PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO MÓVIL PARA EXPLORACIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO Y MONITOREO DE GRIETAS OCULTAS EN LA ANTÁRTIDA

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Cristhian David Vasquez Jimenez

ASESOR:

Diego Eduardo Quiroz Velásquez

Lima, noviembre, 2025

Informe de Similitud

Yo, Diego Eduardo Quiroz Velasquez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingenieria de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO MÓVIL PARA EXPLORACIÓN DEL ENTORNO DE TRABAJO Y MONITOREO DE GRIETAS OCULTAS EN LA ANTÁRTIDA

del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

CRISTHIAN DAVID VASQUEZ JIMENEZ,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 14/11/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 14 de Noviembre 2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Quiroz Velasquez, Diego Eduardo	
DNI:45872538	Firma
ORCID: 0000-0001-8505-3045	

DEDICATORIA

A mi madre y a mi padre, por inspirarme y motivarme día a día y no dejar rendirme a pesar de todo.

A mi abuelo Román, que ahora me cuida desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a mis padres, por brindarme siempre la oportunidad de crecer profesionalmente y por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A Bruno, mi hermano de otra sangre, por alentarme constantemente y no dejarme desmotivar durante todo este proceso.

A Viviana, por acompañarme en los momentos más críticos y ofrecerme siempre palabras de ánimo cuando más las necesitaba.

A Kioshi, mi socio y uno de mis mejores amigos, por las amanecidas compartidas y por el apoyo brindado a lo largo de este camino.

A mi asesor, Diego Quiroz, por su paciencia, guía y tiempo dedicado durante todo este trayecto. Cada consejo fue clave para alcanzar este objetivo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que conocí en el camino y que, con su granito de arena, contribuyeron a que este logro sea posible.

RESUMEN

En la Antártida, la presencia de grietas ocultas y el desconocimiento del entorno en tiempo real representan un peligro constante para los investigadores que realizan trabajos de campo. Frente a esta problemática, esta tesis tiene como objetivo monitorear las grietas ocultas y realizar un mapeo previo del entorno del área de trabajo, con el fin de prevenir accidentes durante las expediciones.

Para ello, se diseña un sistema mecatrónico móvil mediante una metodología que incluye un diseño conceptual (análisis del estado del arte, definición de requisitos, etc.) y un diseño mecatrónico. El sistema está conformado por tres subsistemas principales: desplazamiento, monitoreo de grietas y teleoperación remota. Posee seis ruedas con suspensión independiente Double Wishbone y un mecanismo de direccionamiento doble Ackermann, lo que le proporciona una mayor estabilidad, tracción y maniobrabilidad sobre suelos Antárticos.

Su estructura modular permite el ensamblaje de una manera eficiente y rápida, facilitando su mantenimiento. Se integran sensores como un LIDAR, una cámara y un georradar (GPR), los cuales permiten el monitoreo de las grietas y mapeo del entorno. Además, el sistema cuenta un sistema de energía distribuida, alimentado por una batería de 48V, con protección mediante relés, fusibles y un botón de emergencia.

En conclusión, se propone como una herramienta que evita que los científicos que realizan trabajos de campo en la Antártida sean víctimas de accidentes, como caídas por la presencia de grietas ocultas, al permitirles tener un mayor conocimiento sobre el entorno en que trabajan.

TABLA DE CONTENIDOS

1. ANTECEDENTES 2
1.1. Identificación del problema 2
1.2. Descripción de la Idea preliminar 5
1.3. Objetivos 5
1.3.1. Objetivo general 6
1.3.2. Objetivos específicos 6
1.4. Alcances 7
1.5. Metodología 7
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE 8
2.1. Revisión del marco teórico 8
2.1.1. La Antártida y condiciones climáticas 8
2.1.2. Medios y métodos de detección de grietas ocultas 10
2.1.3. Sistema de locomoción en superficies polares 11
2.1.4. Mecanismos de direccionamiento 11
2.2. Análisis del estado del arte 13
2.2.1. Sistemas polares de detección de grietas 13
2.2.2. Sistemas de locomoción en sectores polares 15
2.2.3. Normas 18
2.2.4. Idea del producto 19
2.3. Determinación de los requisitos del proyecto 20
3. DISEÑO CONCEPTUAL 21
3.1. Descomposición funcional y síntesis de medios 21
3.2. Síntesis de Estructura y Comportamiento General 22
3.2.1. Arquitectura del diseño mecatrónico general 22
3.2.3. Diagrama de bloques del Comportamiento General 24
4. DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO 26
4.1. Modelo Integrado del Sistema 26

4.1.1. Modelo 3D del sistema ensamblado 26
4.1.2. Diagrama general de conexiones 27
4.2. Subsistema de desplazamiento orientado a un entorno antártico 28
4.2.1. Propulsión del vehículo 28
4.2.2. Suspensión del vehículo 36
4.2.3. Mecanismo de dirección doble Ackerman 46
4.2.4. Estructura del vehículo 66
4.3. Subsistema de monitoreo de grietas 68
4.3.1. Selección de componentes 68
4.3.2. Acople del sistema con el vehículo 71
4.3.3. Arquitectura electrónica 71
4.3.4. Método para Reconstrucción 3D 72
4.4. Subsistema de teleoperación remota 73
4.4.1. Selección de Componentes 73
4.4.2. Arquitectura electrónica 81
4.4.3 Comunicación para la teleoperación remota 81
4.4.3.1 Selección de componentes 82
4.4.3.2 Protocolo de comunicación 83
4.4.4. Interfaz con Usuario 84
4.5. Consumo de energía 86
4.5.1. Selección de batería y relé 87
4.5.2 Diseño de pcbs 88
4.5.2.1 PCB 1 88
4.5.2.2 PCB 2 89
4.6 Caja de componentes 90
5. COSTOS Y PLANOS 91
CONCLUSIONES 95
RECOMENDACIONES 97
BIBLIOGRAFÍA 98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Tabla comparativa de robots que identifican grietas 13

Tabla 2. 2 Tabla comparativa de sistemas de locomoción. 16

Tabla 2. 3 Tabla comparativa sobre método de localización y de mapeo. 17

Tabla 3. 1 Tabla de asignación de subsistemas 21

Tabla 4. 1 Tabla de selección de ruedas 29

Tabla 4. 2 Tabla de selección de motores 34

Tabla 4. 3 Tabla de selección de motor de giro 52

Tabla 4. 4 Tabla de selección del sensor de GPR 68

Tabla 4. 5 Tabla de selección de la unidad de control GPR 69

Tabla 4. 6 Tabla de selección de la capturadora de video 70

Tabla 4. 7 Tabla de selección de módulo con GPU 74

Tabla 4. 8 Tabla de selección de microcontroladores 75

Tabla 4. 9 Tabla de selección de GPS 76

Tabla 4. 10 Tabla de selección de IMU 77

Tabla 4. 11 Tabla de selección de Lidar3D 78

Tabla 4. 12 Tabla de selección de Cámara 80

Tabla 4. 13 Tabla de características de la Antena NSM5 82

Tabla 5. 1 Tabla de Costeo 91

Tabla 5. 2 Lista de planos mecánicos/eléctricos-electrónicos 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Grieta de la Barrera Larsen C mes de enero 3

Figura 1. 2 Grieta de la Barrera Larsen C 10 de julio 3

Figura 1. 3 Grieta de la Barrera Larsen C 22 de julio 3

Figura 1. 4 Puente de nieve sobre la grieta “Mongo” 4

Figura 2. 1 Promedio de temperaturas anuales de la estación Machu Picchu 9

Figura 2. 2 Promedio de las precipitaciones anuales de la estación Machu Picchu 9

Figura 2. 3 Configuraciones de direccionamiento 13

Figura 3. 1 *Arquitectura del diseño mecatrónico* 24

Figura 3. 2 Diagrama de Comportamiento General del Sistema 25

Figura 3. 3 Diagrama de bloques de modo teleoperado 25

Figura 4. 1 Modelo 3D ensamblado 26

Figura 4. 2 Diagrama de bloques general de conexiones 27

Figura 4. 3 Motor AK10-9 V2.0 35

Figura 4. 4 Vista seccionada del acople del motor con el motor 36

Figura 4. 5 Vista del acople del motor con el motor 36

Figura 4. 6 Acople encapsulado con rueda 37

Figura 4. 7 Modelado brazo inferior 37

Figura 4. 8 Modelado brazo superior 38

Figura 4. 9 Fuerza de choque con el carro 39

Figura 4. 10 DCL de la rueda conectada con Kingpin.....39

Figura 4. 11 DCL brazo superior.....41

Figura 4. 12 DCL brazo inferior.....42

Figura 4. 13 DCL de la instalación de una suspensión.....43

Figura 4. 14 Análisis de esfuerzos estáticos de wishbone inferior.....44

Figura 4. 15 Análisis de esfuerzos estáticos en wishbone superior.....44

Figura 4. 16 Modelado 3D King Pin.....45

Figura 4. 17 Análisis de esfuerzos en Kingpin.....45

Figura 4. 18 Ensamble de suspensión.....45

Figura 4. 19 SAL 10E rótula esférica.....46

Figura 4. 20 Separador de rótulas M10.....47

Figura 4. 21 Diagrama de fuerzas de separador.....47

Figura 4. 22 Análisis de esfuerzos de separador.....47

Figura 4. 23 Caso de giro a la derecha del vehículo.....48

Figura 4. 24 Mecanismo de dirección por varillas de empuje con plato giratorio.....49

Figura 4. 25 Posición inicial del mecanismo.....49

Figura 4. 26 Giro a la izquierda (a) y Giro a la derecha (b).....50

Figura 4. 27 DCL de rueda para el giro.....51

Figura 4. 28 Componente de giro de las ruedas.....53

Figura 4. 29 Diagrama de sistema de fajas.....53

Figura 4. 30 DCL de eje vertical extremo 55

Figura 4. 31 Diagrama de fuerzas y momentos eje extremo 55

Figura 4. 32 Eje vertical extremo 3D y análisis de esfuerzos.....57

Figura 4. 33 Soporte inferior.....58

Figura 4. 34 Placa base con soporte de aluminio.....58

Figura 4. 35 Soporte superior del eje extremo.....58

Figura 4. 36 Eje extremo con acople y componente de giro.....59

Figura 4. 37 Acople de eje con motor.....59

Figura 4. 38 Eje central del sistema.....60

Figura 4. 39 DCL de eje central.....60

Figura 4. 40 Diagramas de fuerzas y momentos de eje central 61

Figura 4. 41 Análisis de esfuerzos del eje vertical con motor 62

Figura 4. 42 Soporte superior de motor 62

Figura 4. 43 Análisis de esfuerzos soporte superior 63

Figura 4. 44 Sistema central de engranajes.....63

Figura 4. 45 Modelado de sistema de giro Ackerman 64

Figura 4. 46 Vista lateral de sistema de giro.....64

Figura 4. 47 Estado inicial del mecanismo 65

Figura 4. 48 Giro para la derecha 65

Figura 4. 49 Giro para la izquierda.....65

Figura 4. 50 Estructura inferior del vehículo 66

Figura 4. 51 Suspensión double wishbone con soportes 67

Figura 4. 52 Sistema de traslación 67

Figura 4. 53 Acople de la antena con el vehículo (a) Vista general (b) Detalle acople 71

Figura 4. 54 Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de grietas 71

Figura 4. 55 Esquema del método V-LOAM 72

Figura 4. 56 Diagrama de bloques de conexiones Ssitema de teleopeación remota 81

Figura 4. 57 Esquema de la teleoperación remota 82

Figura 4. 58 Protocolos de comunicación 83

Figura 4. 59 Control PID motor AK 84

Figura 4. 60 Diagrama de bloques de la Interfaz de Usuario 85

Figura 4. 61 Interfaz de Usuario 85

Figura 4. 62 Modelo 3D de la PCB1 89

Figura 4. 63 Ruteado de la PCB1 (a) Capa inferior (b) Capa superior 89

Figura 4. 64 Modelo 3D de la PCB2 89

Figura 4. 65 Ruteado de la PCB2 (a) Capa inferior (b) Capa superior 90

Figura 4. 66 Caja de componentes 90

INTRODUCCIÓN

En la Antártida, para realizar la toma de datos, los investigadores tienen que movilizarse por los suelos muchas veces sin conocer el espacio en que se trabaja, dado que no se cuenta con información precisa en tiempo real. Uno de los principales riesgos y preocupación de muchos investigadores es la presencia de grietas ocultas en el entorno, cuya detección es una tarea fundamental para su seguridad. Actualmente, las expediciones peruanas llevan a cabo este proceso de forma manual, lo que expone a los científicos a posibles caídas y accidentes. Por ello, el objetivo principal del presente proyecto es diseñar un sistema enfocado en monitorear las grietas ocultas y realizar un mapeo previo del entorno del área de trabajo para obtener mayor información del ambiente y salvaguardar la vida de los científicos.

El presente trabajo se divide en los siguientes capítulos: Antecedentes, Marco teórico y estado del arte, diseño conceptual de la solución, diseño mecatrónico, costos y planos, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

En este primer capítulo se detalla acerca de la problemática y se especifican los objetivos y alcances del presente trabajo de fin de carrera. Asimismo, se propone la metodología a seguir para resolver el problema identificado.

1.1. Identificación del problema

En los últimos años, la emisión de los gases de efecto invernadero se ha incrementado a velocidades exorbitantes, afectando directamente al cambio climático (Varela, 2022). Un claro ejemplo de esto es la formación y ensanchamiento de grietas en las capas de hielo, las cuales se originan cuando el deslizamiento del hielo no es lo suficientemente rápido como para adaptarse a la nueva forma del glaciar (Ravanel y Ogier, 2015). Si bien es cierto, la generación de grietas es parte del proceso natural del ciclo de vida de los glaciares, la comunidad científica afirma que el cambio climático está acelerando este proceso (Holthaus, 2015; Varela, 2022), ya que el incremento de temperaturas ocasiona que las capas de hielo se derritan y que las grietas comienzan a ser más profundas con características más complejas (Williams, Ray y Lever, 2012).

Este fenómeno se puede apreciar con un caso que ocurrió en la grieta de la Barrera Larsen C, Antártida. En las siguientes Figuras, se puede observar la grieta en diferentes periodos de tiempo; en la Figura 1.1 ocurrió en enero del 2017, en la Figura 1.2 ocurrió el 10 de julio del 2017 y la Figura 1.3 ocurrió el 22 de julio.

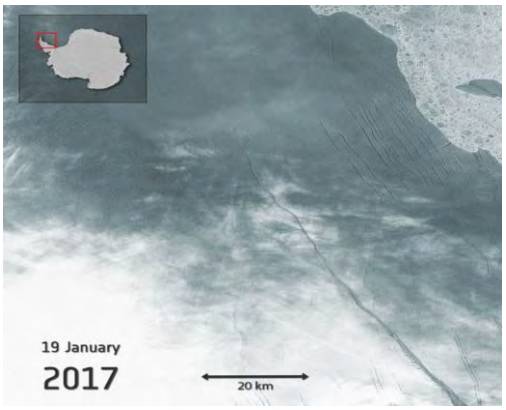


Figura 1. 1 Grieta de la Barrera Larsen C mes de enero (Tomado de ESA, 2017)

Figura 1. 2 Grieta de la Barrera Larsen C 10 de julio (Tomado de Sentinel-1A SAR-C, 2017)

Figura 1. 3 Grieta de la Barrera Larsen C 22 de julio (Tomado de Sentinel-1A SAR-C, 2017)

Como se puede apreciar en la Figura 1.1, que ocurrió en enero del 2017, la fisura que se tenía en la capa de hielo, aumentó en unos 20 km. Y en julio de ese mismo año, se desprendió por completo una parte de la barrera, formándose un iceberg llamado A-68 de 5800 km 2, aproximadamente el doble del tamaño del departamento de Lima. Tras la separación, sus dimensiones se redujeron en más de un 12%, modificando drásticamente el panorama de la zona (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Argentina, s.f). Asimismo, se puede observar en las Figuras 1.2 y 1.3 el notable cambio de la superficie que ocurrió en menos de 2 semanas. Este es un claro ejemplo de cómo es que las superficies de las zonas polares se

encuentran en constante cambio, las cuales principalmente son monitoreadas para entender el comportamiento del cambio climático (Chouksey et al., 2021).

Para realizar el monitoreo y la toma de datos en el campo, los investigadores tienen que movilizarse por los suelos de la Antártida, muchas veces sin conocer previamente el espacio de trabajo, debido a la falta de información actualizada y precisa en tiempo real. Uno de los principales desafíos constantes para el trabajo de campo en la Antártida y otras áreas con características similares es la presencia de grietas, ya que representan un riesgo significativo para la integridad de los investigadores (Thompson et al., 2020). En algunos casos dado su gran tamaño, son visibles y se pueden identificar rápidamente, de tal manera que se puede evitar trabajar por esas zonas o ir por esas rutas. No obstante, dadas las condiciones climáticas durante las tormentas de nieve en las temporadas de invierno, la nieve se acumula en el vacío de las grietas, cubriéndolas y formando puentes de nieve (conocidos en inglés como "*snowbridges*"). A continuación, se muestra la Figura 1.4 de un puente de nieve formado sobre una grieta de casi 10 metros de profundidad.

Figura 1. 4 Puente de nieve sobre la grieta "Mongo"

(Tomado de USAP photo library y fotografiado por Russ Alger, Cold Regions Research and Environmental Laboratory, National Science Foundation,2002)

En la Figura 1.4 se puede apreciar que, al detectar una grieta oculta, se debe colocar una señalización para saber por dónde no pasar. Estos puentes representan un alto peligro para los investigadores puesto que las grietas quedan ocultas a simple vista, incluso en los días de visibilidad total. A pesar de que pueden soportar el peso de la persona misma, cuando se intenta pasar vehículos más pesados o hay un sobrepeso se pueden romper llegando a generar accidentes (Williams et al. 2012; Williams, Burzynski et al., 2014; Ravanel, 2022; Thompsom et al., 2020).

Ante ello, existe una necesidad de que se realice un previo mapeo de la zona de interés para los trabajos de campo, con el fin de obtener información en tiempo real del área de trabajo y monitorear las grietas ocultas que representan un gran riesgo, de tal manera que se pueda garantizar la seguridad de los investigadores en las expediciones.

1.2. Descripción de la Idea preliminar

Ante esta problemática y considerando las condiciones extremas de la Antártida, se plantea diseñar un sistema enfocado en las tareas del mapeo tridimensional de las superficies adversas y el monitoreo en tiempo real de grietas ocultas en el subsuelo. Su finalidad es mejorar la precisión y disponibilidad de información sobre el entorno de trabajo, salvaguardando así la vida de los investigadores.

1.3. Objetivos

A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos para el presente trabajo.

1.3.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un sistema mecatrónico móvil para la exploración del entorno de trabajo y el monitoreo de grietas ocultas en los subsuelos de la Antártida. Este sistema proporcionará información más precisa y completa, minimizando los riesgos para los investigadores.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar y analizar la problemática, así como los productos existentes en el mercado, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora y establecer los requerimientos del sistema.
- Diseñar el subsistema de desplazamiento, adaptado a las condiciones del entorno antártico, con el fin de garantizar su movilidad, maniobrabilidad y estabilidad en terrenos hostiles.
- Diseñar el subsistema de monitoreo de grietas, integrando un sensor GPR en el sistema móvil para la recolección de datos del subsuelo, y definiendo el método de reconstrucción 3D, a fin de proporcionar información detallada del entorno para su análisis.
- Diseñar el subsistema de teleoperación remota, asegurando una transmisión estable entre el mando de control y el sistema móvil, así como diseñar un mockup de la interfaz de usuario, explicando la lógica de interacción y visualización de datos.
- Realizar un costeo aproximado de los componentes del sistema mecatrónico diseñado, con la finalidad de analizar el factor económico y la viabilidad del sistema.

1.4. Alcances

El planteamiento del diseño considera un área de trabajo de forma circular con un radio máximo de 300 metros, en el cual no se contempla la presencia de vida animal. Además, la data obtenida en el sistema de monitoreo de subsuelo y en la reconstrucción 3D será analizada e interpretada por los investigadores, mas no por el sistema mecatrónico.

Por último, el sistema de desplazamiento orientado a un entorno antártico considera suelos con hielo, nieve y tierra a una inclinación máxima de 10° y superficie regular. Asimismo, se considera que la temperatura de operación mínima del sistema sea de -10°C.

1.5. Metodología

En el presente trabajo se empleará la metodología de diseño "*Design of Mechatronic Systems Based on Function/Means Tree*", desarrollada por los profesores Victor De Negri, Karol Muñoz y el Magíster Vinicius Vígolo. Esta metodología se divide en 2 fases fundamentales. La primera fase corresponde al diseño conceptual del sistema, la cual involucra desde el análisis del problema, la revisión del marco teórico y el estado del arte, la definición de los requisitos del sistema, la elaboración del árbol de funciones y medios y selección de la solución óptima. La segunda fase está orientada al diseño mecatrónico, la cual contempla los dominios mecánicos, eléctricos/electrónicos y de control. Para más detalle con respecto al desarrollo del diseño mecatrónico, revisar el anexo A.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se contempla conceptos generales del entorno, la investigación de la tecnología existente y los requisitos del proyecto para poder obtener una idea del producto.

2.1. Revisión del marco teórico

2.1.1. La Antártida y condiciones climáticas

La Antártida es considerado como uno de los continentes más altos, fríos, secos y ventosos del mundo (Gravenkötter y Hamman, 2004). Según la Organización Mundial Meteorológica, la temperatura promedio anual en la Antártida es de -10°C en la costa y -60°C en las partes altas del interior. Para la realización del presente trabajo se tiene como referencia las condiciones climáticas cercanas a la estación Machu Picchu, base de investigación del Perú en dicho continente. Sin embargo, para las expediciones se consideran escenarios más críticos para que el sistema opere de forma normal pese a las condiciones extremas.

En la Figura 2.1, se puede observar el promedio de temperaturas anuales registradas en la estación Machu Picchu. Siendo el año 2021 con -1.3°C, una de las temperaturas más altas como influencia del cambio climático. Asimismo, en la Figura 2.2 se puede apreciar la evolución de la precipitación anual en la región. En los últimos años se evidenció un incremento considerable, lo cual es un factor importante a considerar ya que muestra cuánto volumen de nieve, agua, granizo o entre otros, ha caído sobre una determinada área en una ventana de tiempo. Usualmente, estas precipitaciones son las que causan bloqueos en los caminos, lluvias, entre otros.

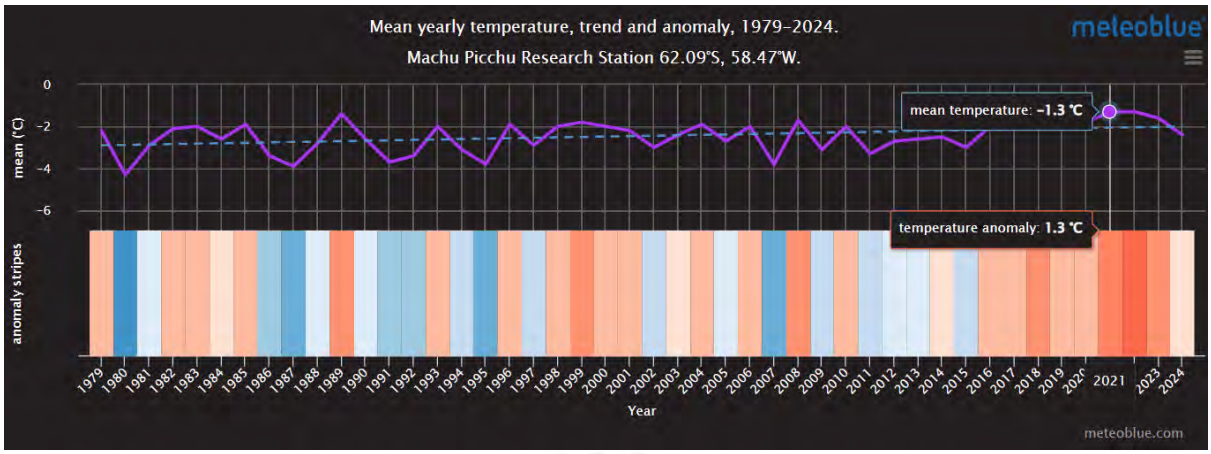


Figura 2. 1 Promedio de temperaturas anuales de la estación Machu Picchu (Tomado de meteoblue, s.f.)

