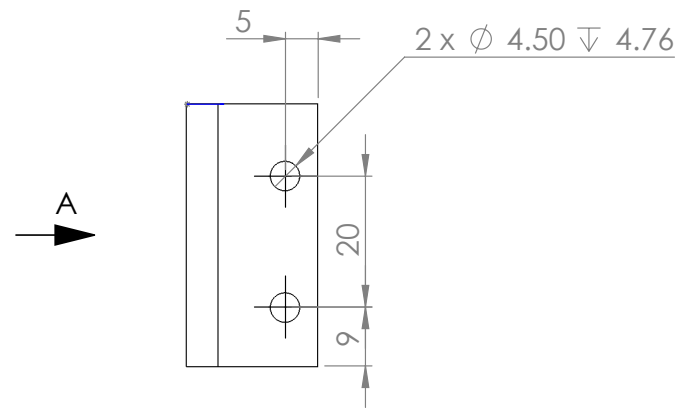
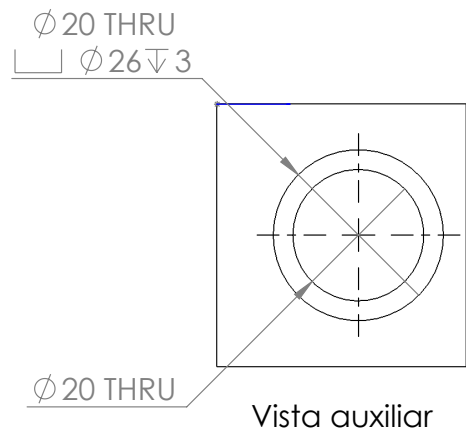
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-003A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



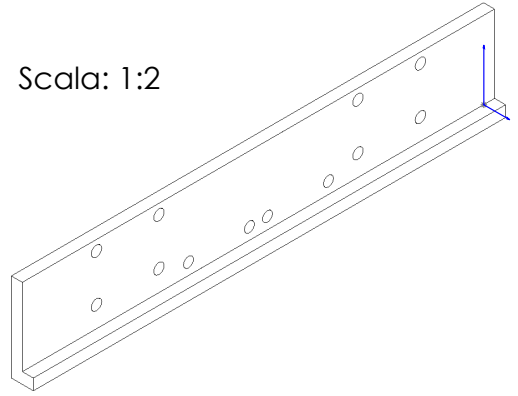
Material: Acero	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-004A-shaft	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



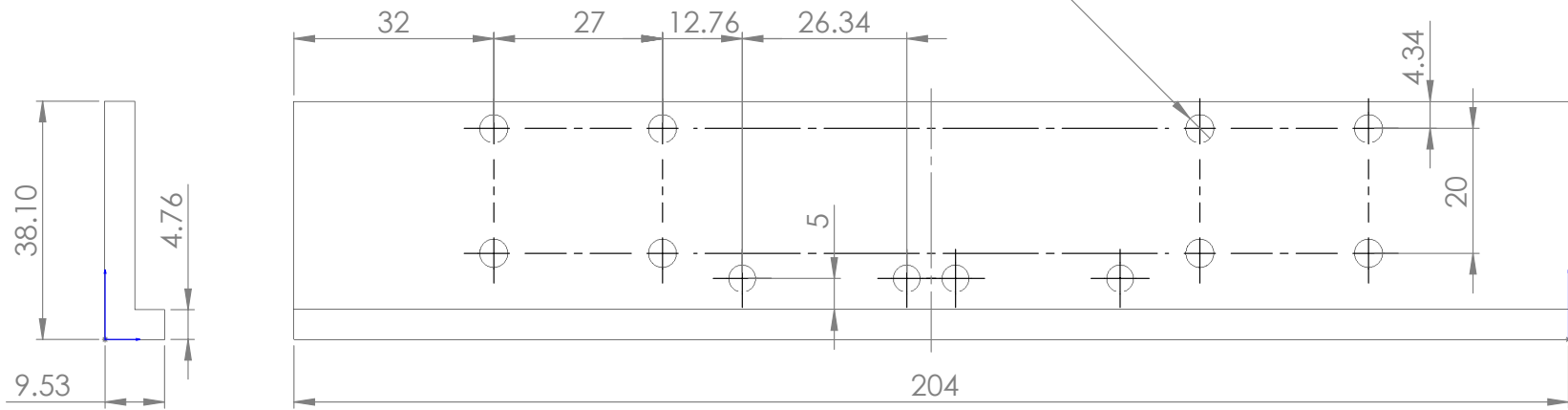
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-005A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-006A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

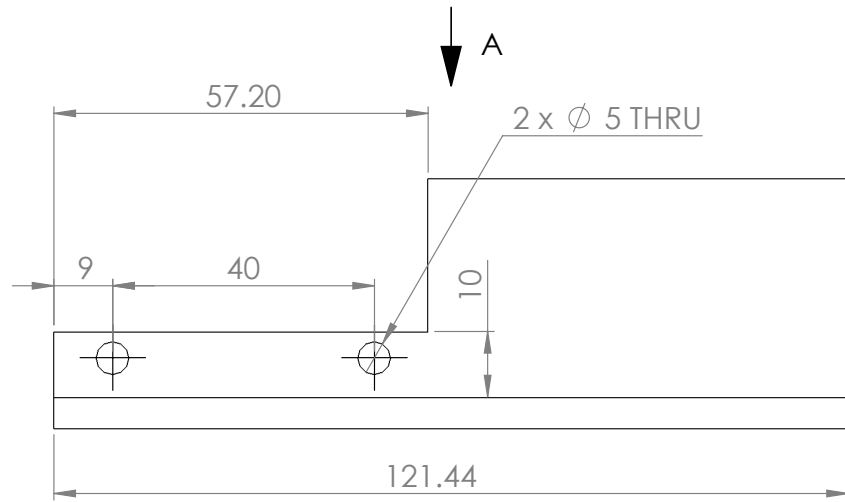
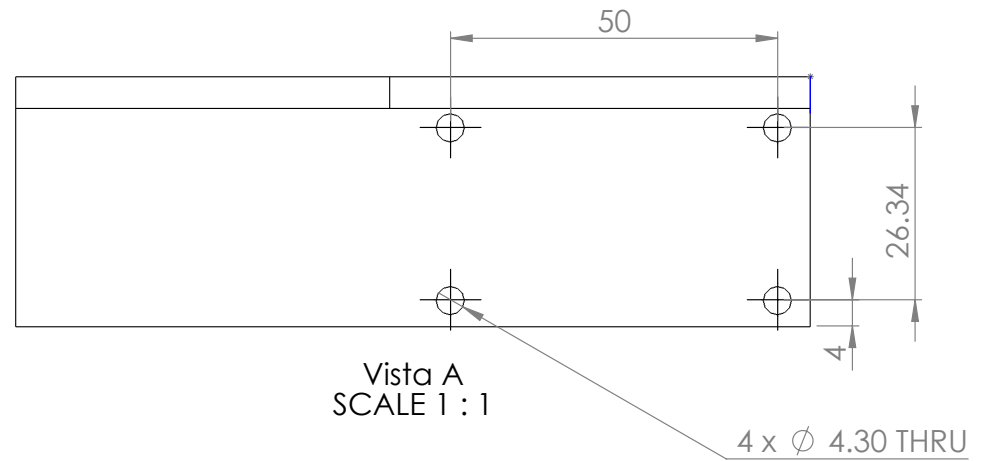
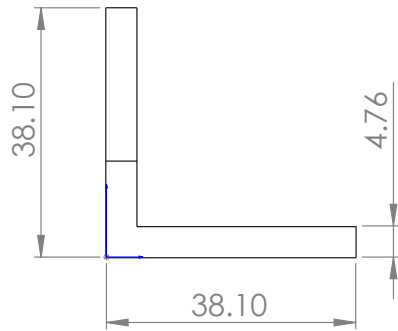
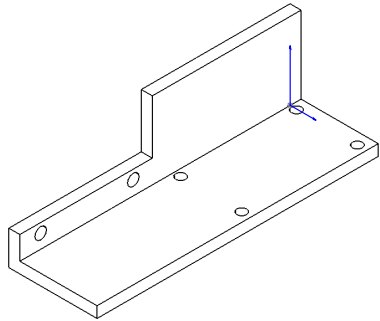


8 x \varnothing 4.50 ∇ 4.76



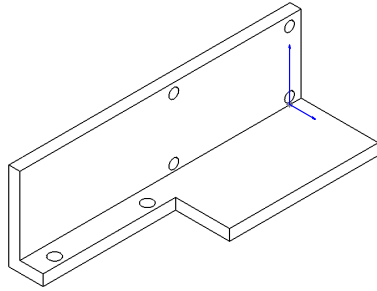
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-007A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

Escala: 1:2

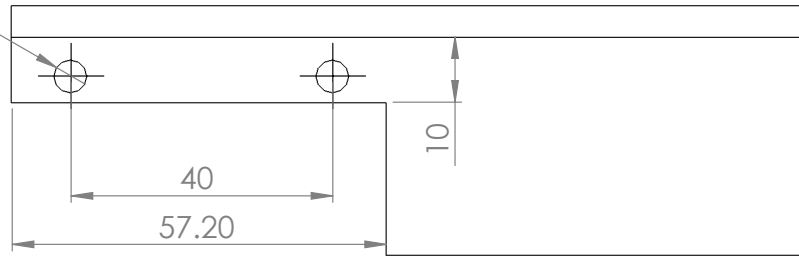


Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-008A-worm_gear_support	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

Escala: 1:2



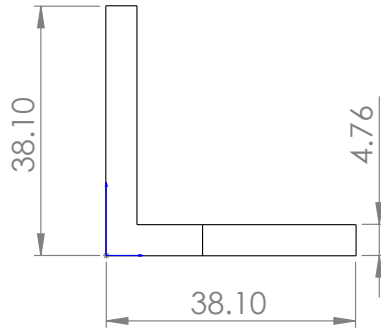
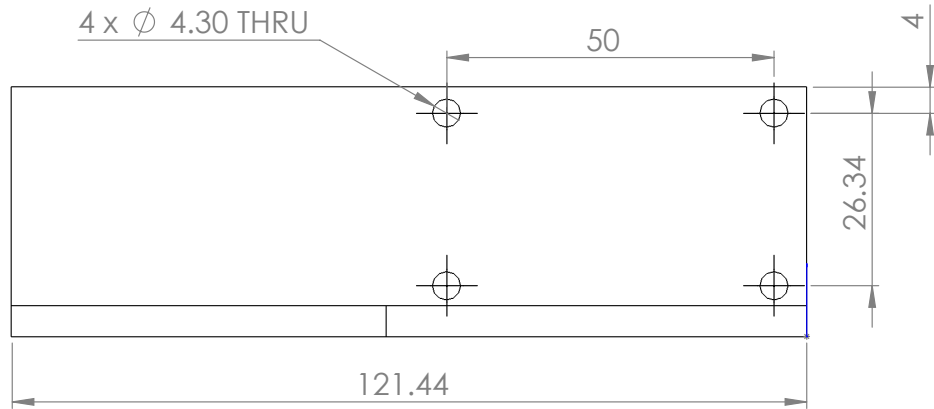
2 x ϕ 5 THRU



