

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Diseño de un sistema mecatrónico móvil para apoyo en el traslado de
muestras durante la prospección geológica**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Fernando Infante Palacios

ASESOR:

M.Sc Diego Eduardo Quiroz Velásquez

Lima, Septiembre, 2024

Informe de Similitud

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

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

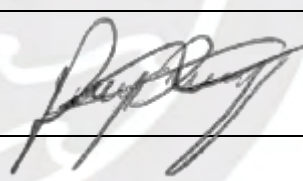
DISEÑO DE UN SISTEMA MECATRÓNICO MÓVIL PARA APOYO EN EL TRASLADO DE MUESTRAS, DURANTE LA PROSPECCIÓN GEOLÓGICA

del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) FERNANDO INFANTE PALACIOS,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 6%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 18/08/2024.
- 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, 02 de Septiembre 2024

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

Resumen

El presente trabajo de tesis explora las tecnologías de navegación autónoma aplicadas en terrenos irregulares, enfocado en la prospección minera. La prospección consiste en la recolección de muestras a lo largo de grandes extensiones de terreno con el fin de determinar un yacimiento mineral. Existe un desafío ergonómico que enfrentan los operarios, quienes deben recorrer largas distancias transportando muestras que, en conjunto, pueden llegar a pesar cerca de 25 kilogramos. Por ello, se plantea el diseño de un vehículo autónomo para agilizar el proceso de traslado de muestras.

El vehículo debe ser capaz de identificar su ubicación y orientación, por lo cual se emplea un sensor inercial y un dispositivo GNSS que lo dirige a su destino. En paralelo, debe ser capaz de analizar la transitabilidad del terreno a fin de identificar el espacio disponible. Con este propósito, se integran sensores LiDAR y cámaras de profundidad para realizar un análisis exteroceptivo de la geometría, complementado con un análisis por apariencia a través imágenes de la cámara.

La dirección del vehículo se logra mediante un servomotor que opera mediante un mecanismo de dirección Ackerman, mientras que la tracción es proporcionada por un motor brushless DC y transmitida a través de una cadena. Todo el vehículo es energizado por medio de una batería Ion-Litio recargable y contiene elementos de protección, como el relé electromecánico y fusibles. La información de los sensores debe ser procesada por una unidad de procesamiento con GPU, y los actuadores son controlados por un microcontrolador. El diseño mecánico contempla una suspensión Double Wishbone delantera y un eje sólido en la parte trasera.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecerle a mi perro, Baloo, quien me acompañó en las largas noches de investigación, desarrollo, y redacción. Segundo, a mi hermana, María Julia, quien siempre estuvo presente para aportar una revisión adicional o escuchar mi frustración, cuando esta era difícil de manejar. Gracias a mis padres, quienes me alentaron y brindaron una perspectiva diferente en los momentos de incertidumbre. Finalmente, una especial mención a mi asesor, Diego Quiroz, quien me guio en cada capítulo del proyecto. Su asesoría permitió identificar errores y oportunidades de mejora, cruciales para el diseño de la propuesta solución presentada en este documento. La tesis es un hito presente en mi carrera profesional, las correcciones e investigación realizada me han permitido aprender gran variedad de temas. Este trabajo me ha brindado la oportunidad de integrar los conceptos aprendidos por 5 años en la PUCP y estoy seguro que he ganado una gran base para los proyectos que vengan a futuro.



Tabla de Contenidos

Resumen	i
Agradecimientos	ii
Introducción.....	1
Tabla de Contenidos	iii
Índice de figuras	v
Índice de tablas	viii
Antecedentes al diseño.....	2
1.1. Problemática	2
1.2. Investigación Previa.....	4
1.3. Revisión del Marco Teórico.....	4
1.3.1. Minería: Prospección y Exploración	4
1.3.2. Prospección Directa	6
1.3.3. Autonomía Off-Road	9
1.3.4. Sistemas de Suspensión para vehículos.....	10
1.3.5. Estructura para vehículo todo terreno.....	11
1.4. Propuesta Solución.....	12
1.4.1. Objetivos.....	12
1.4.2. Alcance	13
1.4.3. Metodología.....	13
1.5. Estado del Arte.....	15
1.5.1. Sistemas de análisis de Transitabilidad	15
1.5.2. Vehículos para manejo Off-Road.....	18
1.5.3. Robots autónomos Off-Road.....	20
1.5.4. Vehículo todo terreno autónomo	23
1.6. Idea del Producto	25
Diseño Conceptual.....	26
2.1. Resumen y asignación de subsistemas	26
2.2. Síntesis de estructura y comportamiento general	28
2.2.1. Arquitectura del sistema mecatrónico	28
2.2.2. Arquitectura del sistema eléctrico – electrónico.....	31
2.2.3. Diagramas de comportamiento.....	33
2.2.4. Bosquejos mecánicos del sistema físico	40
Concepto Óptimo.....	44
3.1. Diseño Preliminar	44
3.2. Selección de Componentes Electrónicos.....	47
3.2.1. Selección de Actuadores	47

3.2.2. Selección de Sensores	54
3.2.3. Selección de Unidades de Control.....	59
3.2.4. Selección de Componentes de Potencia	63
3.3. Diseño Eléctrico/Electrónico.....	68
3.3.1. Diagrama Eléctrico/Electrónico	68
3.3.2. Diseño de PCB de Energía	73
3.3.3. Diseño de Sistema de control	79
3.4. Diseño Mecánico	82
3.4.1. Soporte de Caja Electrónica	82
3.4.2. Soporte de la Batería	84
3.4.3. Soporte de Sensor Lidar	85
3.4.4. Soporte de Cámaras	86
3.4.5. Montaje Motor de Dirección	87
3.4.6. Montaje Motor de Tracción	91
3.4.7. Soporte de almacenamiento de muestras	93
3.4.8. Interfaz de usuario	96
3.4.9. Validación de la estructura	97
3.4.10. Validación de Volcadura	102
3.5. Dominio de Control.....	104
3.5.1. Modelamiento del Vehículo.....	104
3.5.2. Algoritmo de traversabilidad.....	106
3.5.3. Diagramas de Comportamiento.....	110
3.5.4. Interfaz de Usuario.....	113
3.5.5. Método de validación del sistema propuesto	116
3.6. Costos	117
3.6.1. Costos componentes eléctricos.....	117
3.6.2. Costos componentes mecánicos	118
3.6.3. Costo Total.....	120
Conclusiones y Recomendaciones	121
4.1. Conclusiones.....	121
4.2. Recomendaciones	124
Bibliografía.....	125
Anexo A.....	127

Índice de figuras

Figura 1.1. Inversión proporcional a la exploración (Alzahrani, 2010).....	5
Figura 1.2. Muestreo por canales (Alzahrani, 2010)	7
Figura 1.3. Muestreo por puntos (Alzahrani, 2010)	8
Figura 1.4. Diseño de chasis para vehículo todo terreno de 4 ruedas (Mihai Rasidescu, 1999)	11
Figura 1.5. Vehículo todo terreno de 4 ruedas (Santana Pedro, 2013)	24
Figura 2.1. Arquitectura del sistema mecatrónico (Infante Palacios, 2022)	29
Figura 2.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico (Infante Palacios, 2022)	32
Figura 2.3. Diagrama de comportamiento principal (Infante Palacios, 2022)	33
Figura 2.4. Diagrama de la función de Movimiento (Infante Palacios, 2022)	34
Figura 2.5. Diagrama de la función de Orientación (Infante Palacios, 2022)	35
Figura 2.6. Diagrama de la función de Transitabilidad (Infante Palacios, 2022).....	36
Figura 2.7. Diagrama de funciones para actuadores (Infante Palacios, 2022)	37
Figura 2.8. Diagrama de interrupciones de parada (Infante Palacios, 2022)	38
Figura 2.9. Diagrama de control Teleoperado (Infante Palacios, 2022)	38
Figura 2.10. Diagrama de la función Ejecutar Comando (Infante Palacios, 2022).....	39
Figura 2.11. Bosquejo del Vehículo completo (Infante Palacios, 2022).....	40
Figura 2.12. Bosquejos del sistema de tracción (Infante Palacios, 2022).....	41
Figura 2.13. Bosquejo del sistema de control del vehículo (Vista interna/ Vista Externa) (Infante Palacios, 2022).....	42
Figura 2.14. Bosquejo de los apoyos para los sensores (Infante Palacios, 2022)	43
Figura 3.1. Chasis CAD Inicial	45
Figura 3.2. Diagrama de bloques (Infante Palacios, 2022).....	46
Figura 3.3. Imagen de la propuesta (Infante Palacios, 2022).....	46
Figura 3.4. Cajas electrónicas Takachi	47
Figura 3.5. DCL para fuerzas de contacto	48
Figura 3.6. DCL área de contacto entre llanta y terreno	48
Figura 3.7. Ubicaciones de Lidar	55
Figura 3.8. Lidar 360 montado en la parte superior	56
Figura 3.9. Consumo de componentes (Infante Palacios, 2022).....	65
Figura 3.10. Requisitos de la batería (Infante Palacios, 2022)	65
Figura 3.11. Diagrama Eléctrico/Electrónico (Infante Palacios, 2022)	70
Figura 3.12. Conexión de potencia 2 Pines	71
Figura 3.13. Conexión USB hermética	72
Figura 3.14. Comunicación TTL-RS232 (Infante Palacios, 2022).....	74
Figura 3.15. Circuito para protocolo CAN (Infante Palacios, 2022)	74

Figura 3.16. Control de luces (Infante Palacios, 2022)	75
Figura 3.17. PCB de energía Esquemático (Infante Palacios, 2022)	76
Figura 3.18. PCB de energía	77
Figura 3.19. Modelo 3D de la PCB (Infante Palacios, 2022)	77
Figura 3.20. PCB conector DB25	78
Figura 3.21. Modelo 3D del conector (Infante Palacios, 2022).....	78
Figura 3.22. Posicionamiento Caja electrónica (Infante Palacios, 2022).....	79
Figura 3.23. Sistema de control (Infante Palacios, 2022).....	80
Figura 3.24. Conectores de la caja electrónica	80
Figura 3.25. Base de la caja electrónica	82
Figura 3.26. Base Caja Electrónica (Infante Palacios, 2022)	83
Figura 3.27. Seguro Caja Electrónica (Infante Palacios, 2022).....	83
Figura 3.28. Montaje del Sistema de control (Infante Palacios, 2022).....	83
Figura 3.29. Base para batería (Infante Palacios, 2022)	84
Figura 3.30. Análisis de esfuerzos de la base para la batería (Infante Palacios, 2022)	84
Figura 3.31. Posicionamiento sensor Lidar (Infante Palacios, 2022)	85
Figura 3.32. Base para sensor Lidar (Infante Palacios, 2022)	85
Figura 3.33. Soporte para cámaras de profundidad	86
Figura 3.34. Cámara de profundidad trasera	86
Figura 3.35. Encapsulado M8025 (Infante Palacios, 2022).....	87
Figura 3.36. Vista de corte encapsulado (Infante Palacios, 2022).....	88
Figura 3.37. Partes acople servomotor – Ackerman.....	88
Figura 3.38. Acople servomotor - Ackerman.....	89
Figura 3.39. Análisis de resistencia acople servomotor - Ackerman.....	89
Figura 3.40. Soporte servomotor M8025 (Infante Palacios, 2022).....	90
Figura 3.41. Análisis de resistencia soporte servomotor M8025 (Infante Palacios, 2022)	90
Figura 3.42. servomotor M8025 montado (Infante Palacios, 2022)	91
Figura 3.43. Ubicación del motor brushless (Infante Palacios, 2022)	91
Figura 3.44. Datos para el diseño de la cadena (Infante Palacios, 2022).....	92
Figura 3.45. Piñones comerciales (Infante Palacios, 2022).....	92
Figura 3.46. Unión motor brushless y la transmisión por cadena (Infante Palacios, 2022)	93
Figura 3.47. Modelo 3D transmisión por cadena (Infante Palacios, 2022).....	93
Figura 3.48. Caja hermética MSY133-16-23 (Infante Palacios, 2022).....	94
Figura 3.49. Almacenamiento de muestras izquierdo	94
Figura 3.50. Almacenamiento de muestras posterior	95
Figura 3.51. Vehículo para almacenamiento para muestras (Infante Palacios, 2022).....	95
Figura 3.52. Partes del soporte para Tablet	96

Figura 3.53. Vehículo completo (Infante Palacios, 2022)	97
Figura 3.54. DCL análisis de desplazamiento (Infante Palacios, 2022)	98
Figura 3.55. DCL análisis de giro (Infante Palacios, 2022)	100
Figura 3.56. DCL análisis área de contacto.....	101
Figura 3.57. Diagrama para cálculo de centro de masa	102
Figura 3.58. Modelo tipo bicicleta (Infante Palacios, 2022).....	105
Figura 3.59. Lógica de Navegación autónoma. (Infante Palacios, 2022)	106
Figura 3.60. Lógica del algoritmo TERP. (Weerakoon et al., 2022)	107
Figura 3.61. Segmentación por el algoritmo GA-Nav (Guan et al., 2022)	108
Figura 3.62. Sub conjunto de interés A (Infante Palacios, 2022)	109
Figura 3.63. Diagrama de Flujo principal (Infante Palacios, 2022).....	111
Figura 3.64. Ingreso de ruta sugerido (Infante Palacios, 2022)	112
Figura 3.65. Protocolo de parada (Infante Palacios, 2022).....	112
Figura 3.66. Pantalla de inicio (Infante Palacios, 2022).....	113
Figura 3.67. Pantalla de Mantenimiento (Infante Palacios, 2022).....	114
Figura 3.68. Ventanas de mantenimiento	114
Figura 3.69. Pantalla de ingreso de ruta (Infante Palacios, 2022)	115
Figura 3.70. Pantalla de operación (Infante Palacios, 2022)	115
Figura A1. Características del Modelo CAD	127
Figura A2. Información de las llantas del vehículo	127
Figura A3. Cálculos servomotor de dirección	128
Figura A4. Información del Vehículo	129
Figura A5. Cálculo Fuerza de Tracción	129
Figura A6. Cálculo Potencia del Motor.....	130
Figura A7. Pinout STM32L432KC.....	133
Figura A8. Pinout RoboteQ RGBL1960	134
Figura A9. Pinout M8025E25B50L	135

Índice de tablas

Tabla 1.1. Tabla comparativa configuraciones eje/rueda.....	11
Tabla 1.2. Tabla de resumen análisis de transitabilidad.....	17
Tabla 1.3. Tabla de resumen transitabilidad compuesta.....	17
Tabla 1.4. Tabla comparativa de vehículos autónomos Off-Road.....	19
Tabla 1.5. Tabla comparativa de vehículos comerciales Clearpath.....	20
Tabla 1.6. Tabla comparativa control por aprendizaje profundo.....	23
Tabla 2.1. Componentes del Sistema de Energía/Materia.....	26
Tabla 2.2. Componentes del Sistema de Medición.....	27
Tabla 2.3. Componentes del Sistema de Actuación.....	27
Tabla 2.4. Componentes del Sistema de Información.....	27
Tabla 2.5. Componentes de la Interfaz de Entrada.....	27
Tabla 2.6. Componentes de la Interfaz de Salida.....	27
Tabla 3.1. Vehículos Off-Road a adaptar.....	44
Tabla 3.2. Especificaciones modelos CAD inicial.....	45
Tabla 3.3. Servomotores de alto torque.....	49
Tabla 3.4. Motores brushless DC.....	52
Tabla 3.5. Motores brushless DC.....	53
Tabla 3.6. Dispositivos INS/GNSS.....	54
Tabla 3.7. Sensores Lidar.....	57
Tabla 3.8. Cámaras de profundidad.....	58
Tabla 3.9. Unidades de procesamiento.....	60
Tabla 3.10. Microcontroladores.....	61
Tabla 3.11. Sistema de Comunicación.....	62
Tabla 3.12. Dispositivo de control.....	63
Tabla 3.13. Faros comerciales.....	64
Tabla 3.14. Batería Principal.....	66
Tabla 3.15. Relé de estado sólido.....	67
Tabla 3.16. Listado de componentes y su energización.....	68
Tabla 3.17. Conversor DC-DC.....	69
Tabla 3.18. Listado de pines STM32L432KC a utilizar.....	72
Tabla 3.19. Listado de conectores sistema de control.....	81
Tabla 3.20. Especificaciones del vehículo final.....	97
Tabla 3.21. Especificaciones de las llantas a emplear.....	100
Tabla 3.22. Tabla de indicadores de validación.....	116
Tabla 3.23. Precio componentes electrónicos, actuadores y sensores.....	117
Tabla 3.24. Precio componentes mecánicos.....	119

Introducción

Para el presente trabajo de tesis se desarrolla un sistema mecatrónico móvil con el objetivo de semiautomatizar la actividad de prospección. De esta manera, se brinda apoyo con el transporte de equipo y muestras a los geólogos durante su trabajo de campo. Esta problemática permite aplicar tecnologías de automatización en entornos irregulares, representando un desafío multidisciplinario en los ámbitos mecánico, electrónico y de programación. Por medio de conocimiento empírico profesional, se ha corroborado la complejidad de esta tarea, y el proyecto propuesto ha recibido una acogida positiva por parte de los potenciales usuarios.

El proyecto se enfoca en la exploración de tecnologías de automatización en terrenos irregulares e identifica dos requisitos fundamentales para su adecuado diseño. En primer lugar, se requiere una adaptación mecánica para enfrentar la irregularidad del entorno, proponiendo adaptar el chasis de un vehículo off-road comercial. En segundo lugar, se aborda la selección de dispositivos, su comunicación y la lógica de operación. Esto se debe a la necesidad de un correcto sentido del entorno, una buena capacidad de procesamiento para analizar transitabilidad y verificaciones para evitar movimiento descontrolado o fallas que podrían poner en riesgo la integridad del vehículo, o la de los operarios cercanos.

El Capítulo I de la tesis aborda la problemática y detalle de la actividad, seguido de un análisis del estado del arte. A través de la investigación, se propone una idea de producto, la cual será validada mediante el contacto directo con los usuarios para determinar los requisitos. El Capítulo II detalla el diseño de la idea del producto, con diagramas electrónicos y mecánicos para la fase de diseño óptimo.

El Capítulo III incluye el diseño de la propuesta conceptual, dividiendo el trabajo en 03 dominios principales. Primero, se realiza el dominio eléctrico/electrónico, donde se seleccionan los componentes y se identifican las conexiones a realizar para lograr comunicación entre ellos. Segundo, el dominio mecánico, que enfoca la parte física del vehículo y los soportes a diseñar, con el fin de validar el funcionamiento planteado en la etapa conceptual. Por último, el dominio de control busca ilustrar la lógica de funcionamiento específica y cómo se procesa la información extraída por los distintos sensores.

Capítulo I

Antecedentes al diseño

1.1. Problemática

Las nuevas tecnologías están agilizando la labor de exploración en el sector minero, permitiendo la rápida identificación de nuevas zonas de interés. Sin embargo, la actividad de explorar la zona de interés sigue siendo considerada una labor tediosa y demandante para el personal de geología. Durante la visita corta, o comúnmente llamado trabajo de campo, el equipo de exploración liderado por geólogos se enfrenta a entornos no explorados, en su gran mayoría, de difícil acceso donde los vehículos y tecnologías de carga no están disponibles. En estas campañas de muestreo, el equipo recolecta información sobre las características minerales de la zona, requiriendo una variedad de muestras para inferir la posible existencia de un yacimiento y descartar anomalías singulares.

Según el Instituto de Seguridad Minera (ISEM),” La exploración minera es una actividad de alto riesgo, pero que no es considerada en toda su magnitud por las jefaturas o los organismos competentes” (ISEM, 2016). Esta actividad consiste en caminatas, reconocimiento y evaluación de campo, así como el mapeo, cartografiado y toma de muestras. En base a lo investigado, se identifican las siguientes dificultades: en primer lugar, el acceso al área de interés es limitado, comúnmente ubicada en zonas inhóspitas, lo que limita la cantidad de instrumentos (ropa, botiquín, comida) que el equipo de geólogos puede llevar. El trabajo de tesis enfoca entonces la etapa de definición de “targets” (prospección) donde según el ISEM se promedian áreas de 1000 km² inspeccionadas por equipo de 10 personas (ISEM, 2016). En esta etapa el traslado de muestras es la principal problemática a afrontar. Durante las campañas

de muestreo el equipo recolecta y traslada las muestras a pie hasta el acceso más cercano o campamento, si la duración de la prospección lo amerita. Al ser una actividad repetitiva de carga, los miembros del equipo se ven expuestos a riesgos ergonómicos. La distancia a recorrer repercute en la cantidad de muestras a recolectar y posteriormente en la cantidad de información obtenida. La correcta capacitación de los geólogos es necesaria para evitar situaciones de riesgo. De llegar a darse una emergencia, el equipo debe estar listo para actuar de la mejor manera, ya que contactar con personal de auxilio no es un proceso sencillo: la ayuda puede presentar demoras o incluso podría no llegar (ISEM, 2016).

Durante las entrevistas realizadas a los ingenieros geólogos Luis Quispe Renteria, Giuliano Zeballos Zeballos y al Doctor Cesar Muñoz, se confirmaron las dificultades previamente mencionadas y se pudo ahondar en su importancia. El transporte de muestras resultó ser la principal problemática para el personal. En una campaña de muestreo el número y tamaño de muestras dependen del área y detalle de la prospección. Las muestras tienen un peso entre los 3 y 5 kilogramos. Se promedia que, cada persona puede cargar 4-6 muestras, lo que representa cerca de 25 kilogramos de muestra, sin considerar el peso de otros elementos trasladados por el geólogo. Lo que implica un incumplimiento del límite de seguridad de 25 kilogramos como carga estática máxima por persona (Sepruma, 2007). Se debe considerar que las muestras son trasladadas considerables distancias hasta el acceso más cercano. Asimismo, con respecto a los sistemas de comunicación en caso de emergencia, se indicó que es un riesgo ligado a los protocolos de seguridad de cada empresa, ya que la mejor solución ante emergencias recae en la capacitación del personal. No obstante, hay circunstancias de emergencia donde los artefactos de comunicación y localización fallan, incrementando la dificultad de contactar con personal de auxilio.

1.2. Investigación Previa

En el presente capítulo, se aborda la problemática mencionada anteriormente. Iniciando con una investigación del marco teórico, orientado al proceso e industria de interés. Se plantea una propuesta solución, fundamentada con la naturaleza de la actividad, y se desarrolla una investigación del estado del arte.

1.3. Revisión del Marco Teórico

1.3.1. Minería: Prospección y Exploración

El Perú tiene una larga trayectoria minera, siendo actualmente uno de los principales países de extracción minera. El cobre y el oro son los minerales de mayor exportación, representando 30 % y 50 % de las exportaciones minerales nacionales respectivamente (Dammert, 2020). El ciclo de la actividad minera puede ser separado en 4 distintas fases: fase geológica, fase de extracción, fase de metalurgia y fase de cierre.

La fase geológica se caracteriza por los pasos de prospección y exploración, con los cuales se reúne toda la información correspondiente al yacimiento y al entorno en dónde se podría establecer una operación minera. Posterior a la emisión de los permisos correspondientes para iniciar las campañas de muestreo, usando imágenes satélites y mapas geológicos, se delimita un área de interés. Con la zona identificada, se realiza la prospección donde equipos de geología recorren la zona empleando métodos directos (muestreo) e indirectos para la extracción de información (ISEM, 2016).

Una vez confirmada la presencia de yacimiento mineral, fundamentado con los resultados de las muestras superficiales, inicia la etapa de exploración. Esta etapa consiste en realizar actividades de mayor impacto como son las perforaciones diamantinas y el levantamiento de túneles o trincheras. Las perforaciones extraen núcleos de roca, en distintas

profundidades, que posteriormente son analizadas en laboratorio. Durante la exploración se ejecutan actividades que implican una inversión mayor de recursos (tecnología y personal) que buscan obtener el máximo detalle del yacimiento, específicamente la ubicación y dimensión del mismo. Por lo que, la combinación de los métodos indirectos y directos de la prospección es crucial para el éxito de la etapa. Esta es la etapa de mayor riesgo para la compañía porque se genera una alta inversión sin garantía de la existencia de un yacimiento económicamente rentable. Es ideal que las prospecciones den resultados precisos y de manera que la inversión sea guiada por los resultados del muestreo (ver Figura 1.1.). De obtener resultados favorables en la etapa de la exploración, se tendrían que realizar las operaciones logísticas para proceder a la siguiente fase.

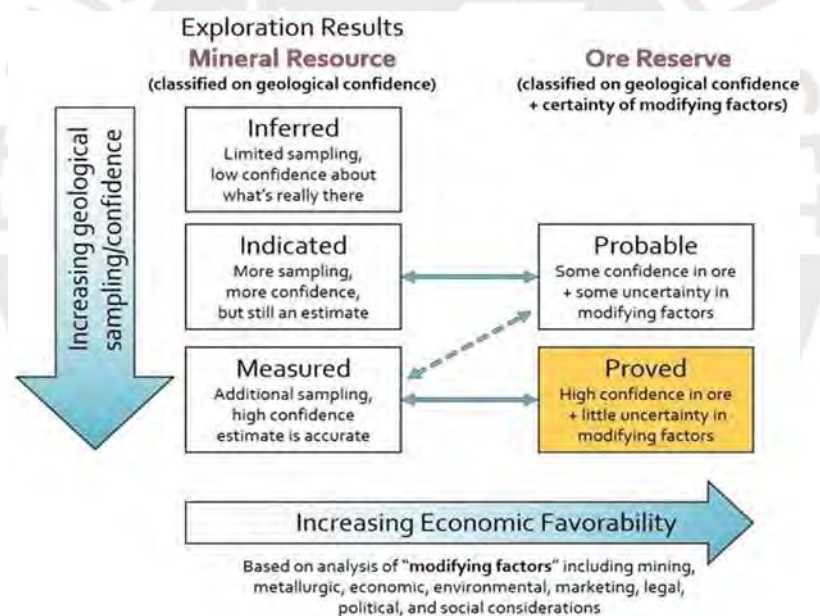


Figura 1.1. Inversión proporcional a la exploración (Alzahrani, 2010)

La fase de extracción, la que comúnmente se asocia a gran minería, consta en el establecimiento de la mina, ya sea de tajo abierto o subterránea. El método de extracción se determina principalmente por las características del yacimiento mineral, la tecnología, los problemas medioambientales y la economía. Las condiciones geológicas halladas durante la prospección desempeñan un papel fundamental en la selección del método. Esta fase es la de

mayor duración y llega a darse en simultáneo con la fase de metalurgia (o procesamiento mineral) donde el material desechable es separado del mineral de interés. El desarrollo en paralelo de ambas fases es necesario para que la operación minera sea autosustentable y se pueda realizar sin interrupciones durante todo el tiempo de vida estimado de la operación (Alzahrani, 2010).