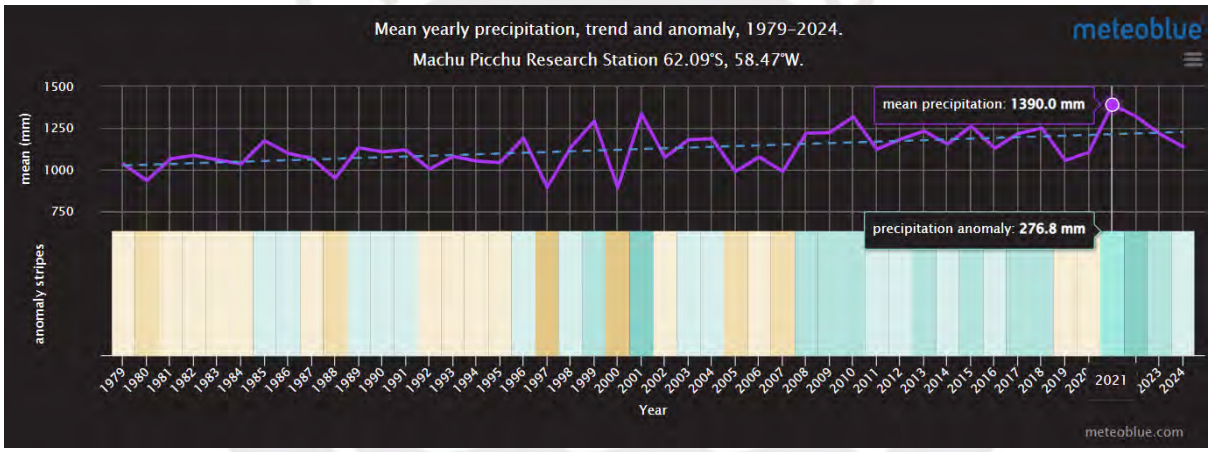


Figura 2. 2 Promedio de las precipitaciones anuales de la estación Machu Picchu en los últimos años (Tomado de meteoblue, s.f.)

Además de eso, según Gravenkötter y Hamman, 2004, los vientos en la Antártida son causados principalmente por aire frío pesado ubicado en la meseta antártica. En el Polo Sur, el aire se mueve lentamente con velocidades máximas de 55 kph, también los movimientos lentos del aire levantan los cristales de nieve seca de la superficie y ocasionan acumulaciones de nieve.

Todas estas características se deben tener en cuenta para realizar el diseño conceptual, dado que el funcionamiento de los componentes trabaja de forma diferente según determinadas temperaturas. Por ejemplo, la duración de las baterías disminuye o algunos metales se vuelven frágiles ante bajas temperaturas.

2.1.2. Medios y métodos de detección de grietas ocultas

Como se mencionó anteriormente, el agrietamiento de las zonas ha aumentado significativamente en los últimos años, lo cual representa un peligro para los investigadores. Más aún, con las grietas ocultas ya que no se pueden observar de forma directa su presencia. Los accidentes (caídas) en las zonas polares frecuentemente están asociados a las fallas de los puentes de nieve que se forman encima de las grietas ocultas (Ravanel L., Lacroix E., Le Meur E., Batoux P., Malet E. ,2022), por lo que es relevante tener más precauciones sobre ellos.

En el pasado, el análisis visual fue el primer método para la detección de grietas. Sin embargo, actualmente existen diversas tecnologías de detección para medir o analizar las superficies, ya sea a través de satélites, vehículos aéreos (drones, helicópteros, entre otros), vehículos terrestres y plataformas estáticas (Linna, 2020).

- **Inspección por medio de imágenes de satélites**: Usan las imágenes de la base de datos de los satélites (muchas veces se actualizan después de meses) para realizar un análisis de las posibles zonas en las que existen grietas. A pesar de que sea un efectivo método de detección de grietas, no se obtiene una información en tiempo real del entorno, por lo cual si alguna grieta no ha sido reportada en los últimos meses podría ocasionar situaciones de riesgo.
- **Inspección por vehículos aéreos**: Helicópteros o aeroplanos equipados con GPR, otorgan un mapeo con mayor alcance del entorno en tiempo real. Sin embargo, se tiene que volar a niveles bajos de altura, lo cual en algunas ocasiones no permite obtener información acerca de algunas estructuras. Estos métodos son muy costosos.
- **Inspección por vehículos terrestres**: Si bien es cierto, con la inspección por vehículos aéreos se puede obtener un mayor alcance del mapeo, los vehículos terrestres equipados

con GPR otorgan una información más detallada del entorno, y tienen un mayor acceso a las zonas accidentadas.

La comparación de los datos obtenidos por las inspecciones por vehículos terrestres o aéreos en tiempo real, ayuda a establecer la precisión que se tiene de los datos otorgados por el satélite. Además, trabajando desde otra perspectiva se puede obtener mayor información creando modelos 3D más precisos.

2.1.3. Sistema de locomoción en superficies polares

Según Lever, Shoop y Bernhard (2009), para una buena movilidad sobre nieve es recomendable tener una baja presión sobre el suelo, además de un sistema de conducción que sea capaz de navegar a través de la nieve húmeda. Para navegar por los suelos polares, que incluyen hielo, tierra y nieve, existen varios tipos de locomoción, ya sea de ruedas, de orugas, patas, hélice de tornillo rotatorio, híbridos, entre otros.

2.1.4. Mecanismos de direccionamiento

Con estos mecanismos, el robot será capaz de cambiar su rumbo, y así poder evadir obstáculos. El direccionamiento del robot, es un factor muy importante a considerar para la locomoción, ya que gracias a ello se puede cambiar la trayectoria del sistema. Dependiendo del tipo de mecanismo de direccionamiento que se utilice, el diseño será de mayor o menor complejidad, así como también se requerirá mayor potencia y tracción para realizar los giros. Entre las configuraciones más usuales se tienen:

- **Direccionamiento deslizante *(Skid steering):***

El direccionamiento de este tipo se va a controlar por un método diferencial, es decir para realizar el giro del sistema ambas ruedas girarán con la misma velocidad, pero en sentido

contrario de tal manera que el robot girará en su propio eje, permitiendo la nueva dirección. En general, es un diseño muy compacto y sencillo de realizar, sin embargo, al ser un terreno resbaloso el giro tiende a que el robot se deslice, lo cual puede provocar algún accidente o un difícil control del robot.

- **Direccionamiento articulado *(Articulated steering):***

La dirección del robot será mediante un vehículo, el cual se divide en 2 partes (delantera y trasera), que gira en torno a un pivote. De tal manera que, la complejidad mecánica es muy baja, sin embargo, para comenzar a cambiar la dirección el torque que requerirá será mucho mayor.

- **Direccionamiento coordinado *(Coordinated steering):***

Se usa un acoplamiento especial para que se pueda sincronizar el giro de todas las ruedas según un mismo centro instantáneo de rotación. Esta configuración, también es conocida como Ackerman y es muy usada a nivel comercial. Si bien es cierto, la geometría es un poco más compleja, ya que se tiene que coordinar los ángulos de las ruedas, se tiene un mejor control a la hora del direccionamiento, así como también se reduce el deslizamiento al girar.

- **Direccionamiento independiente de ruedas *(Independent steering):***

Cada una de las ruedas se puede controlar individualmente ya sea su velocidad o dirección, lo cual permite al robot mayores opciones de movilidad en cualquier terreno. Sin embargo, el control y sincronización de todas las ruedas es más complejo.

Se puede observar en la Figura 2.3 las distintas configuraciones de direccionamiento previamente explicados.

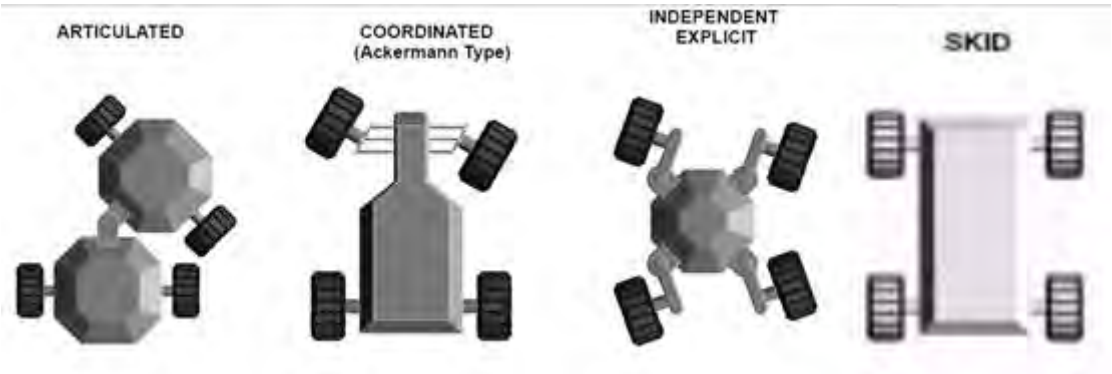


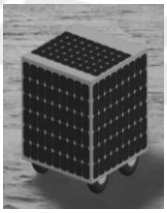
Figura 2. 3 Configuraciones de direccionamiento (Hamman y Gravenkotter, 2004)

2.2. Análisis del estado del arte

2.2.1. Sistemas polares de detección de grietas

A continuación, en la Tabla 2.1 se presentan las características de los distintos sistemas de detección de grietas. Para esto, se tiene en cuenta sus dimensiones, peso, modos de operación, costo, entre otros. La información a detalle sobre los sistemas polares de detección de grietas se encuentra en el anexo B.1.

Tabla 2. 1 Tabla comparativa de robots que identifican grietas

Características	**YETI**	**COOL ROBOT**	**Adaptación ATV**	**CIC ROVER**	**ConceptIce vehicle**
Imagen					
Peso, sin considerar el GPR (Kg)	81	<75	-	85	360
Dimensiones(m)	1.1x.1.1x0.7	1.2x1.2x1.1	-	0.7x0.7x0.6	4.5x4.5

Método de detección grietas	GPR	GPR	GPR	GPR	GPR
Velocidad máx(m/s)	2.2	1	-	0.77	37.55
Modo de operación	Autónomo	Autónomo	Manual/ Autónomo	Autónomo	Manual
Radio de las ruedas (cm)	51	25.4	-	18	-
Fuente energética	Baterías	Energía Solar	Baterías/combustible	Baterías	Bioetanol E-85
Mínima temperatura de trabajo(°C)	-33	-40	-	-23	-
Tiempo de duración (h)	9.3	24	-	12	-
Resistencia por unidad de peso (R/W)	0.08-0.31	0.24	-	0.14	-
Costo ($)	3000	<20000	-	2900	-
Alcance (km)	20	>500	-	20	-
Ventajas	-Diseño compacto y económico. -Tiene un bajo índice de resistencia por unidad de peso, es decir, una alta movilidad.	-Mayor tiempo de operación por trabajar con los paneles solares. -Soporta a bajas temperaturas.	-Cuenta con 2 modos de operación y presenta una buena tracción. -Cuenta con una interfaz fácil de usar para la movilidad del sistema	-Es un diseño compacto y de bajo precio. -Piezas impresas en 3-D, permiten un rápido cambio de repuestos.	Vehículo super ligero, rápido

		-Minimiza el impacto ambiental.			
Desventajas	Alcance limitado y tiempo de duración medianamente alto.	-Precio elevado, dado los componentes que se utilizan. -Potencia ofrecida por los paneles solares no es muy alta. - Limitado a trabajar durante temporadas de verano	-Vehículo pesado, por lo que tiene un mayor riesgo ante caídas. -Representa un alto costo, dado que se tiene que adaptar a una moto comercial.	Alcance limitado	-Detección manual de grietas. -Elevado costo

Nota. Esta tabla presenta las características de los robots que pueden detectar grietas. Elaboración propia.

Tras analizar las ventajas y desventajas que se tiene de cada robot, se puede indicar que a pesar de usar los paneles solares y aprovechar al máximo la energía del sol (lo cual significa que poseen un mayor tiempo de operación), estos tienen un precio elevado que podría representar un problema con el presupuesto. Por lo que, el uso de baterías podría representar una buena alternativa para un tiempo de operación aceptable. Además, un diseño compacto del sistema permite una mejor movilidad en estos tipos de suelos. Finalmente, en la mayoría de casos los sistemas presentan un alcance limitado, esto debido a la fuente energética y a los diferentes componentes que se tienen incorporados.

2.2.2. Sistemas de locomoción en sectores polares

A continuación, en la Tabla 2.2, se presenta una comparación entre los diferentes sistemas de locomoción y métodos de direccionamiento que cuentan los sistemas existentes.

La información a detalle sobre los sistemas de locomoción en sectores polares se encuentra en el anexo B.2.

Tabla 2. 2 Tabla comparativa de sistemas de locomoción.

Características	**ConceptIce vehicle**	**Ski Doo Snowmobile**	**Pistenbully tractor**	**NOMAD**	**ECHO**
Imagen					
Sistema de locomoción	SKIS	SKI/ tracked wheels	tracked wheels	4 ruedas	4 ruedas
Método de direccionamiento	-	Ackerman	skid	skid/Ackerman	skid
Complejidad de diseño	Alta	Media	Baja	Muy alta	Baja

Nota. Tabla comparativa de formas de sistemas de locomoción. Elaboración propia.

Se puede observar que en la mayoría de vehículos diseñados para la nieve, el sistema de locomoción se realiza a través de ruedas u orugas (*Tracked wheels*). Entre las ventajas que se tienen al usar ruedas es su fácil diseño y que presentan menor resistencia a la rodadura en la nieve en comparación con un vehículo tipo oruga. Por lo que, se tiene una mayor velocidad y estabilidad en superficies que no se hunden (Wulfsberg et al., 2000). En cambio, una de las principales ventajas de la locomoción de tipo oruga es su elevada tracción en superficies deformables, además que las orugas permiten redistribuir el peso sobre un área más grande, lo que hace más fácil el traslado de vehículos más pesados.

Además, los métodos más utilizados para el direccionamiento son Ackermann y "*skid steering*". La geometría Ackerman se caracteriza por un mayor control del vehículo para realizar los giros, sin embargo, presenta una mayor complejidad en el diseño que el método de direccionamiento deslizante. En cambio, con un direccionamiento tipo skid los giros son más fáciles de realizar, sin embargo, tienden a deslizar cuando hacen esas maniobras. Además, limita en gran medida a la evasión rápida de obstáculos.

A continuación, en la Tabla 2.3, se muestran los distintos métodos de localización y mapeo que utilizan los sistemas existentes.

Tabla 2. 3 Tabla comparativa sobre método de localización y de mapeo.

Características	**ECHO**	**Robot de uso antártico**	**NOMAD**	**CIC ROVE**
Imagen				
Sensores	LIDAR 3D/cámara	cámaras	LIDAR 2D/Cámaras	cámaras
Método de Localización	GPS	GPS	DGPS	GPS
Método de Mapeo	Nube de Puntos	-	Nube de puntos	Fotogrametría

Nota. Elaboración propia.

En cuanto al método de localización, se puede observar que existen 2 tipos de métodos, por GPS y DGPS. La diferencia entre los 2, radica en que el DGPS o también llamado GPS diferenciales la mejoría en la exactitud de la localización (2 o 3m más preciso, además que el tiempo de localización es unos segundos más rápido). Sin embargo, el método DGPS es más

costoso y para este tipo de entornos no representa una mejora muy drástica (Puertos del Estado, s.f.).

En cuanto al método de mapeo, existen los métodos de las nubes de Puntos y Fotogrametría. Con la nube de puntos se tiene un modelo 3D con una precisión mayor que la creada por la fotogrametría, sin embargo, esta genera un modelo más realista ya que se basa en las fotos que se tienen. Considerando estos entornos, los modelos creados por fotogrametría son más variables (GIM International, 2021), puesto que las fotos que se toman en el entorno son muchas veces afectadas por el reflejo del sol.

2.2.3. Normas

Para el uso de radares de penetración terrestre, más conocido por sus siglas en inglés como GPR (*Ground Penetrating Radar*), se usará la norma ASTM-D6432-11, la cual indica una guía sobre el uso de los GPR, así como también sus procedimientos e interpretación de los resultados.

Para las expediciones peruanas en la Antártida, se debe tener en consideración el Decreto Supremo N.º 014-2014-RE, el cual aprueba la política nacional Antártica para las investigaciones allá, ya que es un escenario internacional en el que se debe profundizar la investigación (DS N.º 016-2002-RE).

Además, se tienen algunas normas ISO para los robots móviles:

- **ISO 9787:2013**: Especifican los sistemas de coordenadas de los robots móviles, así como también brinda la nomenclatura para nombrar a los componentes de forma universal.
- **ISO 18646-1:2016**: Especifican y explican los criterios que se tienen respecto a los sistemas de locomoción para vehículos móviles.

- **ISO 19649:2017**: Define el vocabulario acerca de los robots móviles, por ejemplo, locomoción, movilidad, entre otros

Existe un protocolo llamado “Protocolo al Tratado Antártico sobre Protección del Medio Ambiente” (también conocido como Protocolo de Madrid) que se creó ante la necesidad de la protección del medio ambiente. En este protocolo, se contempla las normas y prohibiciones que se deben cumplir para las actividades humanas, así como también señala que la Antártida “reserva natural consagrada a la paz y a la ciencia” (art. 2).

Finalmente, para el presente proyecto el sistema contará con un radar de penetración terrestre para la identificación de grietas siguiendo los protocolos establecidos en la norma ASTM-D6432-11. Asimismo, se seguirán las normas ISO para el diseño de los vehículos móviles y se cumplirá con el protocolo de Madrid, en el cual se instauran las normas para las actividades humanas en dicho continente.

2.2.4. Idea del producto

Después de evaluar y comparar los distintos sistemas que existen en el mercado, se propone diseñar un sistema mecatrónico autónomo enfocado en las tareas de mapeo del entorno de la zona de trabajo y el monitoreo de grietas ocultas en el subsuelo en tiempo real, dada las condiciones extremas de operación en la Antártida. Las potenciales características del sistema son:

- Sistema liviano (no mayor a 100 kg).
- Operaciones a temperaturas bajas (>-10°C).
- Dimensiones menores a 1.3mx1.0mx0.8m (largo x ancho x altura).
- Velocidad máxima (1 m/s).
- Interfaz intuitiva para la comunicación con el usuario.

- Costos de fabricación menores a $20000.

Asimismo, este producto seguirá las normas y estándares necesarios para su diseño.

2.3. Determinación de los requisitos del proyecto

En esta sección se presenta una lista de requisitos de usuario, en base a las necesidades del usuario y características generales abstraídas del análisis del estado del arte. Con esta lista, se plantean los requisitos de diseño y se realiza un análisis según la importancia y similitud entre cada uno de ellos. Entre los requisitos del proyecto más importantes se encuentran:

- Sistema Robusto ante climas extremos (>-10°C)
- Buena Maniobrabilidad del sistema
- Sistema Teleoperado Remotamente
- Sistema de locomoción para la movilidad adaptado al entorno
- Sistema que permite el mapeo del entorno de trabajo
- Sistema que permite el monitoreo de grietas

Para mayor detalle sobre la clasificación y análisis de los requisitos de usuario/diseño, revisar el Anexo C.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO CONCEPTUAL

3.1. Descomposición funcional y síntesis de medios

Es el método que permite identificar las funciones y medios a partir de la idea del producto. Consiste en desagregar por niveles la función global del sistema en subfunciones, con el objetivo final de obtener los medios que vendrían a ser los componentes físicos o tipo de tecnología que se usará en el sistema. El árbol de funciones elaborado se encuentra en el Anexo D.1, asimismo en el Anexo D.2 se detalla la descomposición funcional por niveles del sistema planteado. A continuación, se muestra en la Tabla 3.1 un resumen de la lista de los tipos de tecnología que se usará, los cuales fueron obtenidos tras la descomposición de funciones y síntesis de medios realizada, separadas de acuerdo al sistema al cual pertenecen.

Tabla 3. 1 Tabla de asignación de subsistemas

Sistema de energía/materia (E/MS)	Baterías de iones de litio Terminal Blocks Caja de Pasos con empaquetadura Conectores Industriales Herméticos Geometría Ackerman Suspensión "*Double Wishbone*" 6 ruedas Acople directo Relé electromecánico
Sistema de Actuación (AS)	Motor Brushless
Sistema de Medición (MS)	Encoder magnético IMU GPS Lidar 3D Cámara GPR
Sistema de Información (IS)	Microcontrolador Módulo con GPU

Interfaz de entrada (In)	Control + computadora+ botones Botón de emergencia
Interfaz de salida (Out)	Pantalla LED

Nota. Elaboración propia.

Esta lista es el resultado de una evaluación entre las diferentes soluciones tentativas que se planteó para cumplir con el objetivo principal, esto en base a los requisitos de diseño planteados previamente (teniendo en cuenta la parte técnica y económica). En el Anexo D.2, se detalla más la selección de estos medios.

3.2. Síntesis de Estructura y Comportamiento General

En esta sección se presentan las arquitecturas del diseño mecatrónico y el diagrama de bloques del comportamiento general del sistema. Asimismo, en el Anexo D.3/D.4 se presenta más información sobre la eléctrico/electrónico y los bosquejos preliminares del sistema correspondientes.

3.2.1. Arquitectura del diseño mecatrónico general

En la Figura 3.1, se puede apreciar la arquitectura del diseño mecatrónico general en la cual están todas las conexiones entre los medios. A continuación, se explica cómo es el funcionamiento general del sistema en base a cada subsistema.

El sistema recibe como entradas la energía eléctrica para energizar a las baterías, la información del entorno para adquirir datos por medio de los sensores, así como también las señales de la pantalla de la computadora y/o botones del mando de control.

El usuario debe pulsar el botón on/off, el cual energiza el sistema, además de encender el control de mando para que el robot móvil esté listo para operar, este proceso es indicado a

través del encendido y apagado de un led verde. Una vez encendido, el sistema de información que está conformado por un microcontrolador y un módulo con GPU procesa los comandos emitidos por el mando de control y la data que se obtiene de los sensores para ir modelando el mapa (módulo con GPU) y accionar los motores Brushless DC (microcontrolador). Estos motores son acoplados directamente a las ruedas junto a los mecanismos de suspensión y geometría Ackermann (ruedas delanteras y posteriores) para generar el movimiento. Los encoders sensan este movimiento para determinar la posición y velocidad del vehículo y enviar esta información al sistema de información como una retroalimentación.

Si ocurre algún imprevisto, el sistema se puede parar de dos maneras, la primera desde el mando de control, y la segunda desde el propio vehículo, pulsando el botón de emergencia, el cual interrumpe el paso de la corriente de manera directa.

Finalmente, las salidas del sistema son los leds que sirven para la iluminación, otro led que indica el estado del sistema, la data obtenida mostrada a través de la pantalla de la computadora y el movimiento del vehículo.

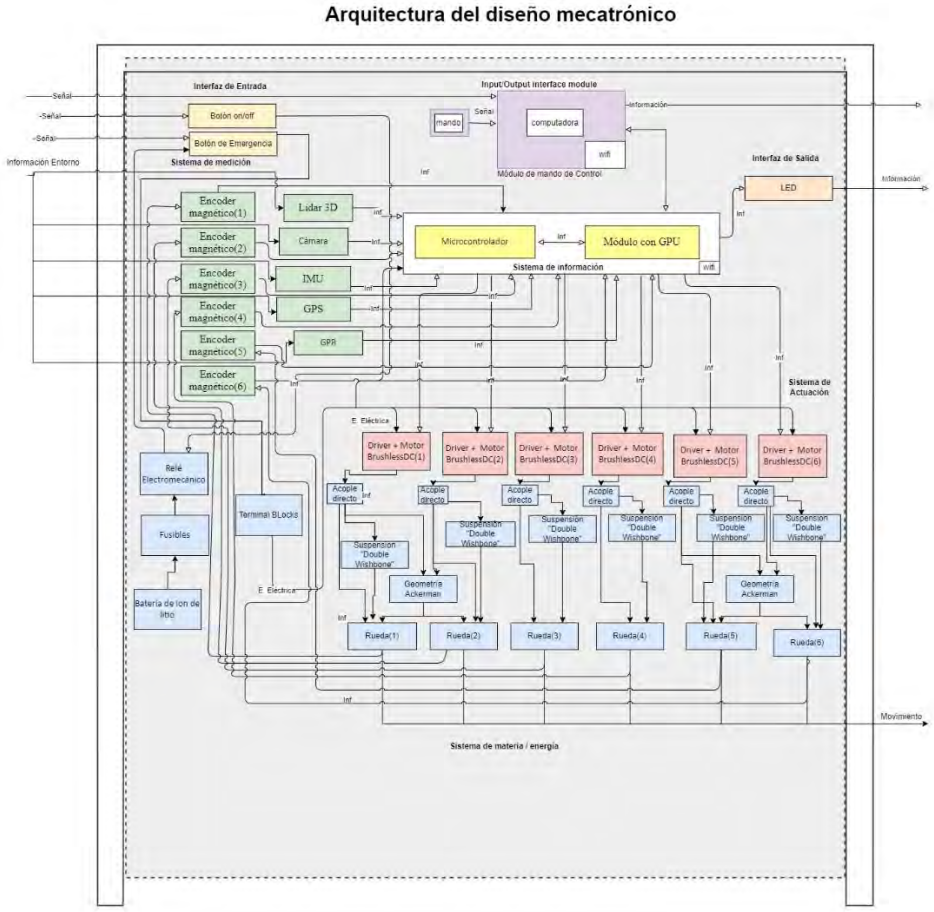


Figura 3. 1 *Arquitectura del diseño mecatrónico (Elaboración propia*)

3.2.3. Diagrama de bloques del Comportamiento General

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de comportamiento del sistema en general. Para comenzar la operación se debe encender el vehículo, mientras se está encendiendo el vehículo se inicializan los componentes. Luego, se interactúa con el mando de control para poder conectarse con el sistema y seleccionar el modo en que se quiere operar, observar la data que se recopila, entre otros. Si hay una conexión establecida con el mando de control, se emitirá una luz verde por medio de un led, caso contrario el led estará apagado. Posteriormente, el robot va a operar de forma teleoperada y se detendrá si se detecta una señal de parada, caso contrario seguirá su funcionamiento.