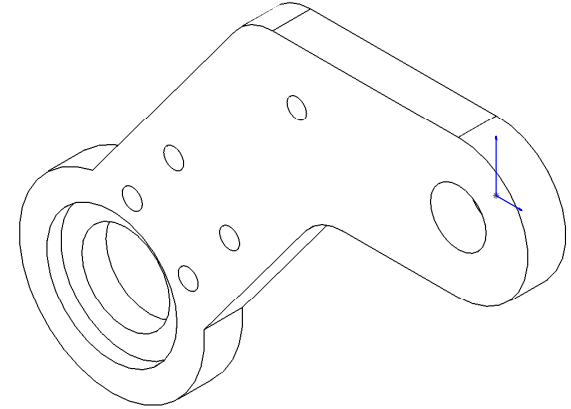
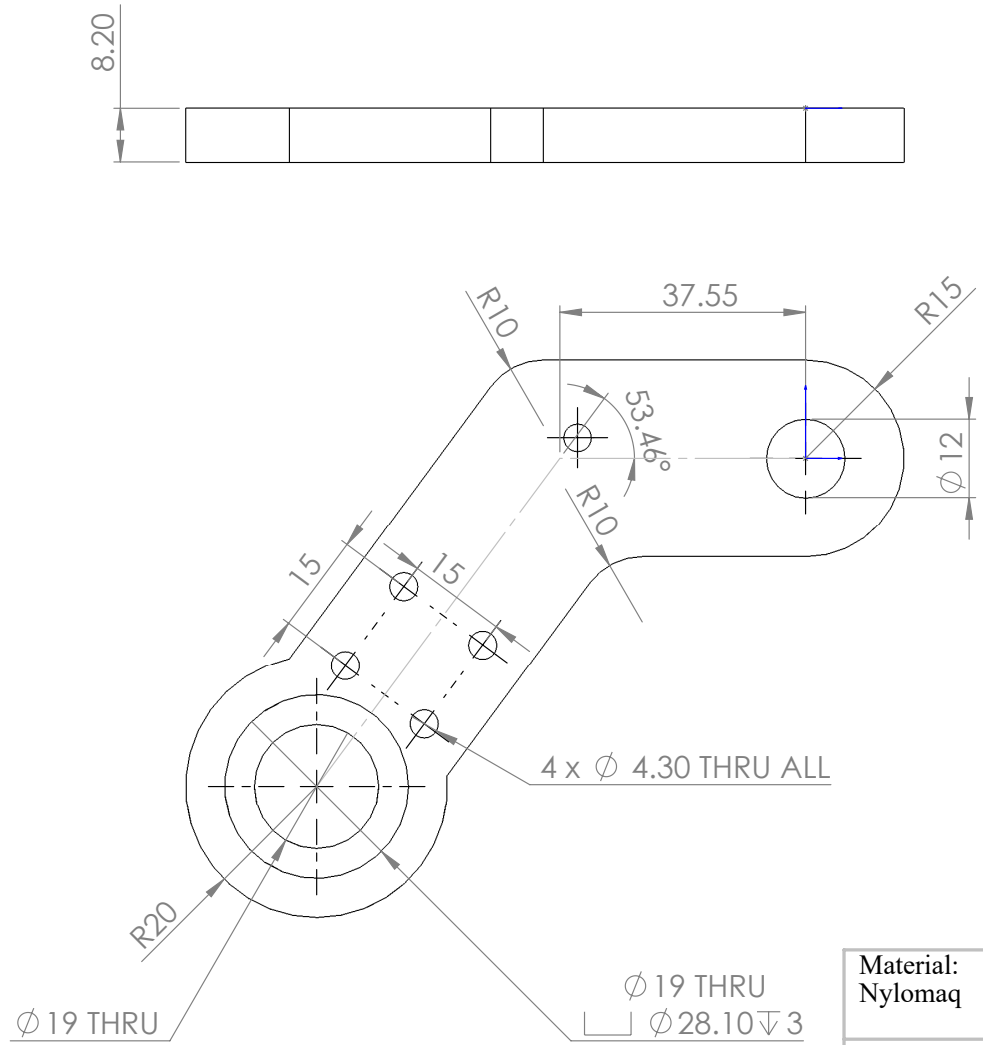
VIEW A
SCALE 1:1



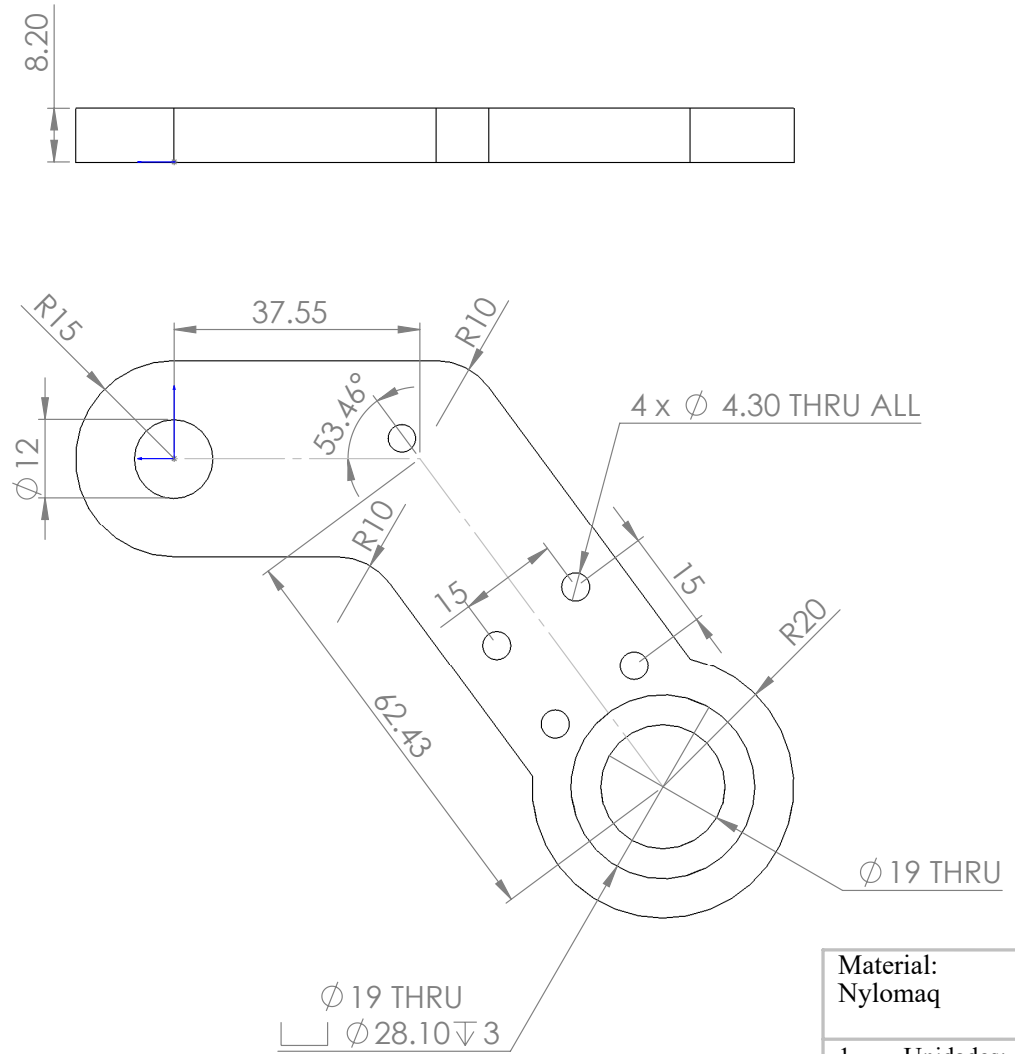
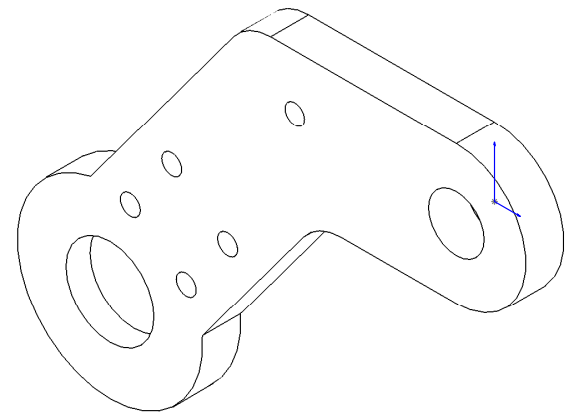
4 x ϕ 4.30 THRU