Una vez finalizada la fase de extracción, inicia la etapa final la recuperación, es decir, el proceso de cierre de la mina, que consiste en la reconversión, revegetación y restauración de los valores del agua y de la tierra. Desde el inicio del proyecto minero se tiene en cuenta el proceso de recuperación, de tal manera que se minimice el coste global de la explotación minera. Actualmente, la filosofía de la sostenibilidad es adoptada por la mayoría de las empresas, tomando en cuenta las condiciones medioambientales para las futuras generaciones. La recuperación debe contemplar la seguridad del sellado de la mina, especialmente si la zona está abierta al público en general (Alzahrani, 2010).

1.3.2. Prospección Directa

La prospección directa extrae las características de la zona por medio del muestreo y su análisis en el laboratorio. También referido como método geológico, consta de la recolección de muestra in-situ, con el fin de obtener una representación cuantitativa o cualitativa del área de interés. La muestra es una parte o porción extraída empleando métodos específicos que permiten considerarla como representativa del área. La cantidad y tamaño de las muestras depende del criterio del geólogo, del estudio a realizar y del mineral de interés, pero frecuentemente una muestra llega a pesar 5 kg. De igual manera, las muestras pueden provenir de sedimentos y/o aguas, donde el peso de la muestra se ve afectado. Ante estas circunstancias se debe considerar el tipo de ensayo a realizar y tomar las medidas para un almacenamiento correcto hasta su llegada al laboratorio. El detalle del muestreo es directamente proporcional a

la cantidad de muestras recolectadas y considera la etapa de selección, recojo, tratamiento y ensayo de las muestras. En consecuencia, los equipos de geología aspiraran a recolectar la mayor cantidad de muestras o las que el geólogo crea necesarias, según su criterio (Ponce, 2012). Los tipos de muestreo de mayor frecuencia en prospección son:

- Muestreo por canales: Consiste en la excavación de un canales estrechos y continuos generalmente en la presencia de vetas, como se muestra en la Figura 1.2. Como buena práctica se debe muestrear la veta y los alrededores para recopilar mayor cantidad de información. Todo el material extraído de la acanaladura es la muestra, con dimensiones aproximadas de 8-10 cm de anchura por 2-3 cm. se recomienda una separación menor a 5m entre acanaladuras (Cangalaya, 2020).



Figura 1.2. Muestreo por canales (Alzahrani, 2010)

- Muestreo por puntos o rock chip: Se extraen las muestras puntuales, de posiciones específicas distribuidas sobre la masa mineral. Se dan perforaciones pequeñas, orificios de 45 mm de diámetro y unos 25-30 cm de profundidad, separadas menos de 20cm. con una distribución lineal o generando una malla en la zona de interés. (Ver Figura 1.3 en el Anexo) (Cangalaya, 2020).

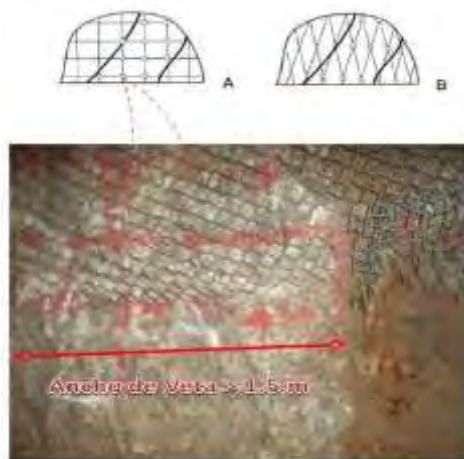


Figura 1.3. Muestreo por puntos (Alzahrani, 2010)

De forma similar, la calidad de la muestra viene a ser crucial para la obtención adecuada de la información. En el muestreo, el humano viene a ser la principal fuente de error cometiéndose errores típicos de: etiquetado, ubicación, corte, manipulación y limpieza de equipos. Los errores previamente mencionados causan contaminación/alteración o pérdida de muestras, debido a una falta de organización y/o entrenamiento del personal. La contaminación de muestras también se da por las condiciones en las que son trasladadas y cargadas por los operarios. Un muestreo debe ser preciso y exacto, ya que los resultados son base para una mayor inversión por parte de la empresa minera. Un mal muestreo puede representar una inversión perdida o un yacimiento no encontrado.

El propósito del muestreo es identificar las distintas litologías, tipos de roca, presentes en el área explorada, priorizando indicios de minerales de interés económico. En el Perú los principales minerales de interés son el oro, el cobre, el estaño y el molibdeno; sin embargo, también se realiza la extracción de otros minerales (plata, zinc, plomo, etc.). Según el Ministerio de Energía y Minas, el Perú es el segundo productor de plata, cobre y zinc a nivel mundial (Minem, 2020). Asimismo, es el primer productor de oro, zinc, estaño, plomo y molibdeno en América Latina. En el Perú, el sector minero aporta el 15 % del PBI (Cruz, 2022)

y parte crucial de su desarrollo es el descubrimiento de nuevos yacimientos. Aparte de su papel en la estabilidad económica del estatal, garantizar el desarrollo minero significa garantizar el empleo e ingreso de 216 mil peruanos y encaminar la lucha por la descentralización del país (Perú, 2019).

1.3.3. Autonomía Off-Road

La conducción autónoma se ha convertido en uno de los principales temas de investigación en la sociedad moderna. A pesar de los retos a los que se enfrenta, la conducción urbana autónoma ha triunfado en algunos países y sigue mejorando. Sin embargo, las aplicaciones de los vehículos autónomos no se deben limitar a dicho entorno. Por ejemplo, las aplicaciones de los vehículos terrestres robotizados en entornos Off-Road son diversas y son sistemas aun no desarrollados a su máximo potencial.

Un vehículo autónomo Off-Road tiene que enfrentarse a una serie de nuevos retos a los que no se enfrentan los sistemas autónomos urbanos. Por ejemplo, los bosques interfieren con el posicionamiento por satélite (GPS) ya que los árboles pueden representar laberintos naturales que desafíen a los algoritmos de planificación del movimiento. También, en el caso de las zonas alpinas sus pendientes pueden resultar peligrosas ya que requieren un control dinámico de la carrocería para lograr una operación segura. Asimismo, existen obstáculos que limitan la cantidad de información obtenida por los sensores que ocultan peligros que podrían resultar críticos para el robot.

Los sectores líderes en la tecnología autónoma Off-Road son el sector militar y el sector espacial, en particular desde la exploración en el espacio. Ambos sectores buscan sistemas robustos y eficientes para el manejo autónomo en zonas no señalizadas. Sin embargo, el desarrollo de este vehículo puede beneficiar una gran variedad de sectores entre ellos: la minería, agricultura y construcción (Kelly et al., 2004).

1.3.4. Sistemas de Suspensión para vehículos

El sistema de suspensión de un vehículo es el principal responsable de garantizar un contacto continuo y comodidad al trasladarse. Aun en vehículos no tripulados es necesario un buen sistema de suspensión, ya que la “comodidad” representa cómo se transmiten las vibraciones, producto de la carretera, hacia el cuerpo principal. El sistema de suspensión está compuesto por el arreglo mecánico, donde se posiciona un resorte para transformar energía cinética en potencial y un amortiguador que disipa energía cinética. El papel del amortiguador es asegurar el contacto entre la llanta y la carretera. Pero con el fin de minimizar las vibraciones e incrementar el contacto con la pista, se continúa investigando e innovando en nuevas tecnologías.

A continuación, se explicarán los tipos de suspensiones acorde a las configuraciones entre el eje y la rueda. La suspensión pasiva es la más limitada, puesto que carece de adaptabilidad y control operando de igual manera en todos los entornos. Seguidamente, la suspensión semiactiva incluye un amortiguador variable que puede variar su coeficiente mediante un control electrónico. En cuanto a la suspensión Activa esta no tiene un único desempeño al permitir variar los parámetros de la suspensión de acuerdo a la necesidad. Tecnologías de hidráulica y neumática también son usadas como suspensiones activas debido a su simplicidad de diseño, su alta resistencia, su fiabilidad y accesibilidad.

Finalmente, la suspensión electromagnética brinda un alto nivel de control en el comportamiento generando fuerzas controladas para absorber rápidamente los impactos de la carretera, suprimir los movimientos de cabeceo y balanceo y mejorar el confort y la seguridad.

Tabla 1.1. Tabla comparativa configuraciones eje/rueda.

Tipo de Suspensión	Pasiva	Semi-Activa	Hidráulica/Neumática	Electromagnética
Montaje	Simple	Complejo	Muy complejo	Simple
Costo	Muy bajo	Bajo	Muy alto	Alto
Comodidad	Pobre	Medio	Bueno	Muy bueno
Contacto	Pobre	Medio	Bueno	Muy bueno

1.3.5. Estructura para vehículo todo terreno

La patente detalla el diseño de una estructura para un vehículo todoterreno de 4 ruedas. El nivel inferior de la estructura se designa al posicionamiento del motor y/o transmisión. Este nivel permite ubicar placas de metal con agujeros, ideales para tener versatilidad en la distribución de componentes. El nivel superior, reforzado con elementos estructurales, tiene como principal propósito ubicar la dirección, brindar más puntos de apoyo y puede considerarse la presencia de un piloto. En el diseño de un vehículo todo terreno (de 4 o más ruedas) se debe considerar la resistencia a la torsión, ocasionada por la irregularidad del terreno. La estructura está hecha de tubos metálicos a los cuales se sueldan placas con la finalidad de brindar puntos de apoyo para los sistemas y partes del vehículo. Se presta especial consideración al espacio y alineación de componentes, ya que estos son garantizan un funcionamiento óptimo.

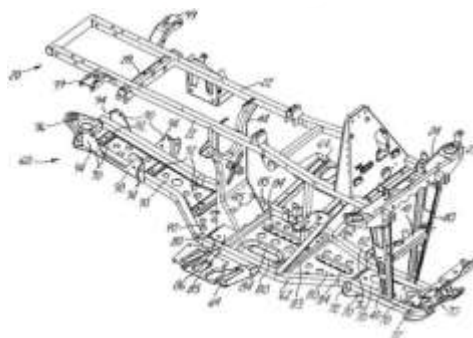


Figura 1.4. Diseño de chasis para vehículo todo terreno de 4 ruedas (Mihai Rasidescu, 1999)

1.4. Propuesta Solución

Considerando la actividad previamente descrita, se propone el diseño de un sistema mecatrónico móvil que pueda operar de forma adecuada en los diversos entornos donde se da la prospección. En simultáneo, se plantea una operación en conjunto con el equipo de geología apoyando con la labor de transporte. Este concepto busca reducir los riesgos a los que se expone el equipo y espera incrementar la eficacia de la actividad.

1.4.1. Objetivos

En esta sección se presentan el objetivo principal y los objetivos específicos del trabajo de tesis.

1.4.1.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema mecatrónico móvil que logre un funcionamiento autónomo óptimo en terreno irregular con el fin de apoyar al equipo de geólogos en la actividad de la prospección. Se busca incrementar la capacidad de carga del equipo y, a su vez, agilizar el proceso.

1.4.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar una investigación adecuada de la problemática e identificación del problema. Aplicar la metodología seleccionada para lograr un desarrollo completo del proyecto desde del diseño conceptual y concepto óptimo.
- Adaptar una plataforma móvil comercial, con componentes eléctrico-electrónicos y elementos mecánicos necesarios para un funcionamiento en la región costa del país, es decir zonas áridas, rocosas y con agua en baja cantidad.
- Diseñar un algoritmo de navegación, el cual sea compatible con los componentes seleccionados y permita analizar la transitabilidad del terreno.

- Analizar el económico de los componentes a emplear, para lograr un sistema autónomo móvil, que represente una solución viable e innovadora para las empresas del sector.

1.4.2. Alcance

El alcance del sistema mecatrónico plantea un funcionamiento conjunto con el personal de geología. Se espera que el sistema facilite las actividades de transporte de equipo y muestras. Asimismo, contempla retos de navegación autónoma en entornos no controlados para poder desarrollar actividades de transporte. El sistema a desarrollar no contempla automatizar la actividad de la prospección porque la selección y recolección de muestras es una actividad con distintas consideraciones e implica el diseño de otros mecanismos. De igual manera, el proyecto no plantea un sistema de reconocimiento de anomalías geológicas, enfocándose en la actividad de transporte y navegación adecuada dentro de zonas áridas, rocosas y con bajo nivel de humedad o nivel de agua menor a 30 cm. Se busca que el sistema sea de apoyo al geólogo, agilizando su trabajo y reduciendo los riesgos a los que se expone.

Dentro de lo desarrollado, se busca realizar esquemas eléctricos y planos mecánicos. El dominio de control será detallado por medio de diagramas de comportamiento y esquemas. Al emplear algoritmos de código abierto, se detallará la integración entre estos. Con respecto a la interfaz de usuario, se va a proponer un mockup y la identificación de los componentes necesarios para su desarrollo.

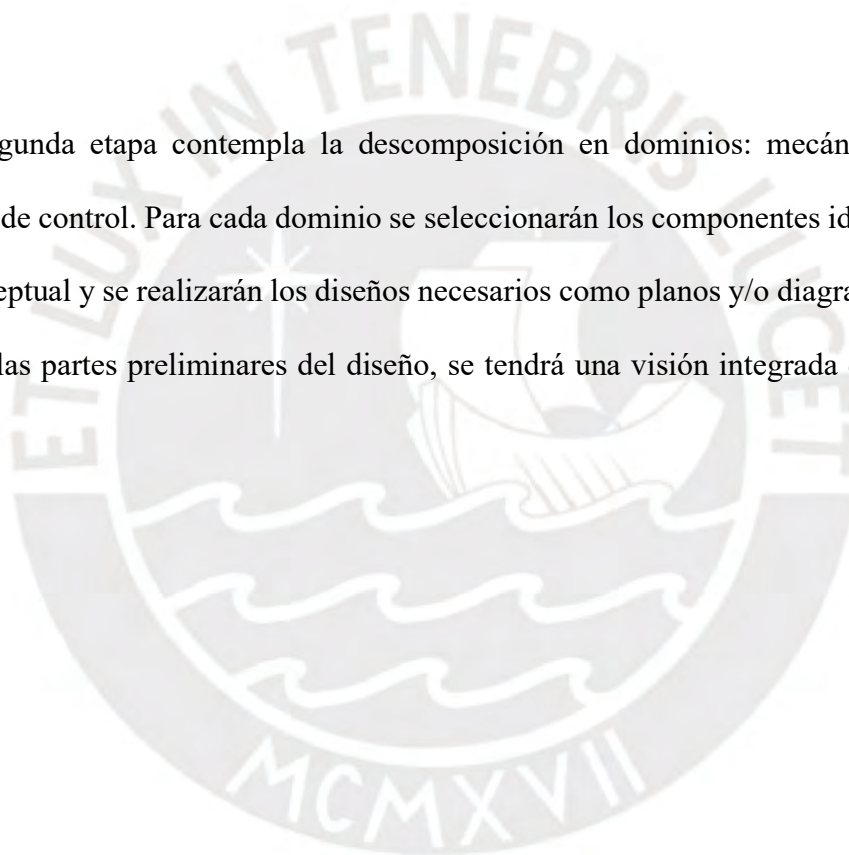
1.4.3. Metodología

La metodología y el enfoque con el cual se realizará el presente informe fue desarrollada en conjunto por el profesor Víctor De Negri (UFSC), la profesora Karol Muñoz (PUCP) y el Mg. Vinicius Vígolo (UFSC). Esta metodología permite afrontar de mejor manera la complejidad de los sistemas mecatrónicos actuales. La metodología permite un mejor manejo

de las fases del proyecto, así como de las tecnologías involucradas. Se plantea un desarrollo versátil que permite replantear enfoques ante los imprevistos a afrontar.

La primera etapa consiste de investigación de la problemática, y las tecnologías existentes relacionados a está. Se plantea una idea de producto la cual es complementada con el aporte de los requisitos de usuario. Seguidamente, se divide el proyecto en unidades/módulos básicos cuyo conjunto representan la solución óptima, tomando en cuenta los requisitos de diseño. Y se finaliza con la entrega de diagramas eléctricos, diagramas de flujo y esquemas mecánicos.

La segunda etapa contempla la descomposición en dominios: mecánico, eléctrico, electrónico y de control. Para cada dominio se seleccionarán los componentes identificados en la etapa conceptual y se realizarán los diseños necesarios como planos y/o diagramas. Una vez desarrollado las partes preliminares del diseño, se tendrá una visión integrada de la solución propuesta.



1.5. Estado del Arte

Debido al carácter específico del sistema a realizar, el análisis de estado del arte enfoca sistemas ya existentes para el correcto funcionamiento de un sistema mecatrónico móvil y una navegación segura en entornos no controlados, como los que se afrontan en la problemática. Se estudia sistemas de análisis del entorno, sistemas de control y diseños mecánicos

1.5.1. Sistemas de análisis de Transitabilidad

1.5.1.1. Un estudio de métodos de análisis de la transitabilidad del terreno para vehículos terrestres no tripulados (Papadakis, 2013)

Con el creciente interés por la implementación de vehículos autónomos en entornos Off-Road, constantemente surgen nuevas soluciones robóticas para operar en dichas condiciones. El término Off-Road (todo terreno) llega a albergar gran variedad de entornos, los cuales tienen ciertas dificultades en común: la correcta evaluación de transitabilidad en el terreno, planificación de trayectorias óptimas y adaptar adecuadamente la configuración cinemática del vehículo en función de la transitabilidad. La transitabilidad es la capacidad de un vehículo terrestre de permanecer en un área tomando en cuenta las condiciones del entorno, el modelo del vehículo y las limitaciones cinemáticas del mismo.

Actualmente la transitabilidad se extrae mediante un estudio del entorno, el cual puede realizarse con información propioceptiva, o información exteroceptiva. La información propioceptiva proviene de sensores internos del vehículo, donde el vehículo autónomo todo terreno (ATV) explora el entorno a medida que entra en contacto con él. Se diferencia de la información exteroceptiva, que se extrae previa a la interacción con la región de interés. El análisis exteroceptivo puede basarse en geometría o en apariencia.

La recolección de información basada en geometría es más robusta, ya que opera con sensores activos, como los Lidar, y no se ve afectada por condiciones ambientales que afecten la visibilidad. Cuando el sistema se basa en información de apariencia, emplea dispositivos pasivos, como cámaras, las cuales requieren menor demanda computacional. Esta información puede llevar a falsos positivos en la transitabilidad porque el análisis es muy sensible a condiciones de iluminación y ambiente. Por otro lado, permite identificar características en una mayor resolución y permite la clasificación a detalle del entorno.

1.5.1.2. Análisis de la transitabilidad de terreno híbrido (Hensley y Marshall, 2022)

Para una correcta operación en entornos Off-Road, es necesario que el vehículo sea capaz de analizar el entorno. El presente artículo muestra un análisis compuesto por segmentación semántica, para interpretar las distintas características del terreno; complementado con un mapeo estructural para identificar las características geométricas del terreno. La combinación de ambos análisis promete lograr una navegación segura.

El análisis de nube de puntos permite generar una representación 2D de las elevaciones del entorno, permitiendo al vehículo considerar la facilidad de transitabilidad y seleccionar una ruta óptima, tomando en cuenta el ‘costo’ de atravesarla. La segmentación semántica realizada por una red neuronal convolucional (CNN) permite identificar distintas superficies (concreto, gras, fango). Para la correcta interpretación de la información, es necesario el cambio de sistema de referencia del mapa al vehículo y del vehículo a la cámara. Con respecto a la información geométrica del entorno, se identifica inclinación, rugosidad y altura de escalón, lo cual resulta en un mapeo de la dimensión de los objetos alrededor del vehículo. Con la integración de ambos métodos el vehículo logra identificar exitosamente el entorno.

Tabla 1.2. Tabla de resumen análisis de transitabilidad

	Análisis Propioceptivo	Análisis Exteroceptivo: Apariencia	Análisis Exteroceptivo: Geometría
Ventajas	Por medio de sensores internos, se puede extraer información de la interacción con el entorno.	<p>El vehículo analiza características del entorno, previa a su interacción, comúnmente se usa cámaras para segmentación semántica del entorno y actuar en base a lo identificado.</p> <p>Se puede obtener información de características específicas como color, reflectividad, etc.</p> <p>Baja demanda computacional.</p>	<p>Por medio de sensores se extrae información sobre la geometría del entorno, se emplea el uso de Lidars para adquirir distancia disponible y dimensiones de los objetos al rededor.</p> <p>Análisis robusto ante condiciones ambientales variantes.</p>
Desventajas	El vehículo no modifica su comportamiento previo a ingresar a la zona de interés.	El análisis por medio de apariencia es muy sensible a la visibilidad disponible puede causar identificación errónea	<p>El análisis por geometría no asocia los objetos con características propias, como por ejemplo arbustos y charcos son considerados igual que rocas y suelo.</p> <p>Alta demanda computacional</p>

Tabla 1.3. Tabla de resumen transitabilidad compuesta

Sistemas	Segmentación Semántica empleando ERFNet entrenado con ImageNet dataset Mapa de Elevación Mapa de transitabilidad
Programa	Implementado con Python (Pytorch), C++ y un sistema operativo de robots (ROS)
Componentes	Nvidia GTX 960 RGB Camera Basler Velodyne Ultra Puck Vectornav VN300 Dual Antenna GNSS/INS
Resultados	La red ERFNet hace inferencias en 0.094 segundos (imagen de tamaño 600x400)

1.5.2. Vehículos para manejo Off-Road

1.5.2.1. Vehículo autónomo Off-Road: Integración de sistemas a través de un bus CAN (Erian, Mhapankar, Conrad, y Gambill, 2019)

La Universidad de Carolina del Norte en Charlotte se propone crear un vehículo autónomo todo terreno (ATV). En la presente investigación se adaptó un vehículo de combustión para lograr un control autónomo en entornos todo terreno. El proyecto contempla los distintos módulos: módulo de dirección, un sistema de freno, un sistema de control de propulsión y un nuevo sistema de comunicación usando el protocolo CAN. Como componentes a utilizar se incluye un sensor inercial Adafruit Ultimate GPS BNO005 y un módulo con el propósito de localización y orientación. Además de sensores Lidar para la detección de obstáculos el microcontrolador MSP430 de Texas Instruments. No se brindó una prueba conjunta, pero se logró la transmisión y recepción exitosa por medio del protocolo CAN entre el microcontrolador y los distintos módulos.

1.5.2.2. Seguimiento de trayectorias de automóviles autónomos para conducción Off-Road (Hoffmann, Tomlin, Montemerlo, y Thrun, 2007)

Se identifica los principales problemas para los vehículos autónomos Off-Road: la falta de estabilidad, falta de precisión en el seguimiento y la dependencia de las superficies lisas en la carretera. Este proyecto ilustra un algoritmo de control no lineal que enfoca el control de la dirección del vehículo considerando la orientación de las ruedas delanteras. Se aplica un control de dirección tomando en cuenta las ecuaciones cinemáticas del movimiento, efectuándose el control sobre el servo de dirección y sobre un controlador PI para regulación de la velocidad del vehículo. Se adaptó un Volkswagen Touareg, el mismo empleado por el Stanford Racing Team durante su participación en el DARPA Grand Challenge.

1.5.2.3. Conducción Autónoma Off-Road en el Grand DARPA Challenge (Jones et al., 2006)

Con el objetivo de participar del Grand DARPA Challenge, el equipo de UCLA implementa un vehículo autónomo para entornos Off-Road mediante la exitosa integración de sensores y algoritmos de control. Se integra GPS, un sensor IMU y odometría junto con modelos de dinámica vehicular. El error generado por la alta sensibilidad de los sensores, específicamente en los cálculos de posición y orientación, es compensado en la estructura de los algoritmos de control. Para poder realizar una comparativa entre los 3 sistemas estudiados, se presenta la Tabla 1.4 la cual permite identificar similitudes y diferencias.

Tabla 1.4. Tabla comparativa de vehículos autónomos Off-Road

Artículo	Stanford Racing	UCLA	UNCC
Sistemas Integrados	Control de Dirección Control de Freno Control de Aceleración	Control de Dirección Control de Freno Control de Aceleración	Control de Dirección Control de Freno Control de Aceleración
Componentes	GPS IMUs Servomotor Válvula proporcional	NovAtel GPS BEI C-Migits integrado INS Motores con Ecoders	Adafruit BNO055 Lidar Servomotor Válvula Proporcional Microcontrolador MSP430
Vehículo	Volkswagen Touareg, "Stanley"	Standard heavy duty pickup truck	Honda Todo Terreno
Algoritmos	Control no Lineal de la dirección (Un solo servo) Control PI para movimiento longitudinal (Freno y Aceleración) interpretados como actuadores opuestos	Doble Filtro de Kalman para estimación del estado del vehículo (Posición y Orientación)	Protocolo de comunicación CAN Señal PWM para control de aceleración Control PI para dirección
Resultados	Desviaciones < 0.5 m con respecto a la trayectoria deseada Velocidades 5-35 mph 200.1 millas de Navegación autónoma prueba de resistencia	Velocidad Mínima de 2.5 mph 22 millas recorridas en el Grand DARA Challenge	Se logro un funcionamiento adecuado de los módulos, de manera independiente. El protocolo CAN fue implementado con éxito

1.5.3. Robots autónomos Off-Road

1.5.3.1. Clearpath Unmanned Ground Vehicles

La empresa Clearpath Robotics es una empresa líder en la creación de robots móviles. La compañía cuenta con 3 plataformas Off-Road que pueden ser equipadas con diferentes sensores y/u equipos, permitiendo su aplicación con distintos propósitos y satisfacer distintas actividades. Gracias a su versatilidad, cada una de estas plataformas ofrece ventajas y usos específicos, considerando su tamaño y diseño. Las plataformas mencionadas son comúnmente empleadas en entornos no controlados.