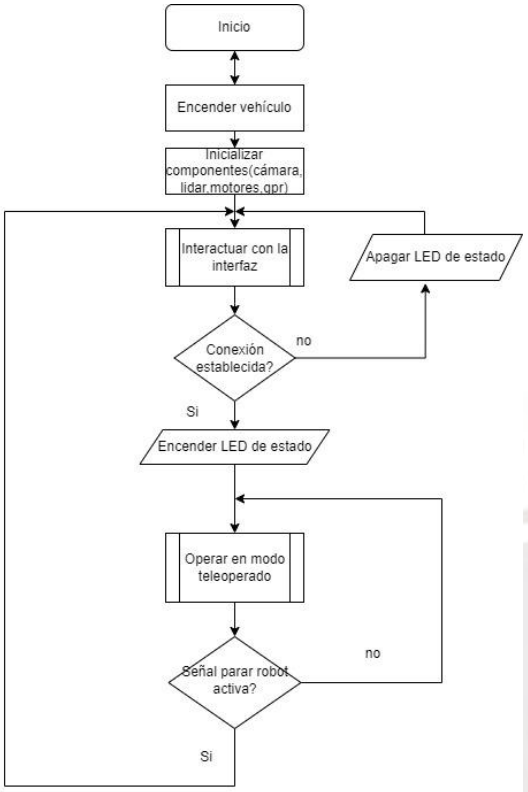


Figura 3. 2 Diagrama de Comportamiento General del Sistema (Elaboración Propia)

Figura 3. 3 Diagrama de bloques de modo teleoperado (Elaboración Propia)

Como se puede apreciar en la Figura 3.3, la función operar en modo teleoperado consiste en recibir las señales de la interfaz y comenzar el movimiento según los comandos recibidos, simultáneamente el sistema estará recopilando los datos del entorno.

Con los datos recopilados del entorno se realizará la reconstrucción 3D y monitoreo de grietas, estas gráficas serán visualizadas en la interfaz con el usuario.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

En este capítulo se detallará los cálculos y el diseño de todo el sistema mecatrónico previamente conceptualizado. Para esto se ha dividido todo el sistema en 3 subsistemas, los cuales están orientados en los objetivos principales que se debe cumplir.

4.1. Modelo Integrado del Sistema

En esta sección se presenta una visión general del sistema mecatrónico propuesto, mediante el modelado 3D y un diagrama de conexiones, los cuales permiten observar cómo interactúan todos los componentes entre sí. De igual manera, se profundizará en el diseño de cada subsistema en las secciones siguientes.

4.1.1. Modelo 3D del sistema ensamblado

En la Figura 4.1, se muestra el modelo 3D ensamblado para mostrar los detalles del diseño. En este se aprecia la división del sistema por módulos (monitoreo, reconstrucción, desplazamiento), lo cual permite una mejor comunicación entre los componentes, un mantenimiento sencillo y un fácil transporte.

Figura 4. 1 Modelo 3D ensamblado (Elaboración Propia)

4.1.2. Diagrama general de conexiones

Tras haber seleccionado todos los componentes a utilizar (explicado a más detalle en las siguientes secciones), se realiza un diagrama general de conexiones para detallar cómo están conectados los subsistemas entre sí en su integración (ver Figura 4.2). Se puede apreciar la etapa de potencia, en la cual la batería de 48V suministra la energía a utilizar, seguido de un relé para energizar/desenergizar todo el sistema activado mediante un botón. Asimismo, se cuenta con un botón de emergencia para cortar toda la energía ante cualquier imprevisto.

A partir de la fuente, se energiza los componentes de acuerdo a su voltaje de operación, por lo cual se emplean reguladores con el fin de bajar el voltaje que se tiene. Finalmente, se muestra las conexiones entre los sistemas de monitoreo y teleoperación remota, los cuales se detallan posteriormente.

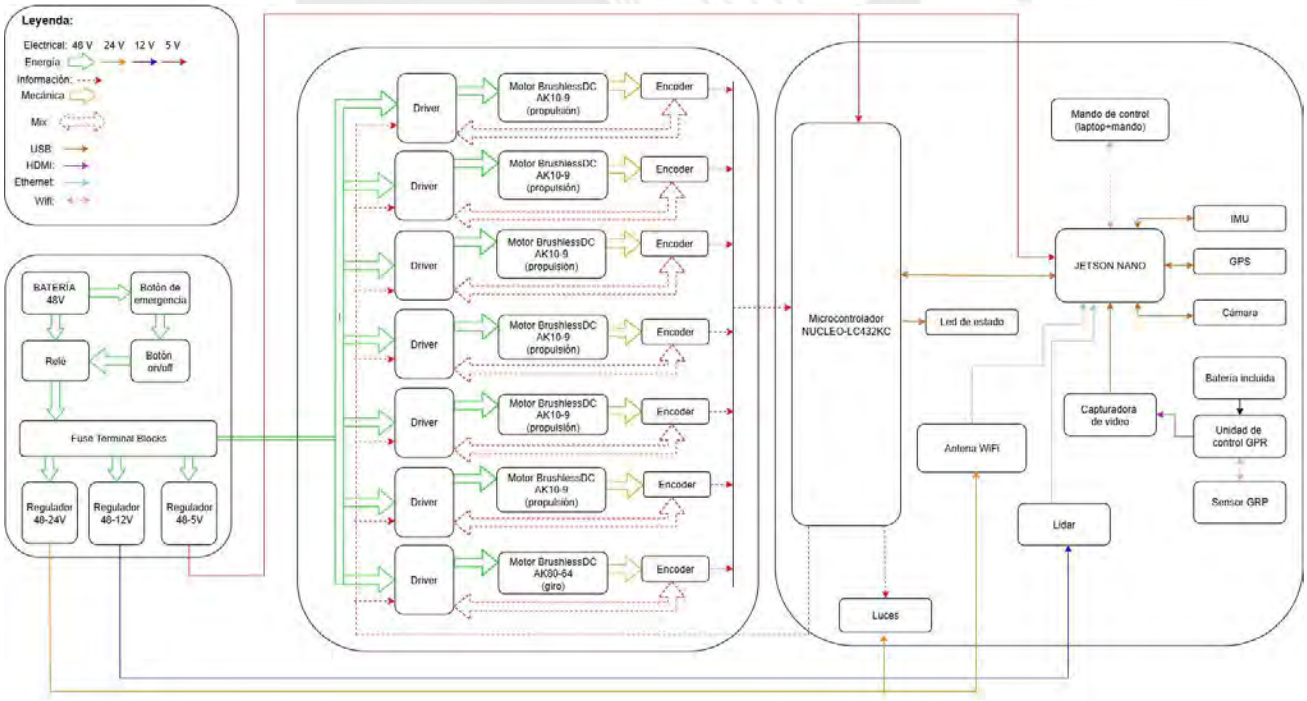


Figura 4. 2 Diagrama de bloques general de conexiones (Elaboración Propia)

4.2. Subsistema de desplazamiento orientado a un entorno antártico

Este subsistema es el encargado de permitir el movimiento del vehículo de un lugar a otro, con la finalidad de facilitar el diseño de este subsistema se ha descompuesto en 4 módulos fundamentales, los cuales son: la propulsión, la suspensión, la estructura y el mecanismo de direccionamiento. A continuación, se detalla cada uno de ellos.

4.2.1. Propulsión del vehículo

El diseño propuesto cuenta con tracción independiente en las 6 ruedas del vehículo, es decir, cada rueda tiene su propio motor. Esto va a permitir tener una mayor tracción, lo cual ayuda a garantizar su movilidad en terrenos hostiles, como es el caso de la Antártida. Para seleccionar el motor más adecuado, seleccionar el tipo de ruedas y realizar el diseño de este módulo, es importante tener en consideración diversos factores, tales como el tipo de suelo, la velocidad promedio con la que operará el vehículo, el peso del vehículo, entre otros.

Selección de ruedas:

Como se mencionó previamente, se utilizará las ruedas tipo invierno dada la consideración que el vehículo se movilizará por tierra, hielo y nieve. En base a diseños pasados se asume que el tamaño de la rueda sea aproximadamente de 14” con un ancho de 5” en una llanta de 6” o 7”. Por lo cual, se busca diferentes opciones de ruedas en el mercado con esas dimensiones para seleccionar algo comercial. Cabe recalcar, que este proceso de diseño es iterativo, es decir, esta asunción de dimensiones puede cambiar en caso sea necesario.

A continuación, en la Tabla 4.1, se presenta una comparación entre las diferentes ruedas comerciales de diámetro 6” para nieve.

Tabla 4. 1 Tabla de selección de ruedas

Nombre	**Carlisle Snow Hog ATV Tire 15 x 5-6 Rear Bias Tubeless**	**Carlisle Snow Hog – 4.10-6**	**TMQWAG 13x5-6**
Imagen de referencia			
Diámetro Exterior (”)	15	12.8	13
Diámetro del Aro (”)	6	6	6
Ancho (”)	5	4.1	5
Peso (Kg)	2.2	1.5	3
Carga nominal (Kg)	186	132	-
Presión máxima (PSI)	20	24	-
Cámara de aire	No	Si	Si
Diseño	ATV	Vehículos de jardín	ATV, GoKarts
Costo ($)	53	45	52

Nota. Elaboración propia

Se puede observar en la Tabla 4.1 que en la mayoría de especificaciones, las 3 opciones de ruedas son similares. Las principales diferencias entre estas son: la carga, la presencia de cámara de aire y las aplicaciones de su diseño. Las ruedas ***Carlisle Snow Hog ATV 15x5-6”*** presentan una mayor carga nominal, lo que significa que pueden soportar una mayor cantidad de peso y evitar el desgaste de las ruedas. Además, estas ruedas no presentan cámara de aire a diferencia de las otras 2 opciones; esto les da una mayor resistencia y un menor riesgo a pinchazos ya que cuenta con una capa de protección en la cubierta, la cual se rellena con

sellador líquido que ante algún pinchazo se selle por sí solos (Teoricodgt, 2021). En cuanto a lo económico, las ruedas ***Carlisle Snow Hog – 4.10-6*** son más económicas que las otras opciones. Mientras que, en sus aplicaciones, las ruedas ***Carlisle Snow Hog ATV 15x5-6" y TMQWAG 13x5-6*** fueron diseñadas específicamente para vehículos todo terreno operando en condiciones de nieve y hielo, mientras que las ***Carlisle Snow Hog – 4.10-6*** fueron diseñadas para vehículos de jardín, como por ejemplo cortadoras de césped o quitanieves.

Después de analizar las diferentes opciones de ruedas, se selecciona las ruedas ***Carlisle Snow Hog ATV 15x5-6"*** por su capacidad de carga y su similar aplicación. Dado que ya se tiene las dimensiones de la rueda comercial que se usará (altura, ancho, diámetro), se realizan los cálculos necesarios a fin de seleccionar el motor adecuado para la tracción del vehículo.

Cálculos del torque de carga

Con el fin de seleccionar el motor adecuado para la tracción del vehículo, se necesita saber el torque de carga inicial que debe ser entregada a cada rueda. Para este primer cálculo, se asume que el vehículo pesa 85kg (incluido la unidad de control para el sensor de suelo) y lleva una carga extra de 9kg (para la antena del sensor de suelo). A continuación, se calcula las fuerzas que el motor tiene que vencer para comenzar el movimiento.

- **Resistencia a la Rodadura y a la compactación de la nieve**

  Según Gravenkötter y Hamman (2000), en su libro "*Development of a Cool Robot for the Antarctica*", basado en las pruebas realizadas que se hicieron en el CRREL (*Cold Regions Research and Engineering Laboratory*), el coeficiente de resistencia a la rodadura y a la compactación de la nieve es 0.2. Por lo que, esta fuerza de resistencia para todo el vehículo sería:

$$F_r = C_{rr} * W = 0.2 * 9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * 94(kg) = 184.43\ [N] \ldots (1.1)$$

Y para cada rueda,

$$F_{w1} = \frac{F_r}{6} = 30.74\ [N] \ldots (1.2)$$

Entonces, el torque de carga sería:

$$\tau_{rc} = F_{w1} * \frac{D}{2} = 30.74N * \frac{381}{2}(mm) = 5.86\ [Nm] \ldots (1.3)$$

- **Resistencia a la excavación**

  En estudios pasados sobre vehículos ligeros (<100kg), el hundimiento promedio en la zona es de aproximadamente 1.3cm (Bekker, 1962). En este caso, al ser un vehículo de 6 ruedas en lugar de 4, se distribuirá mejor el peso ejerciendo menos presión sobre el suelo. Entonces, se puede asumir que el hundimiento será menor a lo usual y dado que este valor representa aproximadamente un 3% del diámetro total de la rueda, se puede despreciar en el cáculo de fuerzas (Ishigami et al., 2007).

- **Resistencia de escalada**

  Se asume que el terreno no será completamente uniforme, ya que pueden existir ciertas acumulaciones de nieve, en la cuales el vehículo tendrá que inclinarse y atravesarlas. Estas elevaciones no superan los 10° como máximo, por lo que la resistencia de escalada sería:

$$F_{re} = W * sen(\theta) = 9.81\left(\frac{m}{s^2}\right) * 94(kg) * sen(10°) = 160.13N \ldots (2.1)$$

Y para cada rueda,

$$F_{w2} = F_{re}/6 = 26.69N \ldots (2.2)$$

Entonces, el torque de carga sería:

$$\tau_{re} = F_{w2} * \frac{D}{2} = 26.69N * \frac{381}{2}(mm) = 5.08\ [Nm] \ldots (2.3)$$

Nota: Dado que se está asumiendo que el vehículo estaría sobre una pendiente de 10° para realizar los cálculos, la fuerza para determinar la resistencia a la rodadura sería W*cos(θ) (porque esa es la fuerza

perpendicular al suelo). Sin embargo, se suele usar el peso completo para no sobreestimar la fuerza resistiva.

- **Resistencia aerodinámica**

  La resistencia aerodinámica depende de la velocidad del aire relativa al carro (v), la densidad del medio (ρ), el área efectiva del objeto (A) y el coeficiente de arrastre (Cd). Según Meteoblue, en los últimos veranos la velocidad promedio del aire en la zona de trabajo ha sido 20mph (8.94 m/s) y considerando que el vehículo opera a bajas velocidades (1 m/s), la fuerza de resistencia sería la siguiente:

$$\boldsymbol{F_D = C_d * A * \rho * \frac{v^2}{2} = 1.05 * 1.02 * 1.29 * \frac{(8.94 - 1)^2}{2} = 87.31\ [Nm]} \ldots \boldsymbol{(2.4)}$$

  Y para cada rueda,

$$F_{w3} = \frac{F_D}{6} = 14.55\ [N] \ldots (2.5)$$

Entonces, el torque de carga sería:

$$\tau_d = F_{w3} * \frac{D}{2} = 18.45N * \frac{381}{2}(mm) = 2.77\ [Nm] \ldots (2.6)$$

- **Arrastre Inercial**

  Se tendrá el arrastre inercial por efecto de la aceleración en el inicio del movimiento (cuando el vehículo comience a acelerar). Para esto, se asume que el vehículo llega a 1m/s en 0.5s.

  Por lo que la aceleración tangencial sería,

$$a_t = \frac{v}{t} = \frac{1\left(\frac{m}{s}\right)}{0.5(s)} = 2\ \left[\frac{m}{s^2}\right] \ldots (3.1)$$

$$\alpha = \frac{a_t}{R} = \frac{2(\frac{m}{s^2})}{\frac{381}{2}(mm)} = 10.5\ \left[\frac{rad}{s^2}\right] \ldots (3.2)$$

Finalmente, con la aceleración angular calculada se puede determinar cuánto sería el torque.

$$I_w = \frac{1}{2} * 2.2(\text{kg}) * \left(\left(\frac{381}{2}(mm)\right)^2 + \left(\frac{152.4}{2}(mm)\right)^2\right) = 0.046[kg * m^2] \dots (3.4)$$

$$\tau_{\text{ai}} = I_w * \alpha = 0.046 * 10.5 \left[\frac{rad}{s^2}\right] = 0.49\ [Nm] \dots (3.3)$$

Finalmente, el torque total sería la suma de los torques en cada caso y adicionalmente se considera un factor de seguridad de 1.2 por.

$$\tau = \tau_{\text{ai}} + \tau_{\text{re}} + \tau_{\text{rc}} + \tau_{\text{d}} = 14.2[Nm] \dots (4)$$

$$\tau_{\text{total}} = \tau * \text{FS} = 14.2 * 1.2 = 17.04\ [\text{Nm}] \dots (5)$$

Cálculo de la velocidad de carga

Además del torque inicial de carga, se debe saber cuál será la velocidad requerida para realizar la selección del motor. Esta velocidad puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$\omega = 19100 * \frac{v}{D} = 19100 * \frac{1\left(\frac{m}{s}\right)}{381(mm)} = 50.13\ [rpm] \dots (6.1)$$

Se puede aproximar a 55rpm, por lo cual la potencia requerida sería:

$$\text{P} = \omega * \tau = 55(rpm) * 17.14(Nm) = 98.7[W] \dots (6.2)$$

Selección del motor de propulsión

A continuación, en la Tabla 4.2, se presenta una comparación entre los diferentes motores comerciales de acuerdo a los requerimientos solicitados.

Tabla 4. 2 Tabla de selección de motores

Modelo	AK10-9 V2.0	AK80-64	RMD-X10S2V3	Requerimientos
Imagen Referencial				
Dimensiones	98x98x61.7	98x98x61.9	150x150x80	<152x152x127
Voltaje (VDC)	24/48	24/48	24/48	48
Corriente nominal(A)	10.6	7	6.7	-
Torque nominal (Nm)	18	48	50	17
RPM	109/228	23/48	50	55
Radio de Reducción	9:1	64:1	35:1	-
Peso (Kg)	0.96	0.85	2	<2.5kg
Costo ($)	698.9	889.90	700	-

Nota. Elaboración propia

Se puede observar que el motor RMD-X10S2V3 a pesar de cumplir con los requisitos técnicos calculados (torque, velocidad), presenta dimensiones muy cercanas a las de la rueda seleccionada previamente, lo que dificultaría su acople. Asimismo, se puede apreciar que el torque nominal del motor AK10-9 V2.0 es menor que las otras opciones, sin embargo, el torque requerido es de 17 Nm, por lo cual estaría operando para las condiciones que fue diseñado. Además, el motor AK10-9 V2.0 es el más económico entre todos. En cuanto al peso y a las dimensiones, este motor puede ir acoplado dentro de la rueda para que sea más compacta y se

tenga un mejor diseño de la suspensión (se explicará más adelante). Tras analizar todas estas características, se selecciona el motor AK10-9 V2.0 para la propulsión del vehículo.

Cabe recalcar que, dada las condiciones del entorno, el motor debe estar protegido ante agua y nieve. Por lo cual, se debe diseñar un encapsulamiento para este facilitando también su acople dentro de la rueda.

Encapsulado del motor

En la Figura 4.3, se puede observar el cad3D del motor AK10-9 V2.0. Dado el modelo 3D, se puede obtener sus dimensiones y diseñar el encapsulamiento del motor.

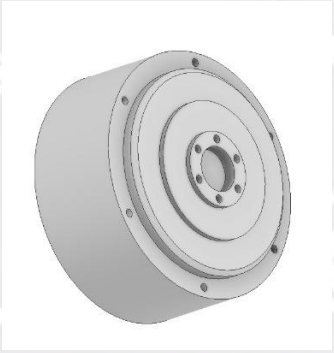


Figura 4. 3 Motor AK10-9 V2.0 (Tomado de https://www.cubemars.com/product/ak10-9-v2-0-kv60-robotic-actuator.html)

El diseño se divide en 3 acoples, el primero es el acople del motor con la rueda, el cual va a permitir su transmisión. El segundo es el acople del motor con la base, permite la sujeción del motor con la tapa. Y el tercero es el acople del motor con la parte electrónica, el cual permite la unión del acople del motor con la parte electrónica del sistema mecatrónico. Finalmente, en la Figura 4.4 y la Figura 4.5, se puede apreciar el motor con su encapsulado. En el ensamble de estos acoples también se consideró el uso de sellos, los cuales impedirán el paso de agua y nieve dentro del ensamble.

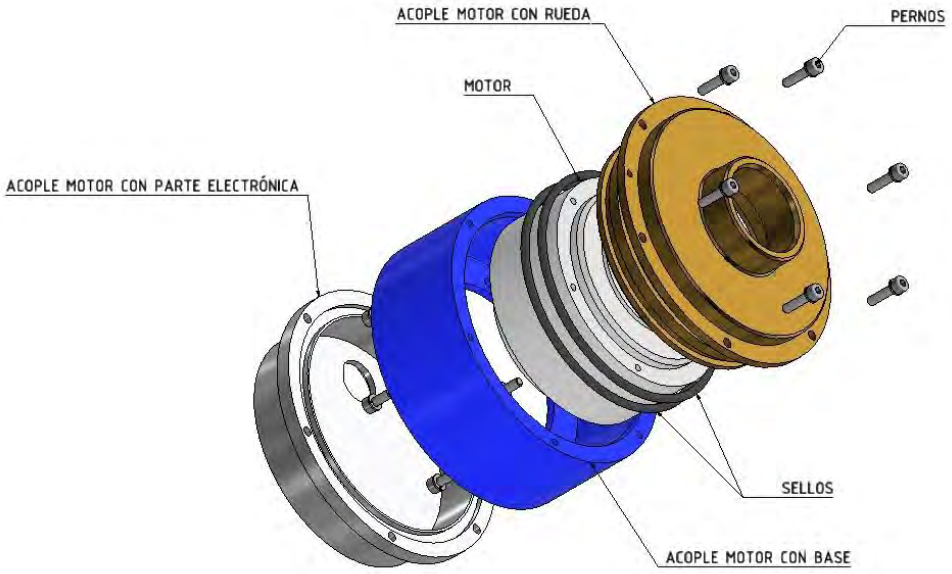


Figura 4. 4 Vista seccionada del acople del motor con el motor (Elaboración Propia)

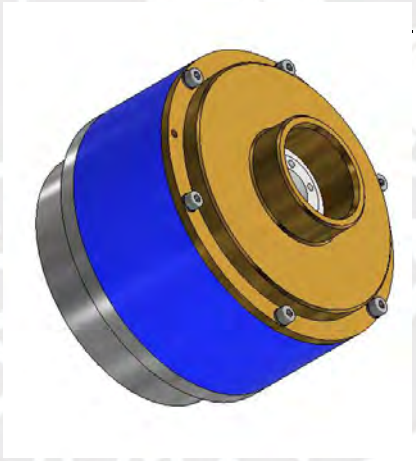


Figura 4. 5 Vista del acople del motor con el motor (Elaboración Propia)

4.2.2. Suspensión del vehículo

Acople del encapsulado con la rueda

Se realiza un acople para la unión del encapsulado con la rueda, de tal manera que el motor quede dentro de la llanta aproximadamente en la mitad. Al introducir el motor en la llanta se reduce la distancia que existe entre la llanta y el chasis, lo cual permite que el sistema sea más compacto. En la Figura 4.6 se puede apreciar la vista seccionada del acople del

encapsulado con la rueda. Se considera pernos para la sujeción y sellos para la hermeticidad del sistema.