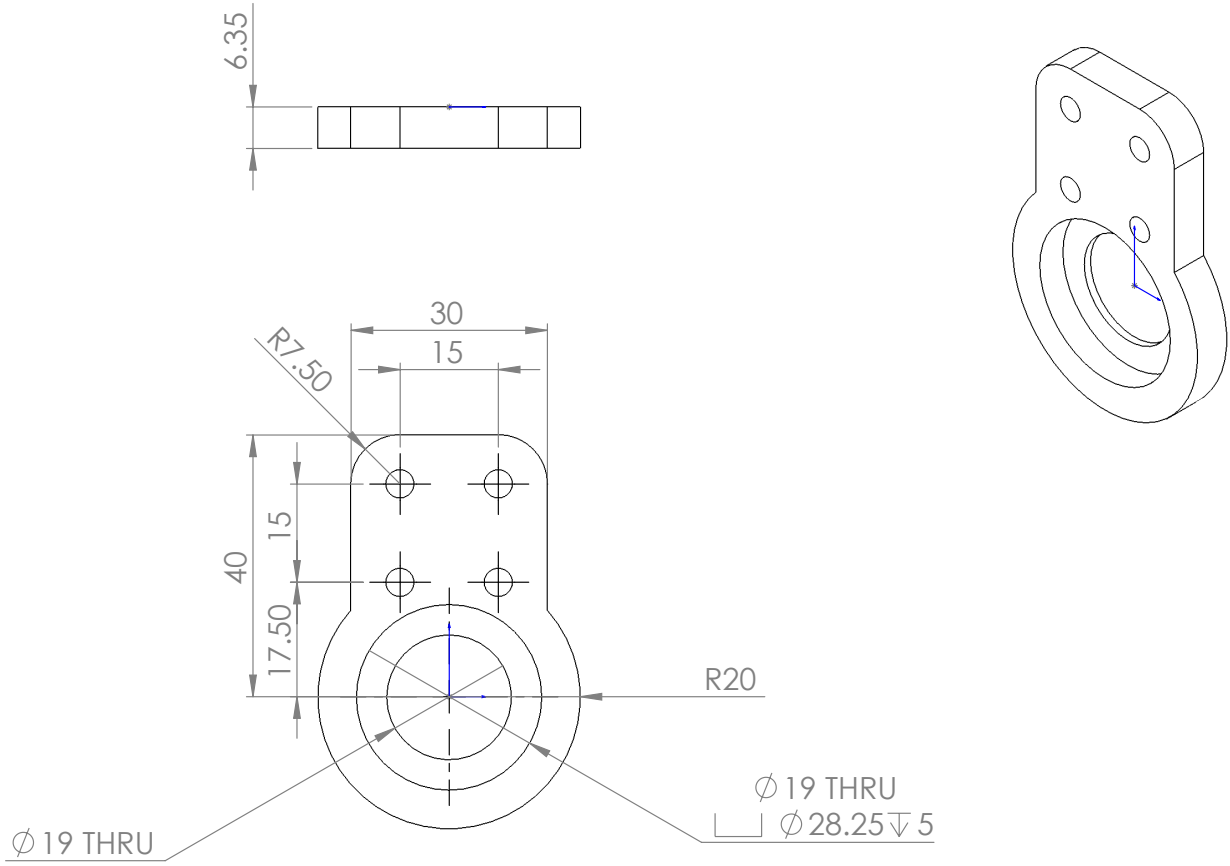
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 120A-009A-worm_gear_support	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



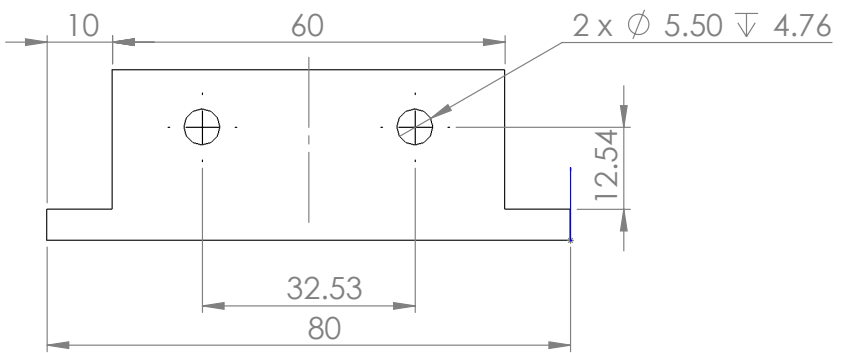
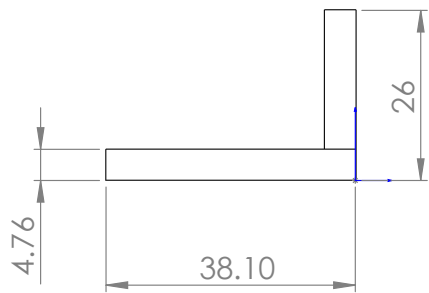
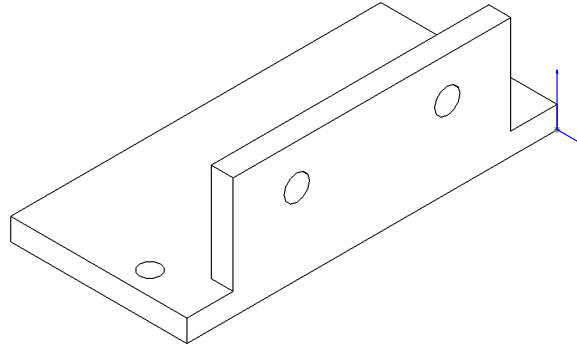
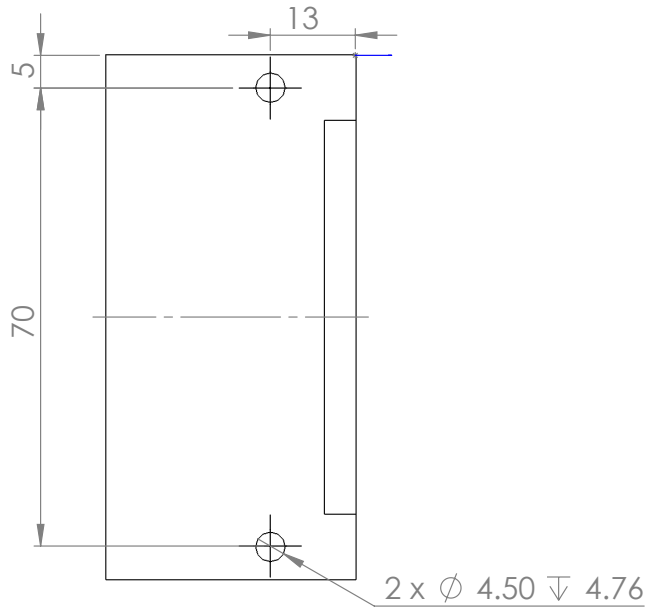
1. Unidades: mm	Material: Nylomaq		Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
	Nombre de parte: 130A-001A			A4
	ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	



Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
	Nombre de parte: 130A-002A	A4
1. Unidades: mm	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

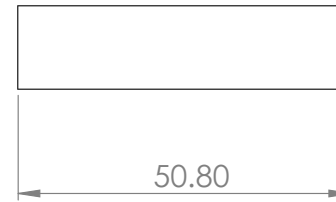
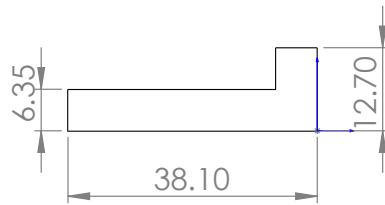
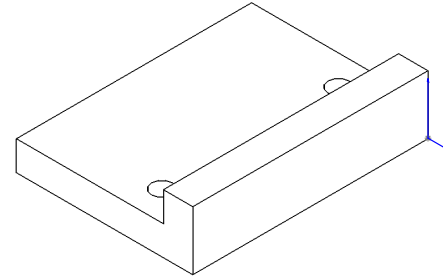
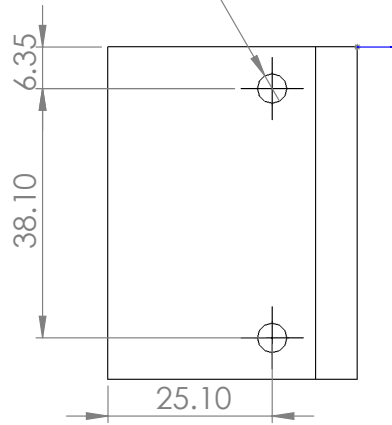


Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
	Nombre de parte: 130A-003A	A4
1. Unidades: mm	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

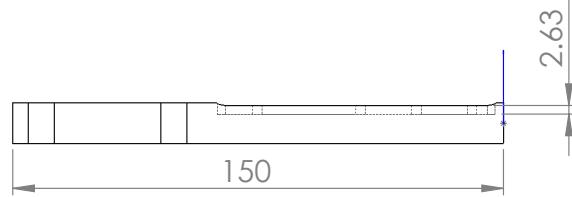
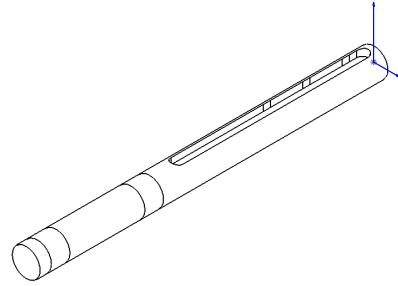
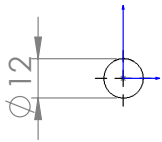
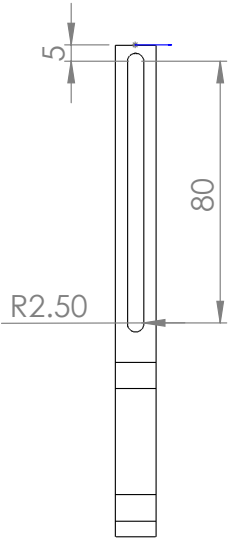


Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 140A-001A-BLCD_supports	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

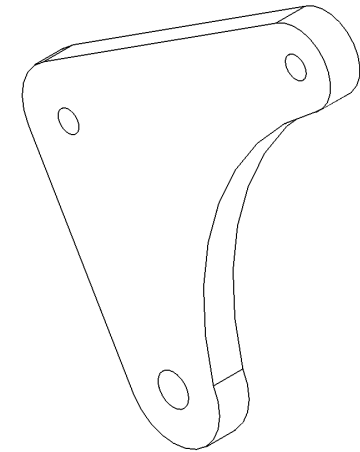
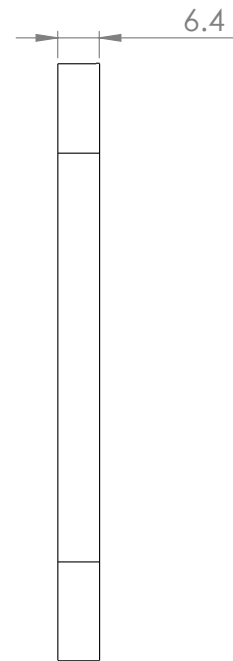
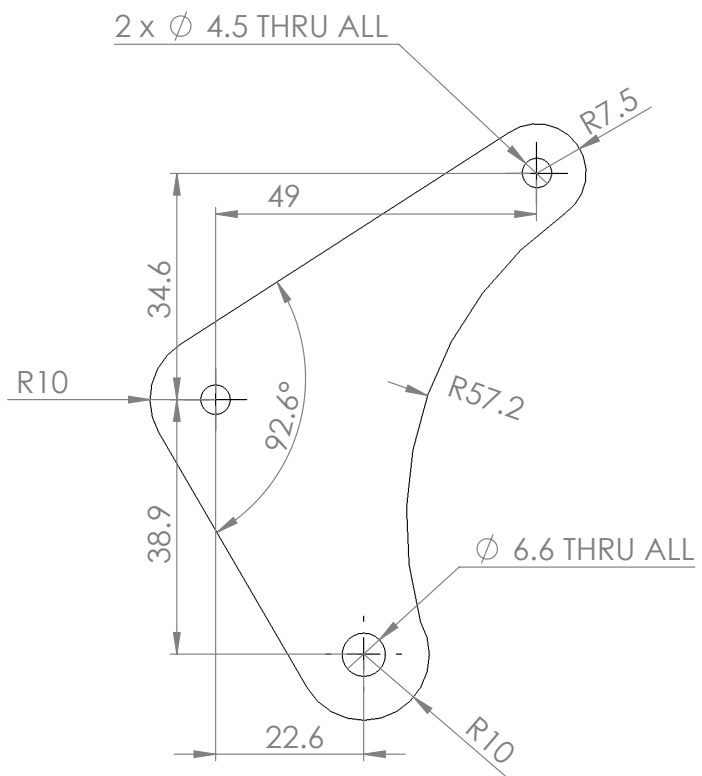
2 x \varnothing 4.50 ∇ 6.35