Tabla 1.5. Tabla comparativa de vehículos comerciales Clearpath

Plataforma	Warthog	Husky	Jackal
Dimensiones	1.5m x 1.4m x 0.8m	Mediana	Compacta
Características	Vehículo terrestre todoterreno, se desplaza por tierra y agua, neumáticos especiales para suelos difíciles	Versátil, gran capacidad de carga, personalizable para diferentes investigaciones	Diseño resistente a la intemperie, incluye GPS e IMU, opciones de detección personalizadas
Usos Comunes	Terrenos difíciles, investigación en exteriores	Investigación, aplicaciones industriales	Aplicaciones portátiles, investigación en exteriores
Imagen			

1.5.3.3. Desarrollo e implementación de un vehículo terrestre no tripulado para aplicaciones todo terreno. (Vardin et al. 2022)

El presente artículo ejemplifica el proceso de diseño de un vehículo autónomo Off-Road basado en las condiciones de operación estimadas para dicho vehículo. Siendo un vehículo para entornos todo terreno, establece una velocidad máxima de 1 m/s, una pendiente máxima de 10° y el tipo de terreno sobre el cual va a operar (superficies arenosas y/o resbaladizas) . En este artículo se enfatiza el diseño del chasis y se presenta un análisis de Elementos Finitos (FEM) del modelo CAD para validar la resistencia ante los esfuerzos torsionales generados por el terreno irregular. Debido a las dimensiones del vehículo, no se realiza un análisis de volcadura, y debido a la limitación de velocidad, no se evalúa el efecto inercial de las curvas a alta velocidad.

1.5.3.2. Aprendizaje de refuerzo y curricular para navegación de un vehículo terrestre no tripulado con un LiDAR 3D (Sánchez, Morales, Martínez, 2023)

El artículo presenta un método de aprendizaje de refuerzo junto con aprendizaje curricular para lograr la operación exitosa de un vehículo terrestre no tripulado. Se inicia por medio de la evaluación de transitabilidad del entorno, mediante el procesamiento de data recolectada por un sensor Lidar. La información de transitabilidad se complementa con coordenadas GNSS de ubicación, coordenadas de destino y valores de orientación de un sensor inercial. Para el entrenamiento por refuerzo se emplea el modelo Actor-Critic, que consta de 2 redes neuronales la red Actor envía comandos de dirección y la red Critic evalúa el error con respecto a la dirección. Finalmente, bajo el concepto de aprendizaje curricular, que establece un aprendizaje progresivo, el vehículo se prueba en tres entornos distintos, incrementando su complejidad: primero en un entorno virtual controlado, seguido de un entorno virtual con elevaciones, y finalmente en una prueba de desempeño en un entorno real no estructurado.

1.5.3.3. Aprendizaje de kinodinámica inversa para una navegación de alta velocidad en terrenos no estructurados (Xiao, Biswas, y Stone, 2021)

El artículo presenta un método de aprendizaje para resolver el problema de movimiento por medio de kinodinámica inversa. Explora un funcionamiento preciso de alta velocidad en entornos Off-Road. Los sistemas de planeación kinodinámica se emplean en ambientes estructurados y no incluyen la interacción del entorno con el vehículo. Por ende, al operar en un entorno no controlado a alta velocidad, el entorno juega un papel crucial en el desempeño. El sistema estudia las interacciones entorno-vehículo por medio de mediciones durante la operación teleoperada. Se probó un vehículo tanto en interiores como exteriores y se registró un incremento en el desempeño en ambos ambientes.

1.5.3.4. Navegación Off-Road por medio de imitación end to end para control continuo (Hensley y Marshall, 2022)

La navegación por medio de aprendizaje profundo es un tema de investigación comúnmente aplicado para entornos urbanos y control de tráfico. Se busca implementar un sistema para navegación en entornos no controlados usando una red neuronal convolucional. Con la finalidad de identificar la efectividad y limitación de este método de control, se aplican algoritmos de machine learning junto con información recolectada por demostraciones humanas.

La siguiente tabla compara los 2 artículos analizados sobre el manejo autónomo por medio de aprendizaje profundo. Ambos métodos requieren información de entrenamiento, la cual es extraída ingresando registros de navegación. En ambos casos, la información fue recolectada durante la operación teleoperada del vehículo. El sistema considera los valores inerciales y características del entorno para asociarlas a la medida de control. Los últimos 2 artículos mencionados, enfocan un control mediante el uso de redes neuronales, se realizó la

Tabla 1.5. para resaltar los resultados junto con las similitudes y diferencias a nivel de programación.

Tabla 1.6. Tabla comparativa control por aprendizaje profundo.

Artículo	Aprendizaje de kinodinámica inversa	Aprendizaje por Imitación
Vehículo	robot UT Automata, plataforma de vehículos autónomos a escala 1/10	Camión a control remoto escala 1/6
Datos de Entrada	Mapa previo del entorno Datos Sensoriales (INS) Velocidad y ángulo deseado	Imagen captada por cámara RGB-D Datos Sensoriales (INS) Ubicación de Destino
Componentes	2D Hokuyo UST10LX Lidar Vectornav VN-100 IMU Flipsky VESC Traxxas Titan 550Motor NVIDIA Jetson	Jetson Xavier NX InertialSense μINS module StereoLabs ZED Arduino UNO
Resultados	El vehículo fue probado en entornos conocidos y desconocidos, logrando una mejora entre el 52,4 % y el 86,9 % en la tasa de éxito al operar a altas velocidades.	Desempeño óptimo con pocas intervenciones por parte del usuario, durante el funcionamiento autónomo. 3 intervenciones en 1 hora de autonomía.

1.5.4. Vehículo todo terreno autónomo

Se desarrolla un vehículo móvil multipropósito teleoperado para aplicaciones industriales todo terreno, contemplando domino electrónico, mecánico y de control. Su estructura se basa en 4 ruedas independientes de gran tamaño para mantener el contacto con el piso y garantizar estabilidad. El cuerpo del vehículo protege los componentes electrónicos de fuerzas externas, así como de variantes ambientales.

El ATV posee una interfaz de usuario que permite al operario configurar parámetros de funcionamiento. La unidad central de procesamiento se encarga de: cálculos cinemáticos del robot, análisis del entorno, cálculo de trayectoria y diagnóstico de errores. El control del vehículo de manera omnidireccional permite un gran rango de movimientos y giros sin

necesidad de espacio para maniobrar. Además, los cálculos se realizan en base a la información de la cámara, sensores láser e IMU. El robot cuenta con acceso a información de mapas aéreos (Google Maps) por medio de dispositivos GPS.

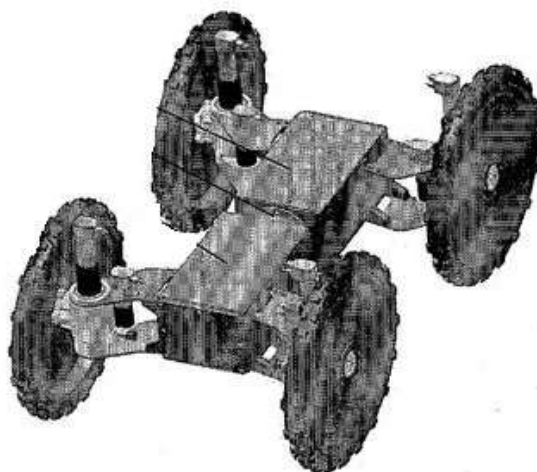
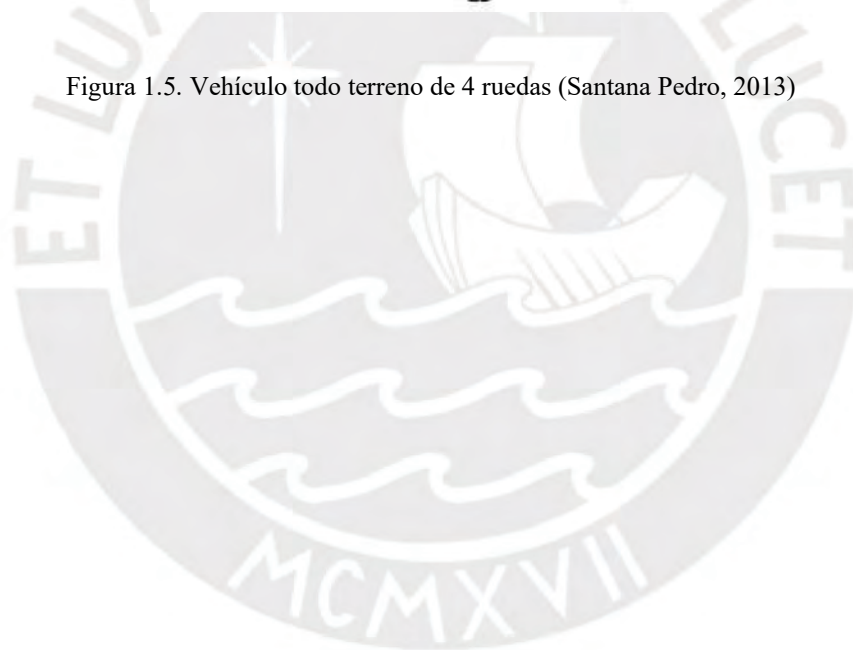


Figura 1.5. Vehículo todo terreno de 4 ruedas (Santana Pedro, 2013)



1.6. Idea del Producto

En base a la investigación realizada, se ha identificado que en la actividad de prospección los principales retos son: accesibilidad, transporte de carga y almacenamiento de muestras. Se busca lograr una operación semiautónoma, por medio de un vehículo que apoye al equipo de geología y mitigue las dificultades previamente mencionadas.

El producto que se pretende diseñar es un vehículo autónomo para operación conjunta en la actividad de prospección. La estructura del sistema debe ser de una dimensión máxima de 1.8x1.2x1.3 (largo x ancho x altura). Se busca garantizar una operación correcta en los terrenos irregulares, específicamente en zonas rocosas, pendientes menores a 10° y zonas húmedas, para operación en la costa del país. El vehículo debe agilizar el proceso, avanzar al ritmo del geólogo con una velocidad máxima de 1.5 m/s, pero ser regulable dependiendo del entorno a transitar. La implementación del vehículo debe incrementar la capacidad máxima de carga, permitiendo recolectar una mayor cantidad de muestras, aproximadamente entre 75 a 100 kg extra. En paralelo, se considera el correcto almacenamiento de las muestras, mediante compartimientos separados y herméticos para evitar contaminación o alteración y para que las muestras sean representativas de la zona. El sistema a diseñar debe cumplir las siguientes características:

- Estructura versátil y robusta
- Sistema para Análisis del entorno
- Sistema de control del movimiento
- Dispositivos de localización robusto

Capítulo II

Diseño Conceptual

En la segunda etapa de la presente metodología de diseño mecatrónico, se realizó y estudió el modelo conceptual para la idea de producto propuesta anteriormente. Se emplean como entradas la idea del producto, los requisitos del sistema y la información complementaria recolectada. El diseño conceptual se realizó mediante una descomposición funcional y síntesis de medios, referido como el árbol de funciones. Desarrollar el árbol de funciones permite dividir en funciones las diversas acciones del sistema y encontrar medios para llevar a cabo dichas funciones. Se finaliza con una síntesis de la estructura y comportamiento general del proyecto, donde se abarca la arquitectura mecatrónica y eléctrica-electrónica, los diagramas de comportamiento y los bosquejos mecánicos del sistema.

2.1. Resumen y asignación de subsistemas

Con el desarrollo del árbol de funciones en su totalidad, presentado en el anexo “Árbol de funciones” se conoce que el sistema mecatrónico está compuesto por 5 subsistemas principales.

Los componentes elegidos fueron clasificados de la siguiente manera:

Tabla 2.1. Componentes del Sistema de Energía/Materia

Sistema de Energía/Materia (E/MS)		
Chasis tubular	Caja estanca	Conector Industrial
Sistema Ackerman	Contenedor industrial Plástico	Transmisión de cadena
Double Wishbone	Eje sólido	Batería Ion-Litio
Terminal Block	Relé Electromecánico	Fusibles

Tabla 2.2. Componentes del Sistema de Medición

Sistema de Medición (MS)	
Sensor Lidar	Cámara de profundidad
IMU	GNSS

Tabla 2.3. Componentes del Sistema de Actuación

Sistema de Actuación (AS)	
Motor brushless DC	Servomotor

Tabla 2.4: Componentes del Sistema de Información

Sistema de Información (IS)		
Microcontrolador	Unidad de Procesamiento con GPU	CAN + UART

Tabla 2.5: Componentes de la Interfaz de Entrada

Interfaz de Entrada (In)
Aplicativo + teclado

Tabla 2.6: Componentes de la Interfaz de Salida

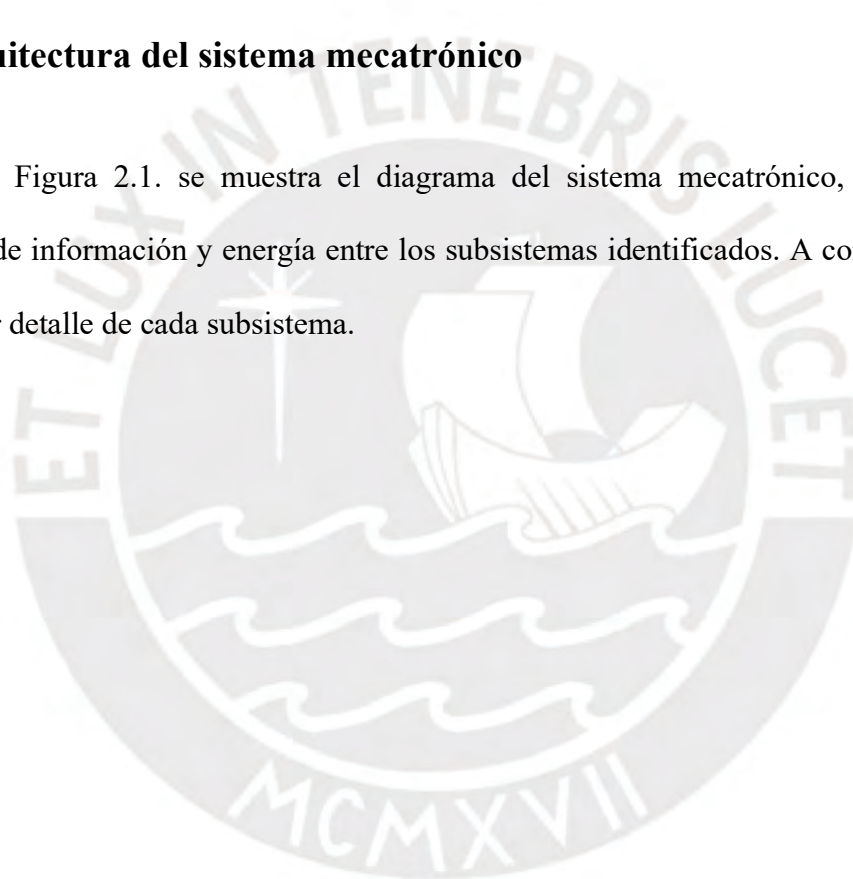
Interfaz de Salida (Out)
Pantalla con Leds indicadores

2.2. Síntesis de estructura y comportamiento general

En esta sección se realizaron los diagramas de diseño óptimo, se incluye: diagrama de arquitectura mecatrónica, diagrama de arquitectura eléctrico/electrónica, diagrama de comportamiento y bosquejos mecánicos del sistema físico. Estos diagramas son base para una implementación adecuada del sistema mecatrónico. En los esquemas se referencia a los componentes seleccionados en el desarrollo del árbol de funciones.

2.2.1. Arquitectura del sistema mecatrónico

En la Figura 2.1. se muestra el diagrama del sistema mecatrónico, detallando el intercambio de información y energía entre los subsistemas identificados. A continuación, se brinda mayor detalle de cada subsistema.



Architecture of mechatronic system

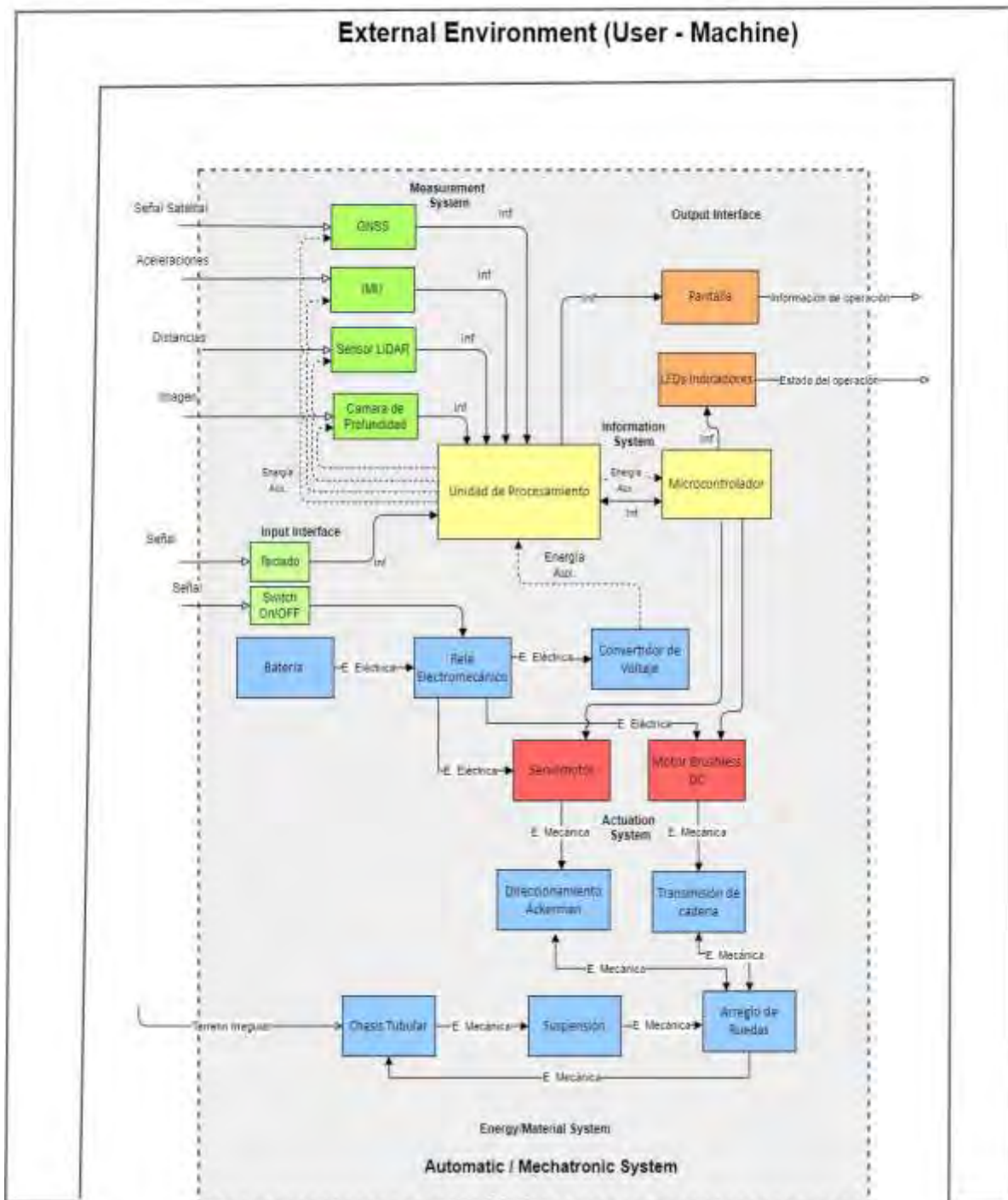


Figura 2.1. Arquitectura del sistema mecatrónico (Infante Palacios, 2022)

El sistema de energía y materia abarca la energización del sistema, por medio de baterías, junto a la estructura diseñada y los mecanismos para transmitir movimiento. El sistema de energía cuenta con un relé electromecánico como dispositivo de encendido y un

convertidor de voltaje para alimentar los componentes de control, que operan a un voltaje diferente al de los componentes de actuación. Con respecto a la estructura, el usuario almacena las muestras recolectadas en los contenedores industriales de Aluminio, posicionados en el chasis tubular. El entorno se encarga de interactuar con el sistema de suspensión y las llantas. Por medio de un sistema de Ackerman y transmisión de cadena, el movimiento de los actuadores es transmitido hacia el arreglo de ruedas, logrando mover el vehículo (direccionar ruedas delanteras y proveer tracción a las ruedas traseras).

La interfaz de entrada consta del interruptor de encendido, así como el teclado del computador que permite enviar comandos hacia la unidad de procesamiento. El operario puede enviar el comando de inicio o comandos para realizar labores de mantenimiento como mostrar indicadores o comprobar el funcionamiento correcto de los actuadores y sensores empleados.

La interfaz de salida se divide en los LEDs indicadores del vehículo que permiten informar de errores en el vehículo, complementado con la pantalla del dispositivo de control. En la pantalla se podrá visualizar valores cuantitativos del procesamiento interno del vehículo (velocidad, distancias, voltaje).

El sistema de actuación está compuesto por el servomotor de dirección y el motor brushless DC que se encargará brindar tracción al vehículo. Por medio de estos 2 actuadores se transmite la energía mecánica necesaria para maniobrar el vehículo.

El sistema de información consta de 2 dispositivos. La unidad de procesamiento encargada de procesar grandes cantidades de data como son las brindadas por el sensor Lidar y las cámaras de profundidad. Adicionalmente, también se analiza la información de ubicación, por medio de un dispositivo GNSS y del sensor IMU para considerar la dinámica del vehículo durante el movimiento. El microcontrolador recibe el resultado del procesamiento de los

diversos sensores y envía las señales de control hacia los LEDs de salida y los componentes de actuación.

Finalmente, el sistema de medición está compuesto por distintos dispositivos que permiten: localizar el vehículo, analizar transitabilidad e informar sobre el movimiento del vehículo. El módulo GNSS proporciona la localización del vehículo, por medio de las señales satélites. El sensor Lidar y la cámara de profundidad se complementan para hacer un análisis del entorno basado en geometría, es decir identificar dimensiones y distancias. La cámara de profundidad, también permite realizar un análisis por apariencia, logrando identificar los objetos de alrededor. Por último, el sensor inercial (IMU) se encarga de proporcionar información sobre la orientación y el movimiento.

2.2.2. Arquitectura del sistema eléctrico – electrónico

Como se ilustra en la Figura 2.2, el vehículo opera a base de baterías de ion-litio. El flujo de corriente es protegido por medio de paradas de emergencia y un relé electromecánico. Tanto la parada de emergencia como el interruptor de encendido son accionados por el usuario. Finalmente, el flujo de energía es distribuido a los distintos dispositivos y se emplea un convertidor de voltaje, debido que no todos los dispositivos operan al mismo valor de voltaje.

Todos los elementos operan en base a corriente continua, pero los componentes de actuación (servomotor de dirección y motor brushless de tracción) son alimentados directamente con la batería. Una vez energizada la unidad de procesamiento, se energizan el sensor Lidar, la cámara de profundidad, el microcontrolador, sensor GNSS y sensor IMU. El microcontrolador y la unidad de procesamiento pueden intercambiar información; sin embargo, las señales de control para los actuadores de dirección y tracción son emitidas desde el microcontrolador.

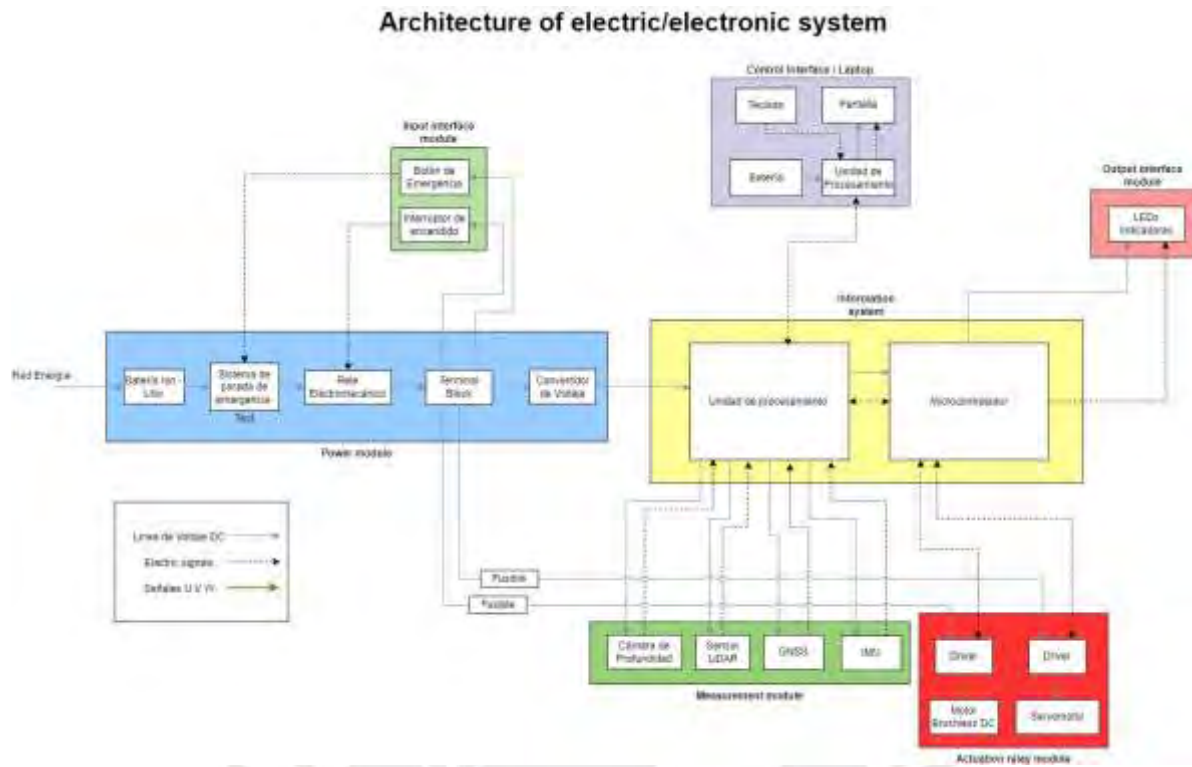


Figura 2.2. Arquitectura del sistema eléctrico-electrónico (Infante Palacios, 2022)

Los comandos ingresan de manera inalámbrica, desde el dispositivo de control del usuario. Una vez iniciada la operación del vehículo, el microcontrolador envía señales a los LEDs indicadores y la unidad de procesamiento transmite información de vuelta al computador del usuario, tal que el usuario puede monitorear el funcionamiento con mayor detalle.