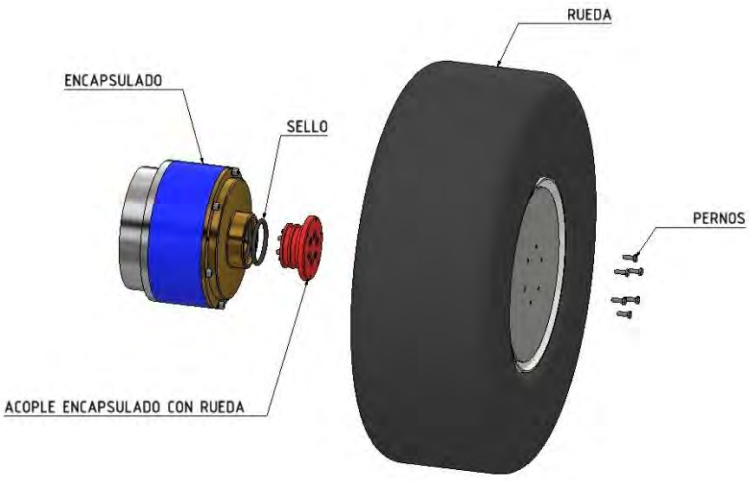


Figura 4. 6 Acople encapsulado con rueda (Elaboración Propia)

Diseño

Los wishbones serán diseñados a partir de tubos circulares de AISI 316. Para el brazo inferior las dimensiones son de 50x1.5 mm (5/8" con grosor de 1.5mm) soldados entre sí, ver Figura 4.7. Mientras que, para el brazo superior, se compone de tubos circulares con medidas de 100x1.5 mm (5/8" con grosor de 1.5 mm), ver Figura 4.8.

Figura 4. 7 Modelado brazo inferior (Elaboración Propia)

Figura 4. 8 Modelado brazo superior (Elaboración Propia)

Dado que las dimensiones de los brazos se asumieron, esto se tiene que verificar con un análisis de esfuerzos dinámico y estático. Para esta verificación se analiza el caso más crítico que pueda suceder, esto ocurre cuando el vehículo está girando y choca contra algún obstáculo. Se asume que el obstáculo con el cual chocará pesa 15 kg y la fuerza producida actuará en el eje central de la rueda con una inclinación de 45° (ver Figura 4.9), la velocidad del vehículo antes del choque es de 1m/s y la velocidad después es de -0.2m/s, este choque dura 0.1s. Además, el vehículo estará girando para la derecha y se analizará solo la rueda frontal derecha, de tal manera los wishbones estarían actuando a compresión en lugar que a tracción. A continuación, se muestra el DCL de la rueda conectada con el Kingpin (unión entre la rueda y los brazos superior e inferior), el DCL del brazo superior e inferior.

ACCIÓN DE LA FUERZA DEL CHOQUE

Como se mencionó anteriormente, se asume que la fuerza producida por el choque estará actuando con una inclinación de 45°, la cual se descompondrá en Fx y Fz.

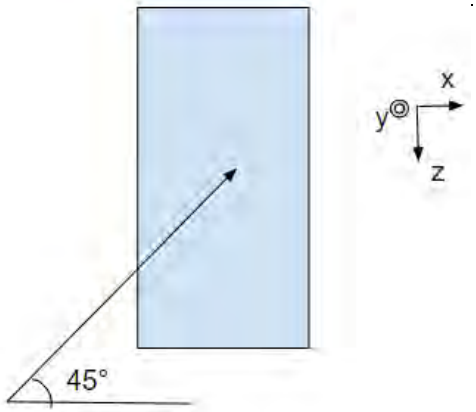


Figura 4. 9 Fuerza de choque con el carro (Elaboración Propia)

Esta fuerza producida por el choque, se calculará con la siguiente fórmula;

$$F = m_o a = m_o \frac{\Delta v}{\Delta t} = 15 * \frac{1.2}{0.1} = 180\ [N] \ldots (7.1)$$

Además, dado que se asume que el vehículo está girando para la derecha y se está analizando la rueda delantera de la derecha, existe una fuerza centrípeta para afuera, la cual se calcula de la siguiente manera.

$$F_c = \frac{mv^2}{\rho} = (\frac{94}{6}) * \frac{1^2}{1340} = 11.69\ [N]\ \ldots (7.2)$$

DCL RUEDA CONECTADA CON KINGPIN

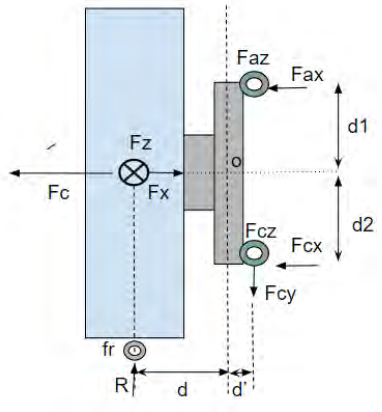


Figura 4. 10 DCL de la rueda conectada con Kingpin (Elaboración Propia)

Ecuaciones a partir del diagrama de cuerpo libre, ver Figura 4.10:

$$\sum F_{\ EJE\ Z} = 0\colon\ F_{az} + F_{cz} + fr = F_{zchoq}, siendo\ fr = W * C_{rr} \ldots (8.1)$$

$$\sum M_{EJE\ X\ } = 0\colon -fr * \frac{D}{2} + F_{AZ} * d_1\ -\ F_{CZ} d_2 = 0 \ldots (8.2)$$

$$\sum Mo_{EJE\ z\ } = 0\colon -R * d - F_{cy} * d' + F_{ax} * d_1 = F_{cx} d_2 \ldots (8.3)$$

$$\sum F_X = 0\colon F_{ax} + F_{CX} - F_{Xchoq} = F_c \ldots (8.4)$$

$$\sum F_y = 0\colon F_{cy} = \mathrm{R}, \text{siendo R} = \frac{\mathrm{W}}{6} \ldots (8.5)$$

Siendo,

R=Reacción normal del suelo [N]

Fa= Reacción entre el Wishbone superior y el Kingpin. [N]

Fc=Reacción entre el Wishbone inferior y el Kingpin. [N]

Fr=Fuerza de fricción [N]

W= Peso [N]

Considerando los valores, d=96.5mm, d'=50mm, d1=95.92mm, d2=52.26mm, m=94kg. Y, tras resolver el sistema de ecuaciones, se obtienen los siguientes valores:

$$F_a(x,z) = (200.8,34.06)\ N\ y\ F_c(x,y,z) = (-61.83,153.53,62.51)\ N$$

DCL BRAZO SUPERIOR

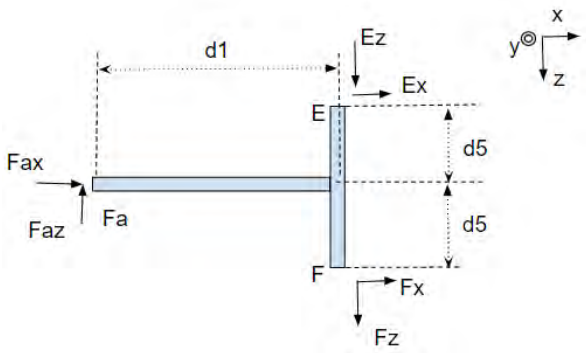


Figura 4. 11 DCL brazo superior (Elaboración Propia)

Ecuaciones a partir del diagrama de cuerpo libre, ver Figura 4.11:

$$\sum F_x = 0 : F_{ax} + E_x + F_x = 0$$

$$\sum F_z = 0 : E_z = F_z = \frac{F_{az}}{2}$$

$$\sum M_F = 0 : F_{az} * d1 + F_{ax} * d_5 + E_x(2 * d_5) = 0$$

Siendo,

Fa= Reacción entre el Wishbone superior y el Kingpin. [N]

F=Reacción entre el Wishbone superior y el apoyo del vehículo [N]

E= Reacción entre el Wishbone superior y el apoyo del vehículo [N]

Considerando los valores, d1=126 mm, d5=50 mm. Y, tras resolver el sistema de ecuaciones, se obtienen los siguientes valores:

$$E(x,z) = (-143.32,17.03)\ N\ y\ F(x,z) = (-57.49,17.03)\ N$$

DCL BRAZO INFERIOR

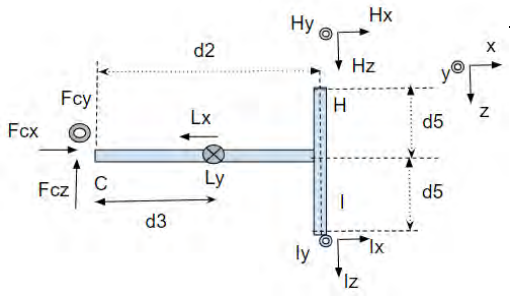


Figura 4. 12 DCL brazo inferior (Elaboración Propia)

Ecuaciones a partir del diagrama de cuerpo libre, ver Figura 4.12:

$$\sum F_X = 0: F_{cx} + H_x + I_x = L_x$$

$$\sum F_Y = 0: F_{cy} + H_y + I_y = L_y$$

$$\sum F_z = 0: \frac{F_{cz}}{2} = \mathrm{I_z} = H_Z$$

$$\sum \mathrm{M_I}^y = 0: \mathrm{F_{cz} * d2 + F_{cx} * d5 + H_x * (2d5) = L_x * d5}$$

$$\sum \mathrm{M_H}^x = 0: -\mathrm{I_y * 2 * d5 + L_y * (d5) - F_{cy} * d5 = 0}$$

Adicionalmente se tienen unas ecuaciones para calcular la fuerza del resorte, la cual es acoplada al wishbone inferior. Como se puede apreciar en la Figura 4.13, Fs es la fuerza del resorte, la cual tiene una inclinación θ y es calculada en base al peso que soporta cada rueda (considerando una distribución uniforme), y al ratio de instalación (IR), el cual se asume.

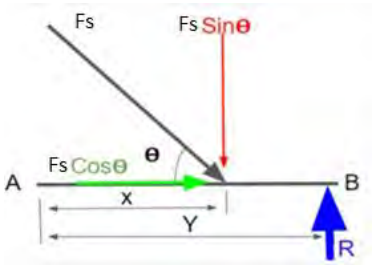


Figura 4. 13 DCL de la instalación de una suspensión (Tomado de https://www.extrica.com/article/21436)

$$L_y = \mathrm{F_s} * \mathrm{sen}(\theta)$$

$$L_x = F_s * \cos(\theta)$$

$$F_s = \frac{\frac{W}{6}}{IR * sen(\theta)}$$

Siendo,

Fs=Fuerza del resorte [N]

Fc=Reacción entre el Wishbone inferior y el Kingpin [N]

H= Reacción entre el Wishbone inferior y el apoyo del vehículo [N]

I= Reacción entre el Wishbone inferior y el apoyo del vehículo [N]

Considerando los valores, θ =85°, d2=176 mm, d3=120.52mm, d5=50 mm, IR=0.32. Y, tras resolver el sistema de ecuaciones, se obtienen los siguientes valores:

$$H(x,y,z) = (-57.8,166.74,31.26)\ N\ y\ I(x,y,z) = (162.24,166.74,31.25)\ N$$

$$Fs = 488.87\ N$$

Análisis de esfuerzos del Wishbone Superior e Inferior:

Se realizó una simulación de análisis de esfuerzos estáticos de los wishbones obtenidos. Como se puede apreciar en las Figuras 4.14 y 4.15, el factor de seguridad como mínimo son 1.964 y 3.19 para el wishbone inferior y superior, respectivamente. Esto, nos indica que no va a fallar estáticamente. Para esta simulación, se consideró que el material es acero y las fuerzas aplicadas a los wishbones son las calculadas previamente con los dcls.

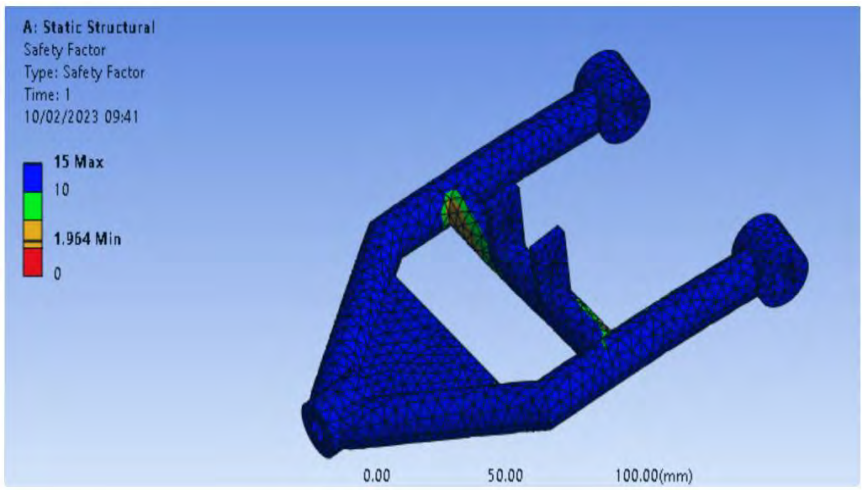


Figura 4. 14 Análisis de esfuerzos estáticos de wishbone inferior (Elaboración Propia)

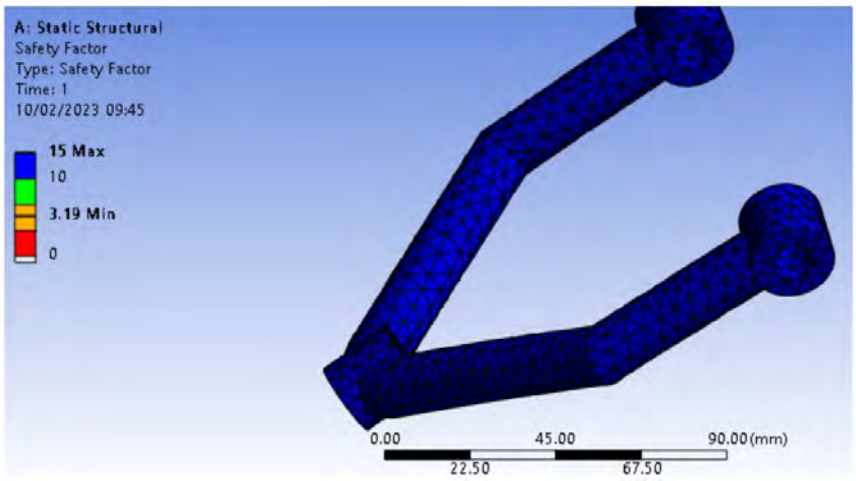


Figura 4. 15 Análisis de esfuerzos estáticos en wishbone superior (Elaboración Propia)

Con las dimensiones asumidas se diseñó el KingPin con el material duraluminio, en la Figura 4.16 se puede apreciar el modelo 3D. Adicionalmente, se realiza un análisis de esfuerzos estáticos para verificar que la pieza soporte con las fuerzas. Se muestra en la Figura 4.17 los resultados de la simulación, siendo $Fc\ (x, y, z)$ pertenece a la fuerza que aparece en el wishbone inferior, y $F_a\ (x, z)$ del wishbone superior en la situación extremas de choque en giro, mientras que $F_b(x, z)$ corresponde a la fuerza de la barra para el giro de las llantas, hallada en la siguiente sección.

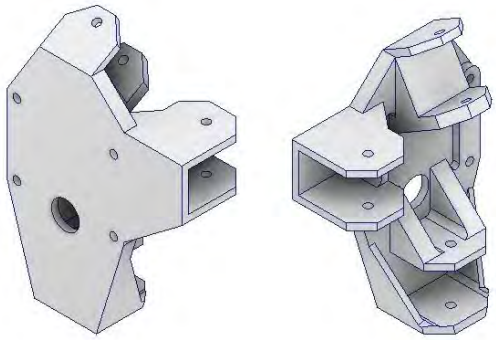


Figura 4. 16 Modelado 3D King Pin (Elaboración Propia)

Figura 4. 17 Análisis de esfuerzos en Kingpin (Elaboración Propia)

Se puede apreciar también en la Figura 4.17, que se tiene un factor de seguridad de 2.23 con lo cual se verifica que el Kingpin soportará todas las fuerzas y no fallará por fatiga. Finalmente, se muestra en la Figura 4.18 el sistema de suspensión ensamblado.

Figura 4. 18 Ensamble de suspensión (Elaboración Propia)

4.2.3. Mecanismo de dirección doble Ackerman

Se utiliza el mecanismo doble Ackerman a fin de darle dirección al vehículo, este es una variante del mecanismo Ackerman simple ya que el giro se realizará en las ruedas delanteras y traseras. Para esto, la barra de dirección también se acoplará con el kingping además de los wishbones superior e inferior. Estos acoples se unirán mediante la utilización de rótulas esféricas, por lo cual se seleccionaron la cabeza de articulación con rótulas esféricas SAL 10E(ver Figura 4.19) de acero inoxidable debido a su amplio rango de temperatura de operación (-50°C hasta +120°C). Según la página del fabricante SFK, con este tipo de unión se asegura una gran libertad de movimiento de la barra con respecto a la rueda, además de reducir la fricción en comparación de otro tipo de uniones, soportar desalineaciones, entre otros.

Figura 4. 19 SAL 10E rótula esférica (Tomado de https://www.skf.com/pe/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/rod-ends/productid-SAL%2010%20E)

Separación Rótulas

Para permitir la rotación adecuada de la suspensión se diseñó espaciadores de acero inoxidable austenítico, los cuales constan de una parte cilíndrica de tal manera se puedan encajar en la rótula en forma de cono (ver Figura 4.20).

Figura 4. 20 Separador de rótulas M10 (Elaboración Propia)

Para verificar las dimensiones del espaciador, se analiza los esfuerzos, producidas por las fuerzas de la reacción, ver Figura 4.21. Esta fuerza tendrá que soportar la reacción de Fcy.

$$F_{cy} = 94 * 9.8/6 \cdot$$

En la Figura 4.22, se puede apreciar que el máximo esfuerzo es de 5MPa, con lo cual se obtiene un factor de seguridad elevado, y se verifica la resistencia.

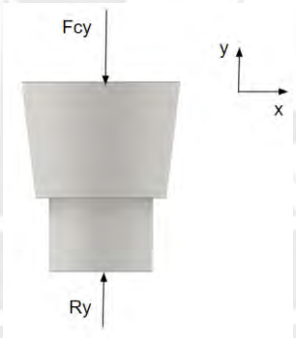


Figura 4. 21 Diagrama de fuerzas de separador (Elaboración Propia)

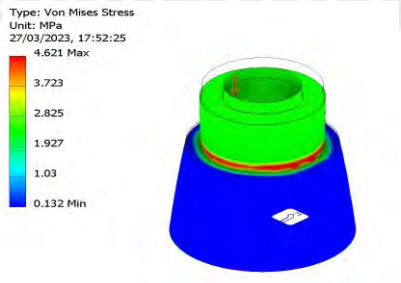


Figura 4. 22 Análisis de esfuerzos de separador (Elaboración Propia)

El principio de Ackerman indica que cuando un vehículo va a dar una vuelta, los ejes de todas las ruedas deben girar sobre un mismo punto, el centro instantáneo de rotación (CIR).

(Ingeniería y Mecánica Automotriz, 2019). De esta manera, la rueda interna girará un ángulo mayor que la rueda externa, con la finalidad de compensar la distancia que se tiene hasta el CIR. En la Figura 4.23 se muestra el caso en que el vehículo está girando para la derecha, en el cual se puede determinar los ángulos de giro conociendo su radio de giro y la geometría del vehículo.

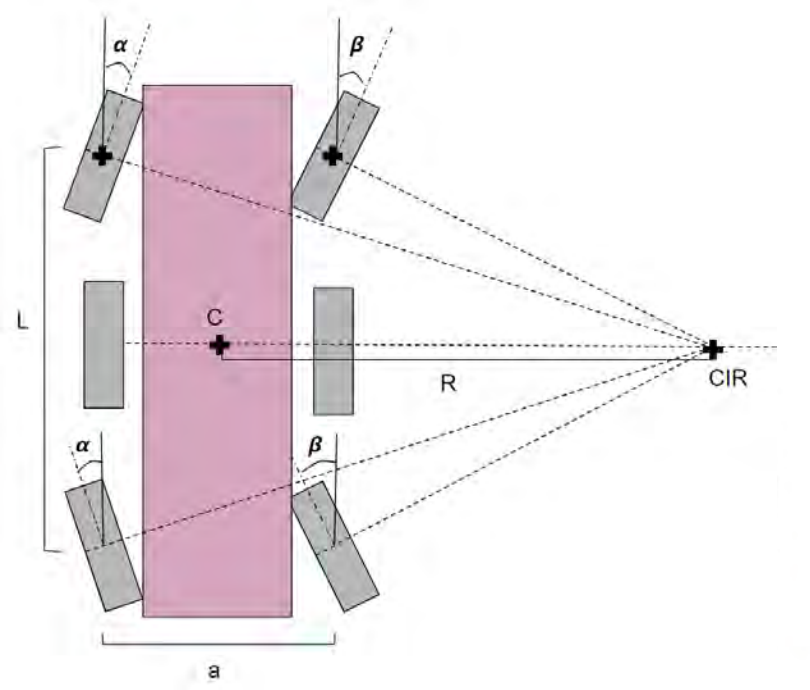


Figura 4. 23 Caso de giro a la derecha del vehículo (Elaboración Propia)

Ecuaciones a partir del diagrama mostrado:

$$\alpha = arctan\left(\frac{\frac{L}{2}}{R+\frac{a}{2}}\right) y\ \beta = arctan\left(\frac{\frac{L}{2}}{R-\frac{a}{2}}\right), para\ \boldsymbol{\beta} > \boldsymbol{\alpha}$$

Siendo,

L=Batalla del vehículo (longitud entre eje delantero y eje trasero) [mm]

R=Radio de giro [mm]

a= Distancia entre ruedas [mm]

Considerando los valores, L =900mm, a=750 mm y un radio de giro de 1.5 veces la batalla del vehículo (R=900*1.5=1350mm). Se obtienen los siguientes valores:

$$\alpha \approx 14.6° \; y \; \beta \approx 24.8°$$

En la Figura 4.24, se puede apreciar el mecanismo de dirección por varillas de empuje, el cual consiste en acoplar una pieza giratoria, en este caso un plato giratorio, con unas barras que se conectan con el Kingpin para darle la dirección a las ruedas. Adicionalmente, se usa un motor para otorgar el torque requerido para lograr los ángulos solicitados.

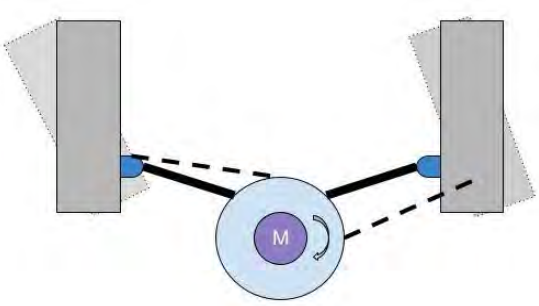


Figura 4. 24 Mecanismo de dirección por varillas de empuje con plato giratorio (Elaboración Propia)

Con la ayuda del software GeoGebra se simuló el movimiento de este mecanismo para obtener los ángulos deseados, de tal modo que se definió la posición y el radio del plato, el tamaño de las barras y la separación de los Kingpins. En la Figura 4.25, se puede observar la posición inicial del plato y ambas ruedas (recta AB' y EF), donde A y E son los pivotes para el giro de las ruedas. Además, se pueden observar las barras de dirección g y j, las cuales están conectadas al plato giratorio.

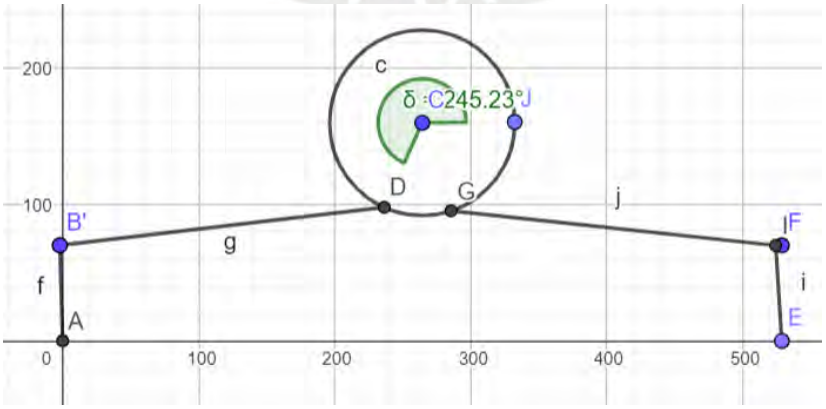


Figura 4. 25 Posición inicial del mecanismo (Elaboración Propia)

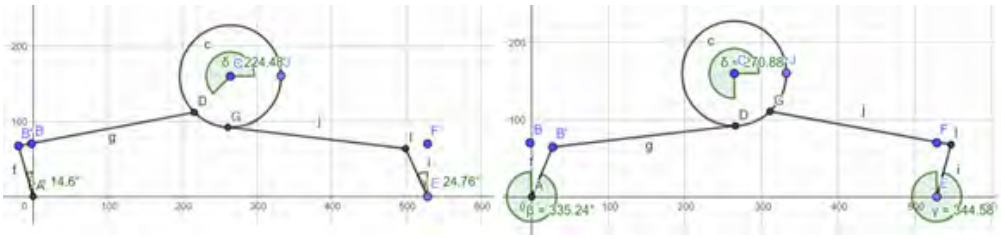


Figura 4. 26 Giro a la izquierda (a) y Giro a la derecha (b)

En la Figura 4.26, se puede observar los giros a la izquierda y derecha con los ángulos obtenidos, los cuales son aproximadamente los ángulos deseados. Considerando valores como la distancia entre ruedas de 530mm, longitud de las barras de 240mm, separación entre las barras de 54mm (entre D y G), radio del plato de 68mm y su posición en la horizontal justo al centro de las 2 ruedas y en la vertical (según el eje de referencia de la Figura) de 160mm. Cabe recalcar, que en la posición inicial hay una ligera desviación del ángulo de la rueda izquierda, esto se da por las condiciones asumidas de que las 2 barras sean de la misma longitud. Si bien, esta configuración cumple con las consideraciones de operación, se puede encontrar dimensiones más óptimas para el diseño, ya que el proceso fue iterativo y se seleccionó la combinación que tenía menos error.