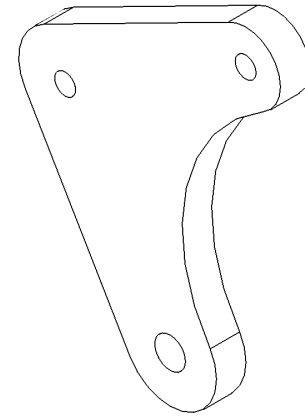
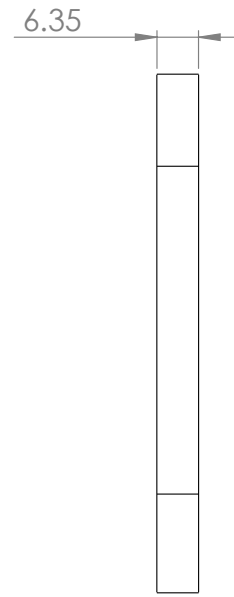
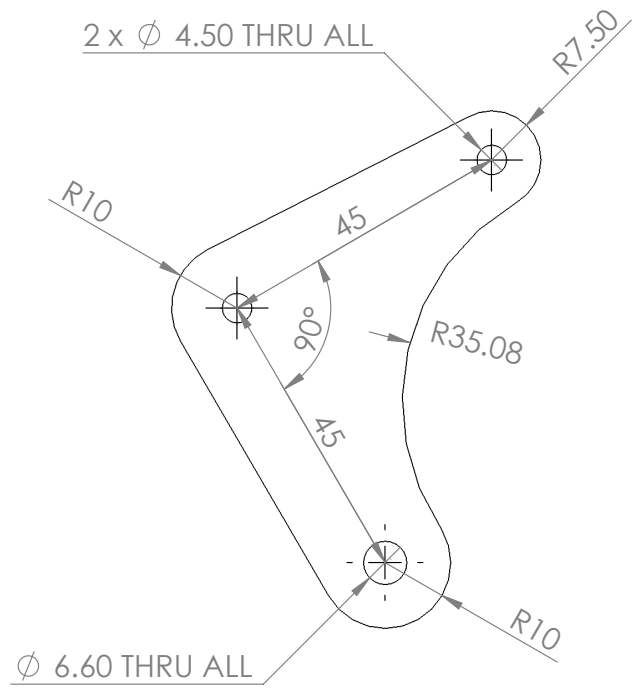
Material: Aluminio	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 140A-002A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



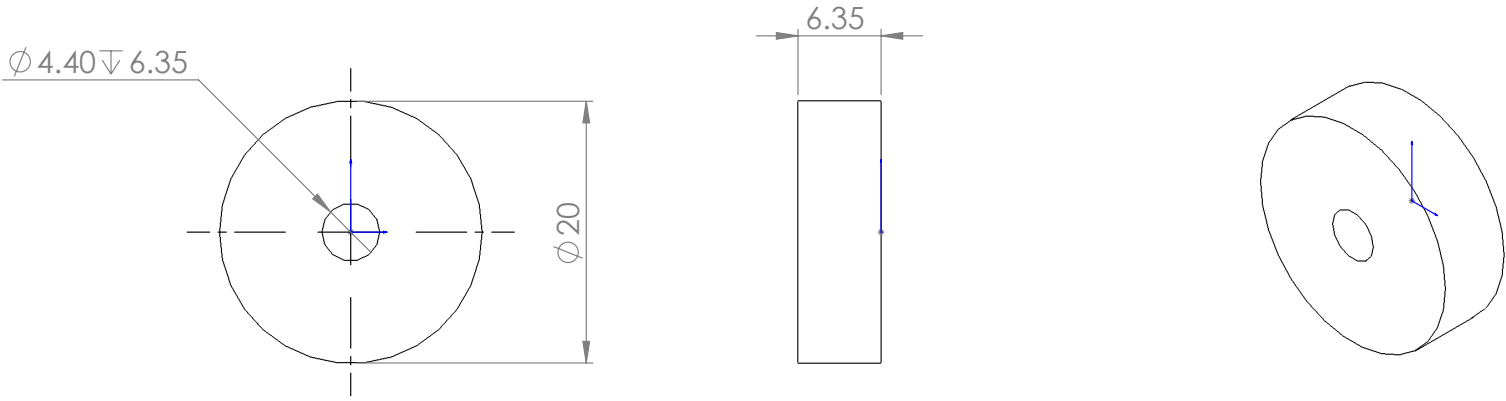
Material: Acero 1045	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 140A-004A-driving_shaft	A4
	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



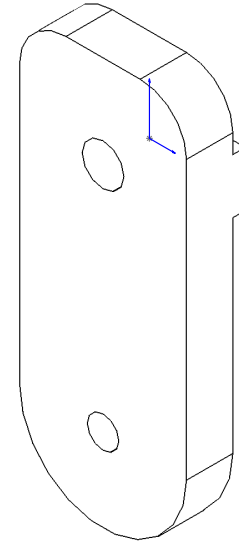
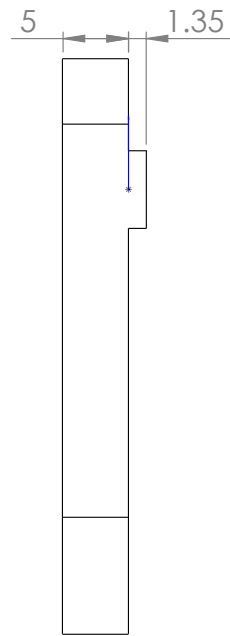
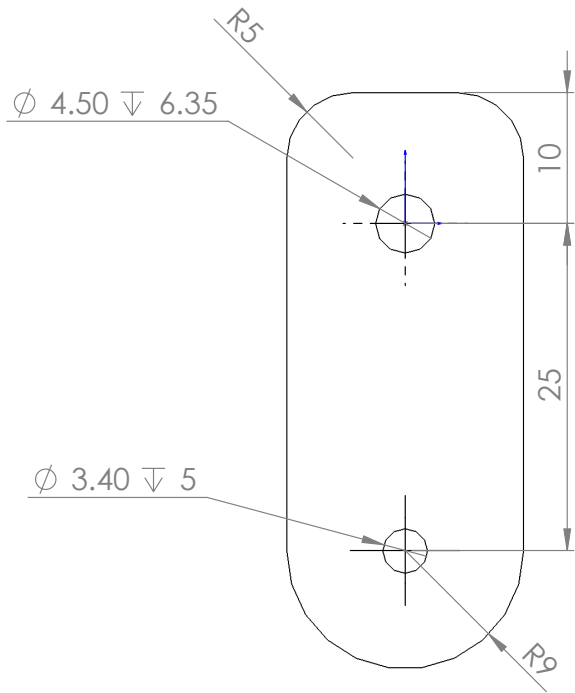
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-001A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



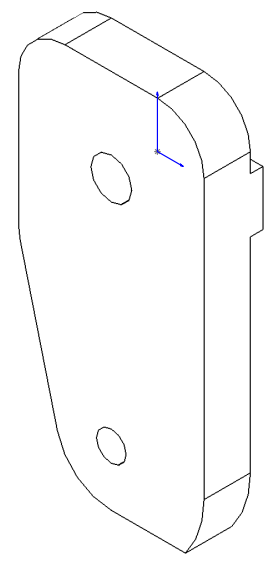
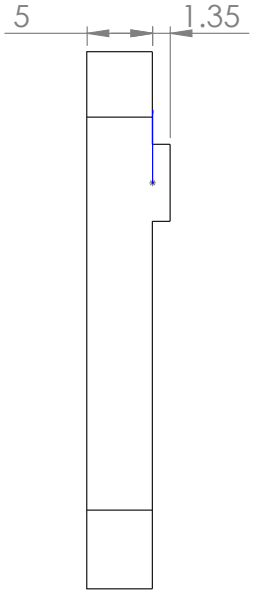
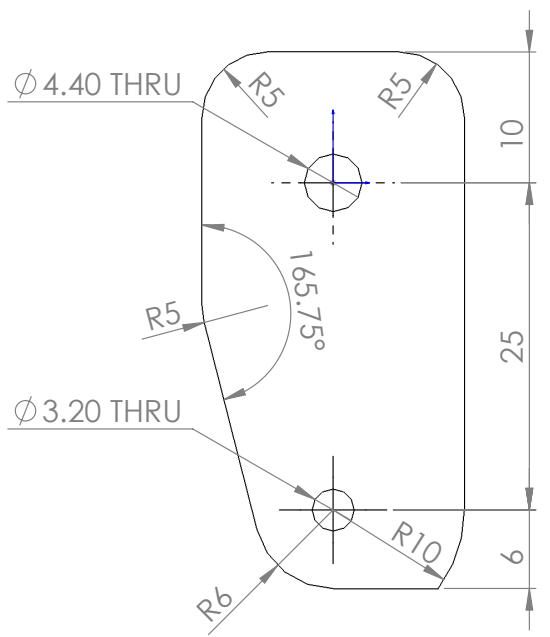
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-002A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