2.2.3. Diagramas de comportamiento

A continuación, se muestra los diagramas de comportamiento del vehículo propuesto. La Figura 2.3 muestra el diagrama de comportamiento general, especificando las acciones que son realizadas por el usuario y las actividades del sistema. El usuario se encarga de ingresar los comandos y/o ubicación de destino, mientras el vehículo ejecuta las acciones de movimiento autónomo o de mantenimiento.

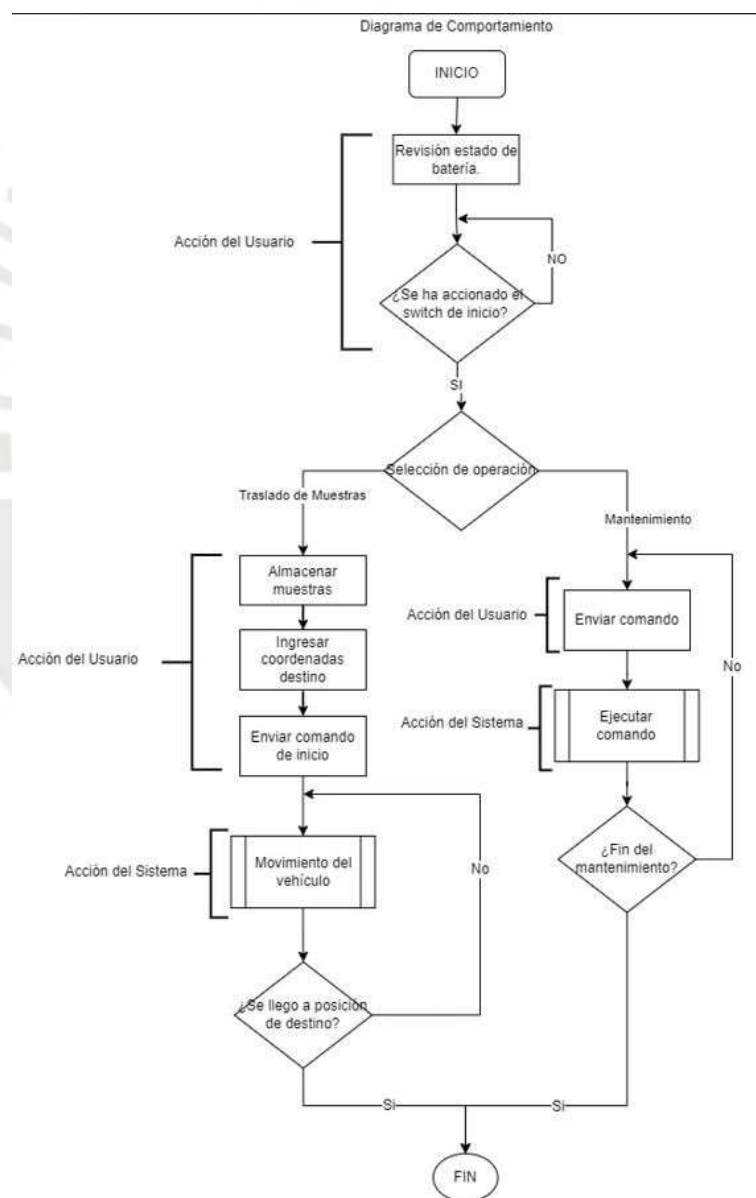


Figura 2.3. Diagrama de comportamiento principal (Infante Palacios, 2022)

El movimiento autónomo del vehículo se inicia por la recepción del comando de inicio y determina hacia donde se debe dirigir. Si el vehículo no está en su posición destino, realiza mediciones del entorno y envía los comandos necesarios hacia los actuadores.

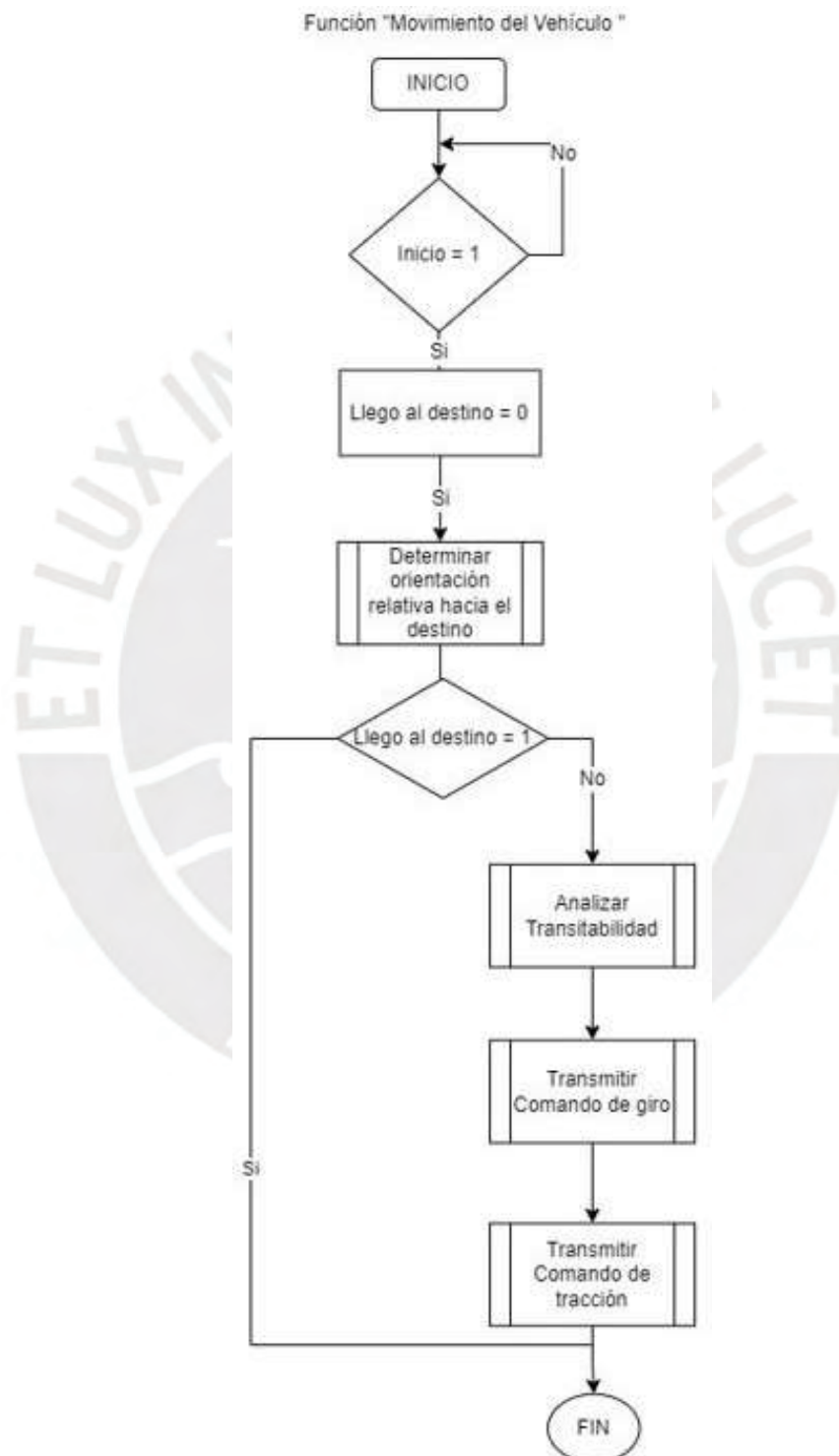


Figura 2.4. Diagrama de la función de Movimiento (Infante Palacios, 2022)

La acción de identificar la orientación hacia el destino (Figura 2.5), se logra mediante una comparación de las coordenadas actuales, medidas por el dispositivo GNSS, y las coordenadas ingresadas por el usuario. La orientación se da con un sistema de referencia propio del vehículo, posicionando el norte en la parte delantera del vehículo. Por ende, la lógica permite identificar si el vehículo debe avanzar, girar a la izquierda o derecha, o realizar una maniobra de giro en U.

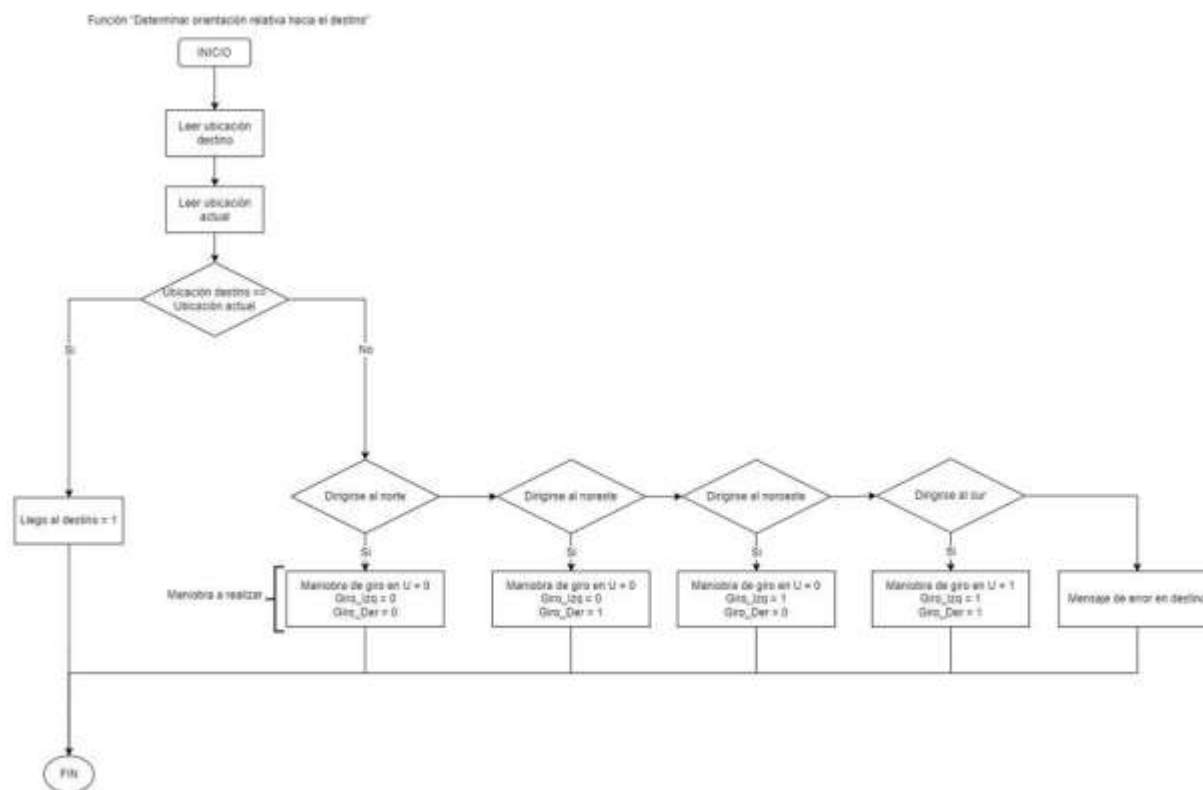


Figura 2.5. Diagrama de la función de Orientación (Infante Palacios, 2022)

Una vez identificados los comandos a realizar de acuerdo con la posición relativa del destino con respecto del vehículo, se analiza la transitabilidad del entorno. Por medio de inferencia de las imágenes captadas por las cámaras y las mediciones realizadas por el sensor Lidar, el vehículo identifica el espacio disponible y los objetos que lo rodean. Con el espacio

disponible se calcula si es posible realizar la maniobra con riesgo 0, considerando las dimensiones del vehículo. El de riesgo permite informar al operario si el vehículo está por realizar alguna operación complicada.

El de riesgo va incrementando a medida que los parámetros de riesgo se ajustan. Los parámetros de riesgo influyen en el espacio mínimo para realizar la maniobra y la velocidad a la que se va a realizar. Niveles de riesgo 0 y 1 son ejecutados de manera autónoma, con un Nivel 2 o 3 se necesita autorización del operario para continuar y para un riesgo Nivel 4 el operario debe tomar control del vehículo y controlar el movimiento desde la PC de control. La Figura 2.6 ilustra la lógica a seguir antes de ejecutar la maniobra.

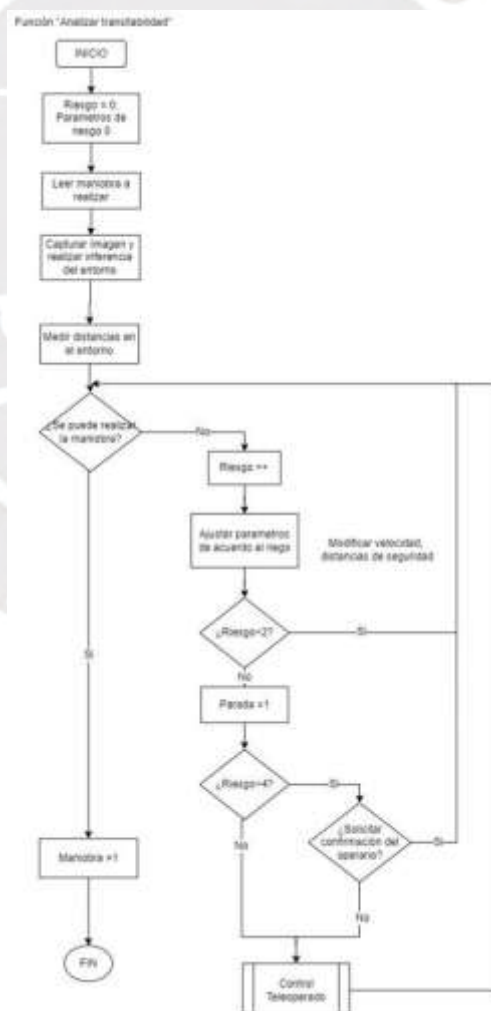


Figura 2.6. Diagrama de la función de Transitabilidad (Infante Palacios, 2022)

Los diagramas mostrados en la Figura 2.7 explican la lógica para transmitir comandos de giro o de tracción. Antes de enviar un comando se debe verificar si los comandos de actuación se mantienen o varían.

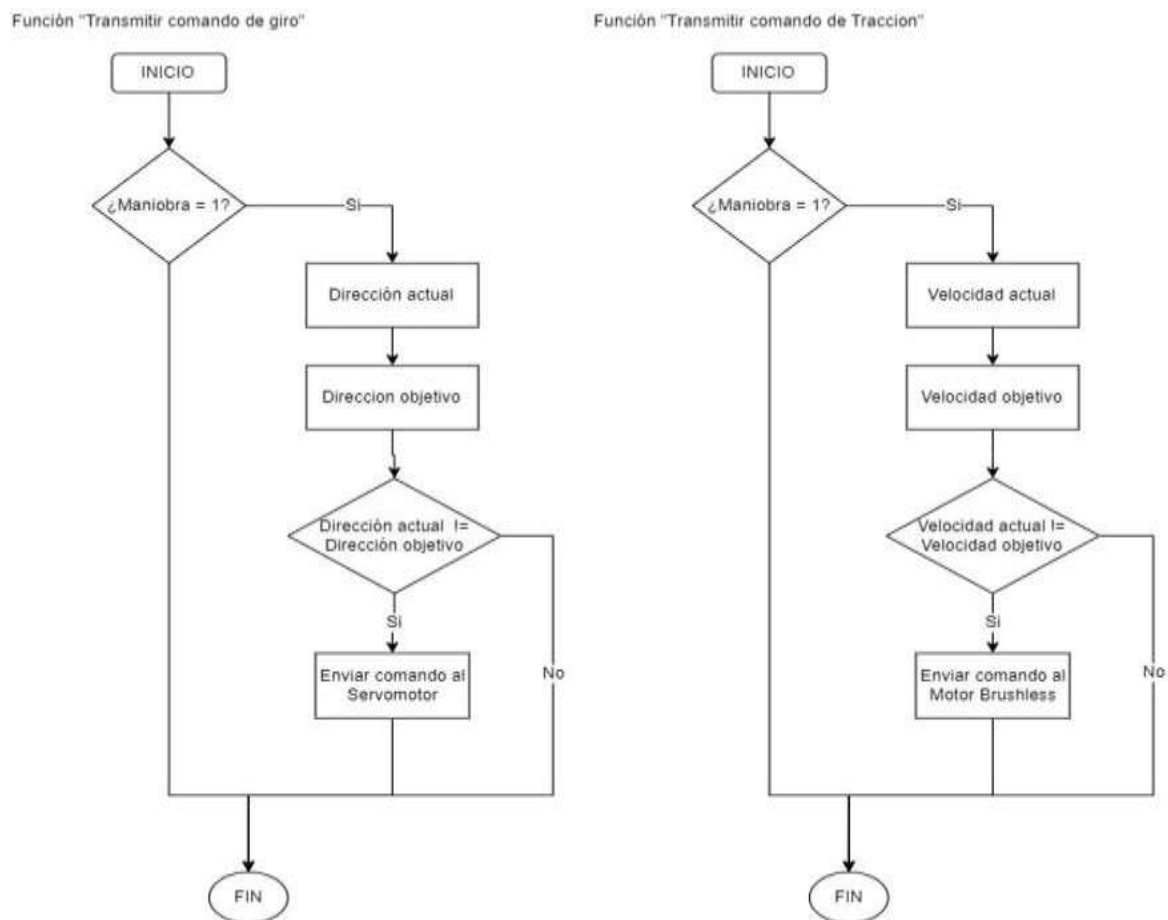


Figura 2.7. Diagrama de funciones para actuadores (Infante Palacios, 2022)

Adicionalmente, se muestran los diagramas para la lógica detrás de la parada y parada de emergencia (Figura 2.8). El diagrama de control teleoperado (Figura 2.9), solo se ejecuta si el vehículo encuentra una maniobra de alto riesgo y el operario toma el control. Por último, el diagrama de ejecutar comando (Figura 2.10) muestra algunas de las pruebas que se pueden realizar durante las actividades de mantenimiento, incluye revisión de sensores y actuadores.

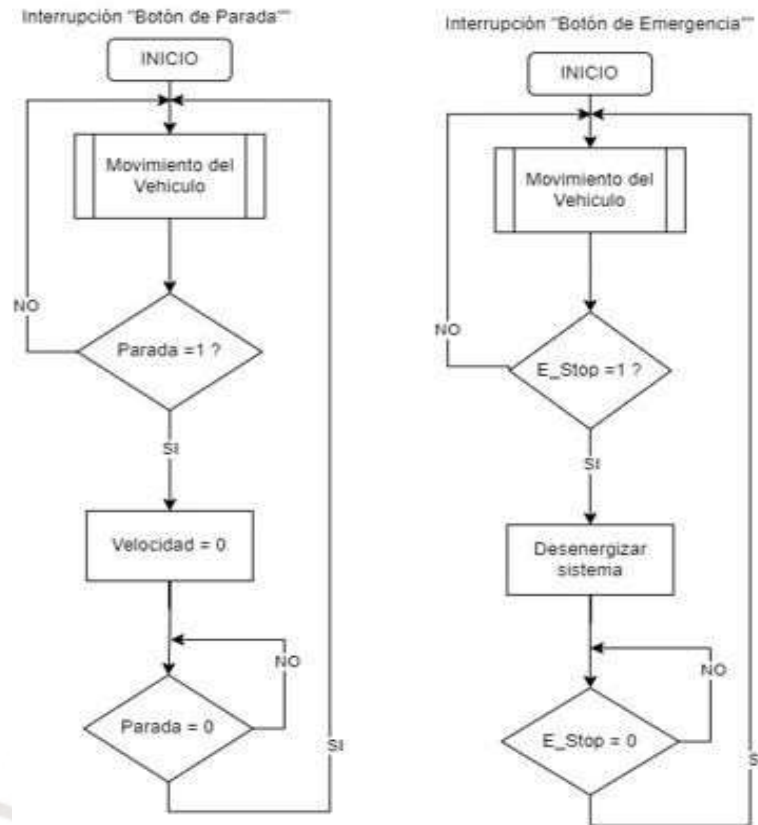


Figura 2.8. Diagrama de interrupciones de parada (Infante Palacios, 2022)

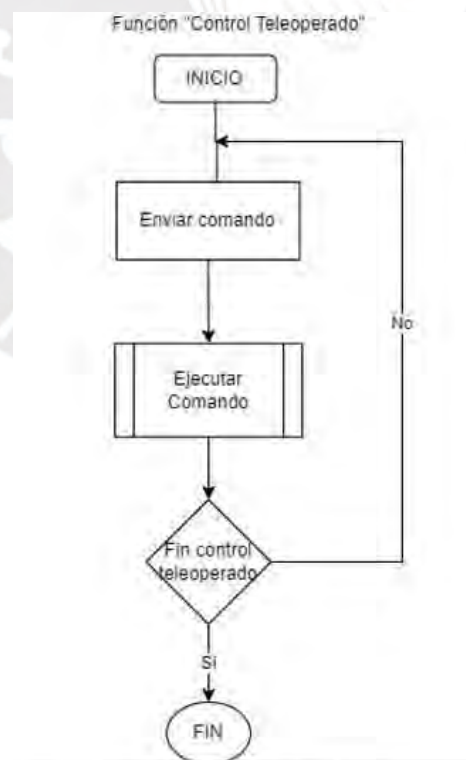


Figura 2.9. Diagrama de control Teleoperado (Infante Palacios, 2022)

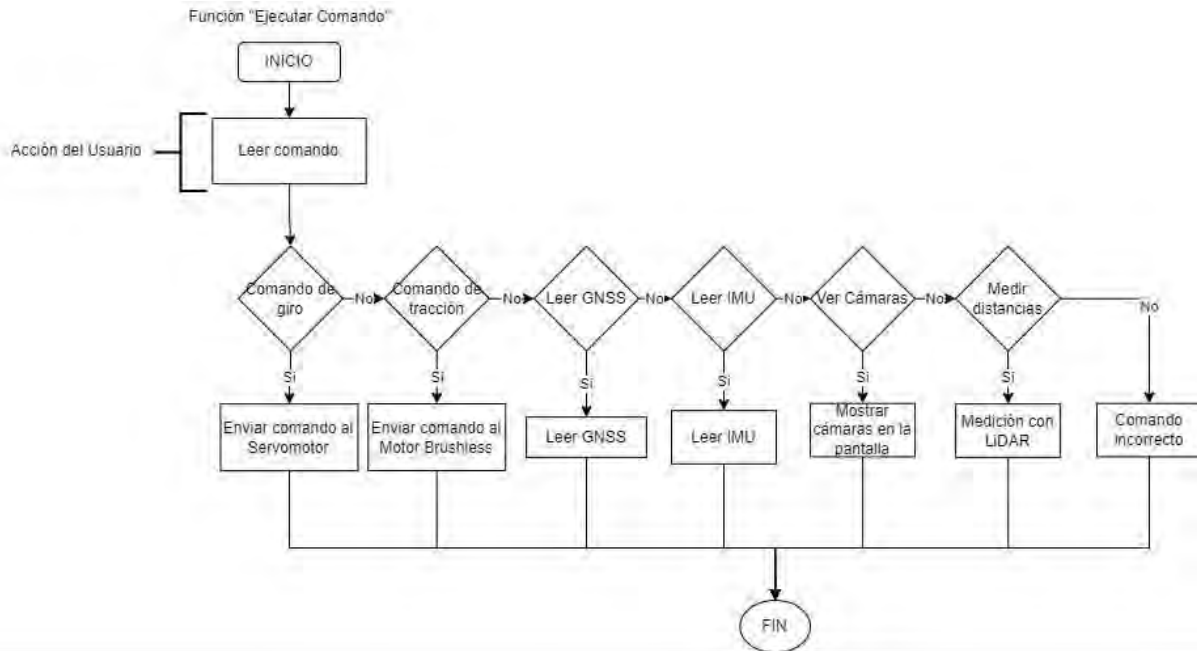
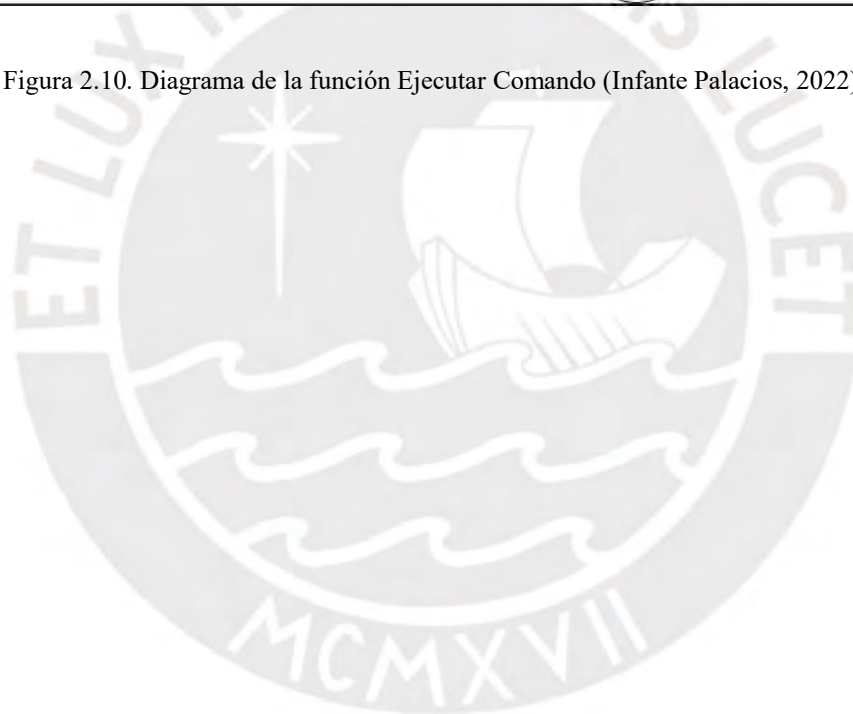


Figura 2.10. Diagrama de la función Ejecutar Comando (Infante Palacios, 2022)



2.2.4 Bosquejos mecánicos del sistema físico

En esta última sección del Diseño Conceptual se exhiben los bosquejos de diseño realizados en base a la propuesta solución. De acuerdo con lo seleccionado en el árbol de funciones, los bosquejos ilustran la ubicación e implementación tentativa de los distintos sistemas de la arquitectura mecatrónica.