Selección del motor de giro

Se calcula la fuerza necesaria para el giro de las ruedas, para esto se realiza un DCL considerando la fuerza que ejerce la barra sobre la rueda.

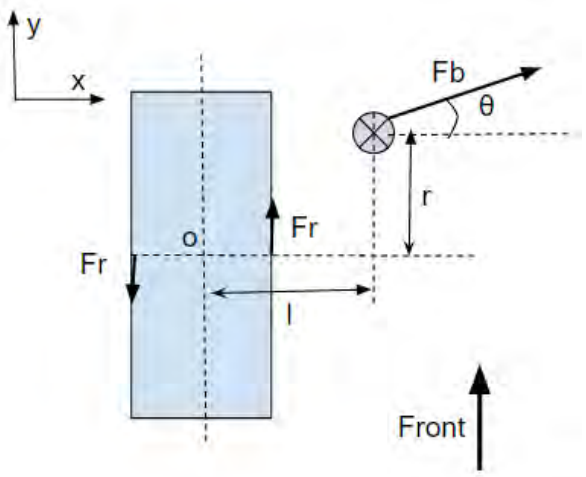


Figura 4. 27 DCL de rueda para el giro (Elaboración Propia)

Ecuaciones a partir del DCL, ver Figura 4.27,

$$F_b\, cos(\theta)\, r\, -\, F_b sin(\theta)\, l\, -F_R * ancho\, =\, I_y\, \alpha$$

$$F_R =\, W *\, C_{rr}/6$$

Siendo,

Fr=Fuerza de fricción [N]

Fb=Fuerza de la barra [N]

l= Distancia entre el centro de la rueda y el punto de acción de Fb[mm]

θ= Ángulo de inclinación de Fb[mm]

I= Inercia de la rueda [mm]

Considerando $I_y\, =\, 0{,}179\ kg\ m^2$ y la aceleración $\alpha\, =\, 13.05\ rad/s2$, para alcanzar 20 rpm en 0.2s. Se obtiene, $F_b\, \approx\, 114\ N$, lo cual indica que, según el radio obtenido en el mecanismo, se requiere un torque de 12.3 Nm del motor por dos barras, en total un torque de 24.6 Nm en total, para las cuatro ruedas.

A continuación, en la Tabla 4.3, se presenta una comparación entre los diferentes motores comerciales de acuerdo a los requerimientos solicitados.

Tabla 4. 3 Tabla de selección de motor de giro

Modelo	AK80-64	RMD-X10S2V3	Requerimientos
Imagen Referencial			
Dimensiones	98x98x61.9	150x150x80	-
Voltaje (VDC)	24/48	24/48	24
Corriente nominal(A)	7	6.7	-
Torque nominal (Nm)	48	50	24.6
RPM	23/48	50	20
Radio de Reducción	64:1	35:1	-
Peso (Kg)	0.85	2	<2.5kg
Costo ($)	889.90	700	-

Nota. Elaboración propia

Se puede apreciar en la Tabla 4.3 que ambos motores cumplen con los requerimientos solicitados por el motor, sin embargo, el AK80-64 es más compacto y sus condiciones de operación se acercan más a las solicitadas. Al igual que con los motores de propulsión, se usará con un encapsulado para su protección.

Transmisión de potencia

Después de tener las dimensiones y ubicaciones del plato giratorio, se diseña en 3D este componente. En la Figura 4.28, se puede apreciar el plato giratorio.

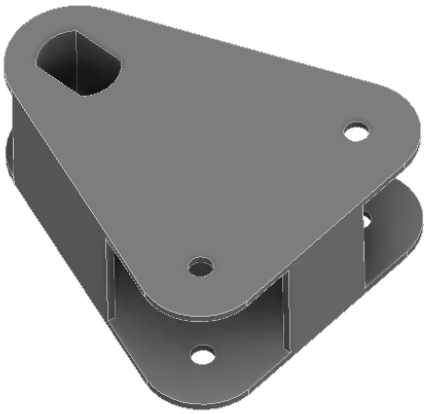


Figura 4. 28 Componente de giro de las ruedas (Elaboración Propia)

Como se puede apreciar en la Figura 4.29, la transmisión del torque para la parte delantera y trasera se dará por medio de un sistema de fajas y engranajes. En la parte delantera, la faja será más larga, para poder desalinearse del centro y tener más espacio para el motor y soportes.

En primer lugar, se calcula la potencia necesaria para el giro:

$$Pt = w * \tau = 20 * 12.29 = 25.74W$$

Luego, se considera el factor de servicio como $F_s = 1{,}4$, con lo cual la potencia de diseño es $P_{diseño} = F_s * Pt = 0.036\ kW$. Adicionalmente, se asume que la relación de poleas será de 1, con lo cual se seleccionan de acuerdo a su diámetro.

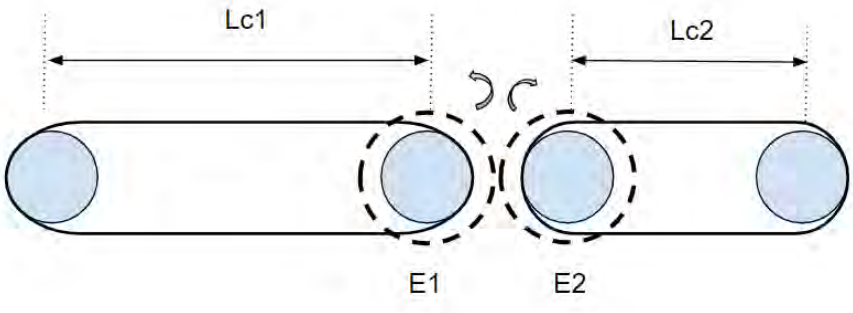


Figura 4. 29 Diagrama de sistema de fajas (Elaboración Propia)

Siendo elegidas las poleas 16 dientes, para calcular el desarrollo requerido se define como distancia de centros deseado $L_{c1} = L_{deseado} = 332.5\ mm$. Se selecciona la faja síncrona más cercana comercial de código 340H, con un ajuste mínimo de 1.32mm. Por último, se verifica la potencia máxima que soporta, con un factor de longitud de faja de 1.1, y factor de dientes 1. La potencia nominal hallada es de $P_n = 0{,}042\ kW$ y la potencia máxima se define con la siguiente expresión:

$$P_{max} = P_n * F_{lf} * F_d = 0{,}0462\ kW$$

Como se puede observar, la potencia de diseño es menor a la potencia máxima obtenida, por lo cual la faja queda verificada. Se realiza el mismo procedimiento para la otra transmisión de la faja, con la diferencia que la distancia de centros deseable sea de 205.5mm, y con la misma potencia de diseño. Con lo cual, se obtiene una selección de 16 dientes, y una faja síncrona de código 240H. Finalmente, los componentes a utilizar son:

- 4 poleas optibelt ZRS 16 H 100 TB (16 DIENTES×1")
- 4 bujes optibelt TB 1108 X 25 MM
- 1 faja optibelt SINC/3 340 H 100
- 1 faja SINC/3 240 H 100

Diseño eje extremo

Se diseña un eje vertical extremo para la transmisión de polea al componente de giro. Este eje recibe el torque mediante una chaveta y lo transmite al componente de giro, mediante una transmisión de forma. En la Figura 4.30, se muestra el DCL del eje vertical extremo.

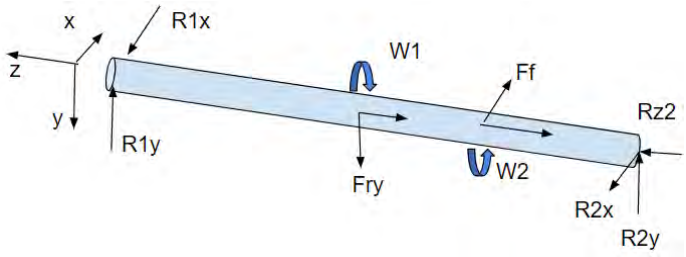


Figura 4. 30 DCL de eje vertical extremo (Elaboración Propia)

Siendo,

Ff=Fuerza de la faja [N]

Fry=Fuerza resultante del giro de las 2 ruedas [N]

W2=Peso de la polea [N]

W1= Peso del componente de giro [N]

R1= Reacción del soporte superior [N]

R2= Reacción del soporte inferior [N]

Considerando Ff≈ 24N (Según catálogo), W2=9.8N, Fry=225N, W1=45N. Se realiza un diagrama de distribución de fuerzas y momentos, como se puede apreciar en la Figura 4.31.

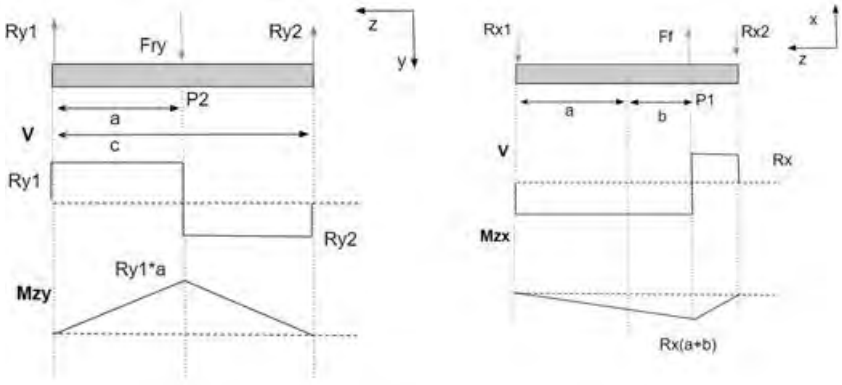


Figura 4. 31 Diagrama de fuerzas y momentos eje extremo (Elaboración Propia)

Podemos observar, que el punto P2 es donde se concentra un mayor esfuerzo, por lo cual se calcula el esfuerzo normal, cortante por torsión y flector.

$$\sigma_n = \frac{W_1}{\pi d^2/4},$$

$$\sigma_{fzy} = \frac{M_{Zy,P2}*32}{\pi d^3} \; y \; \sigma_{fzx} = \frac{M_{Zx,P2}*32}{\pi d^3},$$

$t_{tor} = \frac{16M_T}{\pi d^3}$ y esfuerzo cortante total $t_V = \frac{V}{A}$.

De esta manera, el esfuerzo equivalente es el siguiente:

$$\sigma_{eq,P2} = \sqrt{(\sigma_{fzy} + \sigma_{fzx} + \sigma_n)^2 + 3({t_{tor}}^2 + {t_V}^2)} \approx 29.8\, MPa$$

para un diámetro de 20 mm. De manera similar para el punto P_1, donde el esfuerzo equivalente $\sigma_{eq,P1} = 8{,}7\, MPa$, con un diámetro de 25mm. En cuanto al dimensionamiento de la chaveta en la polea, se verifica por cizallamiento la longitud mínima, mediante la siguiente expresión:

$$l \geq \frac{4M * n_S}{D * b * s_y},$$

Siendo,

M=Momento torsor [Nm]
ns=factor de seguridad
D=diámetro del eje [mm]
b= ancho de la chaveta [mm]
sy= esfuerzo último del material (Acero inoxidable) [Mpa]
R2= Reacción del soporte inferior [N]

Considerando, M=12.2Nm, D=25mm, b=8mm. Se obtiene una longitud mínima de 2.54mm. Mientras, por aplastamiento se calcula la longitud mínima con la siguiente expresión:

$$l \geq \frac{4Mn_S}{D\ h\ s_y}$$

Siendo, la altura de la chaveta (h) 7mm, se obtiene una longitud mínima de 6.75mm. Así que, se escoge una chaveta de 20mm de longitud para la transmisión.

Para la transmisión del eje con las bielas, se diseña una transmisión por forma, la cual dota de mayor capacidad de transmisión, a la vez de facilitar el ensamble. Por ello, se verifica la dimensión de esta sección, con la siguiente expresión: 7.33, donde L_c es la longitud de la sección y $a = 14\, mm$ el tamaño del lado de la sección.

$$M_{max} = \frac{L_c \ a^2 \ p_{max}}{6} , \qquad 7.33$$

Siendo,

Lc=longitud de la sección [mm]

a=tamaño del lado de la sección [mm]

pmax= presión máxima [Mpa]

Considerando a=14mm, se obtiene una capacidad de transmisión máxima de 88.2Nm, por lo que queda verificado que no fallará ya que el momento que se transmite es menor. Se puede apreciar en la Figura 4.32, el modelado 3D del eje extremo y su simulación ante las fuerzas y momentos calculados previamente. Se obtiene un gran factor de seguridad, por lo que se puede verificar que no fallará por fatiga.

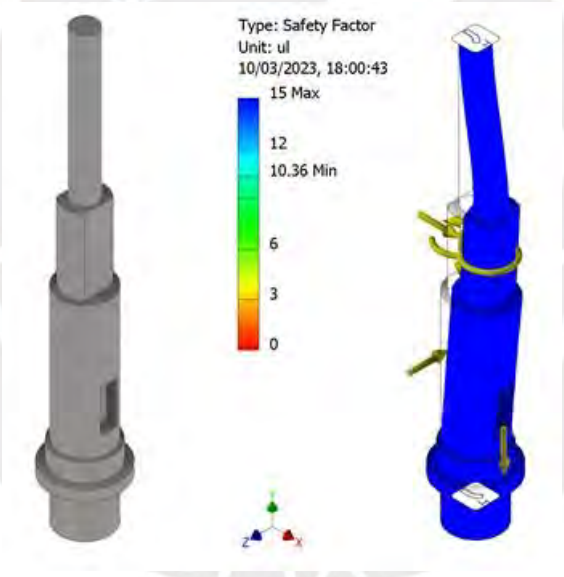


Figura 4. 32 Eje vertical extremo 3D y análisis de esfuerzos (Elaboración Propia)

Se diseña el soporte inferior de aluminio con agujeros para su unión atornillada con una placa base doblada, ver Figura 4.33. La placa se dobla de tal forma que pueda encajar en la estructura y pueda ganar más rigidez comparada con una placa simple, ver Figura 4.34. Además, se le acopla una bocina collar para permitir el giro y soportar cargas axiales y radiales.

Figura 4. 33 Soporte inferior (Elaboración Propia)

Figura 4. 34 Placa base con soporte de aluminio (Elaboración Propia)

Se diseña el soporte superior de aluminio de la misma manera que el soporte inferior, ver Figura 4.35. La unión de estos soportes a la estructura se da por medio de uniones atornilladas.

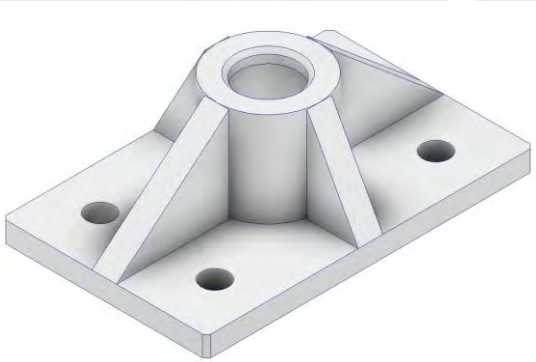


Figura 4. 35 Soporte superior del eje extremo (Elaboración Propia)

Finalmente, el eje vertical para acople con bielas queda definido como se aprecia en la Figura 4.36.

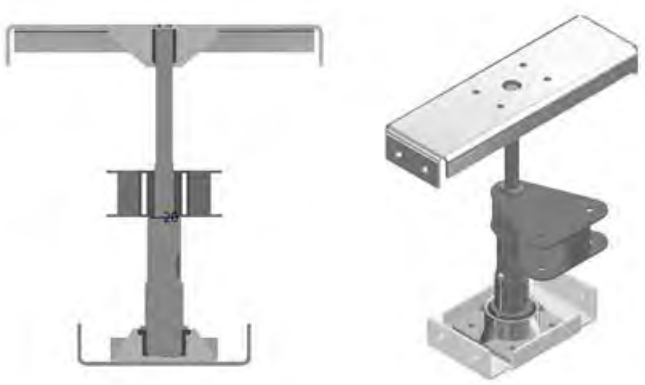


Figura 4. 36 Eje extremo con acople y componente de giro

Ejes centrales

Como se puede apreciar en la Figura 4.37, se realiza el diseño del acople del motor con el eje central. El torque del motor se transmite por medio de 6 uniones atornilladas al acople y luego al eje mediante la transmisión por forma, con una sección transversal de dos caras paralelas de lado a=15.5mm. Con un material de acero inoxidable es capaz de transmitir hasta 58.

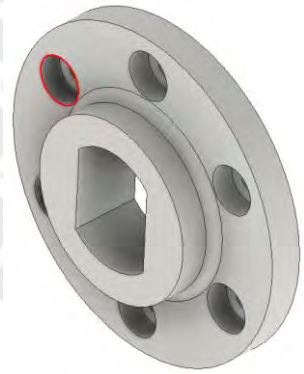


Figura 4. 37 Acople de eje con motor (Elaboración Propia)

Se define el eje que se acopla al motor (ver Figura 4.38), el cual consiste en una transmisión de forma con dos caras para recibir el torque del motor, a través de un acople. En la Figura 4.39, se muestran el DCL del eje central.

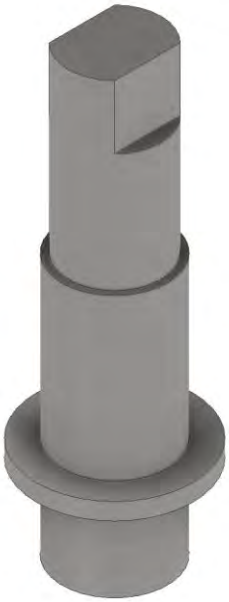


Figura 4. 38 Eje central del sistema (Elaboración Propia)

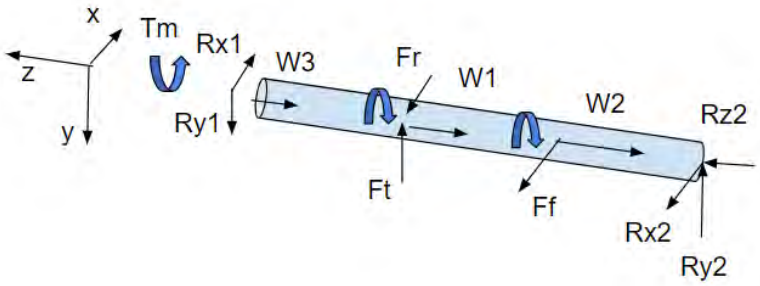


Figura 4. 39 DCL de eje central (Elaboración Propia)

Siendo,

Fr, Ft=Fuerzas radial y tangencial del engranaje [N]

Ff=Fuerza de la faja [N]

W2=Peso de la polea [N]

W1= Peso del engranaje [N]

R1= Reacción del acople [N]

R2= Reacción del soporte inferior [N]

Se dimensiona la transmisión del engranaje al eje, con una chaveta de 8x7 mm. Cuya longitud se define como 14 mm, pues según cálculos (de la misma manera que en el anterior eje) por cizalladura debe ser mínimo 2,4 mm y por aplastamiento 6,38 mm.

Luego, se analizan las fuerzas del eje central mediante las siguientes ecuaciones obtenidas del DCL:

$$\sum M_{1-eje\,y}: R_{x2}(a' + b' + c') = F_r a' + F_f(a' + b')$$

$$\Sigma \quad M_{1-eje\,x}: R_{y2}(a' + b' + c') = F_t a' \,,$$

$$\sum F_x: R_{x2} = F_r + F_f - R_{x1}$$

$$\sum F_y: R_{y2} = F_t - R_{y1}$$

Se realiza un diagrama de distribución de fuerzas y momentos, como se puede apreciar en la Figura 4.40.

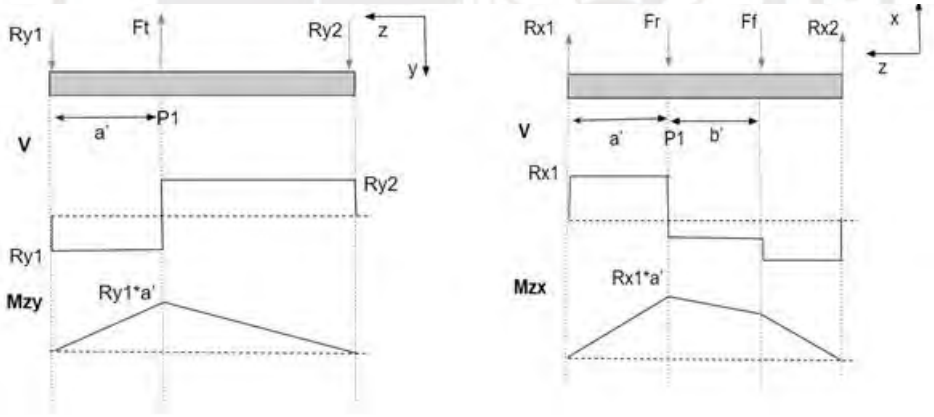


Figura 4. 40 Diagramas de fuerzas y momentos de eje central (Elaboración Propia)

Con lo cual, se analiza el diámetro del P1 que es el más crítico, ya que posee menor diámetro debido a los cambios de sección en el eje, buscando apoyar los componentes como engrane y polea de fajas. Adicionalmente, como esfuerzo normal se halla $\sigma_n = 0{,}08\,MPa$, esfuerzo flector $\sigma_{zy} = 3.16\,MPa\; y\; \sigma_{zx} = 1.45\,MPa$; mientras, como esfuerzo por torsión, se tiene $\sigma_{torsion} = 6\,MPa$. Así, el esfuerzo equivalente es $\sigma_{eq} = 11{,}2\,MPa$ obteniendo así un factor de seguridad elevado, ver Figura 4.39.

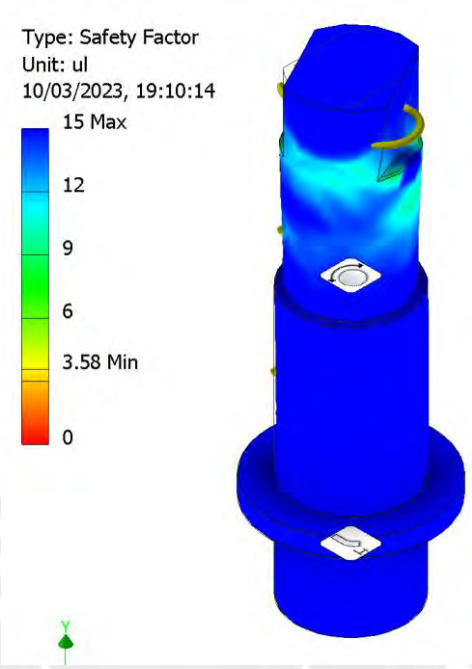


Figura 4. 41 Análisis de esfuerzos del eje vertical con motor (Elaboración Propia)

Para sostener el motor de manera vertical, se diseña un soporte para posicionarlo en el chasis, junto a que se pueda acoplar el soporte vertical del eje continuo. Como se puede observar en la Figura 4.42, este consiste en una placa de aluminio doblado, bajo el mismo concepto de aumentar rigidez, con orificios para su acople con el motor, soporte y estructura mediante uniones atornilladas.

Figura 4. 42 Soporte superior de motor (Elaboración Propia)

Para lo cual se realiza el análisis de esfuerzos para el torque y fuerza longitudinal de los ejes, ver Figura 4.43, comprobando la presencia de esfuerzos de máximo 3 MPa..