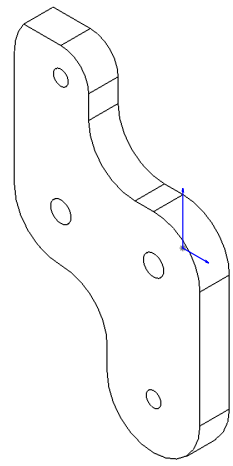
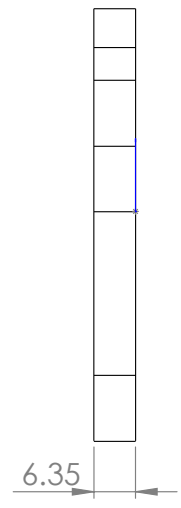
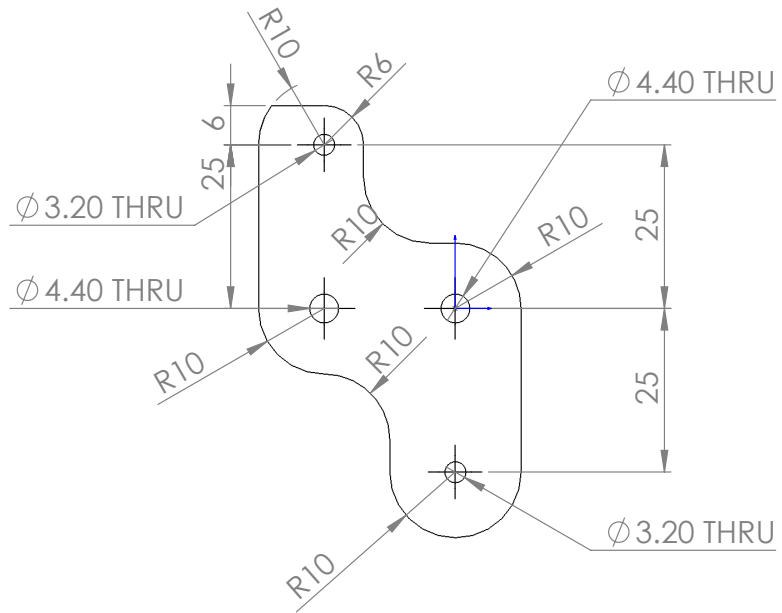
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-003A	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



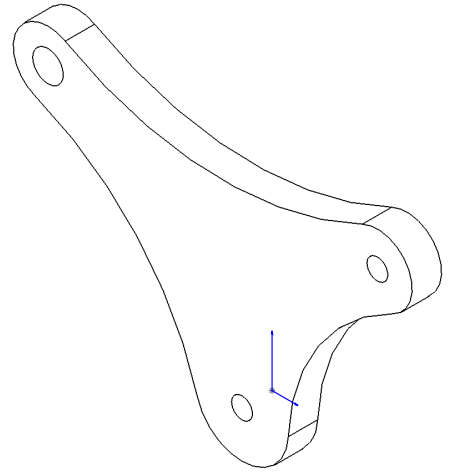
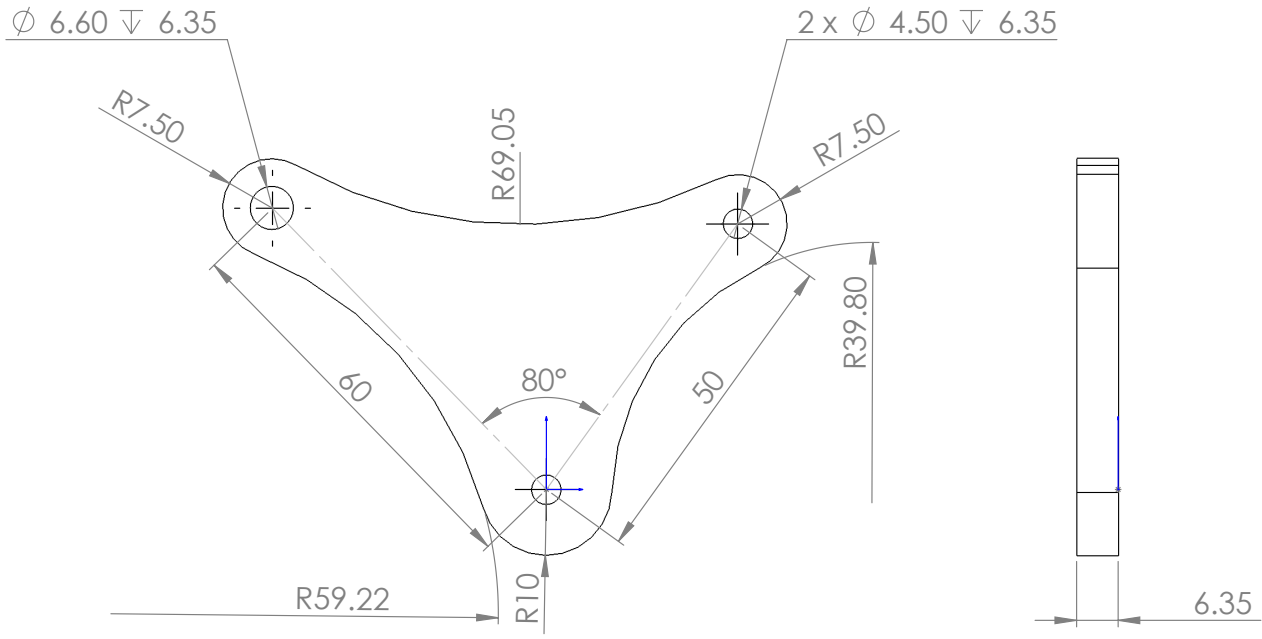
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-004A	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



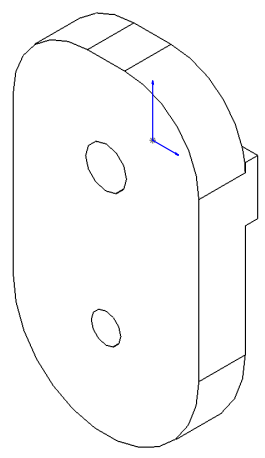
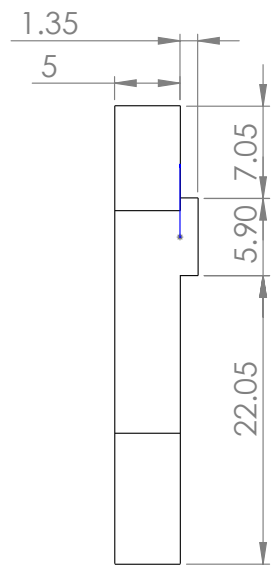
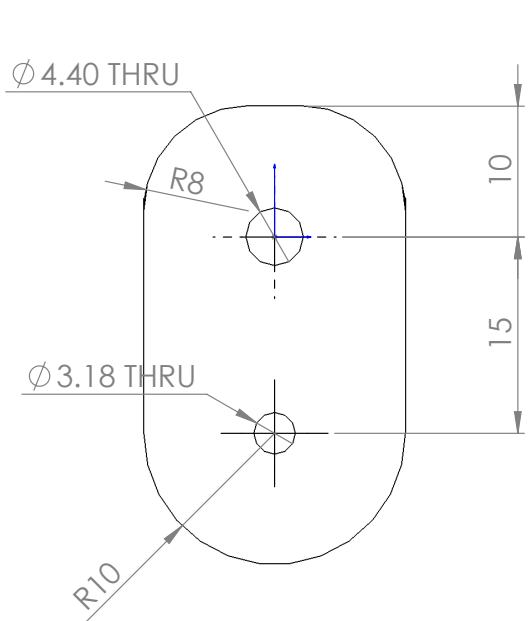
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-005A	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



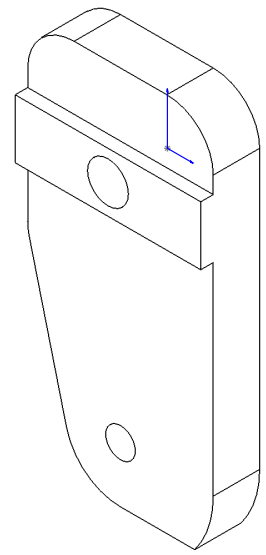
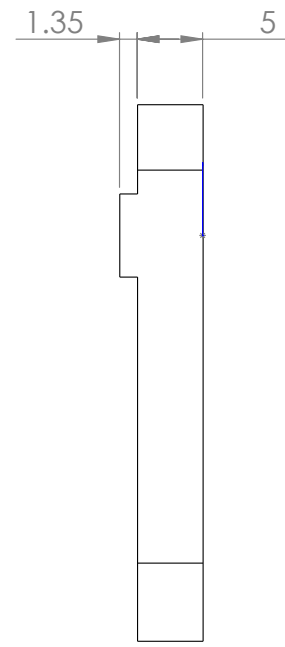
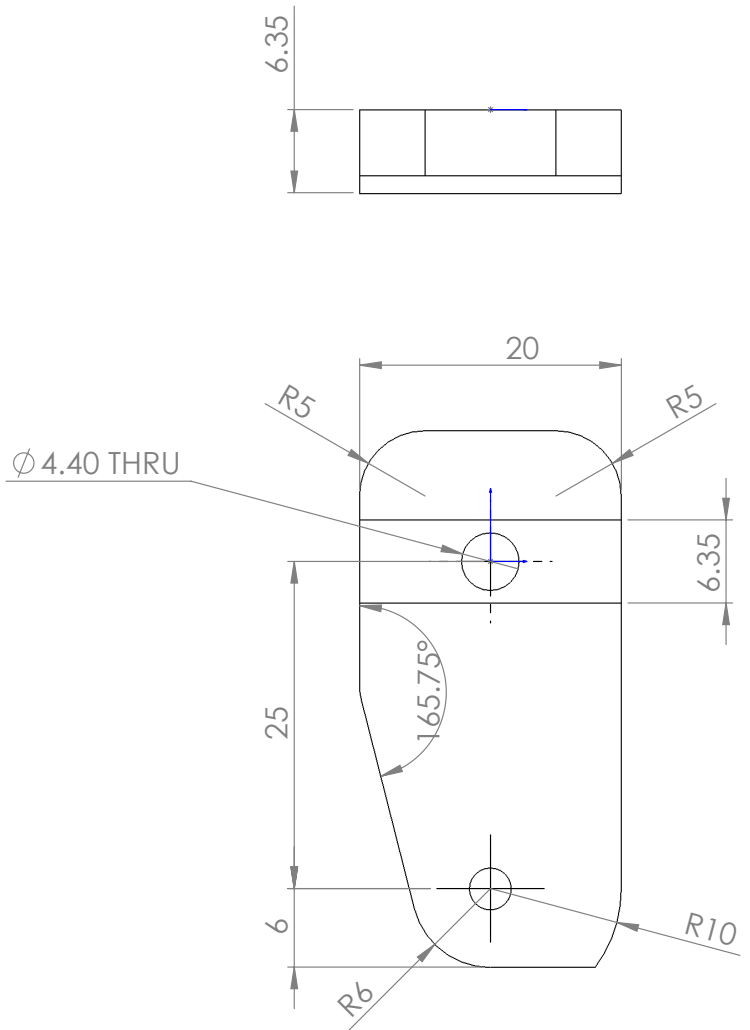
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-006A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-007A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