Los elementos del sistema energía y materia de mayor dimensión son: el chasis tubular y los contenedores de plástico industriales. Se realizó un bosquejo del sistema en su totalidad, que se muestra en la Figura 2.11 se muestra el vehículo completo, indicando los sensores de entorno (cámaras de profundidad delantera y trasera junto a sensores Lidar laterales). Se posiciona el sistema de control y batería en la parte central del vehículo, garantizando la visibilidad de los LEDs indicadores y optimizando el espacio disponible.

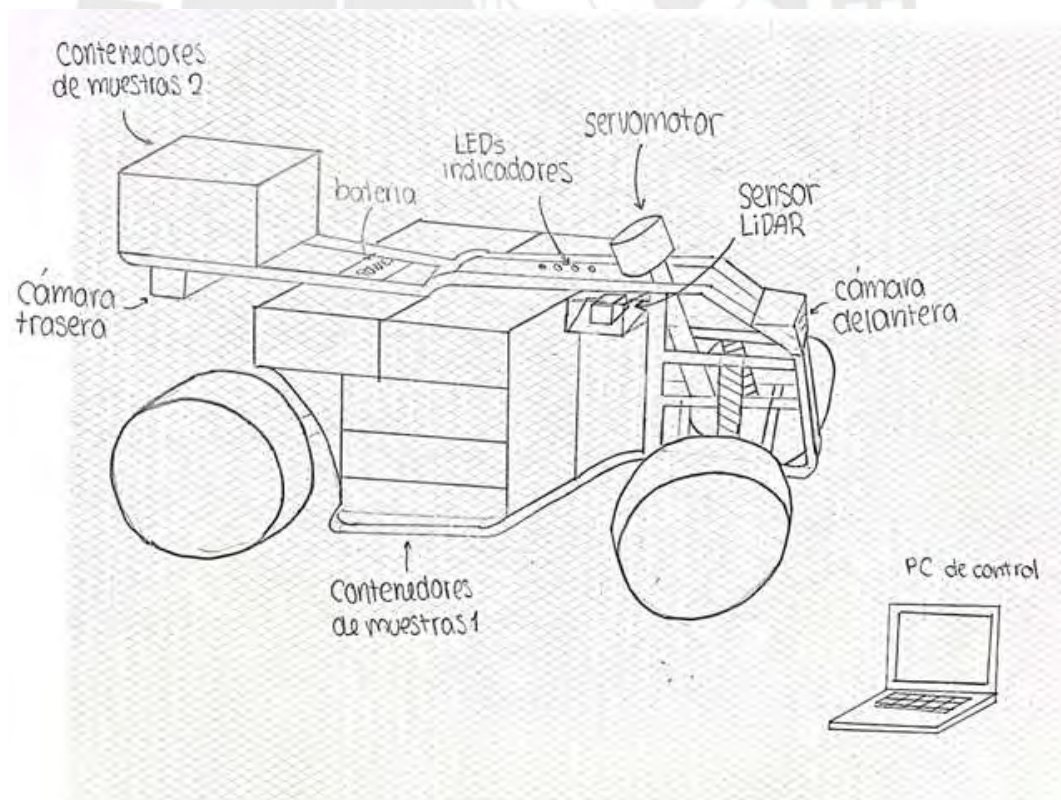
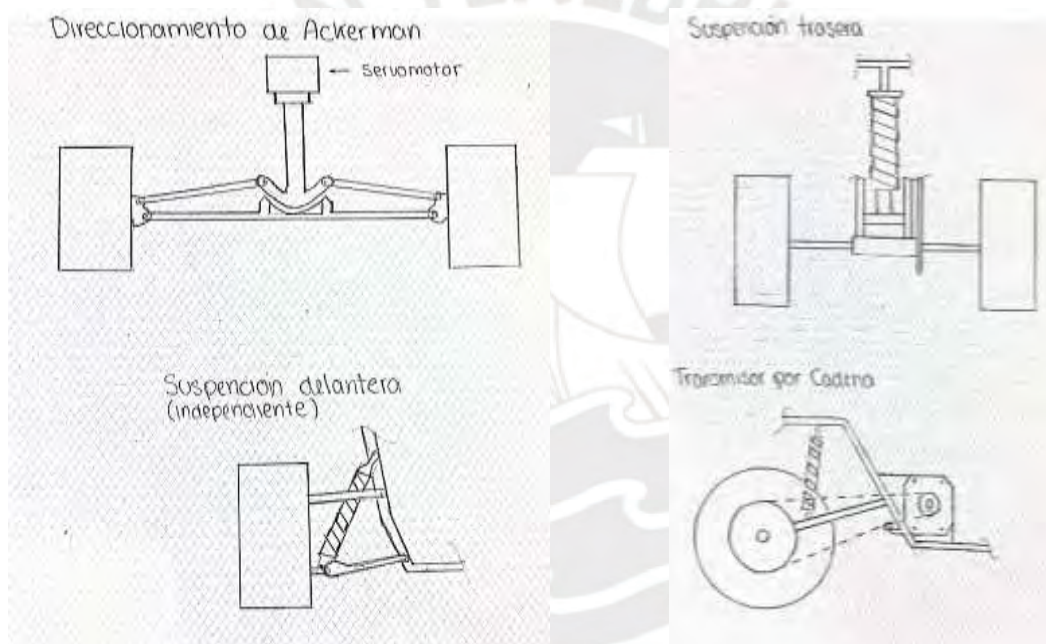


Figura 2.11. Bosquejo del Vehículo completo (Infante Palacios, 2022)

Con respecto al sistema de actuación, es necesario considerar ciertos elementos del sistema de energía y materia. Para la parte delantera del chasis se incluye una suspensión independiente (Double Wishbone), con direccionamiento de Ackerman que permita acoplar el servomotor y permita realizar giros superiores a 20 grados. De igual manera, la parte posterior del vehículo debe contar con suspensión dependiente, considerando un engranaje acoplado al eje posterior que permita transmitir el movimiento de giro, generado por motor brushless DC. Las Figuras 2.12a) y 2.12b) muestran cómo se conectan los elementos de actuación a los elementos mecánicos para realizar los movimientos lineales y de giro.



(a) Bosquejo de la parte frontal del Vehículo (b) Bosquejo de la parte posterior del Vehículo

Figura 2.12. Bosquejos del sistema de tracción (Infante Palacios, 2022)

En la parte interna del vehículo, se deben posicionar los elementos correspondientes al sistema información y sistema de medición. Por lo que, la Figura 2.13 plantea una ubicación tentativa de la unidad de procesamiento, microcontrolador, IMU, sensor GNSS y drivers para los dispositivos de actuación. Todos estos elementos componen el sistema de control que va dentro de una caja electrónica para su protección.

En su parte exterior, la caja electrónica contempla el posicionamiento de la interfaz de entrada y de salida, interruptor de encendido y LEDs indicadores. En la Figura 2.13 se toma en cuenta el posicionamiento de la antena del dispositivo GNSS. Se debe considerar que la laptop de control incluye el teclado (Interfaz de entrada) y pantalla (Interfaz de salida).

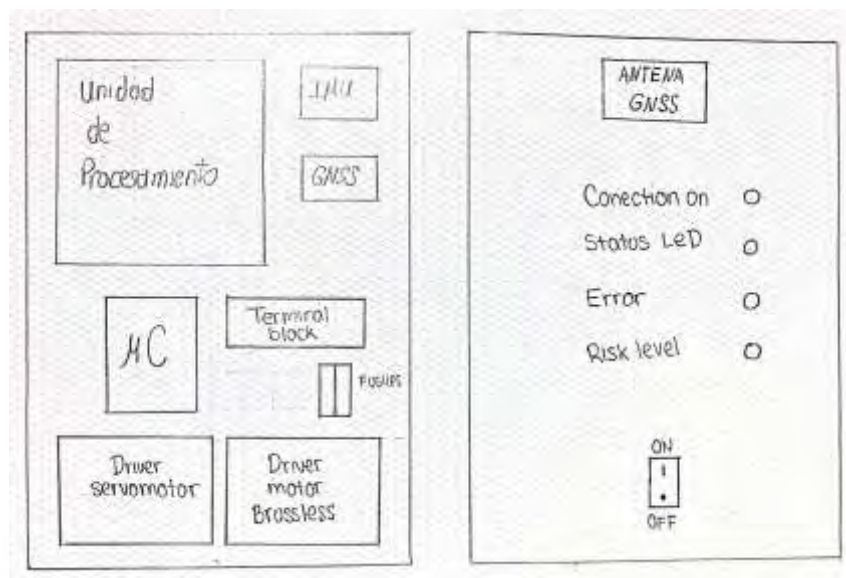


Figura 2.13. Bosquejo del sistema de control del vehículo (Vista interna/ Vista Externa) (Infante Palacios, 2022)

El sistema de medición también incluye los sensores para análisis del entorno (sensores Lidar y cámaras de profundidad), que se deben montar en la parte exterior del vehículo, teniendo 2 consideraciones importantes. Primero, la estructura o base de apoyo se debe acoplar al chasis tubular. Segundo, se debe garantizar protección de las variantes ambientales. En la Figura 2.14 se muestran posibles diseños para apoyar las cámaras de profundidad y para el sensor Lidar. Considerando que estos sensores tengan una visión no obstruida para garantizar la fidelidad de la medición.

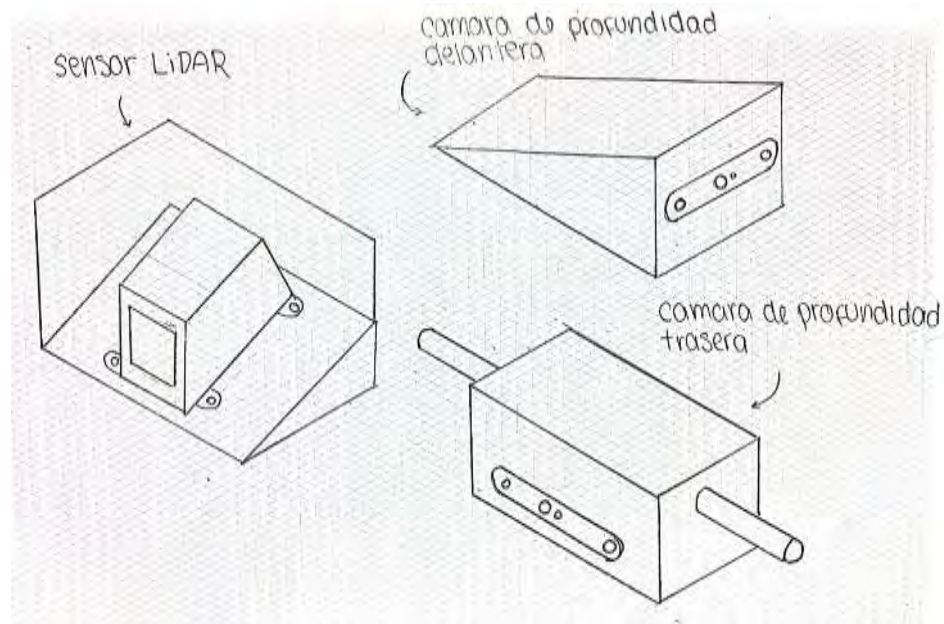


Figura 2.14. Bosquejo de los apoyos para los sensores (Infante Palacios, 2022)

Se concluye que el presente vehículo se presenta como una solución al traslado de muestras en la prospección. Por medio de la aplicación del vehículo, el equipo de prospección puede operar de manera conjunta, sin cargar el peso de las muestras. Esto reduce los riesgos ergonómicos a los que se expone el personal, permite agilizar la actividad e incrementa la capacidad de muestreo, resultando en prospecciones más eficientes.




Capítulo III

Concepto Óptimo

3.1. Diseño Preliminar

En esta sección se detallarán los componentes seleccionados, piezas diseñadas y diagramas de conexión para lograr la solución óptima. Como se ha identificado en el desarrollo conceptual, la adaptación de un vehículo Off-Road comercial es la mejor alternativa. A continuación, se comparan las siguientes opciones de vehículo seleccionados por su disponibilidad comercial.

Tabla 3.1. Vehículos Off-Road a adaptar

Vehículo Off Road			
			
Vehículo	Pick Up	Sand Buggy	Cuatrimoto
Dimensiones (m) (LxWxH)	6x2x1.9	4x1.9x1.4	1.9x1.1x1.2
Tipo de Chasis	Chasis escalera	Chasis Tubular	Chasis Tubular

Con lo identificado en la Tabla 3.1 se selecciona adaptar el chasis de una cuatrimoto, principalmente por ser el vehículo de menor dimensión para el manejo Off-Road y cumplir con los requisitos previamente analizados de chasis tubular, suspensión dependiente trasera (Eje sólido) y suspensión independiente delantera (Double Wishbone). El presente trabajo de tesis

se realizará en base a un modelo CAD de una cuatrimoto de estructura tubular cuadrada (Figura 3.1, sus especificaciones se detallan en la Tabla 3.19. La suspensión y llantas también son incluidas como parte del modelo inicial.

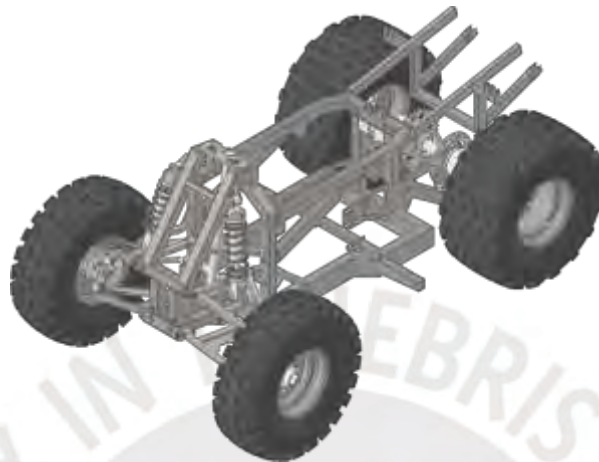


Figura 3.1. Chasis CAD Inicial

Tabla 3.2. Especificaciones modelos CAD inicial

Especificaciones modelo CAD	
Peso (kg)	110
Largo (m)	1.73
Ancho (m)	1.02
Alto (m)	0.90
Distancia entre ejes (m)	1.16

En base a este Modelo CAD se pueden extraer características físicas necesarias para realizar los cálculos en la selección de componentes y cálculos en el ámbito de control. El proyecto de tesis a trabajar se va a diseñar en base al diagrama de bloques de la Figura 3.2. Se divide el proyecto en 3 dominios: Eléctrico/Electrónico, Dominio Mecánico y Dominio de Control. Se finalizará con un análisis de costos para evaluar la rentabilidad de la propuesta.

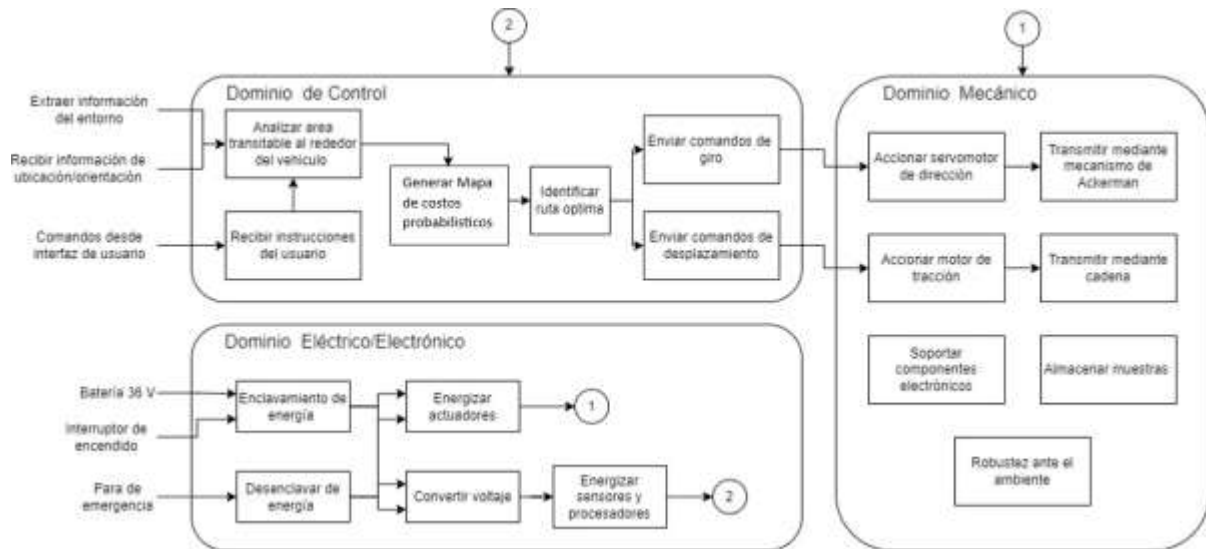


Figura 3.2. Diagrama de bloques (Infante Palacios, 2022)

La presente propuesta consiste en un vehículo para prospección que emplea algoritmos de navegación para un funcionamiento seguro junto al equipo de prospección. La Figura 3.3 funciona como referencia del objetivo a lograr. Para mayor detalle sobre el funcionamiento, se puede consultar el siguiente link: <https://youtu.be/VleWZVHorI>.



Figura 3.3. Imagen de la propuesta (Infante Palacios, 2022)

Se inicia con la selección del almacenamiento para las muestras recolectadas. Considerando hermeticidad y resistencia, se seleccionan cajas marca Takachi (Figura 3.4), estas cajas cuentan con una protección IP65 como mínimo y cumplen con los requisitos

identificados durante el planteamiento conceptual del proyecto. Adicionalmente, las cajas se encuentran en variedad de dimensiones, garantizando la versatilidad al momento de diseñar los compartimentos para el almacenamiento de muestras y se pueden usar para almacenar/proteger los componentes de control y procesamiento del vehículo.



Figura 3.4. Cajas electrónicas Takachi

3.2. Selección de Componentes Electrónicos

En esta sección se detallarán los componentes elegidos para lograr el producto solución. Se incluirá una comparación entre productos comerciales y se justificará la selección de los componentes finales. Estos componentes cumplirán con los requisitos identificados en los cálculos presentes en el Anexo “Cálculos previos de Torque” y requisitos establecidos en la matriz morfológica, Anexo “Matriz Morfológica”.

3.2.1. Selección de Actuadores

El presente proyecto contiene solo dos actuadores, se seleccionará un servomotor para la dirección y un motor brushless DC para la tracción.

El servomotor de dirección debe poder generar el torque necesario para accionar el mecanismo de Ackerman. A continuación, se presentan el diagrama de cuerpo libre (Figura 3.5) y fórmulas empleadas (Ecuaciones 3.1 y 3.2) para identificar el torque necesario.

$$\Sigma MCG = FT * 0,48 - FD * 0,68 = 0 \quad (3.1)$$

$$\Sigma F = FT + FD = Peso \quad (3.2)$$

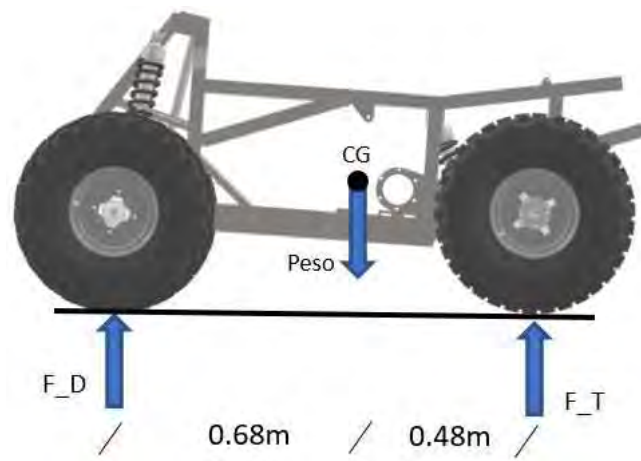


Figura 3.5. DCL para fuerzas de contacto

Calculada la fuerza sobre el eje delantero, se asume que esta se distribuye equitativamente entre las 2 llantas. Identificada la carga, se selecciona la llanta 23x7-10 36F, comúnmente empleada en vehículos Off-Road. Con las especificaciones de la llanta y la fuerza de contacto, es posible calcular el área de contacto entre el vehículo y el terreno, así como la fuerza de fricción a vencer para girar el vehículo. Por simplicidad, el área de contacto se idealiza como un rectángulo (Figura 3.6) y el torque necesario para el giro se calcula con la Ecuación 3.16.

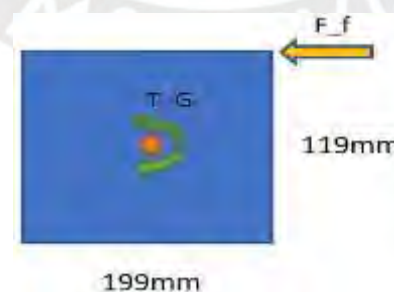


Figura 3.6. DCL área de contacto entre llanta y terreno

$$\Sigma M = Ff * 0,12 - TG = 0 \quad (3.3)$$

Identificado el torque de giro por llanta, se duplica para obtener el torque total, considerando un factor de seguridad. Los valores numéricos de estos cálculos se detallan en el

Anexo de “Cálculos previos Torque”. El requerimiento de torque es de aproximadamente 50 Nm. Conociendo este valor, se investigaron algunas opciones comerciales de servomotor. Para cumplir con el requerimiento de un alto torque, bajas velocidades y un diseño compacto, se buscaron opciones que tengan reducción.

Tabla 3.3. Servomotores de alto torque

Código	RDrive 85	AK80-80	M8025E25B50L
Imagen			
Fabricante	Rozum Robotics	T-Motor	TINSMITH
Diámetro (mm)	88	98	110
Longitud (mm)	127.1	62	104
Torque Nominal (Nm)	108	48	51
Alimentación (VDC)	48	48	36
Corriente nominal (A)	9	13	7
Peso (g)	2470	2700	2500
Precio (\$)	3699	989	490

Tomando en consideración los componentes estudiados en la Tabla 3.3 se selecciona el motor M8025E25B50L ya que es la opción más económica y brinda el torque suficiente para realizar el giro del sistema de dirección. Además, tiene un bajo voltaje y bajo consumo de corriente. El motor RDrive85 tiene un costo muy elevado y el motor AK 80-80 estaría operando sobre su valor nominal.

De acuerdo a lo investigado en el diseño conceptual, se seleccionará un motor brushless DC debido a la alta potencia que pueden proporcionar sin necesidad de una transmisión

compleja. Estos motores operan junto a un controlador, permitiendo la lectura de los sensores hall y/o de temperatura, facilitando las acciones de control.

Para realizar la selección del motor, es necesario calcular la fuerza de tracción necesaria para mover el vehículo. Se toma como referencia el libro de “Automotive Technology” de la Universidad de Ghent, donde se indica que la fuerza de tracción está definida de la siguiente manera (Verhelst, 2016).

$$F_{Trac} = F_{Rolling} + F_{Climbing} + F_{Aerodinamic} + F_{Inertial} \quad (3.4)$$

Es la suma de la fuerza de rodadura (Ecuación 3.5), el efecto de la pendiente (Ecuación 3.6), la resistencia aerodinámica (Ecuación 3.7) y la resistencia inercial (Ecuación 3.8). Cada una de estas fuerzas se detalla a continuación.

$$F_{Rolling} = f_{roll} * G \quad (3.5)$$

$$F_{Climbing} = G * \sin(\theta) \quad (3.6)$$

$$F_{Aerodinamic} = 0,5 * \rho a * v^2 * S * Cx \quad (3.7)$$

$$F_{Inertial} = \left(1 + \frac{J}{m*r^2}\right) * m * a \quad (3.8)$$

G peso del vehículo

f_{roll} coeficiente de rodadura

θ inclinación del terreno

ρ densidad del aire

v velocidad de desplazamiento

S superficie frontal

Cx coeficiente de resistencia J inercia de las llantas

a aceleración lineal

r radio de las ruedas

Con la fuerza de tracción requerida se puede identificar el torque del motor necesario. Considerando que esta fuerza se calcula en el eje trasero, se relaciona con el torque del motor promedio de las Ecuaciones 3.9 y 3.10. Donde T_m es el torque del motor, T_t es el torque de tracción, i es el ratio de transmisión de cadena, y n es la eficiencia de la misma.

$$T_t = F - Trac * r \quad (3.9)$$

$$T_m = \frac{T_t}{i * n} \quad (3.10)$$

Por último, considerando la velocidad de desplazamiento, se puede calcular la velocidad angular del motor obteniendo la potencia del mismo. Los valores numéricos se especifican en el Anexo “Cálculos previos motor brushless”. Se busca un motor que pueda brindar desde 2kW de potencia y un torque nominal cercano a 12Nm para terreno plano y 42 Nm con una pendiente de 10°. Con estos requisitos se identificaron las siguientes opciones.