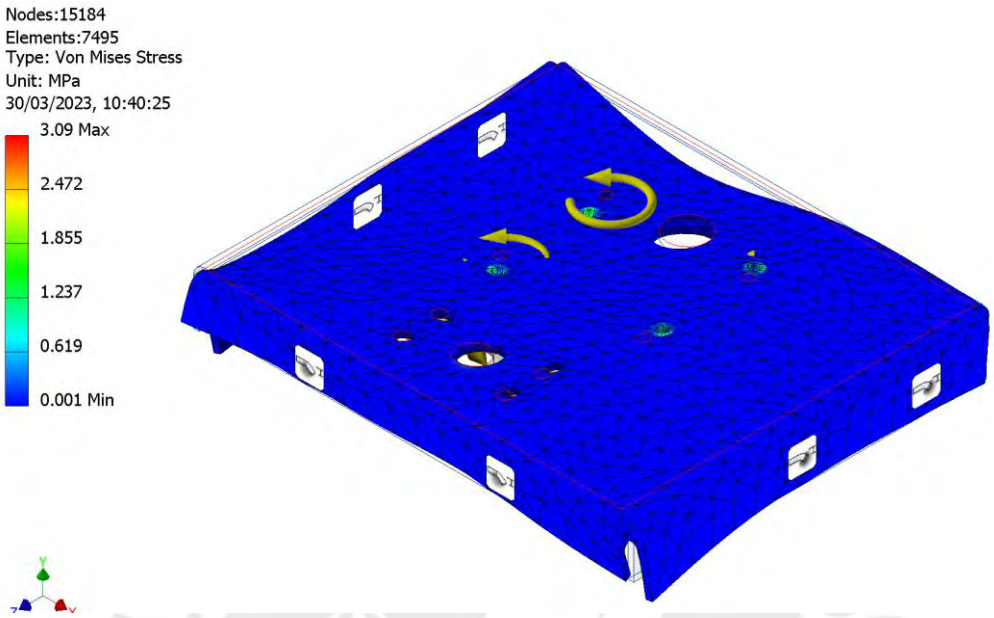


Figura 4. 43 Análisis de esfuerzos soporte superior (Elaboración Propia)

Luego, para poder de un motor transmitir el movimiento a dos extremos se selecciona un sistema de engranajes que movilizará las fajas escogidas. Consiste en dos engranajes que invierten el sentido de giro correspondiente a cada extremo. Para lo cual se determina emplear dos engranajes de módulo 2 y 40 dientes, de acero inoxidable, ver Figura 4.44.

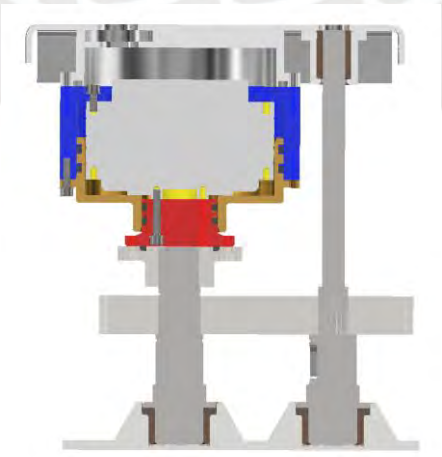


Figura 4. 44 Sistema central de engranajes (Elaboración Propia)

Finalmente, en las Figura 4.45 y 4.46, se muestra el modelado 3D de todo el sistema de transmisión.

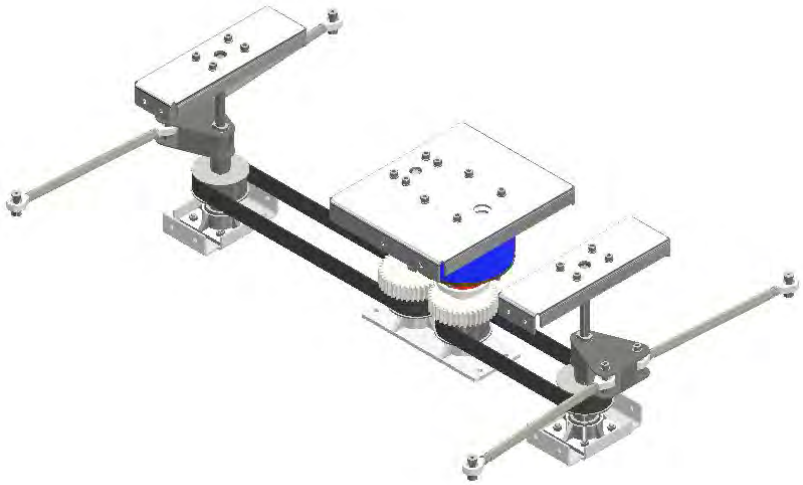


Figura 4. 45 Modelado de sistema de giro Ackerman (Elaboración Propia)

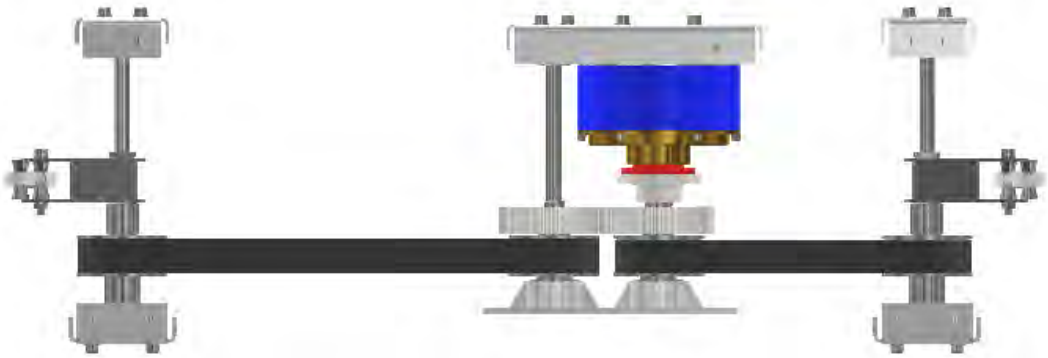


Figura 4. 46 Vista lateral de sistema de giro (Elaboración Propia)

Verificación de ángulos

Para comprobar los ángulos deseados en el diseño del sistema de dirección, se realizó un prototipo con impresión 3D y madera. Para esto, se simplificó el diseño del plato giratorio teniendo en cuenta la posición en donde irían las barras. Adicionalmente, se consideró solo la parte delantera de la estructura inferior pues el objetivo solo era observar si el mecanismo iba

lograr llegar a los ángulos deseados. El torque generado por el motor se simuló mediante una varilla central en el eje de giro del plato giratorio y girándolo manualmente. En la Figuras 4.47, 4.48 y 4.49, se puede observar el prototipo y los ángulos de giro esperados. En el Anexo E, se muestra las fotos de los componentes que se usaron.

Figura 4. 47 Estado inicial del mecanismo (Elaboración Propia)

Figura 4. 48 Giro para la derecha (Elaboración Propia)

Figura 4. 49 Giro para la izquierda (Elaboración Propia)

Se corrobora finalmente que, para el posicionamiento del componente giratorio y dimensiones de los componentes de la suspensión, se logra llegar a los ángulos deseados.

4.2.4. Estructura del vehículo

El chasis de la estructura está diseñado a partir de tubos de acero cuadrados (3/4”x3/4” x2), soldados entre sí. Además, de tubos de acero cuadrangular (40x20), con el objetivo de aumentar su resistencia a la flexión. En la Figura 4.50, se muestra el modelo 3D de la estructura del vehículo.

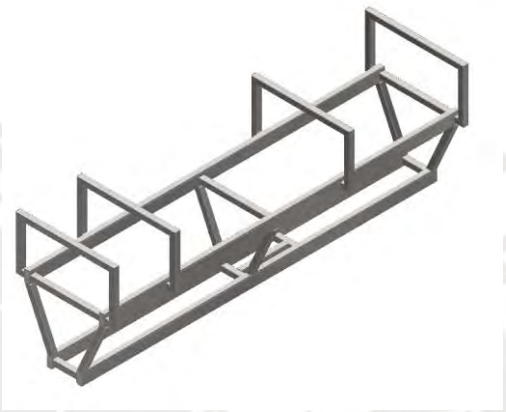


Figura 4. 50 Estructura inferior del vehículo (Elaboración Propia)

Con respecto a la unión de la suspensión al chasis se diseñan pestañas en acero para que sean soldadas al chasis en las posiciones adecuadas (descritas en los planos) y permitan tener un sistema mecánico unido por soldadura, ver Figura 4.51.

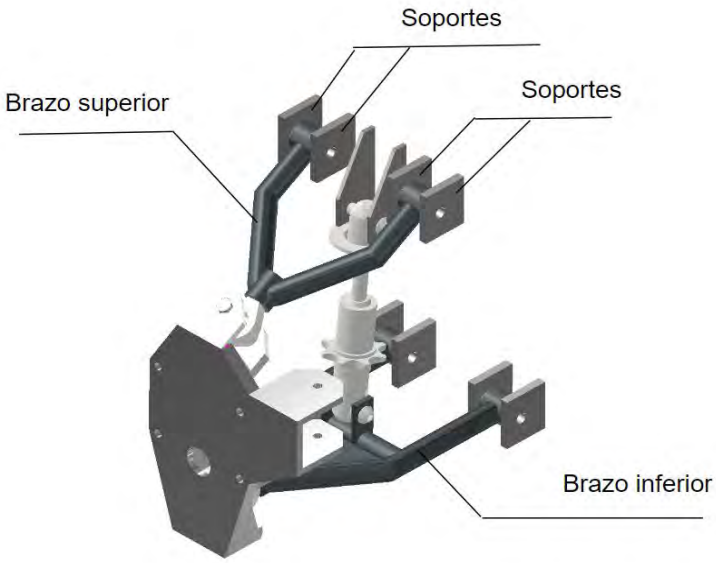


Figura 4. 51 Suspensión double wishbone con soportes (Elaboración Propia)

Se muestra el ensamble de la estructura inferior con el sistema de propulsión, suspensión y dirección, ver Figura 4.52.

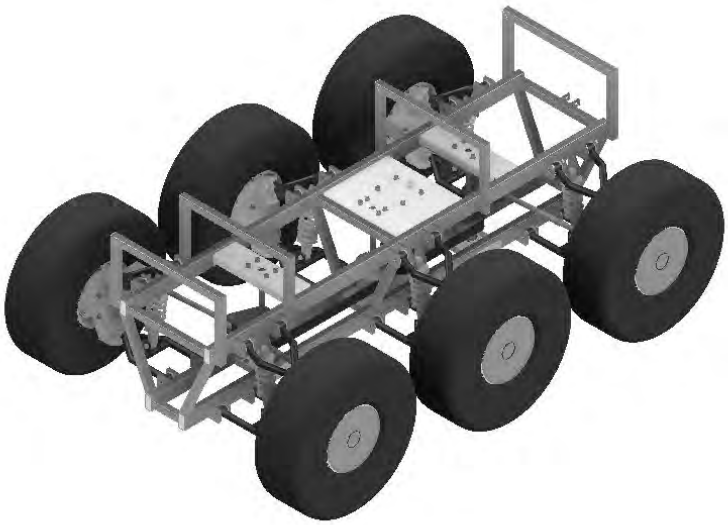


Figura 4. 52 Sistema de traslación (Elaboración Propia)

4.3. Subsistema de monitoreo de grietas

Para la detección del subsuelo en la Antártida mediante los sensores GPR (*Ground Penetrating Radar*), se pueden usar bajas o altas frecuencias. La diferencia entre ellas radica en la resolución y en la profundidad que se requiera medir. En altas frecuencias, se obtendrá una mayor resolución, pero la profundidad de medición será menor; en cambio, a bajas frecuencias se obtendrá una mayor profundidad de sensado, pero una resolución más baja.

4.3.1. Selección de componentes

A continuación, en la Tabla 4.4, se presenta una comparación entre las diferentes antenas comerciales con diferente frecuencia.

Tabla 4. 4 Tabla de selección del sensor de GPR

Modelo	5106A	50270S	50400S	Requerimientos
Foto				
Frecuencia (MHz)	200	270	400	>= 200
Dimensiones	600x600x300	450x450x170	300x300x170	-
Rango de profundidad(m)	0-9	0-6	0-4	>= 4
Peso (Kg)	20.5	8.6	5	< 25
Precio ($)	1200	1250	1500	-

Nota. Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Tabla 4.4, se tiene varios modelos de antenas de diferente frecuencia. A medida que va aumentando la frecuencia el rango de profundidad es menor, sin

embargo, el componente tiene una mayor resolución, es más compacto y menos pesado. Por lo cual se escogió el modelo 50400S de 400 Mhz para la recolección de datos del subsuelo. En la identificación de grietas propuesta, basta con detectar que no haya nada hasta una profundidad de. Si no se encuentra nada, eso indica la presencia de una grieta oculta mayor a 4m de profundidad, caso contrario, indica que hay una grieta y se obtendrá una información más detallada en comparación de las otras antenas.

Después de seleccionar la antena, se debe seleccionar el sistema de adquisición de datos para procesar la data obtenida en tiempo real y luego transmitirla a la interfaz con el usuario. En la Tabla 4.5, se presenta una comparación entre 2 de las unidades de control usadas para el procesamiento de las señales GPR.

Tabla 4. 5 Tabla de selección de la unidad de control GPR

Modelo	SIR30	SIR4000	REQUERIMIENTOS
Foto			
Dimensiones(mm)	450x330x130	360x250x70	-
Puertos	Entradas Antenna/ Entrada fuente de alimentación HDMI/ETHERNET USB/	SerialRS232/HDMI/ ETHERNET/USB2.0/miniUSB/ Entrada analógica y digital para Antenna/ Entrada fuente de Alimentación	HDMI
Wifi	No	Si	-
Batería Interna	No	Si	-
Consumo de energía máximo (W)	260	260	-

Peso (Kg)	8.4	4.53	< 9
Temperatura de Operación (°C)	-10 hasta +50	-20 hasta +40	> -10
Precio ($)	3500	4500	-

Nota. Elaboración propia

Luego de realizar la tabla comparativa 4.5, se puede apreciar que la unidad de control SIR4000 es la mejor opción a pesar de que su precio sea más elevado. Este componente es más compacto y liviano con respecto al SIR30, además posee múltiples características como: módulo wifi, entradas digitales y posee una batería interna de larga duración, aproximadamente 2horas y media.

Finalmente, se usará una capturadora de video que permitirá grabar la pantalla del SIR4000 y se conectará al módulo con gpu para la transmisión con la interfaz de usuario. En la Tabla 4.6. se puede apreciar la capturadora de video que se utilizará con sus especificaciones.

Tabla 4. 6 Tabla de selección de la capturadora de video

Modelo	HDMI Video Capture Card-Aluminum
Foto	
Dimensiones	62x28x13
Puertos	HDMI/USB
Consumo máximo de energía (W)	2
Sistema Operativo	Linux, Windows, Mac OS
Peso (g)	21.4
Temperatura de Operación (°C)	-10 hasta +55
Precio ($)	15

Nota. Elaboración propia

4.3.2. Acople del sistema con el vehículo

En la Figura 4.53 (a) se muestra el modelado 3D de la antena, unidad de control y su acople con la estructura del vehículo. Además, en la Figura 4.53 (b) se muestra a detalle el acople realizado con la antena, el cual consiste en una sujeción mediante un pin y una biela.

(a) (b)

Figura 4. 53 Acople de la antena con el vehículo (a) Vista general (b) Detalle acople (Elaboración Propia)

4.3.3. Arquitectura electrónica

En la Figura 4.54, se muestra un diagrama de bloques para indicar cómo es la transmisión y conexión entre la antena y el módulo con gpu. En primer lugar, la antena GPR de frecuencia 400Mhz capta la información del subsuelo, luego la unidad de control GPR (SIR4000) procesa esa data y muestra un diagrama con curvas, las cuales son interpretadas para la detección de elementos. Dado que no se puede conectar directamente el módulo con GPU y la unidad de control debido a compatibilidad del software, se usa con un elemento intermedio una captura de video. Este componente permite grabar la pantalla de la unidad de control y mostrarla en el módulo con GPU con el objetivo de poder transmitirlo hacia la interfaz vía wifi.

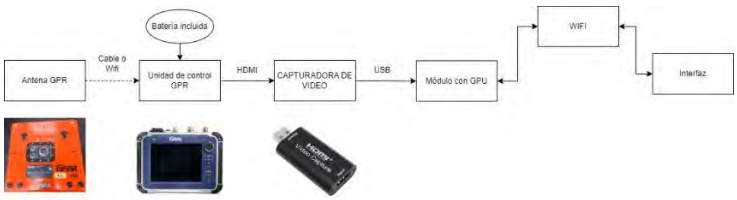


Figura 4. 54 Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de grietas (Elaboración Propia)

4.3.4. Método para Reconstrucción 3D

Se utilizará el método *Visual-Lidar Odometry and Mapping* (V-LOAM) el cual realiza una fusión de sensores entre un Lidar 3D y una cámara para crear el mapa en 3D (posteriormente se detalla su selección). Como se puede apreciar en la Figura 4.55, este método consta de 2 principales procesos: la odometría visual y la odometría Lidar. Ambos procesos se basan en métodos ya existentes, *Real-time Depth Enhanced Monocular Odometry* para la odometría visual que permite una estimación de movimiento a frecuencias altas (60Hz); y *Lidar Odometry and Mapping in Real-time* para la odometría Lidar, la cual trabaja a bajas frecuencias (1Hz) para refinar la estimación previa y eliminar el ruido intrínseco en la odometría visual de la nube de puntos, mejorando la robustez del mapeo y disminuyendo sus falencias individuales (Zhang y Singh, 2015).

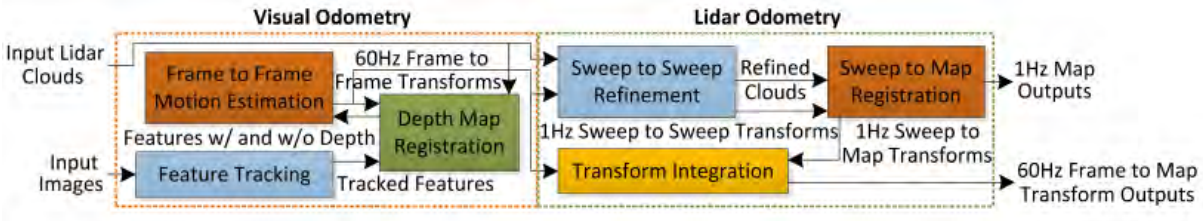


Figura 4. 55 Esquema del método V-LOAM (Zhang y Singh, 2015)

El primer paso es la odometría visual, para esto se tiene como entrada la nube de puntos generada por el Lidar y las imágenes obtenidas por la cámara monocular. Estas imágenes pasan por una etapa de "seguimiento de características", en la cual se realiza un match de puntos característicos entre imágenes consecutivas. Luego, en el bloque de "Registración del mapa de profundidad" se almacena la nube de puntos y se le asocia a cada punto característico una profundidad. Con este mapa registrado se realiza una estimación de movimiento cuadro por cuadro (*frame to frame*) a una frecuencia de 60 Hz. El segundo paso es la odometría Lidar, esta se ejecuta una vez por barrido, el cual dura 1s, procesando la nube de puntos cuando se realice

un barrido completo. En el bloque “Refinación Barrido por barrido” (*Sweep to Sweep Refinement*) se refina la estimación de movimiento predicha en la odometría visual comparándola con nuevos puntos característicos obtenidos tras comparar 2 nubes de puntos consecutivos y eliminando el ruido generado por esta. Estos puntos característicos son generalmente puntos planos y de borde, en el entorno de la Antártida se puede considerar por ejemplo al límite de las grietas como puntos de borde y partes del relieve del suelo como puntos planos. Tras esto, se pasa a una etapa de “Registración del mapa por barrido” en el cual se combina el mapa previo con la actual nube de puntos para formar el nuevo mapa, asegurando que la nueva información obtenida por el nuevo barrido se adicione al mapa. Finalmente, se da la fusión de ambas secciones para obtener un mapa a 60 Hz (Zhang y Singh, 2015).

Para poder aplicar este método se asume que los parámetros intrínsecos de la cámara, tales como la longitud focal, coordenadas centrales, tamaño efectivo del pixel, entre otros; son conocidos (Ferrer, 2004). Asimismo, se debe realizar una previa calibración del Lidar y la cámara para obtener sus parámetros extrínsecos, los cuales están relacionados a su sistema de coordenadas. Por la simplicidad del algoritmo y los cálculos, se asume que ambos sistemas de coordenadas coinciden (Zhang y Singh, 2015).

4.4. Subsistema de teleoperación remota

En esta sección se desarrollará el módulo de la teleoperación remota. Se abordará la selección de componentes a usar, así como también los diagramas de electrónicos y de flujo para saber cómo están conectados entre sí.

4.4.1. Selección de Componentes

En primer lugar, se tiene que seleccionar el módulo con GPU, el cual será el cerebro de todo el sistema mecatrónico, ya que permitirá el procesamiento y control junto a los demás

componentes. En la Tabla 4.7, se muestra una comparación entre diferentes módulos con GPU comerciales.

Tabla 4. 7 Tabla de selección de módulo con GPU

Modelo	Rockchip RK3399pro	Jetson Nano	Allwinner H5	Requerimientos
Foto				
Dimensiones (mm)	82x60x20	70x54x14	60x53x10	-
Procesador	ARM Cortex-A76	ARM Cortex-A57	ARM Cortex-A53	-
RAM (GB)	6	4	2	>= 2
Almacenamiento (GB eMMC)	64	16	16	8
Voltaje de Operación (V)	5	5	5	5
Consumo de Energía (W)	18	10	5	-
Temperatura de Operación (°C)	-20 hasta +55	-25 hasta +80	-30 hasta +60	> -10
Conexión	Wifi/Ethernet/USB	Wifi/Ethernet/USB	Wifi/Ethernet/USB	-
Puertos	4 USB 2.0/ HDMI/1 microUSB/Ethernet	4 USB 3.0/ HDMI/1 microUSB/Ethernet	4 USB 2.0/ HDMI/1 microUSB/Ethernet	-
Peso (g)	120	90	50	-
Precio	130	100	50	-

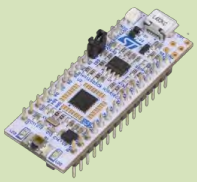
Nota. Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Tabla 4.7, los 3 modelos presentan características similares. La Rockhip tiene un buen almacenamiento y memoria RAM, sin embargo, consume mucha energía y ocuparía demasiado espacio en la caja de componentes. Por otro lado,

AllwinnerH5 es un módulo más compacto, tiene muy poca RAM por lo que el procesamiento sería más lento. La Jetson Nano, no consume tanta energía y tampoco es espaciosa, además cuenta con puertos USB 3.0, los cuales tienen mayor velocidad de transmisión que los USB 2.0. Asimismo, existe una mayor documentación sobre la Jetson en proyectos orientados a vehículos eléctricos. Por lo que, tras analizar la tabla comparativa realizada, se selecciona la Jetson Nano como el procesador principal para el vehículo.

En segundo lugar, se tiene que seleccionar al microcontrolador, el cual será el encargado de controlar a los motores, luces antiniebla y recibir información de algunos sensores. En la Tabla 4.8, se muestra una comparación entre diferentes módulos GPS comerciales.

Tabla 4. 8 Tabla de selección de microcontroladores

Modelo	Arduino Mega 2560	NUCLEO-L432KC	TM4C123GXL	
Foto				
Dimensiones	101.52x53.3x10 mm	45x30x10	20x16x4	-
Voltaje Operación (V)	5V	1.8-5V	5V	5
RAM (KB)	8	128	3	-
FLASH (KB)	256	512	512	-
Comunicación	USB/UART/I2C /SPI/GPIO	USB/UART/I2C/ CAN/SPI/GPIO	USB/UART/I2C /SPI	CAN
Temperatura de Operación (°C)	-40 hasta +85	-40 hasta+105°C	-40 hasta +85	> -10
Consumo de Energía (W)	2.5W	2.5W	1.8W	-

Peso (g)	15	10	6	-
Precio ($)	40	20	30	-

Nota. Elaboración propia

Tras analizar las características de la Tabla 4.8, se selecciona el microcontrolador NUCLEO-L432KC dado su diseño compacto, poco consumo de energía y económico.

El sistema debe estar en constante comunicación con la base, por lo que es necesario conocer su ubicación en tiempo real. Además, con su localización se puede mejorar el mapeo del entorno y la navegación en general. A continuación, se presenta la Tabla 4.9 con 3 de los GPS utilizados comúnmente en el mercado.