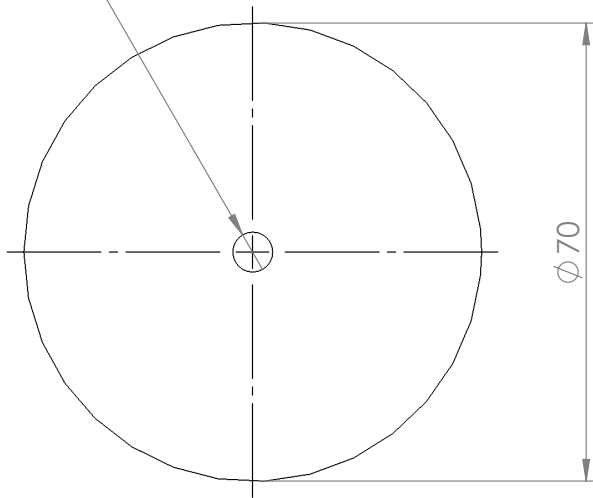


Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-008A	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

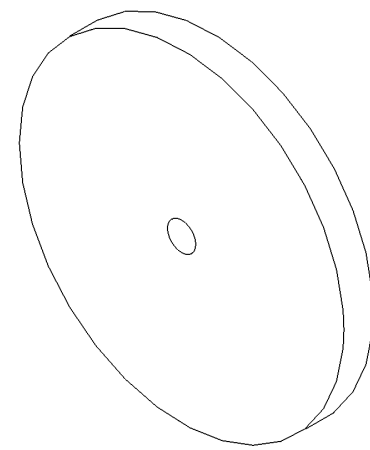
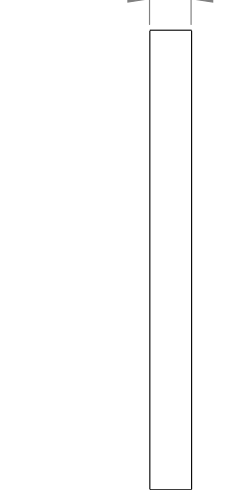


Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-009A	A4
	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

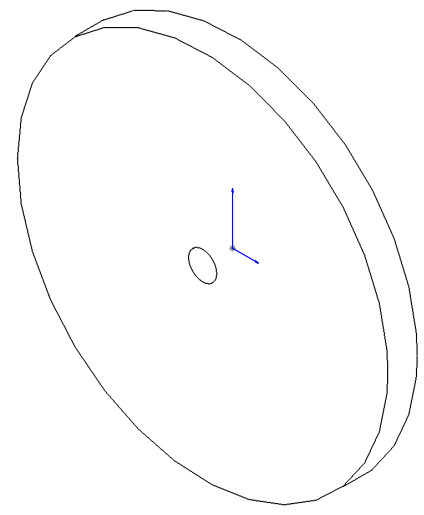
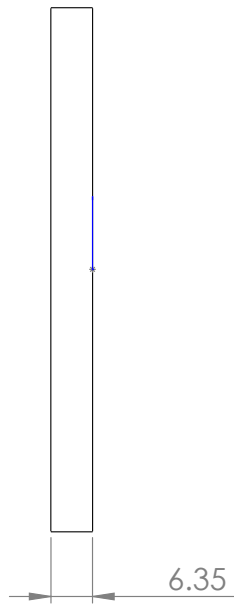
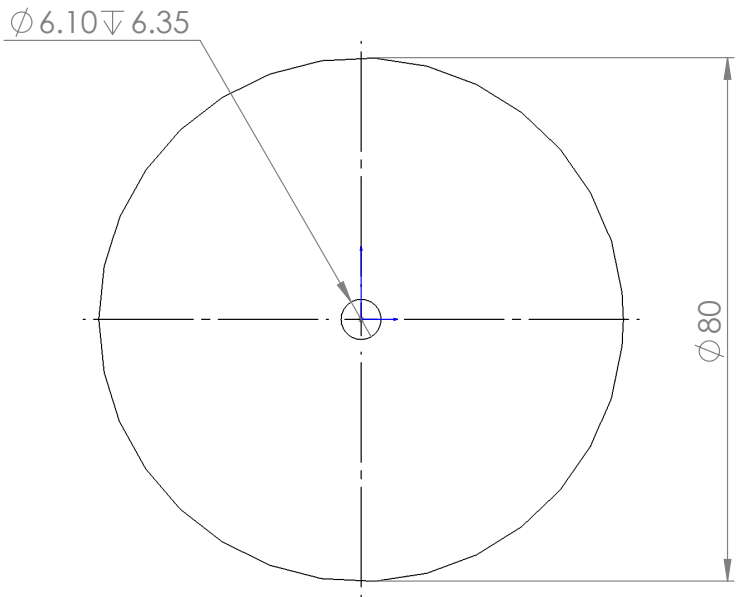
$\varnothing 6.10 \nabla 6.35$



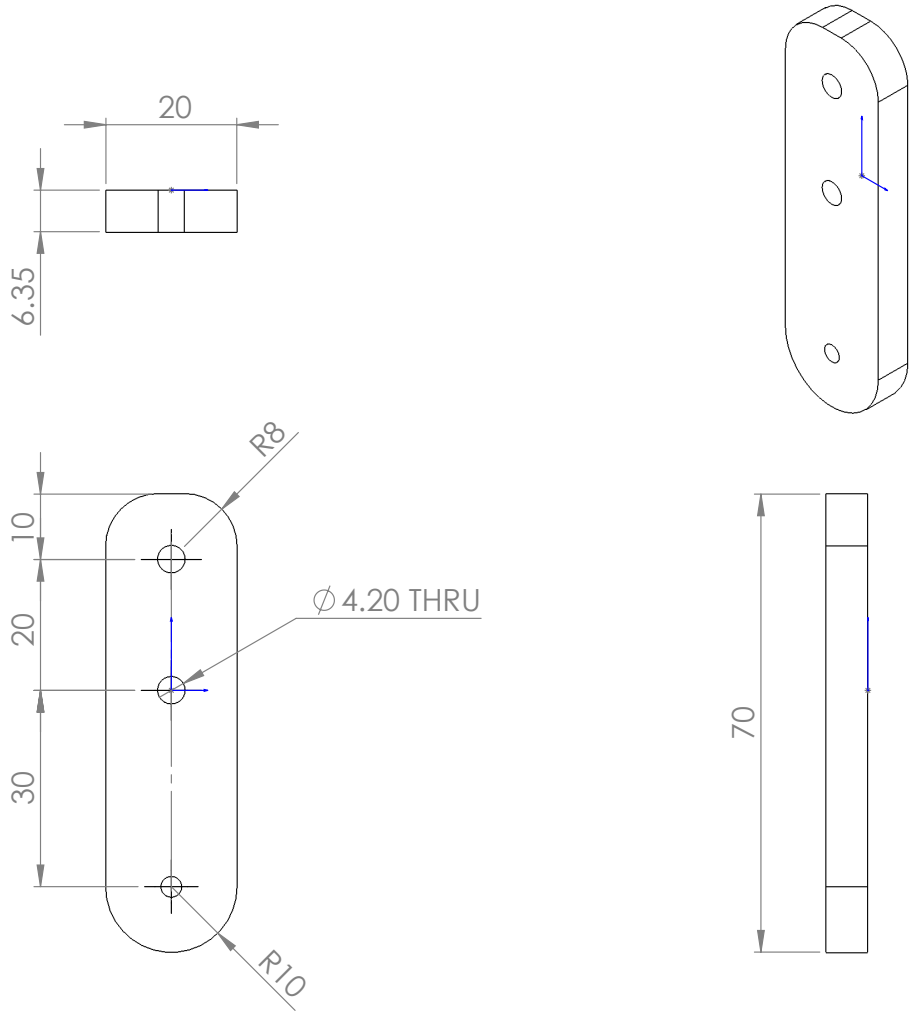
6.35



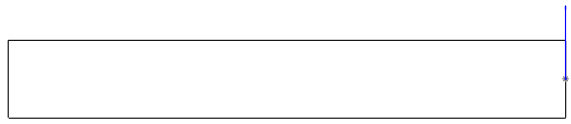
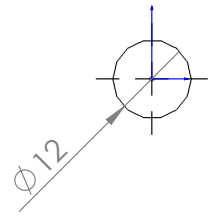
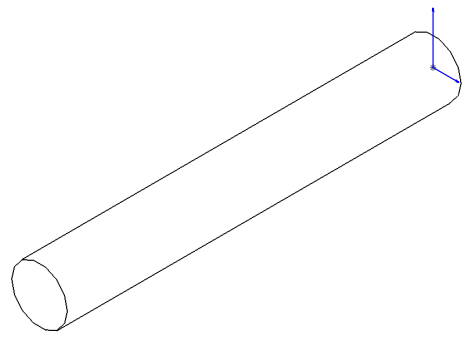
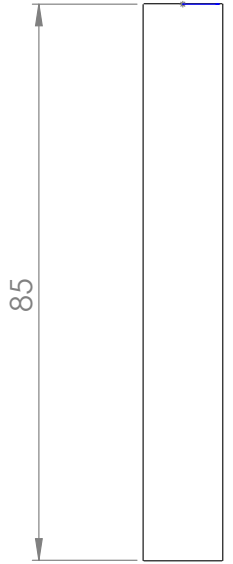
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-010A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