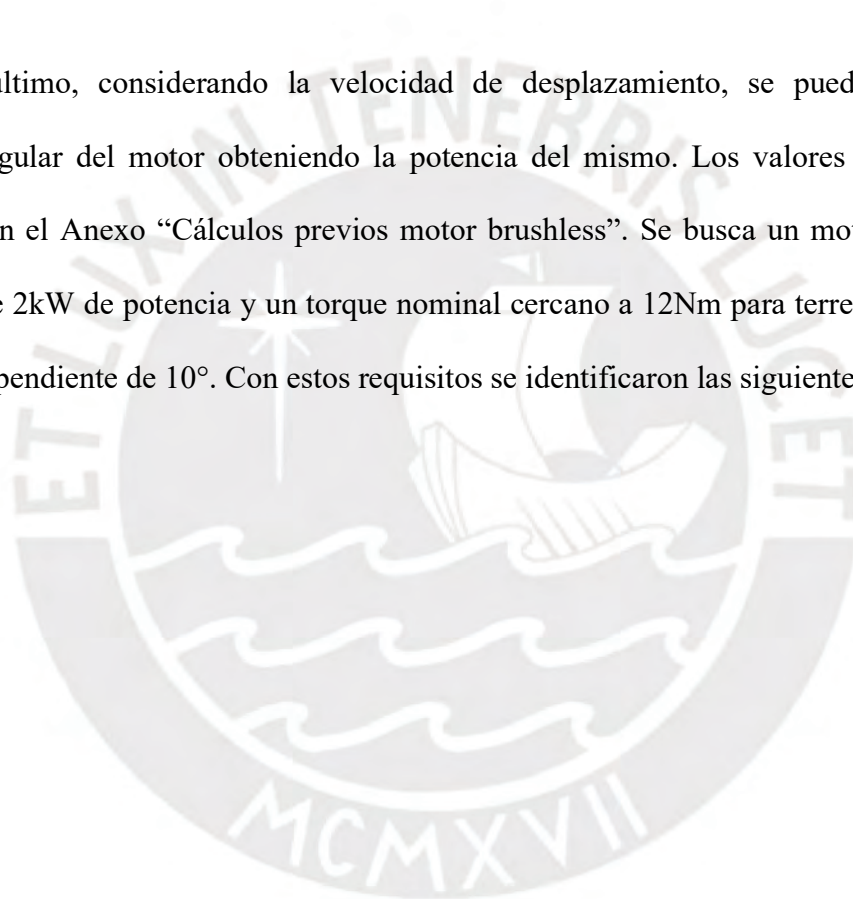


Tabla 3.4. Motores brushless DC

Código	QS 4000W 138 90H 85	HPM5000	DDR-5K
Imagen			
Fabricante	QS Motor	Golden	MXUS
Diámetro (mm)	160	206	110
Longitud (mm)	230	126	104
Rated Power (kW)	4	3	5
Max Power (kW)	7.5	7.5	6
Rated Torque (Nm)	14.3	13	5
Max Torque (Nm)	72	45	—
Velocidad (RPM)	4000	2000-6000	—
Sensor	Single Hall Sensor	Thermal Sensors	Double Hall sensor
Alimentación (VDC)	72	48/72/96	72
Dientes de Sprocket	14	10/11	No Incluye
IP	IP67	IP67	IP67
Peso (kg)	13-14	11	13
Precio (\$)	375	600	240

Con la información de la Tabla 3.5, se selecciona el motor QS 4000W, que se presenta como la mejor opción debido a sus dimensiones, torque nominal y costo. Para complementar la selección del motor, se debe elegir su controlador. A continuación, se muestran las opciones comerciales de controladores para motores brushless DC.

Tabla 3.5. Motores brushless DC

Código	RGBL1960	EM72100SP	Vector 300
Imagen			
Fabricante	RoboteQ	Votol	Golden
Dimensiones LxWxH (mm)	140x200x58	218x124x60	190x180x50
Potencia (kW)	18	7.8	10
Alimentación Max (VDC)	60	72	72
Corriente Nominal (A)	300	100	30
Corriente Max (A)	400	330	200
Protocolos	CAN/RS232/RS485 TTL/USB	CAN/428/LIN	CAN/UART/Bluetooth
Control modes	Open/Closed Loop Speed Loop Torque/PID Loop	S mode / R mode	three-mode speed
Regenerative Brake	Si	No	Si
Motor Operating mode	Sinusoidal Trapezoidal	Sinusoidal	Sinusoidal
IP	IP67	IP65	IP65
Peso (kg)	3	1.65	2.5
Precio (\$)	965	400	520


En base a lo especificado en la Table 3.5, se selecciona el controlador RoboteQ, que, aunque es el de mayor costo, resulta ser el más robusto. Con estos 3 componentes se define el dominio de actuación. El servomotor se conecta directamente con los dispositivos de control. Por otro lado, controlar el motor QS se logra por medio del controlador RoboteQ.

3.2.2. Selección de Sensores

En la siguiente sección se hará la selección de los sensores que componen el sistema de medición. Estos sensores permitirán extraer información de localización y orientación del vehículo, así como información del entorno por medio de cámaras y Lidars.

La información de orientación y ubicación del vehículo es crucial para un movimiento autónomo exitoso. Se buscarán componentes medición inercial y ubicación de alta gama que garanticen precisión y fiabilidad en su medición, específicamente dispositivos que integren un sistema de medición inercial (INS) y el sistema GNSS.

Tabla 3.6. Dispositivos INS/GNSS

Código	RUG-IMX-5-Dual	VN-300 Rugged Dual	MTI-670
Imagen			
Fabricante	Inertial Sense	Vector NAV	Xsens
Dimensiones LxWxH (mm)	30.5x25.4x14.8	45x44x11	28x31.5x13
Roll/Pitch (deg)	0.04	0.03	0.2
Heading (deg)	0.4	0.15	1
Precisión Horizontal (m)	1.5	1	1
Precisión Velocidad (m/s)	0.03	0.05	0.05
Protocolo	USB/RS232/ RS485/CAN	UART	CAN/RS232/UART
IP	IP40	—	—
Alimentación (V)	3-3.6	3.3-14	4.5-24
Potencia Consumida (W)	1.47	1.25	0.5
Precio (\$)	3300	4850	1500

Con los parámetros comparados en la Tabla 3.6, se identifica que el MTI-670 viene a tener una baja precisión con respecto al roll/pitch y heading. Entre las opciones de InertialSense y Vector Nav se elige el RUG-IMX-5-Dual por ser más económico y tener precisiones similares. Por lo tanto, se seleccionará un RUG-IMX-5-Dual para realizar mediciones de orientación y localización.

Para la selección de los sensores Lidar es necesario un análisis previo, ya que estos sensores varían en sus campos de visión (360° o de estado sólido). Los sensores de visión 360° normalmente usados para mapeo y reconstrucción virtual, a diferencia de los sensores de estado sólido, que se usan para análisis focalizado de un área. Debido a que el vehículo se trabaja como un modelo bicicleta, sus movimientos están limitados por desplazamientos rectos. Esto significa que el principal énfasis se encuentra en el análisis de la parte delantera del vehículo.

En las Figuras 3.7a) y 3.7b) se ilustra el campo de visión de un Lidar de estado sólido en la parte delantera del vehículo. De igual manera, la Figura 3.8 muestra el posicionamiento de un Lidar 360 en la parte superior del vehículo. Se decide trabajar con un Lidar de estado sólido, ya que se tendrá un mejor aprovechamiento de la información y detalle de la zona delantera. Al trabajar con un Lidar 360 se extrae información de los alrededores, pero el cuerpo del vehículo va a obstruir el campo de visión, reduciendo el detalle de los objetos próximos al mismo.

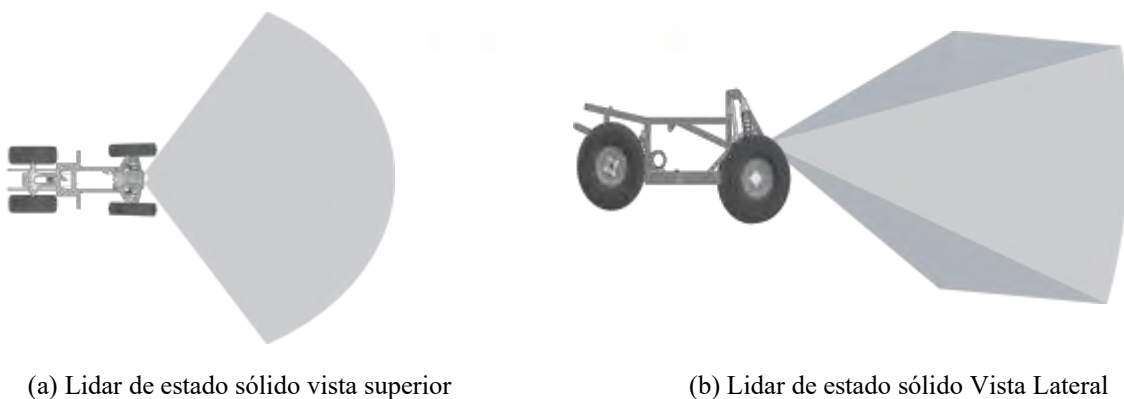


Figura 3.7. Ubicaciones de Lidar



Figura 3.8. Lidar 360 montado en la parte superior

Considerando el análisis previo se realizará una búsqueda de sensores Lidar de estado sólido. A continuación, se presentan los sensores Lidar identificados.

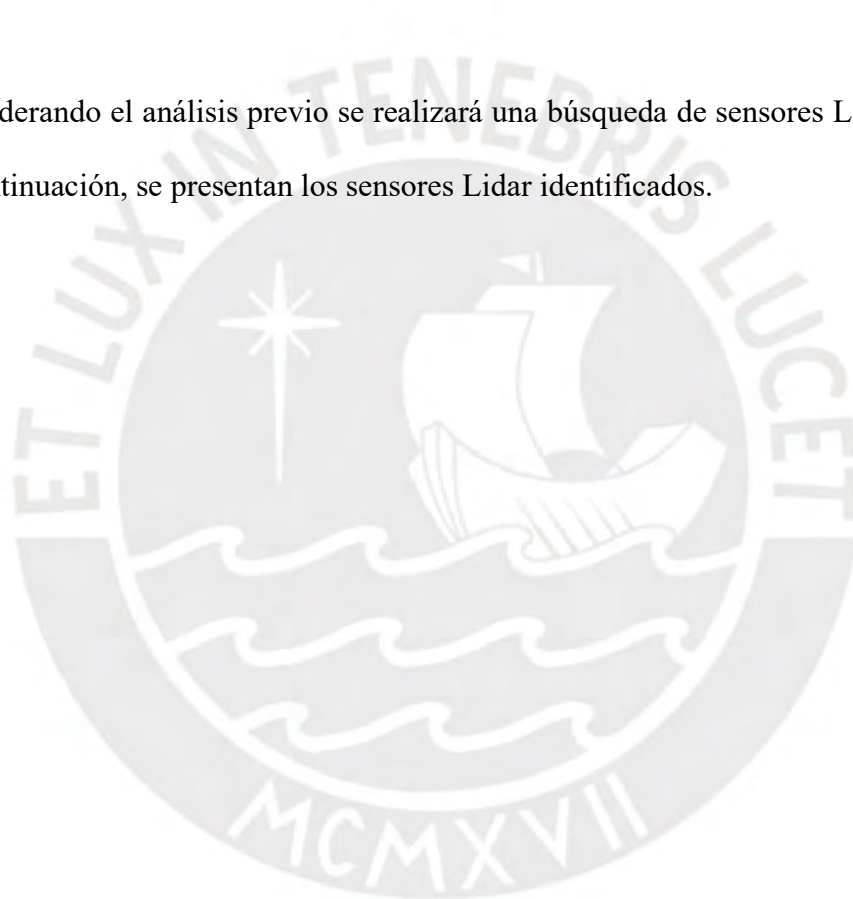





Tabla 3.7. Sensores Lidar

Código	HAP	Velarray M1600	MID-70
Imagen			
Fabricante	Livox	Velodyne	Livox
Dimensiones LxWxH (mm)	105×131.6×65	81.1x180x55	97x64x62.7
Field of view HxV (deg)	120x25	120x32	70.4x70.4
Precisión angular (deg)	0.2	0.2	0.1
Rango Min-Max (m) @10% reflectivity	0.05-150	0.1-30	0.05-90
Wavelength (nm)	905	905	905
Laser Safety	Class 1	Class 1	Class 1
IP	IP67	IP67	IP67
Alimentación (V)	9-18	9-16	10-15
Potencia Consumida (W)	30	15	8
Livox Converter	No	No	Si
Livox Converter alimentación y consumo	—	—	9-30 VDC 30W
Precio (\$)	1600	2000	1100

De los sensores presentados en la Tabla 3.7 se selecciona el Livox MID-70, específicamente por su rango de visión focalizado que permite identificar el camino delantero. Tiene un alcance regular y una zona nula muy pequeña (5cm), siendo la opción más económica comparada a las otras opciones. Su dimensión va a permitir variedad de posiciones para maximizar la cantidad y utilidad de la data recolectada.

Para complementar la capacidad de interpretación del entorno, es necesario poder realizar un análisis basado en la apariencia. Las cámaras de profundidad permiten extraer una imagen RGB para incrementar la efectividad del análisis de transitabilidad, y con la información de profundidad se complementa la información recolectada por el Lidar. A continuación, se comparan cámaras de profundidad comercialmente disponibles.

Tabla 3.8. Cámaras de profundidad

Código	D457	Astra	Azure Kinect
Imagen			
Fabricante	Intel RealSense	Orbbec	Microsoft
Dimensiones LxWxH (mm)	124×29×36	165x30x40	103x125x39
Field of view HxV (deg)	87x58	60x49.5	Narrow 75x65 Wide 120x129
Rango de Profundidad (m)	0.6-6	0.6-8	0.25-5.5
RGB Resolution (pixels)	1280x800	640x480	4096x3072
Temp (C°)	—	0-40	10-25
IP	IP65	—	—
Alimentación (V)	10-15	9-16	10-15
Energizar	USB Tipo C	USB 2.0	USB Tipo C
Potencia Consumida (W)	3.7	2.4	5.9
Precio (\$)	500	150	400

De la Tabla 3.8 se selecciona la cámara D457 de Intel RealSense, a pesar de no es la opción más económica, resalta en resolución y robustez. Dado que las cámaras estarán expuestas al ambiente, su índice de protección IP es crucial. Se van a usar 2 cámaras en el desarrollo del vehículo, una cámara delantera y una trasera.

Con la selección de las cámaras de profundidad, se ha delimitado el sistema de medición del vehículo: Un sensor inercial (RUG-IMX-5-Dual) que proporcionará orientación y ubicación del vehículo; un sensor Lidar (MID-70) que será posicionado para enfocar la parte delantera del vehículo; y 2 cámaras de profundidad (D457 Intel RealSense) que se ubicaran por delante y detrás del vehículo.

3.2.3. Selección de Unidades de Control

En esta sección de control se seleccionará la unidad de procesamiento central, que se encargará del análisis de la información recopilada por los sensores. También se seleccionará un microcontrolador que esté encargado de la comunicación con los actuadores.

Debido a la cantidad de información que va a ser recolectada por el sensor Lidar y las cámaras de profundidad, es necesario una unidad de procesamiento con alta capacidad computacional, en vista de que la velocidad de procesamiento es crucial para alcanzar un movimiento seguro a la velocidad objetivo de 0.75 m/s. Se compararán dispositivos de alta gama, marca Nvidia detallados a continuación:

Tabla 3.9. Unidades de procesamiento

Código	Jetson Orin	Jetson AGX Xavier
Imagen		
Fabricante	Nvidia	Nvidia
Dimensiones LxWxH (mm)	110x110x71.65	105x105x80
AI performance	275 TOPS	32 TOPS
GPU	2048 núcleos y 64 núcleos Tensor	512 núcleos y 64 núcleos Tensor
Frecuencia GPU	1.3 GHz	1.37 GHz
CPU	CPU Arm® Cortex®-A78AE de 12 núcleos v8.2 64 bits 3 MB L2 + 6 MB L3	8 core Carmel ARM CPU @ 2.26GHz (4x) 2MB L2 + 4MB L3
Memoria	LPDDR5 de 32 GB	LPDDR4 de 16 GB
Almacenamiento	64GB	32GB
Puertos	2 USB tipo C 2 USB tipo A USB micro-B UART, SPI, I2S, I2C CAN, PWM, DMIC, GPIO	2 USB tipo C 2 USB tipo A USB micro-B UART, SPI, I2S, I2C CAN, PWM, DMIC, GPIO
Potencia Consumida (W)	60	30
Alimentación (V)	9-20	9-20
Precio (\$)	2000	1100

Considerando la Tabla 3.9, la Jetson Orin posee una clara superioridad computacional, esto permitirá que el sistema opere a mayor velocidad y se conecte adecuadamente con los

demás dispositivos. Se debe considerar que este dispositivo no cuenta con protección IP, por lo que debe aislar de manera adecuada para garantizar su durabilidad.

Para el control de los actuadores se recomienda una unidad independiente que se encargue de las tareas de bajo nivel, mientras la unidad de procesamiento central (Jetson Orin) se encarga del procesamiento de alto nivel para el análisis del terreno. Como se trabaja solo con 2 actuadores, la potencia y funcionalidades del microcontrolador no deben ser muy altas.




Tabla 3.10. Microcontroladores

Código	STM32L432KC	STM32 BluePill	Arduino Nano
Imagen			
Fabricante	STMicroelectronics	STMicroelectronics	Arduino
Dimensiones LxW (mm)	124×29×36	53x22	44x19
Procesador	32-bit ARM Cortex-M4 @ 80 MHz	32-bit ARM Cortex-M3 @ 72 MHz	8-bit AVR @ 16 MHz
SRAM	64KB	20 KB	2KB
Protocolo CAN	Si	Si	Shield CAN arduino
Alimentación (V)	1.8-3.6	2-3.6	USB o 7-12 en Vin
Corriente Consumida (mA)	3.7	2.4	19
Precio (\$)	11	9	24

De los microcontroladores analizados en la Tabla 3.10, se selecciona el STM32L432KC ya que es el de mayor velocidad de procesamiento, bajo costo e incluye protocolo CAN, el cual servirá para integrar el servomotor M8025 al sistema. Con la selección de la Jetson Orin y el microcontrolador STM32L432KC, se define el sistema de información.

Por último, es necesario conectar la unidad de procesamiento del vehículo con el dispositivo de control del operario. La Jetson Orin permite una conexión inalámbrica por medio de una red WIFI. Para aprovechar esta característica, se buscará un componente que mejore la conexión y establezca una red local para transmitir comandos y vídeo hacia el operario.

Tabla 3.11. Sistema de Comunicación

Código	AWUS036ACH	Industrial WiFi Router F3X26-TB	ESP32-S3-DevKitC
Imagen			
Fabricante	Alfa Network	Four-Faith	Espressif Systems
Protocolos	WIFI	WIFI	WIFI
Transmit Power	—	15 ± 2dBm	17dBm
Voltaje (V)	5	5-36	3.3
Conexión	USB	RS232/RS485/ Ethernet/WIFI	UART, I2C, USBx2
Precio (\$)	70	—	15

Entre los componentes de la Tabla 3.11 se selecciona AWUS036ACH, ya que puede ser configurado como un punto de acceso y permitirá el intercambio de información entre el vehículo y el operario. El operario, necesita un dispositivo desde el cual pueda ingresar la información y realizar la lectura de ciertos sensores. Para esto se determina el uso de una tablet, por ser un dispositivo versátil y fácil de transportar.

Tabla 3.12. Dispositivo de control

Código	RT71
Imagen	
Fabricante	Xenarc
Procesador	ARM 64Bit Cortex A53 Quad Core 1.5GHz x 4
Dimensiones	202x138x22
Conexión	WIFI/ Bluetooth/ Red Celular 2G/3G/4G
IP	67
Peso (kg)	1.5
Precio (\$)	775

Con este dispositivo se podrá establecer una comunicación entre el operario y el vehículo. El ingreso de información sobre la ruta y el destino, lectura de sensores, pruebas con los motores y visualizar las cámaras son las acciones disponibles para el operario.

3.2.4. Selección de Componentes de Potencia

Para finalizar la selección de componentes, es necesario definir algunos elementos del sistema de masa/energía que completarán los sistemas necesarios para una implementación completa del sistema.

Considerando el concepto de LEDs indicadores establecido en el Capítulo 2, se opta por la inclusión de luces en el vehículo en vez de LEDs. Las luces permiten comunicar el estado mediante parpadeos y, simultáneamente, permiten operar en condiciones de poca visibilidad. ya que, es necesario un sistema de iluminación que garantice que las cámaras puedan operar de manera adecuada y se puedan emitir alertas visuales al operario.

Tabla 3.13. Faros comerciales

Código	Mini LED Work light	ATV auxiliary light	LED Vehicle Work Light
Imagen			
Fabricante	BTRLED	BTRLED	BTRLED
Voltaje (V)	9-36	9-36	9-36
Consumo (W)	24	30	35
Lumens	2600	3300	3650
Intensidad	1 lux @39m	1 lux @62m	1 lux @69m
IP	68	68	68
Tiempo de Vida	+50000 h	+50000 h	+50000 h
Dimensión	150x50x48	85x108x58.3	107x129x47.7
Precio (\$)	14.2	14.6	17.5

El sistema de iluminación permite operaciones en baja visibilidad y dar señales a los operarios. Considerando las especificaciones en la Tabla 3.13, se selecciona la Mini LED Work light.

Para lograr una selección adecuada de la fuente de energía, es necesario considerar los requerimientos energéticos de los componentes más demandantes ya seleccionados. El servomotor de dirección no tiene un funcionamiento continuo, por lo que su consumo no es constante. Por otro lado, el motor brushless tiene un funcionamiento constante siendo su consumo energético el principal, acompañado de los dispositivos de control y sensores. Los requerimientos de la batería son de 36V con 100 Ah para una autonomía de 6 horas continuas, como se muestra en las Figuras 3.9 y 3.10.

Componente	Accion	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Tiemp High / Hora	Duty Cycle (por hora)	Potencia (W)
Servomotor	Giro	36	7	252	5	0.08	21
Jetson	Procesamiento	12	5	60	60	1.00	60
Lidar	Escaneo	-	-	15	60	1.00	15
Camaras		-	-	8	60	1.00	8
Luces	Iluminacion	-	-	72	10	0.17	12
Motor QS	Movimiento Plano	36	10	360	50	0.83	300
Motor QS	Pendiente 10 deg	36	30	1080	10	0.17	180
Potencia Total							596

Figura 3.9. Consumo de componentes (Infante Palacios, 2022)

Tiempo Funcionamiento	6 h
Voltaje Bateria	36 V
Capacidad Bateria	100 Ah

Figura 3.10. Requisitos de la batería (Infante Palacios, 2022)

Bajo estos requerimientos se comparan las siguientes opciones comerciales.




Tabla 3.14. Batería Principal

Código	36V 100Ah	GM36 150 Ah	B36100B
Imagen			
Fabricante	GTK	Bush Energy	Epoch Batteries
Tipo de Batería	Lifepo4	Lifepo4	Lifepo4
Voltaje (V)	36	36	36
Capacidad (Ah)	100	150	100
Ciclo de Vida	2000 ciclos	3000 ciclos	3500 ciclos
Corriente de descarga Max (A)	100	100	100
BMS Integrado	Si	Si	Si
IP	—	—	67
Indicador de batería	—	—	Si
Monitoreo	—	Bluetooth Control App	Bluetooth Control App
Dimensión (mm)	460x380x180	360x275x260	502x260x270
Peso (kg)	20	36	34
Precio (\$)	980	3700	1700

De las baterías consideradas en la Tabla 3.14, se selecciona la batería B36100B de Epoch Batteries. Principalmente por sus dimensiones, que se ajustan al espacio disponible en el vehículo. Esta batería se puede posicionar sin problema en la parte central del vehículo. Adicionalmente, incluye una aplicación para el monitoreo a detalle, y un indicador del nivel actual de la batería con diversas advertencias de seguridad.

El sistema de encendido del vehículo debe contemplar un interruptor; sin embargo, como la corriente que pasa por el cable directo de la batería es de alto amperaje, no es posible realizar una energización directa. Por lo cual se va a emplear un relé de estado sólido como elemento de seguridad

Tabla 3.15. Relé de estado sólido

Código	Solid State Relay	Solid State Relay	Solid State Relay
Imagen			
Fabricante	CRYDOM	CRYDOM	DAYTON
Voltaje de Control (V)	4-32	4-8	3-32
Voltaje Controlado (V)	1-100	3-100	3-200
Corriente Max (A)	40	20	40
Dimensiones (mm)	57x45X23	37x21x15	59x46x26
Precio (\$)	123	50.5	117

La principal diferencia entre los componentes presentes en la Tabla 3.15 es la corriente que puede pasar por las borneras controladas, por lo que se selecciona el relé de estado sólido de marca DAYTON, por ser el de menor precio con una alta corriente máxima.

Como último grupo de componentes a seleccionar se encuentran los conectores industriales, para los cuales se emplearán conectores “Harsh Environment Connectors” de Switchcraft Conxall. Los conectores varían en dimensiones para señales de comunicación o de energización. Se seleccionarán de acuerdo a la necesidad.