Tabla 4. 9 Tabla de selección de GPS

Modelo	u-blox NEO-6MV2	SPARKFUN GPS-RTK2	UltimateGPS Module PA1616D	Requerimientos
Foto				
Dimensiones(mm)	16x12.2x2.4	43.5x43.2x3	16x16x4	-
Alimentación (V)	3.3-5	3.3-5	3.3-5	5
Consumo de energía (mA)	50	35	20-30	-
Precisión (m)	2.5	0.1	3	<= 3
Peso (g)	8	6.8	5.7	-
Interfaces	UART/USB/I2C/SPI	UART/USB/I2C/SPI	UART/I2C	I2C o USB
Precio ($)	20	150	30	-

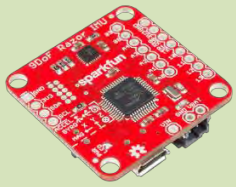
Temperatura de Operación (°C)	-40 +85	-40 +85	-40 +85	> -10

Nota. Elaboración propia

Se puede observar en la Tabla 4.9, que SPARKFUN GPS-RTK2 presenta la mejor precisión de los 3 GPS. Además, cuenta con un puerto USB, lo cual permite enviar directamente la información al módulo con GPU. El GPS U-blox NEO-6MV2, es el más económico, pero es el que consume más energía. Por último, el GPS UltimateGPS Module PA1616D, es el más compacto y ligero, pero presenta una menor precisión y no cuenta con un puerto USB. Después de analizar las 3 opciones, se selecciona el SPARKFUN GPS-RTK2.

Además de conocer su ubicación, es importante poder estimar sobre su orientación e inclinación. En la Tabla 4.10, se muestra una comparación entre diferentes IMU comerciales.

Tabla 4. 10 Tabla de selección de IMU

Modelo	SparkFun MPU9250	ADAFRUIT BNO055	Invensense mpu6050	Requerimientos
Foto				
Dimensiones (mm)	20x20x10	25x25x9	16x16x10	-
Precisión	±2g, ±200°/s, ±10µT	±1g, ±200°/s, ±4µT	±2g, ±100°/s, ±1µT	-
Alimentación (V)	2.4-3.6	3.3	3.3	-
Consumo de energía(mA)	15-20	10-20	5-10	-
Precio ($)	25	30	15	-
Peso (g)	4	5	3	-

Interfaz	USB/I2C/SPI	I2C/SPI/UART	I2C/SPI	I2C o USB
Temperatura de Operación (°C)	-40 +85	-40 +85	-40 +85	> -10

Nota. Elaboración propia

Las 3 opciones presentan similares características, sin embargo, se selecciona el IMU SparkFun MPU9250 ya que cuenta con un puerto USB, permitiendo la adquisición de la información de forma más fácil, por lo cual representa la mejor opción.

Con el fin de obtener mayor información del área de trabajo en tiempo real, como la identificación de zonas peligrosas u obstáculos para una planificación de la ruta previa expedición, se realizará una reconstrucción 3D del entorno mediante una cámara y un lidar 3D. En la Tabla 4.11, se muestra una comparación entre diferentes Lidar 3D comerciales.

Tabla 4. 11 Tabla de selección de Lidar3D

Modelo	MidLIVOX360	OS1	Rs-lidar-32	Requerimientos
Foto				
Dimensiones	65x65x60	87x87x75	114x114x108.73	-
Ratio de puntos (puntos/s)	200000	5.2 M	600000	-
Frecuencia de Muestreo (Hz)	10	10/20	5/10/20	10
Rango de medición (m)	40-70	90-170	200	> 50
Resolución Angular (°)	0.15	0.35	0.33	-
FOV	Horizontal 360° Vertical 59°	Horizontal 360° Vertical 45°	Horizontal 360° Vertical 40°	-

Voltaje de operación (V)	9-27	9-34	9 - 32	12
Potencia (W)	6.5-14	14-20	13.5	-
Protección	IP67	IP68&IP69K	IP67	-
Temperatura de Operación (°C)	-20| hasta +55	-40 hasta + 60	-30 +60	> -10
Conexión/Interfaz	Ethernet	Ethernet	Ethernet	Ethernet
Peso (g)	265	495	1130	-
Precio	749	4500	6000	-

Nota. Elaboración propia

Se puede destacar de la Tabla 4.11 que el RS-LIDAR-32, tiene una buena resolución y presenta un gran rango de medición, por lo que se puede obtener información de lugares más alejados cuando se esté en límite del alcance. Los 3 lidars tienen un campo de visión horizontal de 360°, sin embargo, varían en el ángulo vertical. Si bien es cierto el MidLivox360 tiene una buena resolución y presenta un mayor FOV vertical, tiene limitaciones en el montaje en el carro dado que su campo de visión vertical solo se mide desde 0° hacia arriba, a diferencia de los otros lidars que pueden escanear lugares por debajo suyo. Por otro lado, el OS1 capta mayor información por segundo, pero consume mayor potencia. Tras las características señaladas, se escoge al RS-lidar-32. Asimismo, en la Tabla 4.12 se muestra una comparación entre diferentes cámaras comerciales.

Tabla 4. 12 Tabla de selección de Cámara

Modelo	Insta360 GO2	ZED 2i Stereo	Intel RealSense D435i	Requerimientos
Foto				
Dimensiones (mm)	52.9x23.6x20.7	175x30.25x43.1	90x25x25	-
Resolución RGB	1920x1080	2688x1520	1920x1080	-
Cámara de profundidad	No	Si	Si	-
Peso (g)	26.5	166	75	-
Voltaje de carga (V)	5V USB-C/ Batería incluida	5V USB-C	5V VUSB-C	5V
Potencia(W)	5	6	8	-
Temperatura de operación (°C)	-10 hasta +40	-10 hasta +50	-10 hasta +50	> -10
Precio ($)	399	499	349	-

Nota. Elaboración propia

Se puede observar de la Tabla 4.12, que las 3 cámaras presentan similares características. La Insta360 GO2 es la más compacta y presenta buena resolución, pero no cuenta con una cámara de profundidad. Si bien es cierto, para la reconstrucción 3D y la teleoperación solo es necesario recibir imágenes a color, el contar con un canal profundidad brinda mayor información que puede ser utilizada a futuro. La ZED 2i Stereo presenta la mejor resolución en comparación con las otras 2, pero es muy pesada. Finalmente, a pesar de que la Intel

RealSense D435i consuma un poco más de energía, las ventajas que tiene son mayores, por ejemplo: es ligera, la más económicas y tiene 2 canales. Así, se escoge la Intel RealSense D435i.

4.4.2. Arquitectura electrónica

En la Figura 4.56, se muestra un diagrama de bloques para indicar cómo son las conexiones del sistema de teleoperación remota.

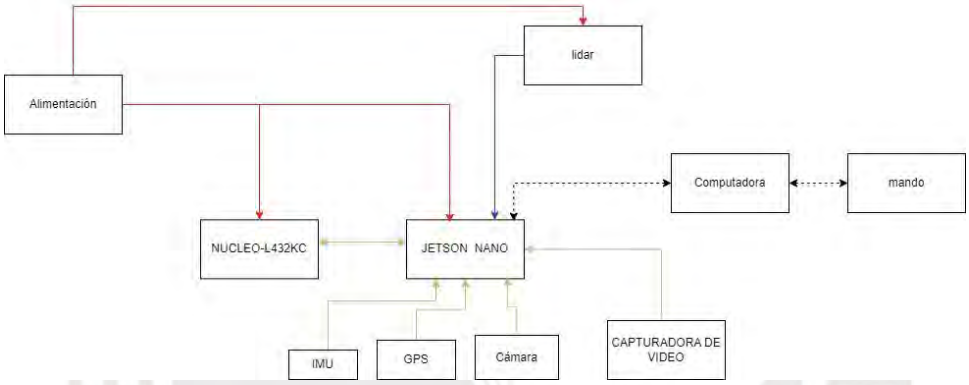


Figura 4. 56 Diagrama de bloques de conexiones Ssitema de teleopeación remota (Elaboración Propia)

4.4.3 Comunicación para la teleoperación remota

En esta sección se detalla la comunicación del vehículo móvil con el mando de control. En la Figura 4.57 se puede observar un esquema de la teleoperación, la comunicación del sistema con la base es a través de una antena Wifi, por el alcance. En la computadora se mostrará la interfaz con el usuario, en la cual se podrá observar los datos en tiempo real del escaneo 3D y monitoreo de grietas mientras que es teleoperado remotamente a través del mando.

Figura 4. 57 Esquema de la teleoperación remota

4.4.3.1 Selección de componentes

Es requisito que el operador cuente con una laptop y un mando para poder teleoperar al robot. Por otro lado, dado que el alcance Wifi que tiene la Jetson es menor a 300m, es necesario contar con una antena para ampliar ese rango y no ocurran problemas de conectividad. A continuación, se presenta la Tabla 4.13 en la cual se muestran las características de la Antena wifi que se utilizará.

Tabla 4. 13 Tabla de características de la Antena NSM5

Modelo	NanoStation loco M5	Requisitos
Foto		-
Voltaje (V)	24V	-
Consumo de energía máximo (W)	8	-
Alcance (m)	1000	>300
Temperatura de Operación (°C)	-30 hasta 75	> -10
Precio ($)	90	-

Nota. Elaboración propia

4.4.3.2 Protocolo de comunicación

En la Figura 4.58 se muestra los protocolos de comunicación que se utilizan entre los componentes. Como se mencionó anteriormente, la Jetson Nano será el encargado de procesar toda la información. Este módulo se conectará con el GPS, IMU, microcontrolador, cámara capturadora de video vía USB, mientras que con la antena Wifi y lidar vía Ethernet. Por lo que, dado su limitado número de puertos, se necesita el uso de un HUB para extender los puertos. Por otro lado, el microcontrolador será el encargado del encendido de las luces antiniebla, led de estado y transmitir las señales hacia los motores AK. Esta última se dará por medio del protocolo CAN.

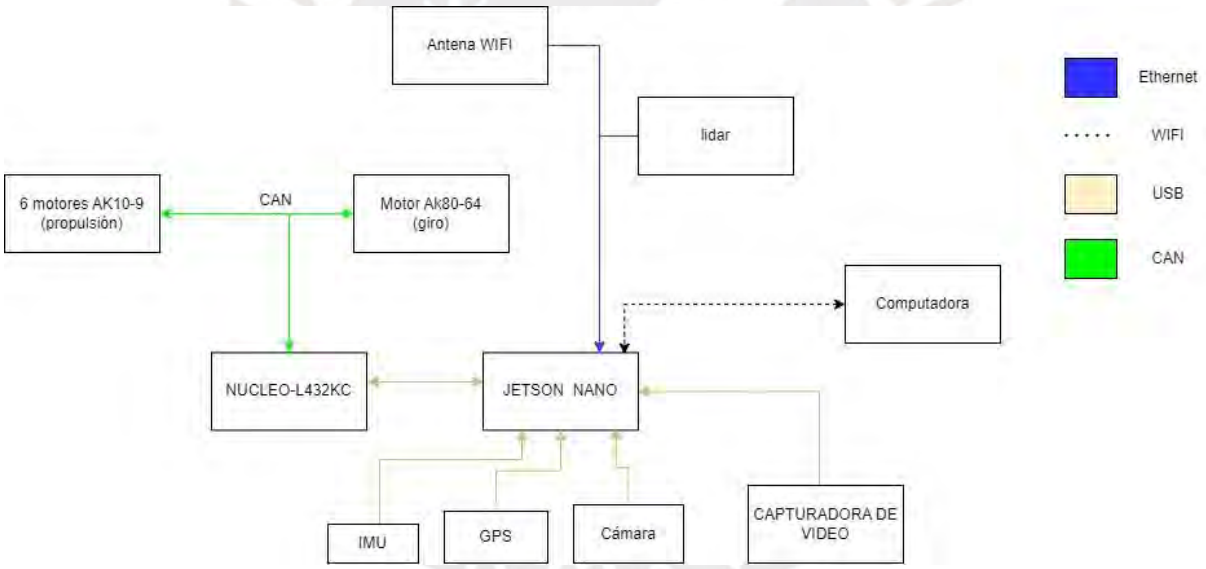


Figura 4. 58 Protocolos de comunicación (Elaboración Propia)

De acuerdo con la hoja de datos de los motores AK, el protocolo CAN está configurado a 1 MHz y el ID por default es de 0x00. Asimismo, la trama de comunicación es “ID + DATA”, donde ID es el identificador que establece la prioridad del mensaje, y DATA son los datos que se le enviará, ya sea posición, velocidad, parámetros del control. El control de los motores de propulsión será enviándoles datos de velocidad, mientras el motor de giro será controlado por

posición. Aprovechando que los motores AK tienen un controlador PID interno, solo es necesario enviarles los parámetros kp,kd, kt para el controL (ver Figura 4.59)

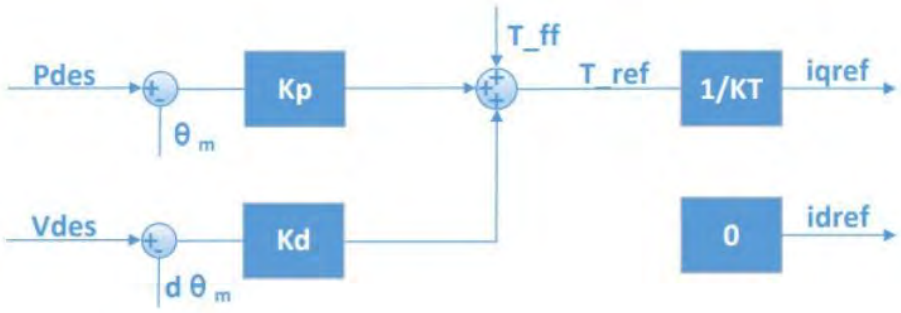


Figura 4. 59 Control PID motor AK (Elaboración Propia)

4.4.4. Interfaz con Usuario

En la Figura 4.60 se muestra el diagrama de bloques de la interacción con la Interfaz de Usuario. En primer lugar, se prende el botón del mando para establecer la conexión con el robot, una vez establecida se envía una señal de confirmación al robot y esto se refleja en el robot mediante el encendido del led de estado. Al cargar la interfaz se mostrará una ventana de selección (ver Figura 4.61 a), en la cual aparecerán las opciones de apagar sistema, registro, información del sistema y modo teleoperado. La opción de apagar sistema es el ícono “x” que aparece en la ventana principal, tras seleccionarla habrá una confirmación de salida y de presionarla se enviará un dato de parada de los motores al robot y se saldrá del programa. Tras seleccionar el modo teleoperado se abrirá otra ventana (ver Figura 4.61 b), se podrá controlar al robot remotamente además de ver los datos de la reconstrucción 3D e información del subsuelo en tiempo real. Asimismo, se mostrarán valores de la velocidad, orientación, proximidad de un objeto y un minimapa para visualizar la posición del robot. En la ventana de información del sistema, se muestra los parámetros de configuración de la cámara y el lidar.

Finalmente, en la ventana de registro se puede observar los videos y data que se hayan guardado.

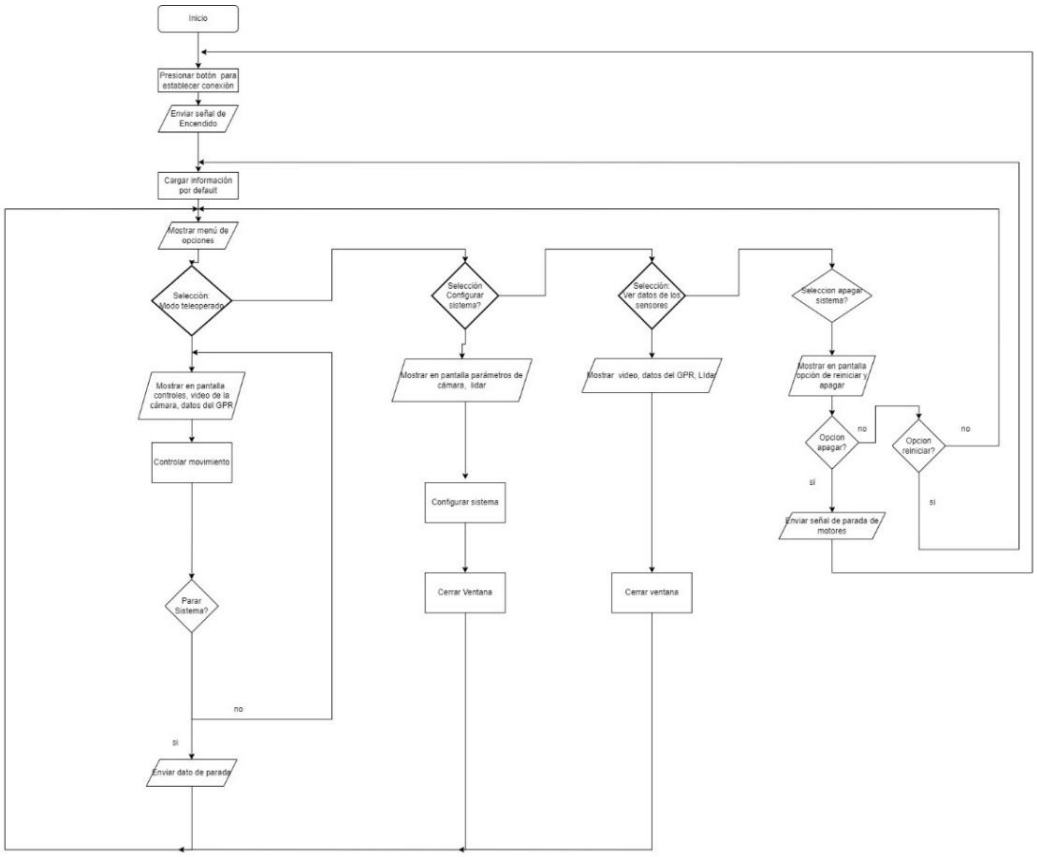


Figura 4. 60 Diagrama de bloques de la Interfaz de Usuario (Elaboración Propia)

(a) (b)

Figura 4. 61 Interfaz de Usuario (a) ventana de selección (b) ventana modo teleoperado (Elaboración Propia)

4.5. Consumo de energía

Se realiza un resumen del consumo energético de todo el sistema con el fin de seleccionar las baterías a utilizar. En la Tabla 4.14, se puede observar el consumo de cada componente según cada subsistema.

Tabla 4.14 Tabla de consumo de energía

Subsistema	Componente	Cantidad	Corriente	Voltaje	Potencia
Sistema de desplazamiento orientado a un entorno antártico	Motor AK10-9 V2.0	6	2.056A	48V	592.2W
	Motor AK80-64	1	0.625A	48V	30W
Sistema de monitoreo de grietas	HDMI Video Capture Card-Aluminum	1	-	-	2W
Sistema de teleoperación remota y reconstrucción 3D	Jetson Nano	1	2A	5V	10W
	Rs-lidar-32	1	-	12V	13.5W
	Intel RealSense D435i	1	-	-	3.5W
	SPARKFUN GPS-RTK2	1	0.35A	5V	1.75W
	IMU SparkFun MPU9250	1	0.02A	3.3V	0.066W
	NUCLEO-L432KC	1	500mA	5V	2.5W
	luces	2			36W
	Antena	1		24V	8W
Total	-	-	-	-	699.5W

Luego de realizar la Tabla 4.14, se puede observar que la potencia para una 1 hora de autonomía es de 699.5W. Por lo tanto, al multiplicarlo por un factor de 1.5 se obtiene un tiempo de operación de 1h y 30min, además se considera un factor de seguridad de 1.25 debido a que a bajas temperaturas la capacidad de la batería disminuye. Así, la potencia que se necesita para 1h y media de trabajo es 699.5Wh*1.5*1.25=1311.56 Wh.

4.5.1. Selección de batería y relé

Dado que el voltaje máximo que requieren los componentes eléctricos/electrónicos es de 48V y la potencia requerida es de 1311.56 W, se necesita una batería de 1311.56Wh/48V = 27.5 Ah como mínimo. A continuación, en la Tabla 4.15, se muestra las características de la batería a usar.

Tabla 4.15 Tabla de batería 48V

Modelo	ABL-048030P
Foto	
Batería	Ion-Litio
Voltaje (V)	48
Capacidad (A)	30
Almacenamiento de energía (W)	1440
Peso (Kg)	7.8
Dimensiones (mm)	255x230x70
Temperatura descarga (°C)	-20°C hasta 60°C

Nota. Elaboración propia

Luego se selecciona un relé que acepte el voltaje de la batería con el fin de controlar la distribución de la energía en el sistema. En la Tabla 4.16, se muestra las características del relé electromecánico a usar.

Tabla 4.16 Tabla de características del relé 48V

Modelo	DCNLEV100-E	Requisitos
Foto		
Material de Contacto	Cobre	-
Voltaje Bobina(V)	48	48
Corriente Bobina (mA)	122	-
Montaje	M4	-
Dimensiones (mm)	46x53x53	-
Temperatura operación (°C)	-40 hasta 60	> -10

Nota. Elaboración propia

4.5.2 Diseño de pcbs

Se realiza el diseño de pcbs con la finalidad de ahorrar cableado y hacer más compacto los componentes a utilizar.

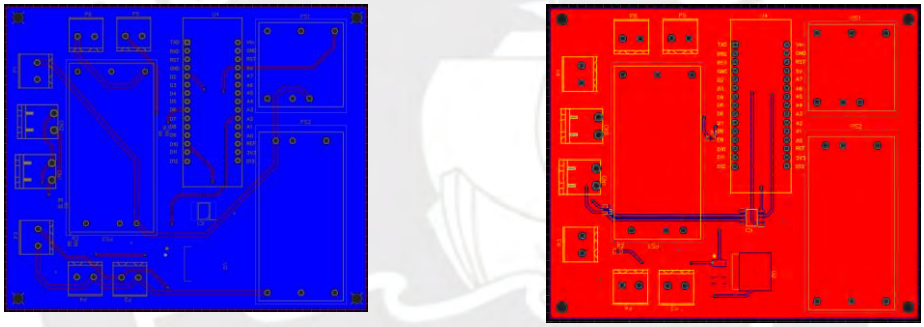
4.5.2.1 PCB 1

Como se mencionó anteriormente, algunos componentes no operan al mismo voltaje, por lo que se necesita el uso de reguladores DC-DC. En la Figura 4.62, se muestra el modelo 3D de la PCB1 diseñada para solventar las conexiones que generan estos reguladores. Por otro lado, el microcontrolador enviará las señales de control hacia los motores vía protocolo CAN, por lo que se necesita un transceptor CAN para recibir y transmitir esa información como

componente intermedio. Además, esta PCB1 contiene resistencias, un mosfet para el control de las luces y borneras para las salidas.

Figura 4. 62 Modelo 3D de la PCB1 (Elaboración Propia)

Finalmente, en la Figura 4.63, se muestra el ruteado de la PCB1 realizada.



(a) (b)

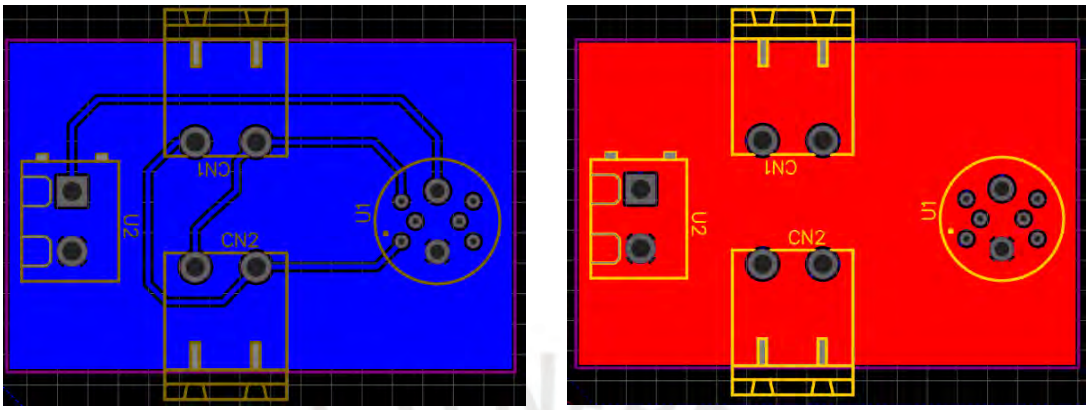
Figura 4. 63 Ruteado de la PCB1 (a) Capa inferior (b) Capa superior (Elaboración Propia)

4.5.2.2 PCB 2

Se realiza esta PCB2 para distribuir la energía y la información de las señales que componen el protocolo CAN (CAN-HIGH, CAN-LOW) hacia los motores AK. De esta manera, las señales de estos motores se entrelazan y forman un BUS-CAN para una única conexión con el microcontrolador.

Figura 4. 64 Modelo 3D de la PCB2 (Elaboración Propia)

Finalmente, en la Figura 4.65, se muestra el ruteado de la PCB2 realizada.



(a) (b)

Figura 4. 65 Ruteado de la PCB2 (a) Capa inferior (b) Capa superior (Elaboración Propia)

4.6 Caja de componentes

En la Figura 4.66 se muestra como es la distribución física de los componentes dentro de la caja electrónica. Esta caja tiene dimensiones 280x128x560 mm, cuenta con una separación para incluir a las baterías y se pueda realizar una conexión directa.