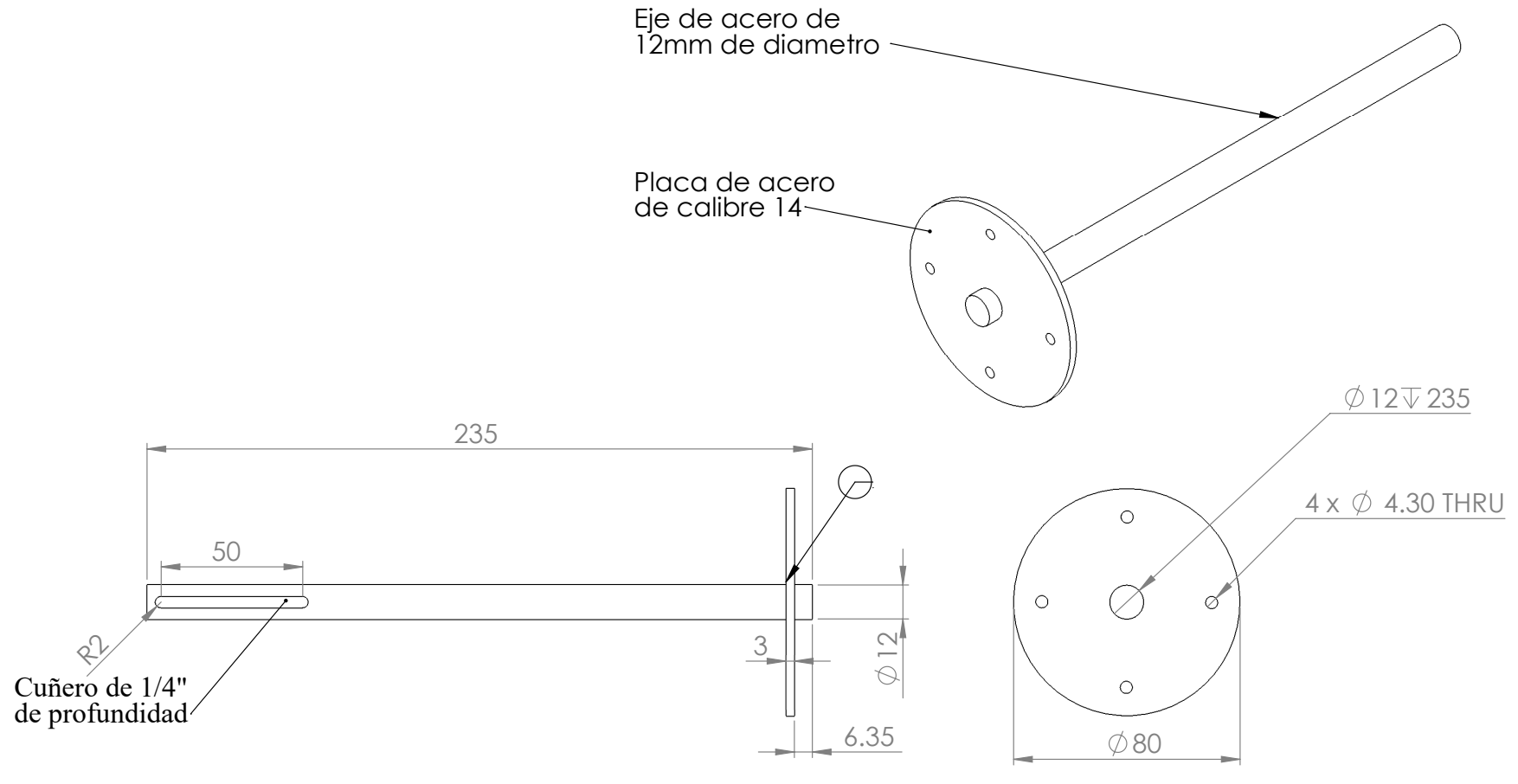
Materias: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-011A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



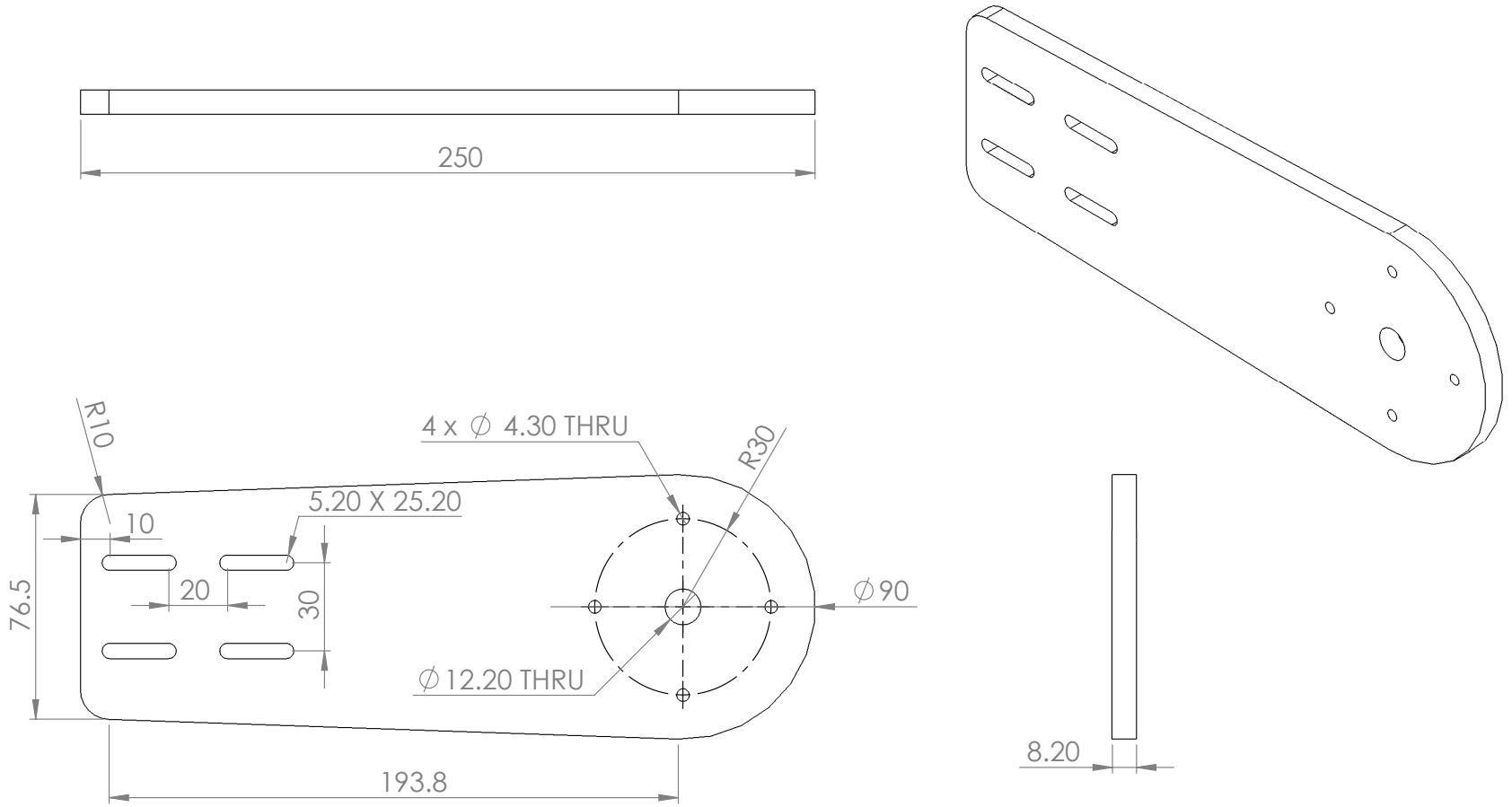
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 200A-012A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



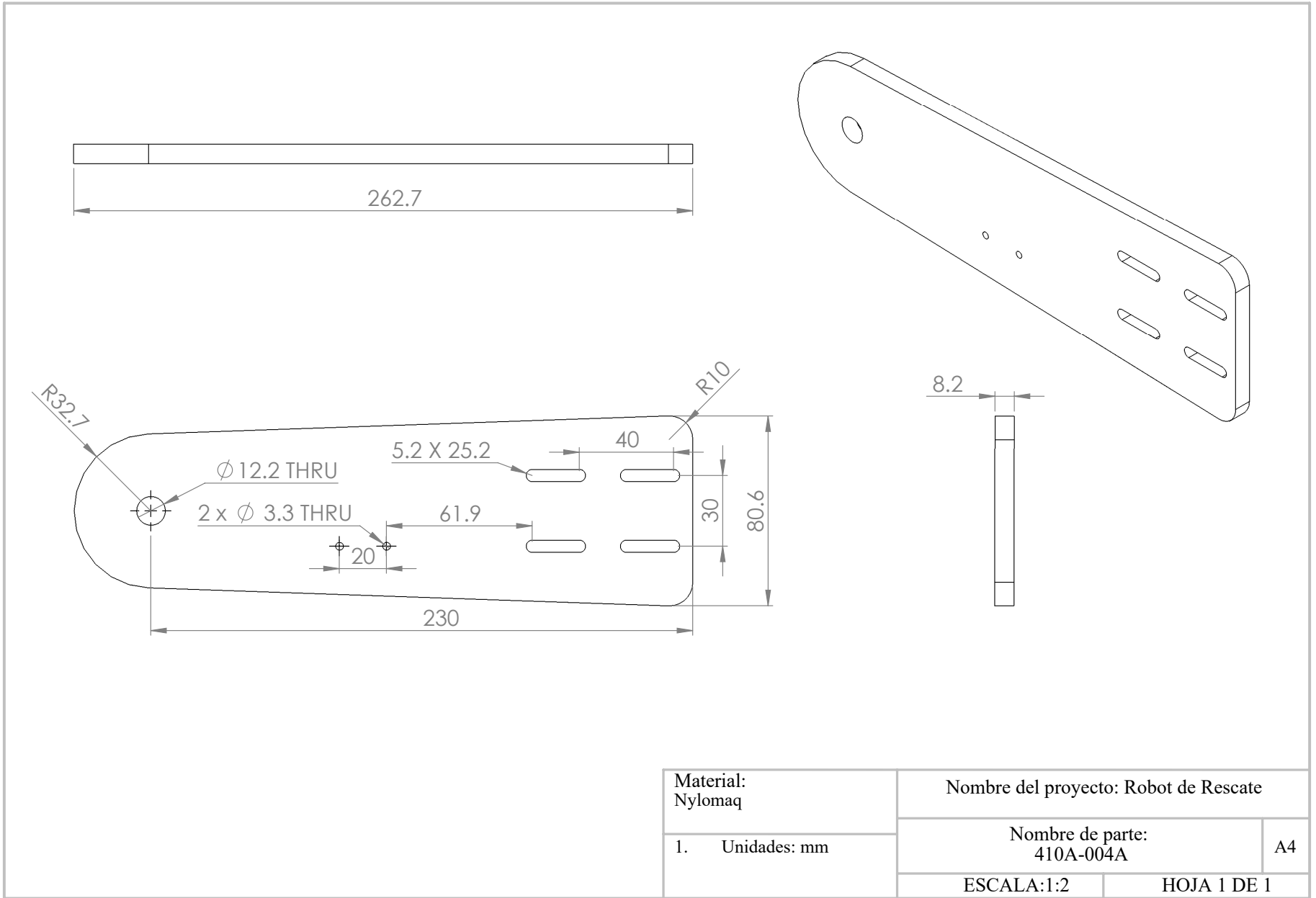
Material: Acero 1045	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 410A-001A	A4
ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1