3.3. Diseño Eléctrico/Electrónico

En la presente sección del informe se detallará el dominio eléctrico/electrónico especificando en el diagrama de conexiones principal. Se abordarán detalles sobre la energización y comunicación de los componentes, el diseño de las PCBs necesarias y la distribución de los componentes del sistema de control,

3.3.1. Diagrama Eléctrico/Electrónico

Respecto a la energización de los componentes, se busca aislar las tierras de control y tierras de actuación, con el fin de proteger los componentes de control. La Jetson Orin es el componente principal de procesamiento, además de energizar una gran variedad de dispositivos. La Tabla 3.16 organiza los componentes y su fuente de energía, para identificar donde separar los lazos de tierra.

Tabla 3.16. Listado de componentes y su energización


Componente	Conector	Fuente de energía
Servomotor	Cable de potencia	Batería 36V
Driver RoboteQ	Cable de potencia	Batería 36V
Luces	Cable de potencia	Batería 36V
Jetson Orin	DC power Jack	12V
INS/GNSS	USB A	Jetson Orin
Hot-spot	USB C	Jetson Orin
Cámara Delantera	USB A	Jetson Orin
Cámara Trasera	USB A	Jetson Orin
Interface box	Ethernet	12V
STM32	USB A	Jetson Orin

Gracias a la tabla anterior, se pueden identificar 2 dispositivos adicionales a emplear.

Primero, un Hub USB3.0 de 3 entradas Tipo A y conector USB tipo C, para satisfacer la

cantidad de conexiones por USB Tipo A, hacia la Jetson Orin. El segundo componente es un conversor aislado de 36-12V para separar los componentes cuya alimentación es diferente a 36V. El conversor a emplear es THM 60-4812WI, que cumple con los requisitos de potencia de la Jetson Orin y, al mismo tiempo, separará las mallas de tierra entre los actuadores y dispositivos de control. En la Tabla 3.17 se tienen las especificaciones del conversor.

Tabla 3.17. Conversor DC-DC

Código	THM 60-4812WI
Imagen	
Fabricante	TRACO Power
Voltaje min entrada (V)	18
Voltaje max entrada (V)	75
Voltaje salida (V)	12
Corriente Max (A)	5
Potencia de salida (W)	60
Dimensiones (mm)	58x37x13
Precio (\$)	186

Otro aspecto a considerar es la robustez de los componentes, para que estén protegidos de los entornos a los que serán expuestos. En el diagrama Eléctrico/Electrónico Figura 3.11, se indica qué componentes estarán aislados dentro de una caja electrónica. Es importante reconocer que para la conexión con componentes dentro de la caja electrónica se empleará un conector SwitchCraft de panel.

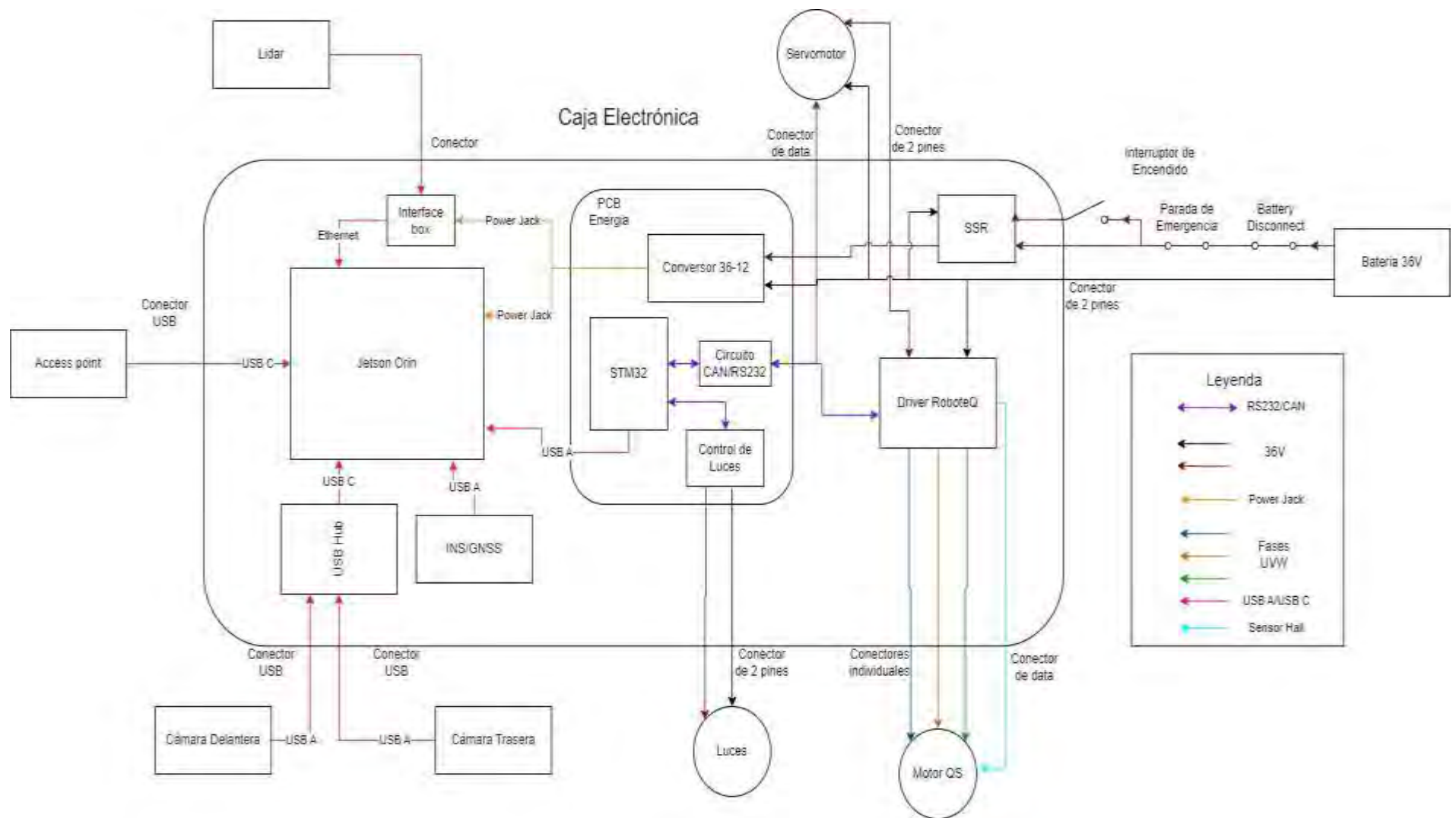


Figura 3.11. Diagrama Eléctrico/Electrónico (Infante Palacios, 2022)

En base a la Figura 3.11, se identifican las conexiones de energización principales para el servomotor, driver RoboteQ, luces y batería. Para las conexiones de la batería y el motor brushless se emplearán conectores de alto amperaje y utilizará un cable AWG 12 siliconado, que puede resistir hasta 85A.

Para los conectores de 2 pines, montados en la caja electrónica, se pueden emplear los conectores herméticos de panel hembra y los conectores herméticos macho para los cables AWG12. Similarmente, se emplean conectores herméticos (7282-2SG-300) para señales de menor amperaje



(a) 5182-2PG-530

(b) 4182-2SG-300

Figura 3.12. Conexión de potencia 2 Pines

Para lograr la energización de los componentes de control, es necesario diseñar una PCB de energía. Esta PCB tiene 2 tareas de potencia: permitir la energización de la Jetson Orin y la interface box del Lidar, y permitir el control de las luces desde el microcontrolador STM32. Para esto las conexiones de potencia de la PCB de energía emplearán conectores XT-60 para facilitar las conexiones internas. Por último, se usarán conectores JST para las conexiones de comunicación.

Como se ilustra en el diagrama eléctrico/electrónico se realizan una gran cantidad de conexiones por medio de puertos USB. La Jetson Orin cuenta con 4 puertos USB, 2 puertos tipo A y 2 puertos tipo C, y un puerto ethernet. Las conexiones a realizar son las siguientes.

- Puerto USB A: Dispositivo de medición inercial INS/GNSS.
- Puerto USB A: Microcontrolador STM32.
- Puerto USB C: Punto de Acceso Movil.
- Puerto USB C: Hub USB (Cámara delantera y cámara trasera).
- Puerto Ethernet: Interface box de sensor Lidar

Estas conexiones son directas entre los componentes, por lo que no se requiere un circuito intermedio para realizarlas. Sin embargo; los componentes externos a la caja electrónica se conectarán a través de un conector hermético de panel y adaptará el conector, asegurando hermeticidad en la conexión.



(a) DCC-US3AT-180 (b) DCP-US3AB-US3C

Figura 3.13. Conexión USB hermética

Con respecto a la comunicación con los actuadores, se inicia identificando los pines de interés del microcontrolador STM32, los pines del servomotor M8025 y los pines de interés del driver Roboteq. La Tabla 3.18 resume las conexiones a realizar.

Tabla 3.18. Listado de pines STM32L432KC a utilizar

Pin STM32L432KC	Actuador	Pin del Actuador	Detalle
PA_9 UART1_Tx	Driver RGLB1860	Pin3 RS_RxD	Comunicación RS232
PA_10 UART1_Rx	Driver RGLB1860	Pin2 RS_TxD	Comunicación RS232
PA_11 CAN1_RD	Driver RGLB1860 Servomotor M8025	Pin8CANL Terminal8 CANL	Protocolo CAN
PA_12 CAN1_TD	Driver RGLB1860 Servomotor M8025	Pin20CANH Terminal9 CANH	Protocolo CAN
PB_0 DIN / PB_1 DIN	Luces	–	Control de Luces

En base a la Tabla 3.18, se va a implementar un conector de 2 pines para establecer la comunicación con el servomotor M8025 y un conector de 4 pines para comunicarse con el driver RGLB1860. Adicionalmente, para establecer la lectura del sensor hall, es necesario un conector intermedio de 8 pines entre el driver RGLB1860 y el motor brushless.

Para poder realizar las conexiones identificadas en la Tabla 3.18, se debe considerar que, la conexión RS232 no se realiza directamente, ya que el microcontrolador STM32 emplea una comunicación TTL, por lo cual es necesario un circuito que adapte esta señal a RS232. Similarmente, la conexión del protocolo CAN emplea un circuito que integra las señales CAN1_RD y CAN1_TD del microcontrolador con las señales CANL y CANH de los actuadores. El protocolo CAN implementa un Bus CAN que permite comunicarse con ambos actuadores por medio del mismo bus de datos. Por último, el control de luces también incluye un circuito que permita alimentar con 36V las luces por medio de una señal de control del microcontrolador STM32.

3.3.2. Diseño de PCB de Energía

En la presente sección del trabajo de tesis, se detalla la tarjeta electrónica que permite realizar las conexiones de energización de los dispositivos, conexiones de comunicación microcontrolador STM32- servomotor M8025, microcontrolador STM32- driver RGLB1860 y control de luces.

La primera conexión establece la comunicación STM32 - driver RGLB1860 empleando una resistencia y diodos 1N5819. El circuito de la Figura 3.14 permite una comunicación serial entre ambos componentes, permitiendo enviar los comandos de velocidad desde el microcontrolador STM32 al motor Brushless.

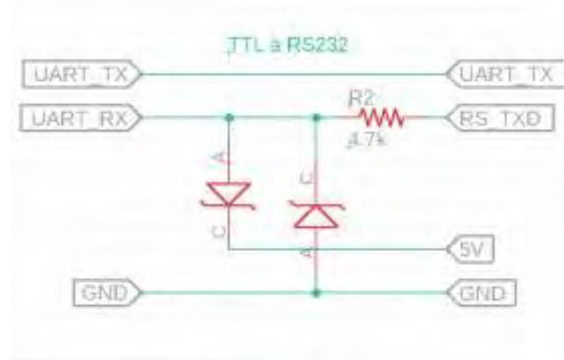


Figura 3.14. Comunicación TTL-RS232 (Infante Palacios, 2022)

El servomotor M8025 no permite comunicación por medio del protocolo RS232, por lo que se utilizará el protocolo CAN para su control. El protocolo CAN implica el uso de un CAN transceiver MCP2562-E/P, un circuito integrado que permite generar la señal diferencial. De igual manera, el driver RGLB1860 también permite el protocolo CAN y se incluirá en el Bus. En la Figura 3.15 se detallan las conexiones y componentes empleados.

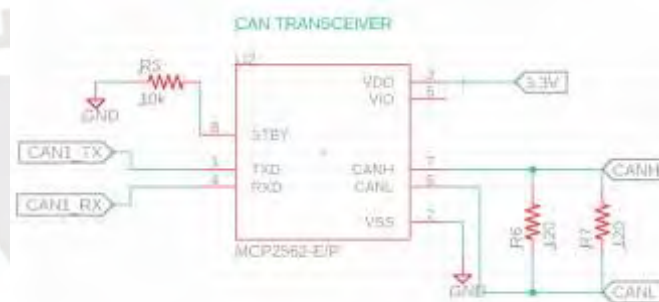


Figura 3.15. Circuito para protocolo CAN (Infante Palacios, 2022)

Por último, el control de las luces también es una acción de bajo nivel que será realizada por el microcontrolador. Considerando que se empleó un convertor de voltaje aislado, las señales de control y de potencia, no cuentan con la misma referencia (GND). En consecuencia, los mosfets no pueden ser empleados para realizar este control. Como alternativa, se emplean relés de estado sólido (AQY212GHAX) de bajo amperaje. La Figura 3.16 ilustra los 3 grupos de luces controlados.

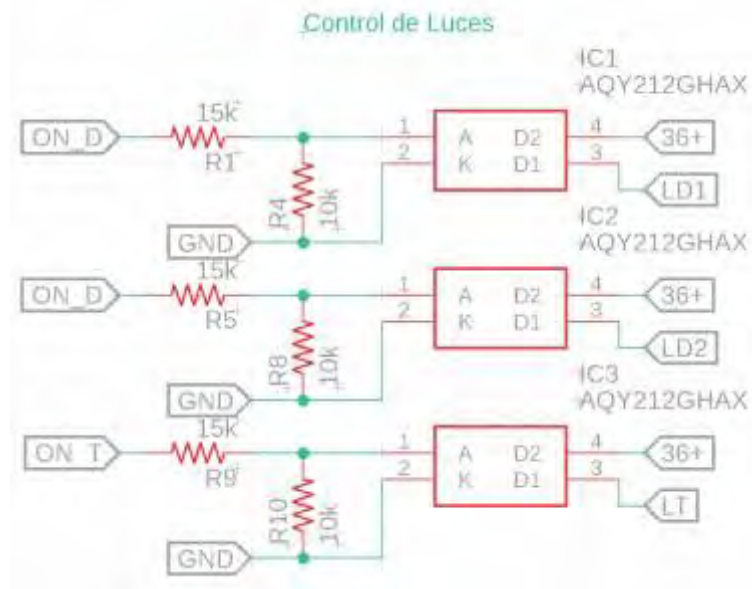


Figura 3.16. Control de luces (Infante Palacios, 2022)

Ahora se muestra el esquemático completo de la PCB de energía, donde se ubican los subcircuitos previamente mencionados y el convertidor de voltaje, con un LED indicador. Para las conexiones de con mayor amperaje se emplean conectores XT60-M, a diferencia de los conectores JST empleados para comunicación. Debido al bajo consumo de corriente, también se emplearán conectores JST para las luces. La Figura 3.17 muestra el esquemático completo de la PCB de energía.

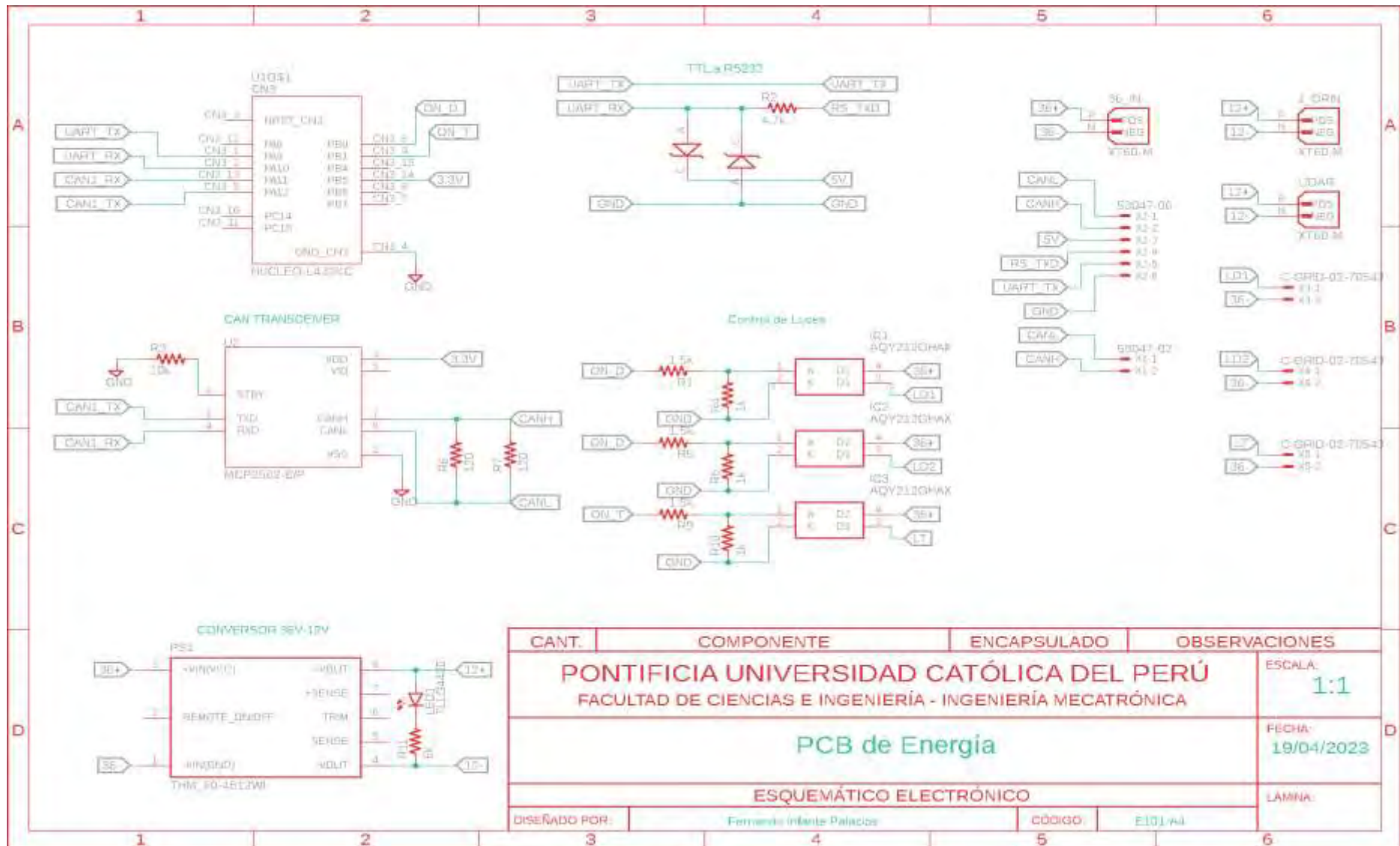


Figura 3.17. PCB de energía Esquemático (Infante Palacios, 2022)

Adicional al diagrama esquemático, se diseñó la placa a fabricar. El ancho de pista varía dependiendo de la demanda de corriente y se realizó un modelo 3D para complementar el modelo en 3D del proyecto (Figura 3.18). El modelo permite considerar el tamaño y orden de los componentes. La ubicación del microcontrolador STM32 se identifica por medio de los pin headers, donde se colocará. Al ser un componente elevado con respecto a la placa, se aprovecha el espacio intermedio para ubicar el CAN transceiver.

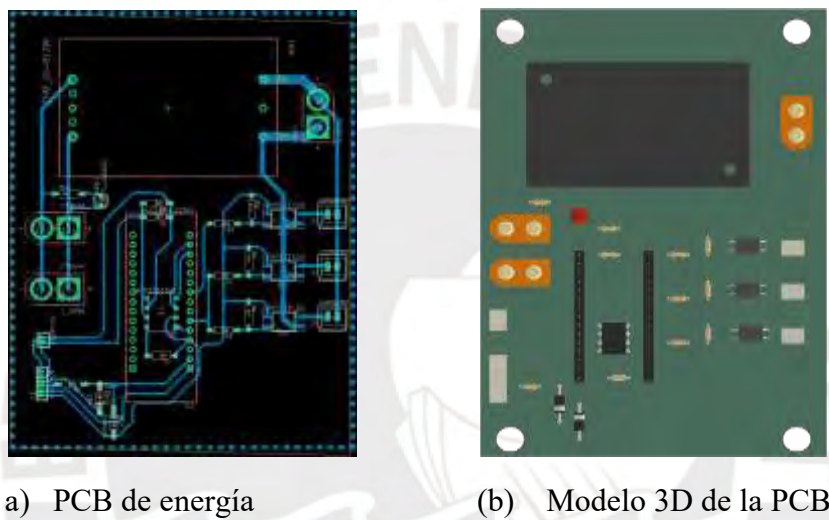


Figura 3.18. PCB de energía

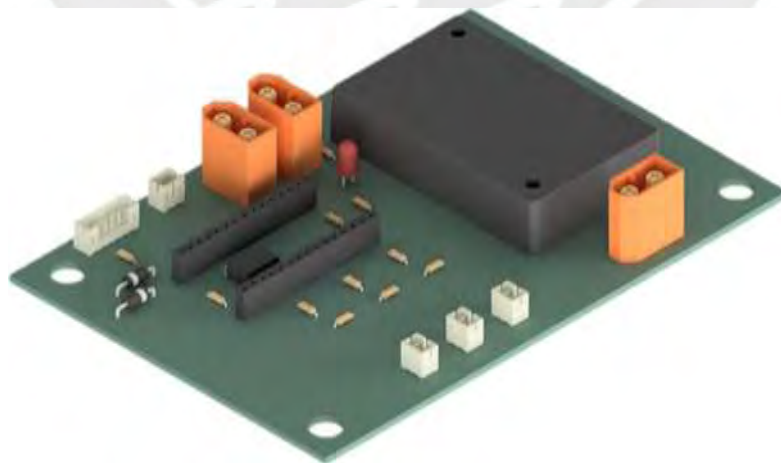


Figura 3.19. Modelo 3D de la PCB (Infante Palacios, 2022)

Por último, para facilitar la comunicación entre el microcontrolador y el driver RGBL, se diseña una pequeña placa que se monte sobre el conector DB25 del driver y permita seleccionar los pines de interés y facilitar la conexión física con la PCB de energía. Este circuito se muestra en la Figuras 3.20 y 3.21.

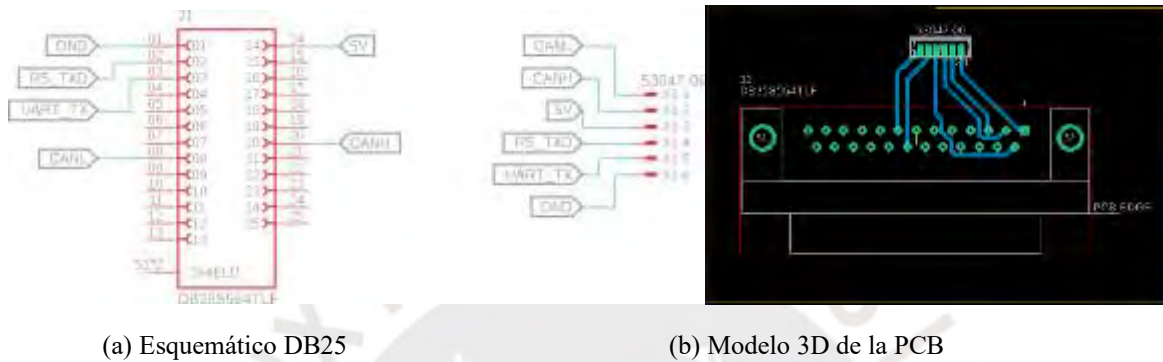


Figura 3.20. PCB conector DB25



Figura 3.21. Modelo 3D del conector (Infante Palacios, 2022)

3.3.3. Diseño de Sistema de control

Como último aspecto en el ámbito electrónico, se debe organizar la distribución de los componentes dentro de la caja electrónica, así como la selección de la misma. En la presente sección se detallarán las dimensiones, posicionamiento y organización del sistema de control.

En base al modelo 3D inicial de la cuatrimoto, una ubicación tentativa para la caja electrónica es en la parte central del vehículo (Figura 3.22), con unas dimensiones máximas de 400 x 300 x 200 mm. Con estas especificaciones, se selecciona la caja FCW15-40-30K, una caja de aluminio que cumple con las dimensiones permisibles y cuenta con una tapa de seguridad.



Figura 3.22. Posicionamiento Caja electrónica (Infante Palacios, 2022)

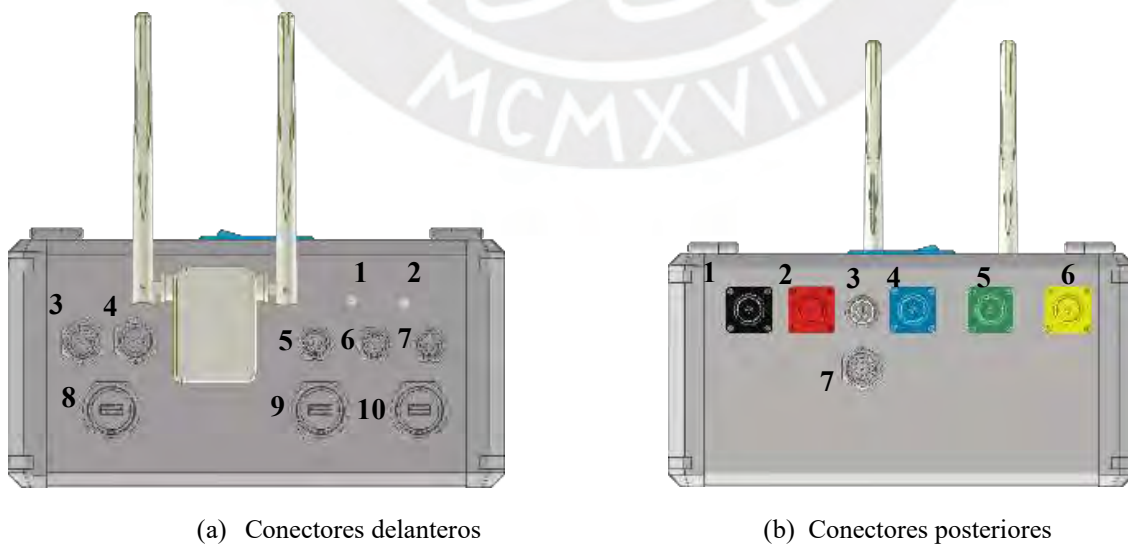
En vista de que ya se han identificado las conexiones necesarias en el diagrama electrónico, es posible un posicionamiento tentativo de los componentes, considerando la cercanía entre elementos interconectados.