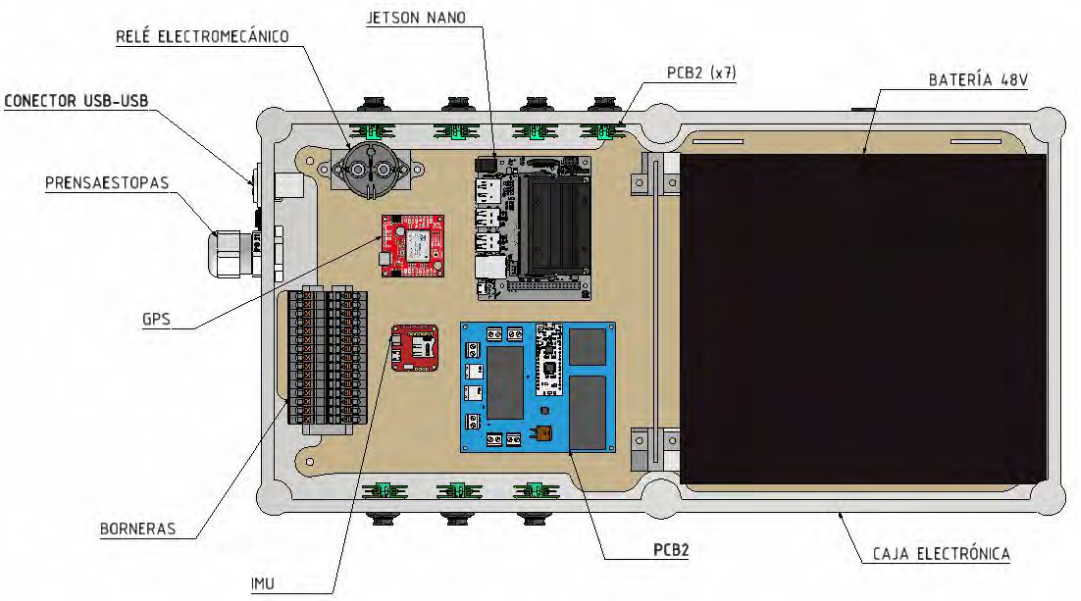


Figura 4. 66 Caja de componentes (Elaboración Propia)

CAPÍTULO V

5. COSTOS Y PLANOS

En la Tabla 5.1. que se muestra a continuación, se detallan los costos de los componentes utilizados para la implementación del vehículo separados por cada subsistema.

Tabla 5. 1 Tabla de Costeo

Subsistema	Componente	Cantidad	Precio/unitario ($)	Precio Total ($)
Subsistema de desplazamiento orientado a un entorno antártico	Motor AK10-9 V2.0	6	699	4194
	Motor AK80-64	1	890	890
Subsistema de monitoreo de grietas	HDMI Video Capture Card-Aluminum	1	13	13
	Antena GPR	1	1500	1500
	Unidad de Control GPR	1	4500	4500
	Rs-lidar-32	1	6000	6000
	Intel RealSense D435i	1	349	349
Subsistema de teleoperación remota	Jetson Nano	1	100	100
	SPARKFUN GPS-RTK2	1	150	150
	IMU SparkFun MPU9250	1	25	25
	NUCLEO-L432KC	1	11	11
	Antena Wifi	1	90	90
	Mando	1	35	35
	Batería 48V	1	630	630

Diseño caja electrónica	Relé electromecánico 48V	1	74	74
	Conector USB-USB	2	20	40
	USB-HUB	1	10	10
	Borneras CAN	16	0.0415	0.66
	Borneras potencia	13	0.0925	1.20
	Conector multiseñal	7	8.53	59.71
	Resistencia	3	0.055	0.165
	Convertidor 48-5V	1	42.16	42.16
	Convertidor 48-12V	1	37.07	37.07
	Convertidor 48-24V	1	37.07	37.07
	Luces antiniebla	1	11	11
	Led panel	1	10	10
	Caja electrónica BCAL285613T	1	140	140
Total	-	-	-	18950.04

Nota. Elaboración propia

Asimismo, en la Tabla 5.2, se detalla la lista de planos mecánicos y eléctricos-electrónicos que se tienen. En el archivo 20180754_Tesis_Planos, se puede apreciar el detalle de los planos enlistados a continuación.

Tabla 5. 2 Lista de planos mecánicos/eléctricos-electrónicos

Subsistema	Nro.	Descripción	Tipo
Subsistema desplazamiento – Módulo Propulsión	1	Subensamble Encapsulado-ruedas	Subensamble
	2	Subensamble Encapsulado Motor	Subensamble
	3	Tapa inferior - acople motor - electrónica	Despiece
	4	Cuerpo motor - base	Despiece
	5	Tapa superior – motor	Despiece
	6	Acople Encapsulado-Ruedas	Subensamble
Subsistema desplazamiento – Módulo Suspensión	7	Acople Suspensión Izquierda	Subensamble
	8	Wishbone Superior	Subensamble
	9	Wishbone Inferior	Subensamble
	10	Cilindro para rótula wishbone	Despiece
	11	Espaciador rótula	Despiece
	12	Cilindro para bocina wishbone	Despiece
	13	Bocina Wishbone	Despiece
	14	Soporte suspensión	Despiece
	15	Soporte resorte superior	Despiece
	16	Soporte resorte inferior	Despiece
	17	Placa Wishbone inferior	Despiece
	18	Kingping Central	Despiece
	19	Kingping Izquierdo	Despiece
	20	Kingping Derecho	Despiece
Subsistema desplazamiento – Módulo mecanismo de giro	21	Subensamble giro	Subensamble
	22	Espaciador rótula Ackerman	Despiece
	23	Biela	Despiece
	24	Subensamble eje extremo	Subensamble
	25	Subensamble soporte superior extremo	Subensamble
	26	Bocina soporte superior	Despiece
	27	Tapa-soporte superior extremo	Despiece
	28	Contratapa-soporte superior extremo	Despiece

	29	Subensamble soporte inferior extremo	Subensamble
	30	Bocina soporte inferior extremo	Despiece
	31	Tapa-soporte inferior extremo	Despiece
	32	Contratapa- soporte inferior extremo	Despiece
	33	Eje extremo	Despiece
	34	Plato Ackerman	Subensamble
	35	Placa Ackerman	Despiece
	36	Soporte perfil Ackerman	Despiece
	37	Soporte lateral Ackerman	Despiece
	38	Cilindro giro Ackerman	Despiece
	39	Subensamble eje central	Subensamble
	40	Tapa-soporte superior central	Despiece
	41	Contratapa-soporte superior central	Despiece
	42	Soporte inferior central	Despiece
	43	Eje central	Despiece
	44	Eje central motor	Despiece
	45	Acople motor eje	Despiece
Subsistema de monitoreo de grietas	46	Soporte-LIDAR	Subensamble
	47	Acople LIDAR	Despiece
	48	Soporte - Antena	Subensamble
	49	Acople Antena	Despiece
	50	Sujetador GPR	Despiece
	51	Soporte GPR	Despiece
Subsistema de teleoperación remota	52	Caja electrónica	Ensamble
Subsistema desplazamiento	53	Subsistema desplazamiento	Subensamble
Sistema Integrado	54	Tapa externa	Despiece
Sistema Integrado	55	Vehículo móvil terrestre	Ensamble
Planos eléctricos-electrónicos	56	Plano esquemático para PCB1	-
Planos eléctricos-electrónicos	57	Plano esquemático para PCB2	-

CONCLUSIONES

- Se diseñó un vehículo móvil teleoperado de forma remota con un radio de alcance máximo de 300m, cuya velocidad máxima es de 1 m/s y tiene un tiempo de operación de 1h y media dada las bajas temperaturas (<0°C). Este sistema es una herramienta para evitar que los científicos que realizan trabajos de campo en la Antártida, como los investigadores de Instituto del Mar del Perú (IMARPE), sean víctimas de accidentes, como caídas por la presencia de grietas ocultas, al permitirles tener un mayor conocimiento sobre el entorno en que trabajan. Esto debido a que el vehículo móvil posee diversos sensores como Lidar, cámara, GPS, entre otros, que permiten generar un mapa previo de la zona y mostrar en tiempo real información del subsuelo con el fin de monitorear grietas.
- Se diseñó un sistema robusto ante climas extremos, ya que opera a una temperatura mínima de -10°C. Además, siguiendo con las normas y regulaciones, como el Tratado de Madrid, el sistema es ecoamigable al no depender de combustibles fósiles para su funcionamiento.
- El diseño que se propone cuenta con un sistema de locomoción mediante 6 ruedas. Esto debido a su buena adaptación a distintos tipos de terrenos como nieve, tierra, hielo, entre otros. Asimismo, al contar con seis puntos de apoyo, el peso del vehículo se distribuye de mejor manera en el suelo por lo que se tendría mayor tracción especialmente en superficies resbaladizas o deformables, evitando su hundimiento.
- Se diseñó un mecanismo de doble Ackerman que permite un giro máximo de 25° para cada lado mediante bielas, platos giratorios y una transmisión por fajas y engranajes. Este mecanismo, a diferencia de otros modelos (tipo deslizante, independiente), reduce

la fricción o deslizamiento de las ruedas al momento de girar y posibilita un mejor control de giro sobre superficies resbalosas, así como un menor desgaste de las ruedas.

- Se implementó un prototipo del sistema de dirección, el cual permitió verificar los ángulos obtenidos por la simulación. Asimismo, se pudo identificar posibles errores como la falta de robustez de las piezas y reajustar los parámetros de dimensionamiento del vehículo.
- Se diseñó una interfaz intuitiva en la cual se puede controlar de forma remota al robot vía wifi y visualizar en tiempo real los datos de la reconstrucción 3D en base a la información por la cámara y el Lidar usando el método V-LOAM. Además, se puede observar la información del subsuelo continua por medio de la antena GPR.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda investigar sobre la presencia de animales en el entorno y qué acciones o medidas se debe tener en cuenta para la movilidad del vehículo con el fin de expandir el área de trabajo a diferentes zonas de la Antártida.
- Si se desea incorporar un nivel de autonomía al sistema, se recomienda investigar sobre la fusión de sensores para integrar los diferentes componentes que se tiene, optimizando el sistema de percepción y planeamiento de rutas. Asimismo, se debe asegurar cumplir con la normativa de vehículos autónomos como por ejemplo la norma SA-J0316, la cual especifica el grado de autonomía del sistema, entre otras.
- Si se desea realizar un mapeo más completo del entorno, se recomienda investigar el monitoreo en conjunto usando diferentes tipos de vehículos, tanto terrestres como aéreos. Por ejemplo, se puede obtener un mapa preliminar con un vehículo aéreo y luego complementarlo con imágenes terrestres, entre otros.
- Si se desea implementar el método de la reconstrucción 3D, se recomienda comprobar y validar primero en entornos similares, teniendo en cuenta los diferentes desafíos que pueden presentarse. Asimismo, comparar los resultados obtenidos con otros métodos ya existentes para saber su eficiencia computacional.

BIBLIOGRAFÍA

Alibaba. (s.f) Servo Motor with Drive Gear RMD-X10S2 1:35 V3 Brushless dc Large Torque 50N.M High Precision Planetary Reducer. https://www.alibaba.com/product-detail/Servo-Motor-with-Drive-Gear-RMD_1600462911342.html

Apostolopoulos, D. & Wagner, M.& Whittaker, R. (2022). *Technology and field demonstration results in the robotic search for Antarctic meteorites*. https://www.researchgate.net/publication/228725634_Technology_and_field_demonstration_results_in_the_robotic_search_for_Antarctic_meteorites

Apostolopoulos, D. (2001). *Analytical configuration of wheeled robotic locomotion* (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University. https://www.researchgate.net/publication/2378232_Analytical_Configuration_of_Wheeled_Robotic_Locomotion

Arcone S. (2005). Crevasse detection with GPR across the Ross Ice Shelf, Antarctica. https://n9.cl/p58en

Argentina.gob.ar (2 de noviembre de 2021). Se presentó un robot para empleo científico en la Antártida. https://www.argentina.gob.ar/noticias/se-presento-un-robot-para-empleo-cientifico-en-la-antartida

Arpit Chouksey a, Praveen K. Thakur a, Gaurav Sahni a, Ashit K. Swain b, S.P. Aggarwal a, A.S. Kumar (2020). Mapping and identification of ice-sheet and glacier features using optical and SAR data in parts of central Dronning Maud Land (cDML), East Antarctica. https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100740

Bekker, M. G. (1962). *Theory of Land Locomotion*. University of Michigan Press. https://www.scienceopen.com/book?vid=65350c8a-04bf-4ebb-9d08-ffdd5f719b3e

Blain, L. (2008). Lotus deploys unique Concept Ice Vehicle to the Antartic. https://newatlas.com/lotus-deploys-unique-concept-ice-vehicle-to-the-antarctic/9849/

Brandt O. , Hawley R., Kohler J., Hagen O., Morris E., Dunse T. y Eiken T. (2008 Comparison of airborne radar altimeter and ground-based Ku-band radar measurements on the ice cap Austfonna, Svalbard. Copernicus Publications on behalf of the European

Geosciences Union. https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/9060395

Chouksey Arpit, Thakur Praveen K., Sahni Gaurav, Swain Ashit K., Aggarwal S.P., Kumar A.S. (2021). Mapping and identification of ice-sheet and glacier features using optical and SAR data in parts of central Dronning Maud Land (cDML), East Antarctica. *Polar Science*, 30, 1873-9652. https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100740.

Chowdhary, G., Soman, C. y Driggs-Campbell, K. (24 de julio de 2020). *Levels of autonomy forfieldrobots*. EarthSense. https://www.earthsense.co/news/2020/7/24/levels-of-autonomy-for-field-robots

CubeMars Motion Advanced Robotic System. (2023). AK10-9 V2.0. https://store.cubemars.com/goods.php?id=1141

CubeMars Motion Advanced Robotic System. (2023). AK80-64 https://store.cubemars.com/goods-1143-AK80-64.html

DigiKey (2016, Marzo). A000067. https://www.digikey.com/en/products/detail/arduino/A000067/2639006

DigiKey (2020, Agosto). NUCLEO-F446ZE. https://www.digikey.com/en/products/detail/stmicroelectronics/NUCLEO-F446ZE/5806778?s=N4IgTCBcDaIHIFUDCAZAogeQLQDEAseAbAFpogC6AvkA

DigiKey (2022, Diciembre). NUCLEO-F446ZE. https://joslinperu.com/producto/tiva-c-series-tm4c123gxl/

Dremali, D. (8 de enero de 2018). *The 5 Levels of autonomy*. AndPlus. https://www.andplus.com/blog/the-5-levels-of-autonomy

Efthimios Tsiogas; Ioannis Kostavelis; Georgios Kouros; Andreas Kargakos; Dimitrios Giakoumis (2019). Surface Exploration with a Robot-Trailer System for Autonomous Subsurface Scanning. IEEE Xplore. https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/9060395

Entusiasta Interwebs. (2021, Noviembre). ¿Qué es un neumático sin cámara y qué ventajas ofrecen? https://n9.cl/p9uiw

Ferrer Gutiérrez, V. (2004). *Calibración de una cámara por seguimiento de características en una secuencia de imágenes.* [Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.] https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/980/1/TMIPICYTF4C32004.pdf

Gamillo, E. (5 de mayo de 2022). This Tiny Yellow Robot Spies on Antarctica's Emperor Penguins. *Smithsonian Magazine. https://www.smithsonianmag.com/smart-news/this-tiny-yellow-robot-spies-on-antarcticas-emperor-penguins-180980021/#:~:text=Among%20thousands%20of%20emperor%20penguins,level%20with%20the%20adult%20penguins*

Gravenkötter, G., & Hamann, G. (2004). *Development of a cool robot for the Antarctic* (Diplomarbeit). Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Hoffman, A., Steen-Larsen, H., Christianson, K. y Hvidberg, C. (2019). *A low-cost autonomous rover for polar science.* Geoscientific Instrumentation, Methods and Data System. https://www.proquest.com/scholarly-journals/low-cost-autonomous-rover-polar-science/docview/2237774130/se-2

Holthaus, E. (13 de mayo de 2015). *Greenland's Glaciers are Accelerating So Fast, They Have Stretch Marks*. Slate Magazine. Extracts at https://slate.com/technology/2015/05/crevasses-on-greenland-glaciers-are-evidence-of-the-increasing-rate-of-ice-melt.html

Infoespacial. (3 febrero de 2017). *Los Sentinel-1 vigilan la grieta en la barrera de hielo Larsen C*. Recuperado 4 de septiembre de 2022, de https://www.infoespacial.com/texto-diario/mostrar/3568304/sentinel-1-vigilan-grieta-barrera-hielo-larsen-c

Ingeniería y Mecánica Automotriz. (2019, Octubre). Qué es y como funciona el principio de Ackerman? https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-y-como-funciona-el-principio-de-ackerman/

International Organization for Standardization. (2013, Mayo). Robots and robotic devices — Coordinate systems and motion nomenclatures. https://www.iso.org/standard/59444.html?browse=tc

International Organization for Standardization. (2016, Septiembre). Robotics — Performance criteria and related test methods for service robots — Part 1: Locomotion for wheeled robots https://www.iso.org/standard/63127.html?browse=tc

International Organization for Standardization. (2017, Marzo). Mobile robots — Vocabulary https://www.iso.org/standard/65658.html?browse=tc

Ishigami, G., Miwa, A., Nagatani, K., & Yoshida, K. (2007). *Terramechanics-based model for steering maneuver of planetary exploration rovers on loose soil*. Journal of Field Robotics, 24(3), 233–250. https://www.researchgate.net/publication/220648239_Terramechanics-based_for_steering_maneuver_of_planetary_exploration_rovers_on_loose_soil

Kristen, Z. (29 de abril de 2022). A tiny research robot is living with an Antarctica penguin colony. *CBS NEWS*. https://www.cbsnews.com/news/echo-robot-antartica-penguin-research/

Lee, T., Cho, S., Lee, S., Roh, C. y Kang, Y. (2016). "Design of an autonomous antarctic exploration platforms through manipulations of All-Terrain Vehicles," *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific).* doi: 10.1109/ITEC-AP.2016.7512963.

Lever, J., Ray, L., Streeter, A., y Price, A. (27 de febrero de 2006). *Solar power for an Antartic rover.* Wiley Online Library. https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1002/hyp.6121

Lever, J., Shoop, S. y Bernhard, R. (2009). *Design of lightweight robots for over-snow mobility.* Journal of Terramechanics. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.11.003.

Lewis, A. (2013). Getting to Antarctica. NDSU. https://www.ndsu.edu/faculty/adalewis/Working_in_Antarctica.html

Linna, P., Aaltonen, T., Halla, A., Grönman, J. y Narra, N. (2020). "Conceptual design of an autonomous rover with ground penetrating radar: application in characterizing soils using deep learning," *2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)* doi: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245270.

LivoxTech (2023, Enero). Specs - Mid-360 LiDAR Sensor – Livox. https://www.livoxtech.com/mid-360/specs

Ma S., Modi J., Peng T., Chengyi s., Jianbo W., Jun W., Tao D. y Wen S. (2018). Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2018.11.002

Meteoblue (2021). *Climate Change Machu Picchu Research Station.* https://www.meteoblue.com/en/climate-change/machu-picchu-research-station_antarctica_6620764#

Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2017). *Desprendimiento de la Barrera de Hielo Larsen C - Sentinel-1A SAR-C - 10 de Julio de 2017*. Argentina gob. https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/educacion-y-formacion-masiva/materiales-educativos/desprendimiento-de-la-barrera-de-hielo-larsen-c-sentinel-1a-sar-c-10-de-julio-de-2017

Myers, L. (01 de junio de 2022). *meet ECHO, the yellow robot that's monitoring emperor penguins in antarctica.* Designboom. https://www.designboom.com/technology/echo-yellow-robot-monitoring-emperor-penguins-antarctica-06-01-2022/

Ogier, C, Ravanel, L. (2015). Snow bridge over crevasses, a poorly understood structure on glaciers. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pp. 8865. Extracts at

Organización Meteorológica Mundial (1 de julio de 2021). *La OMM confirma un récord de temperatura en la Antártida e invalida otro.* https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-omm-confirma-un-r%C3%A9cord-de-temperatura-en-la-ant%C3%A1rtida-e-invalida-otro#:~:text=La%20temperatura%20media%20anual%20oscila,altas%20del%20interior%20del%20continente

P. Linna; T. Aaltonen; A. Halla; J. Grönman; N. Narra (2020). Conceptual design of an autonomous rover with ground penetrating radar: application in characterizing soils using deep learning. IEEE Xplore. https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/6295593

Ravanel L., Lacroix E., Le Meur E., Batoux P., Malet E. (2022). Multiparameter monitoring of crevasses on an Alpine glacier to understand formation and evolution of snow bridges. *Cold Regions Science and Technology*, 203. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103643.

Ravanel L., Lacroix E., Le Meur E., Batoux P., Malet E. (2022). Multiparameter monitoring of crevasses on an Alpine glacier to understand formation and evolution of snow bridges. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103643

Ray, L., Price, A., Streeter, D. y Lever, J. H. "The Design of a Mobile Robot for Instrument Network Deployment in Antarctica," Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 2111-2116, doi: 10.1109/ROBOT.2005.1570425.

Rebecca M. Williams; Laura E. Ray; James H. Lever (2012). Autonomous robotic ground penetrating radar surveys of ice sheets; using machine learning to identify hidden crevasses. IEEE Xplore. https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/6295593

Richmond, P. (marzo de 1995). *Motion resistance of wheeled vehicles in snow*. NASA STI/Recon Technical Report N. https://www.researchgate.net/publication/253549373_Motion_resistance_of_wheeled_vehicles_in_snow

Rodríguez, H. (30 de junio de 2022). La Antártida se agrieta de nuevo. National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/antartida-iceberg-tamano-new-york_13937

SAE International. (3 de mayo de 2021). *SAE Levels of Driving Automation Refined for Clarity and International Audience*. https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update

Science Learning Hub. (3 febrero de 2017). *Collecting data in Antarctica*. Recuperado 3 de septiembre de 2022, de https://www.sciencelearn.org.nz/resources/321-collecting-data-in-antarctica

SKF. SAL 10 E https://www.skf.com/cl/products/plain-bearings/spherical-plain-bearings-rod-ends/rod-ends/productid-SAL%2010%20E

Ski-Doo. (2016). 2024 Ski-Doo Summit-Deep Snow Snowmobile. https://www.ski-doo.com/us/en/models/deep-snow/summit.html

Spergel, J. (16 de noviembre de 2017). *Let's Talk About Crevasses-Deep Fractures in Antarctica's Ice*. StateofthePlanet. https://news.climate.columbia.edu/2017/11/16/crevasses-antarctic-ice-fractures/

Thompson S.S., Cook S., Kulessa B., Winberry J.P., Fraser A.D., Galton-Fenzi B.K. (2020). Comparing satellite and helicopter-based methods for observing crevasses, application in East Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*,178. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103128.

Trautmann, E., Ray, L., & Lever, J. (2009, Oct.). Development of an autonomous robot for ground penetrating radar surveys of polar ice. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO.

University at Buffalo Glacier Modeling Lab. (2018, Julio). Research: Crevasse fields. https://ubwp.buffalo.edu/glaciermodelinglab/research/research-crevasse-fields/

US Army Corps of Engineer (19 de noviembre de 2012). *Robotic Rovers*. https://www.erdc.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476652/robotic-rovers/

USAP Photo Library (30 de noviembre de 2002). *Antarctic Photo Library.* https://photolibrary.usap.gov/PhotoDetails.aspx?filename=MONGOJOHN.JPG

Varela, M. (6 de abril de 2022). *¿En qué afecta la contaminación en la Antártida?*. Hablando en vidrio. Recuperado 4 de septiembre de 2022, de https://hablandoenvidrio.com/en-que-afecta-contaminacion-en-antartida/

Williams R. M., Ray L. E. and Lever J. H. (2012), Autonomous robotic ground penetrating radar surveys of ice sheets; Using machine learning to identify hidden crevasses. *2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings*, pp. 7-12, doi: 10.1109/IST.2012.6295593.

Williams R. M., Ray L. E., Lever J. H. and Burzynski A. M. (2014). Crevasse Detection in Ice Sheets Using Ground Penetrating Radar and Machine Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(12), pp. 4836-4848. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2332872.

Zamora, E. (8 de noviembre de 2015). Robots Autónomos: Navegación. *Erik Zamora*. https://ezamorag.wordpress.com/tag/navegacion-autonoma/

Zhang, J., & Singh, S. (2015). Visual-Lidar Odometry and Mapping: Low-Drift, Robust, and Fast. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015 IEEE).* doi: 10.1109/ICRA.2015.7139486