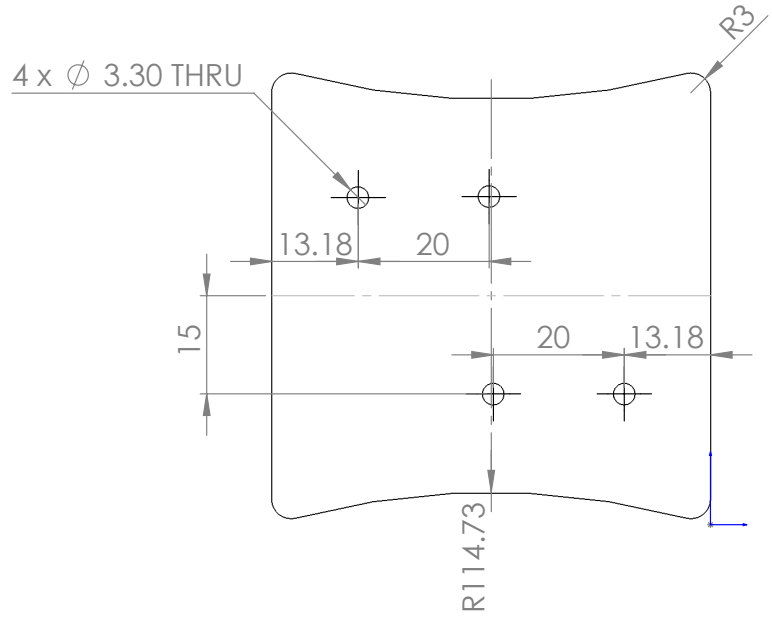
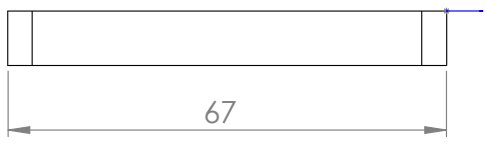
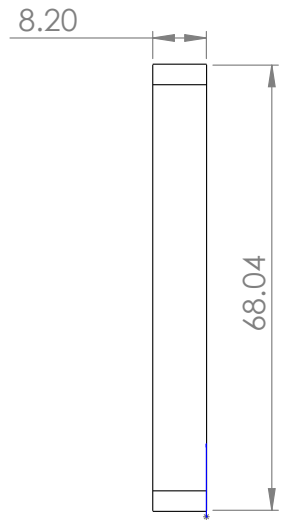
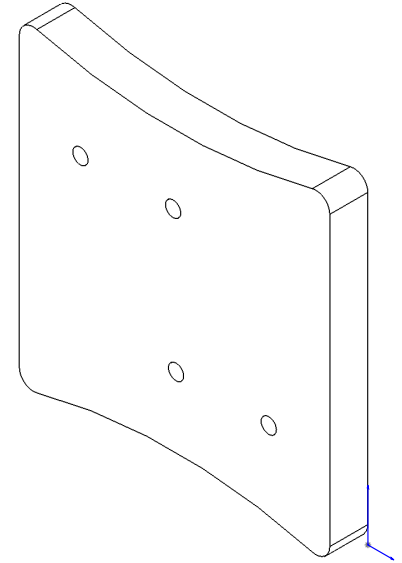


Materiales: Eje: acero Cople: acero	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
	Nombre de parte: 410A-001A-shaft_assembly	A4
1. Unidades: mm	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

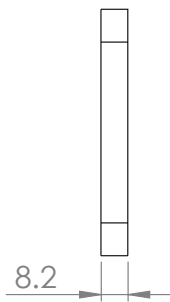
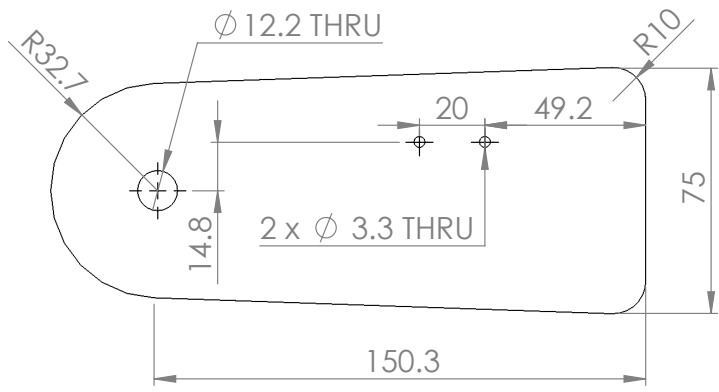
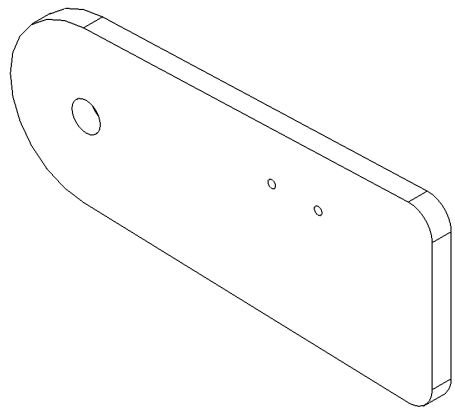
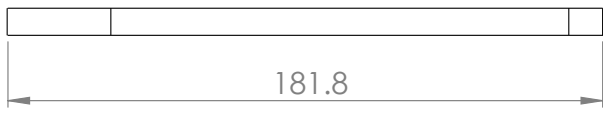


Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 410A-003A	A4
	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

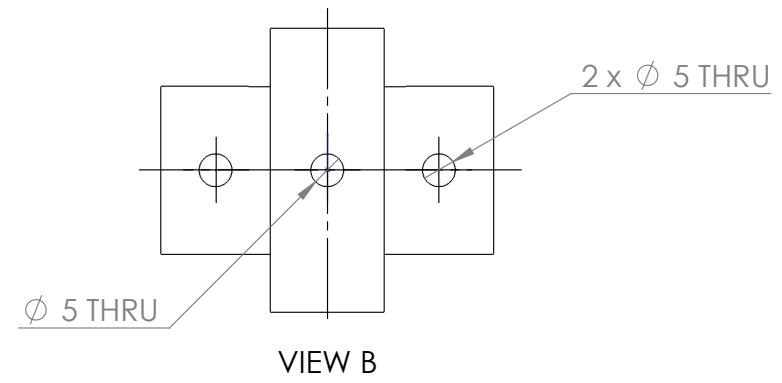
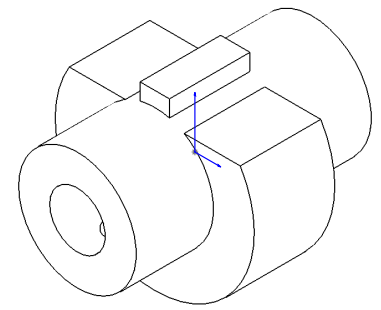
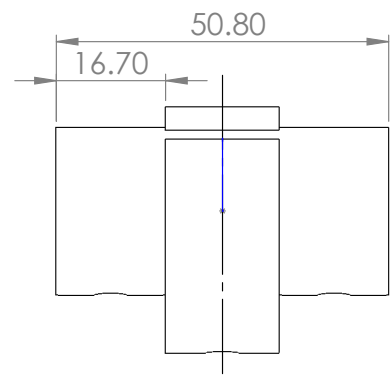
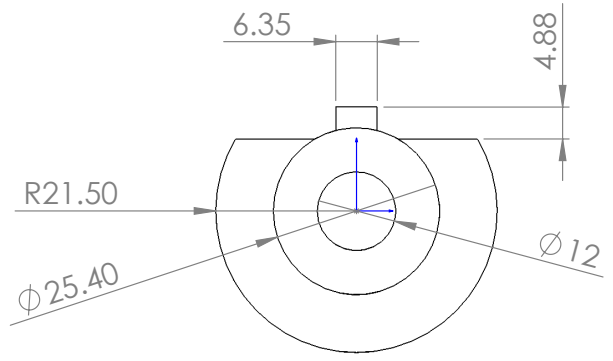




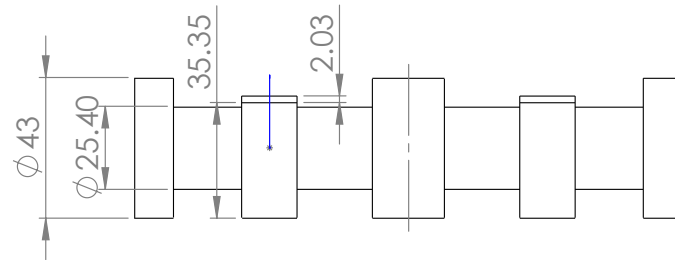
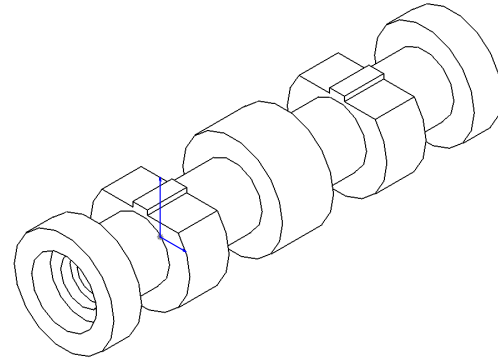
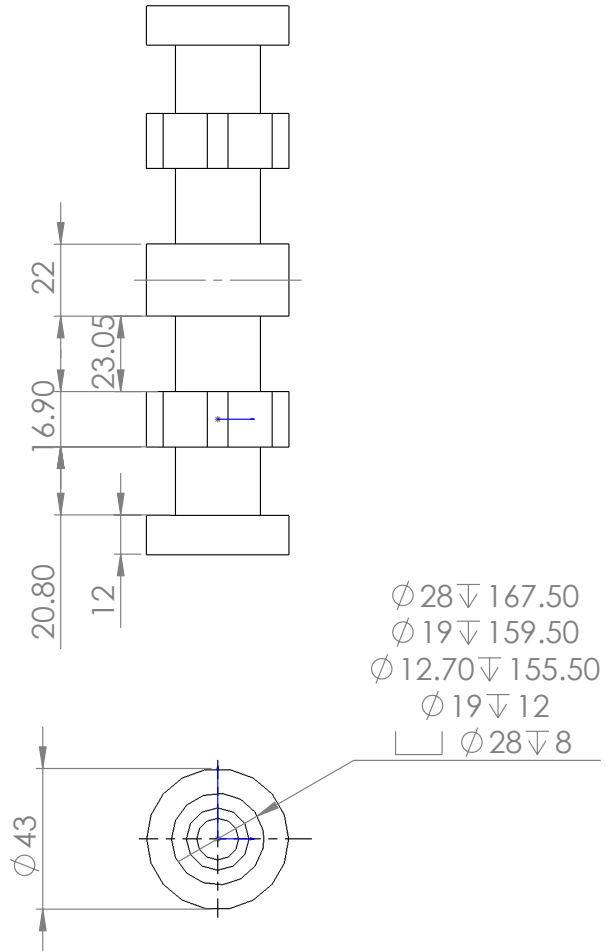
Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 410A-005A	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 410A-006A	A4
	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



Material: Nylomaq	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 410A-009A-bush_rex_21T	A4
	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



Materiales: Nylamid	Nombre del proyecto: Robot de Rescate	
1. Unidades: mm	Nombre de parte: 410A-010A-bush_Rex_25T	A4
	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1