Figura 3.23. Sistema de control (Infante Palacios, 2022)

Como se muestra en la Figura 3.23, el espacio permitido en la caja electrónica considera el cableado, por lo que se prioriza el ahorro de espacio colocando los componentes de acuerdo con el flujo de información y energía. La PCB se posiciona sobre una base para no interferir en los conectores de la Jetson Orin. Elevar la PCB de energía permite posicionar el sensor inercial debajo, y emplear de mejor manera el espacio disponible para cableado y/o conectores.

Con respecto a las conexiones a realizar con los elementos externos, se modificarán los 2 lados de la caja cada, uno con un objetivo específico.



(a) Conectores delanteros

(b) Conectores posteriores

Figura 3.24. Conectores de la caja electrónica

Tabla 3.19. Listado de conectores sistema de control

Conectores delanteros	Conectores Posteriores
1, 2 – Conectores para antenas GPS	1 – Conector terminal negativo de la batería
3 – Conector para Servomotor de dirección	2 – Conector terminal positivo de la batería
4 – Conector para sensor Lidar MID-70	3 – Botón de encendido
5, 6, 7 – Conectores para luces	4 – Conector para fase W del motor brushless
8 – Conector para Punto de Acceso	5 – Conector para fase V del motor brushless
9 , 10 – Conectores herméticos para cámaras de profundidad	6 – Conector para fase U del motor brushless
	7 – Conector para sensor hall del motor brushless

Como se muestra en la Figura 3.24, cada lado de la caja electrónica comunica con un grupo específico de componentes. Para la conexión con las luces, se utilizan tres conectores herméticos y dos jacks de panel para antenas GPS. Se tienen tres conectores USB3.0, dos de los cuales se conectan con las cámaras de profundidad (delantera y trasera), y el tercer USB se conecta a la Jetson Orin con el punto de acceso externo, también montado en el exterior de la caja. Por último, se tiene un conector hermético para la comunicación con el servomotor M8025 y un conector hermético para conectar el sensor Lidar MID-70.

En el lado posterior de la caja electrónica, se emplean 5 conectores de alto amperaje (1106304) , que van conectados a la batería (colores rojo y negro) y a las fases UVW del motor QS (colores amarillo, verde y azul). Este lado incluye el interruptor de encendido y un conector de 8 pines para conectar el driver RGBL con el sensor hall interno del motor QS.

3.4. Diseño Mecánico

En esta sección se abordarán los aspectos mecánicos del presente proyecto de tesis. Con un enfoque en el diseño de soportes, posicionamiento de los sensores y montaje de los actuadores. Aprovechando la estructura de tubos cuadrados de la cuatrimoto, es posible generar puntos de apoyo en el chasis, mediante uniones atornilladas. Se deben diseñar soportes para: el sistema de control, batería, sensor Lidar, cámaras, y también considerar el montaje del motor brushless y servomotor M8025.

3.4.1. Soporte de Caja Electrónica

Como se ha indicado en la sección previa, la caja electrónica se encuentra ubicada en la parte central del vehículo. Es necesario diseñarle una base que se pueda apoyar en los laterales del chasis y logre restringir los movimientos laterales y verticales. Se diseñó una base compuesta por 3 partes de aluminio 6061 que se unen por medio de uniones atornilladas. El componente central viene a ser una plancha de 3mm de espesor (Figura 3.25a) que sirve como base para la apoyar la caja electrónica. La segunda pieza se muestra en la Figura 3.25c y permite soportar la base en los nervios presentes en el chasis principal. Por último, la tercera pieza (Figura 3.25b) es un segundo soporte con agujeros roscados que se va a atornillar al perfil lateral del chasis.

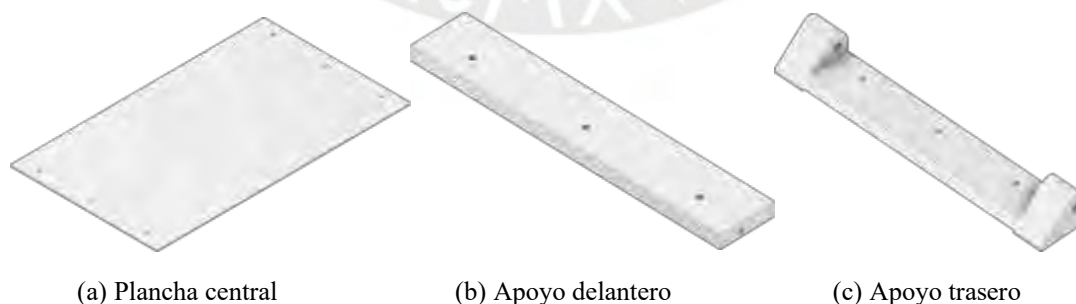


Figura 3.25. Base de la caja electrónica

La pieza ya ensamblada se muestra en la Figura 3.26. Su diseño permite el fácil montaje y desmontaje; sin embargo, esta pieza no restringe los movimientos verticales.



Figura 3.26. Base Caja Electrónica (Infante Palacios, 2022)

Como parte del soporte se añade una plancha doblada de aluminio de 1.5mm de espesor. Esta va a restringir el movimiento vertical y asegurar la caja electrónica en su posición. Tal elemento se muestra en la Figura 3.27 y se asegura por medio de tornillos M5.



Figura 3.27. Seguro Caja Electrónica (Infante Palacios, 2022)

Finalmente, la caja electrónica ya montada se muestra en la Figura 3.28.



Figura 3.28. Montaje del Sistema de control (Infante Palacios, 2022)

3.4.2. Soporte de la Batería

La batería fue seleccionada por sus dimensiones, considerando el espacio disponible en la parte central del vehículo. Por lo tanto, es necesario diseñar una base que permita soportar adecuadamente la batería del vehículo. Considerando los perfiles disponibles en la parte inferior del chasis, se diseñó una plancha doblada de acero inoxidable AISI 430 (espesor de 1.5mm), mostrada en la Figura 3.29.



Figura 3.29. Base para batería (Infante Palacios, 2022)

Esta pieza soportará el peso de la batería (36 kg); por ello, se realizó un análisis de esfuerzos para identificar si el material y espesor de la plancha cumplen con los requerimientos. El análisis garantiza que la base resiste adecuadamente el peso de la batería, considerando un factor de seguridad de 5 en su sección crítica, los agujeros para los pernos M5.

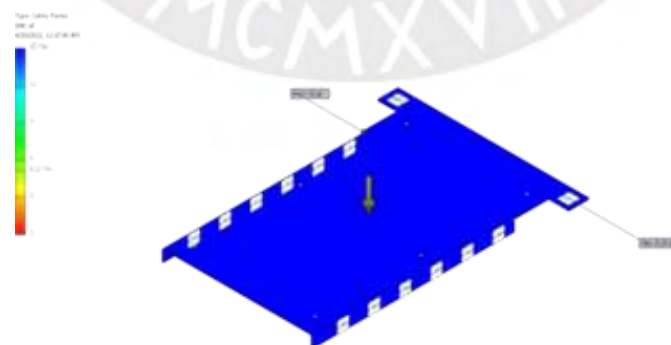


Figura 3.30. Análisis de esfuerzos de la base para la batería (Infante Palacios, 2022)

3.4.3. Soporte de Sensor Lidar

El posicionamiento del sensor Lidar MID-70 debe garantizar la mayor cobertura del terreno por delante del vehículo. El sensor MID 70 se colocó con una inclinación de 10° con respecto de la horizontal, enfocando la parte delantera del vehículo para aprovechar al máximo su campo de visión. Adicionalmente se consideraron las dimensiones y de IP 67 del MID-70 para posicionarlo en la parte delantera del chasis (Figura 3.31), simplemente apoyado en un soporte de plancha doblada



Figura 3.31. Posicionamiento sensor Lidar (Infante Palacios, 2022)

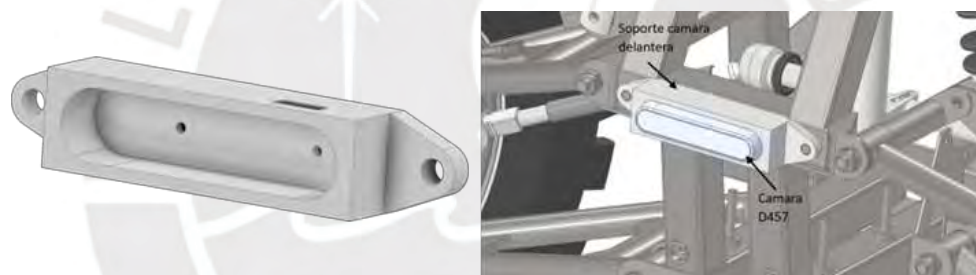
El soporte del MID-70, mostrado en la Figura 3.32, está hecho de aluminio 6061 con un espesor de 1.5 mm. Para el montaje de este soporte se requiere hacer agujeros en el chasis e insertar tuercas remachables. Dado que el Lidar tiene un peso de 580g, no es necesario un análisis de resistencia para este soporte.



Figura 3.32. Base para sensor Lidar (Infante Palacios, 2022)

3.4.4. Soporte de Cámaras

Las cámaras de profundidad D457 ya cuentan con un grado IP 65, por lo cual pueden ir en el exterior del chasis sin mayor problema. Para su ubicación delantera y trasera, se diseñan 2 soportes distintos considerando los puntos de apoyo disponibles. Ambos soportes están hechos de aluminio 6061 por ser un material liviano. Como los soportes no estarán sometidos a cargas elevadas, no es necesario realizar un análisis de estrés. La Figura 3.33 muestra el soporte de cámara delantera, que se acopla un par de pernos de la parte delantera del vehículo. La Figura 3.34 muestra el soporte trasero, que se atornilla a la parte inferior de la estructura soldada posterior. Se deben mecanizar agujeros e insertar tuercas remachables a la estructura para atornillar el soporte.



(a) Soporte cámara delantera

(b) Posición de la cámara delantera

Figura 3.33. Soporte para cámaras de profundidad



(a) Soporte cámara trasera

(b) Posición de la cámara trasera

Figura 3.34. Cámara de profundidad trasera

3.4.5. Montaje Motor de Dirección

El servomotor de dirección es un actuador de alta potencia que se utilizará para accionar el mecanismo de Ackerman y direccionar el vehículo. El servomotor M8025 es un componente robusto, pero no cuenta con una protección IP para los ambientes a los que el vehículo será expuesto. Por lo tanto, el montaje del motor contempla 3 aspectos. El encapsulado debe hermetizar el componente, es necesario un acople que permita la transmisión del movimiento y se debe incluir un soporte que mantenga fijo el estator.

Tomando como base el servomotor M8025, se diseñará un encapsulado compuesto de 3 partes, cuyo fin es proteger el componente de agua, tierra o impurezas que pueden estar en el ambiente. se emplearán O-rings para garantizar el sello del encapsulado. En la Figura 3.36 se muestra una vista explosionada del servomotor y su encapsulado.



Figura 3.35. Encapsulado M8025 (Infante Palacios, 2022)

La tapa del rotor incluye una ranura para O-ring vertical; esta tapa se atornilla directamente al rotor del servomotor y encaja con la parte central del encapsulado. La parte central incluye 2 ranuras para O-ring y se atornilla por la parte posterior con el estator. La tapa posterior se atornilla junto a la pieza central y el estator, además contiene una ranura para O-ring y un conector hermético para energizar y comunicar el servomotor.

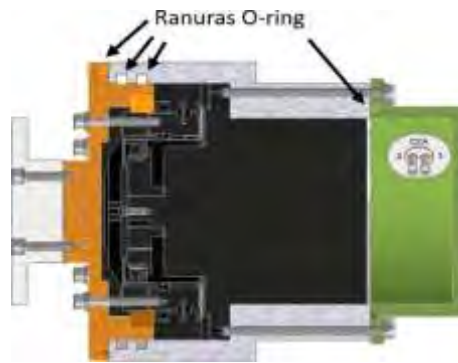


Figura 3.36. Vista de corte encapsulado (Infante Palacios, 2022)

La tapa del rotor incluye 6 agujeros roscados que permiten conectar el servomotor al sistema de direccionamiento de Ackerman.

El sistema de direccionamiento de Ackermann del vehículo consiste en un eje sólido con agujeros para entornillar el acople del servomotor. Para realizar el acople del servomotor se diseñaron 2 piezas tipo bridas para lograr la transmisión del torque. La primera es el acople para el eje y el segundo es el acople para el servomotor. Estas piezas están hechas a base de aluminio 6061, material que va a resistir la transmisión del torque y las condiciones ambientales. A continuación, se muestran los acoples independientes (Figuras 3.37a y 3.37b) y su ensamble en la Figura 3.38.



(a) Acople eje de dirección (b) Acople para servomotor

Figura 3.37. Partes acople servomotor – Ackerman

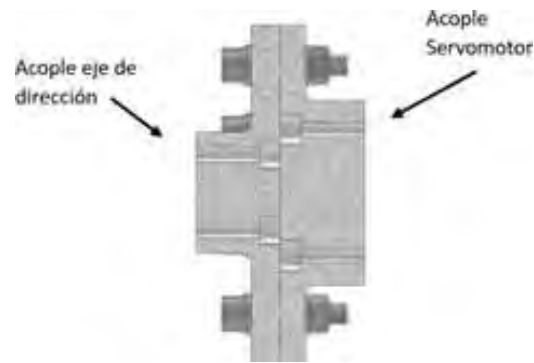
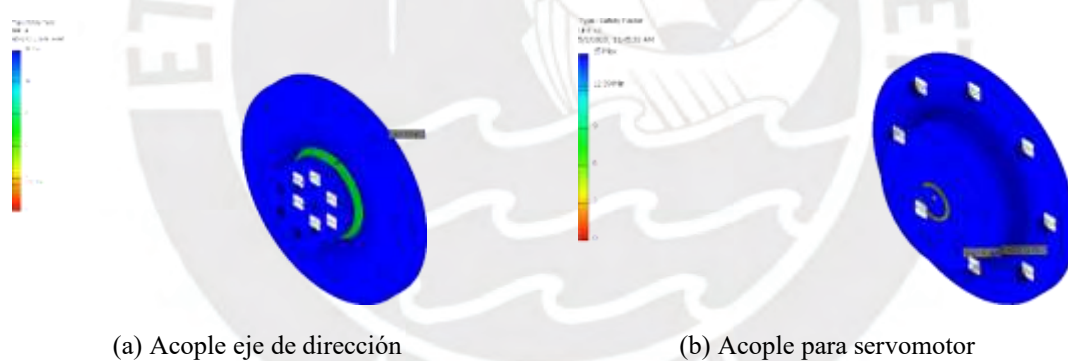


Figura 3.38. Acople servomotor - Ackerman

Por último, se realizaron simulaciones de esfuerzo para garantizar que estas piezas soporten el torque que tienen que transmitir. El torque simulado es de 100 Nm. Como se pudo ver en la Figura 3.39 ambas partes del acople logran transmitir el torque sin mayor problema. El acople para la dirección presenta un de seguridad de 2.5 al tener menor sección transversal que el acople del servomotor, lo que garantiza un funcionamiento adecuado.



(a) Acople eje de dirección

(b) Acople para servomotor

Figura 3.39. Análisis de resistencia acople servomotor - Ackerman

Por último, es necesario apoyar de manera estática el servomotor al chasis, tal que la transmisión se realice netamente al mecanismo de Ackerman y el estator se mantenga fijo. Para lograr esto, se diseñó el soporte mostrado en la Figura 3.40. Este acople se atornilla directamente al chasis y a la parte central del encapsulado del servomotor. El soporte cuenta con una parte plana para encajar con la parte central del encapsulado del motor.

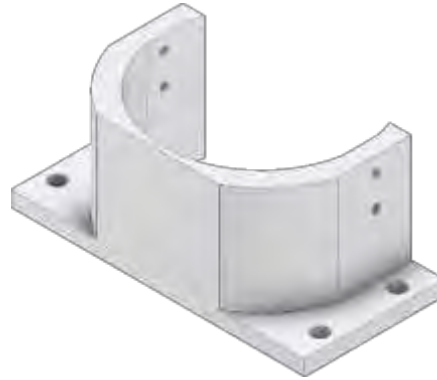


Figura 3.40. Soporte servomotor M8025 (Infante Palacios, 2022)

Para el diseño de esta pieza se realizaron simulaciones hasta conseguir dimensiones y una geometría que pueda resistir 100 Nm. La Figura 3.41 muestra la simulación realizada, donde el soporte presenta un de seguridad mínimo de 6, lo que garantiza un funcionamiento seguro.

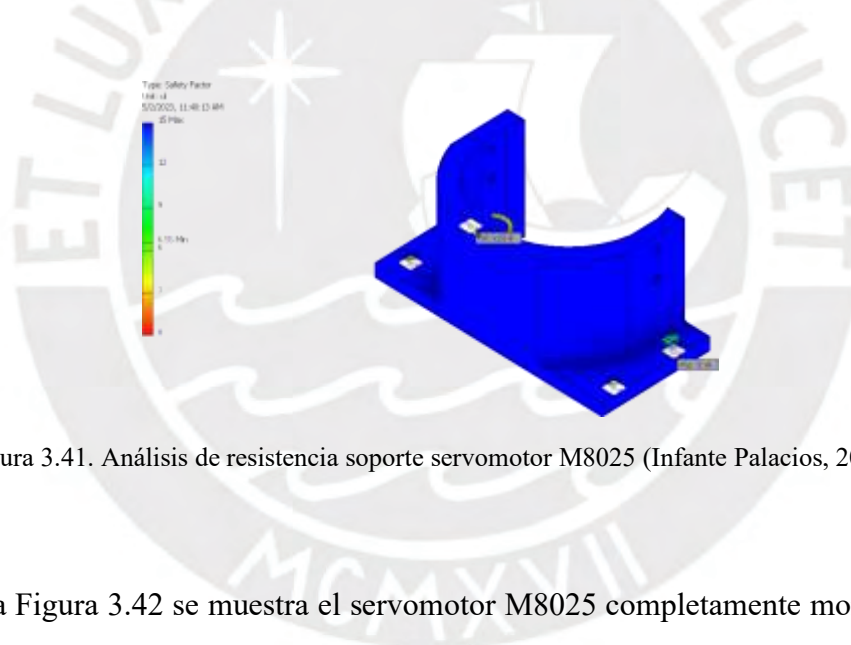


Figura 3.41. Análisis de resistencia soporte servomotor M8025 (Infante Palacios, 2022)

Por último, la Figura 3.42 se muestra el servomotor M8025 completamente montado sobre el vehículo.

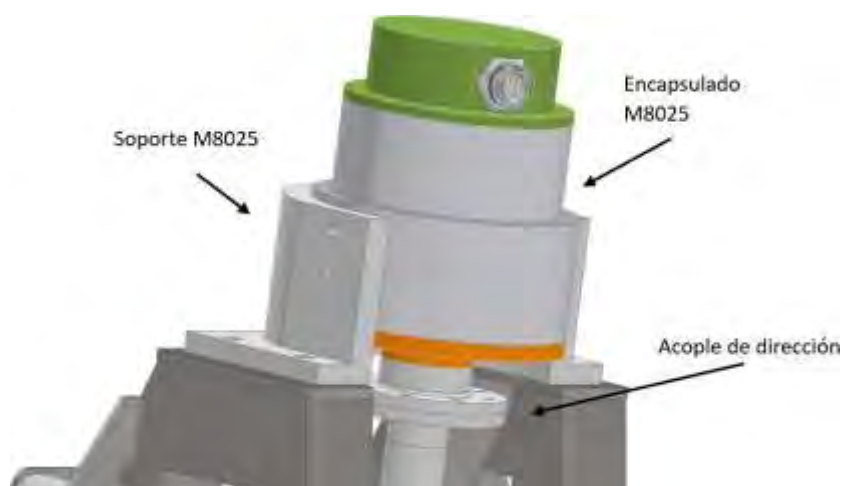


Figura 3.42. servomotor M8025 montado (Infante Palacios, 2022)

3.4.6. Montaje Motor de Tracción

El motor de tracción se va a apoyar en los soportes del chasis. Estos apoyos están hechos de acero inoxidable AISI 430, tienen un espesor de 4 mm y ya estaban incluidos en el chasis inicial. El motor incluye agujeros para montar y se emplearán tornillos M6.

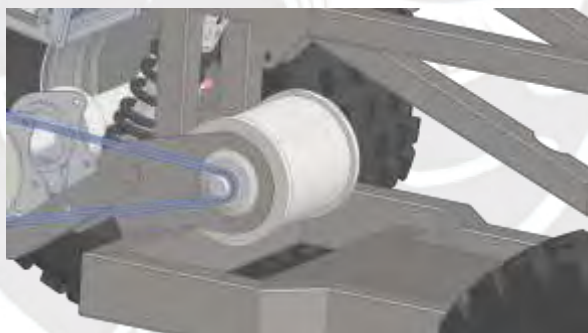


Figura 3.43. Ubicación del motor brushless (Infante Palacios, 2022)

Para la transmisión de potencia se diseñará una transmisión de cadena cuya relación aproximada sea de 1:4, según los cálculos previos realizados. Para esto, se empleó el catálogo de cadenas Renold y se diseñó considerando que el motor transmita su máxima potencia. En la Figura 3.44 se muestran los datos de entrada empleados.

Datos de Entrada		
Potencia a Transmitir	7	kW
RPM rueda conductora	800	RPM
RPM rueda conducida	200	RPM
Eficiencia	1	
Relacion de transmision	4	
Distancia entre ejes	350	mm

Figura 3.44. Datos para el diseño de la cadena (Infante Palacios, 2022)

Se inicia mediante la selección de los piñones, como se presenta en la Figura 3.45, seleccionando piñones de 15 y 57 dientes, para el motor y el eje sólido, respectivamente, resultando en una relación de transmisión de 3.8.

TABLA 1

	No de dientes del Piñón Conducido Z_2		No de dientes del Piñón Motriz Z_1				
	15	17	19	21	23	25	
25	-	-	-	-	-	-	1.00
38	2.53	2.23	2.00	1.80	1.65	1.52	
57	3.80	3.35	3.00	2.71	2.48	2.28	
76	5.07	4.47	4.00	3.62	3.30	3.04	
95	6.33	5.59	5.00	4.52	4.13	3.80	
114	7.80	6.70	6.00	5.43	4.96	4.56	

Figura 3.45. Piñones comerciales (Infante Palacios, 2022)

Considerando la operación del vehículo, se seleccionan el coeficiente de uso y la constante f_2 , referente al tamaño del piñón motriz. El tipo de cadena es seleccionado en base las RPMs del piñón motriz y la potencia ajustada. Para esta selección, se utiliza la tabla presente en el Anexo de "Tablas para selección de cadena". Finalmente, se opta por una cadena ISO de 3/4 de pulgada con 76 eslabones para la transmisión adecuada de la potencia.

La unión del piñón motriz y el motor brushless se detalla en la Figura 3.46. Esta conexión emplea una chaveta 5x5x10 y el piñón se mantiene en su posición gracias a un cambio de sección del eje y una tuerca M14 por el extremo opuesto.

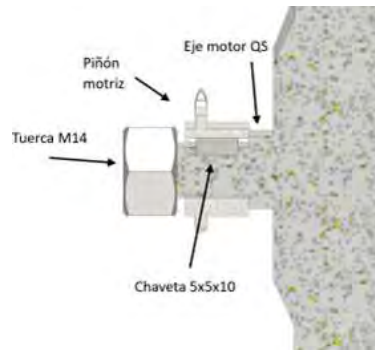


Figura 3.46. Unión motor brushless y la transmisión por cadena (Infante Palacios, 2022)

Finalmente, esta cadena se agrega al modelo 3D del vehículo, como se muestra en la Figura 3.47.

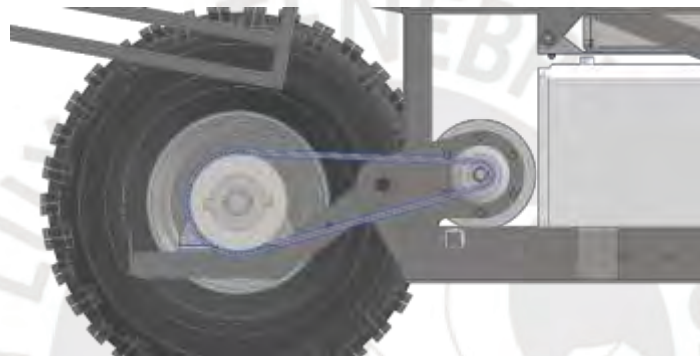


Figura 3.47. Modelo 3D transmisión por cadena (Infante Palacios, 2022)

3.4.7. Soporte de almacenamiento de muestras

Desde la etapa conceptual del presente proyecto, se planteó como objetivo principal incrementar la capacidad de carga del equipo de prospección como objetivo principal. Por lo cual, es necesario el diseño del almacenamiento para muestras. Se ha considerado un diseño que permita llevar una mejor organización de las muestras recolectadas. Esto se logra con varios espacios de almacenamiento independientes, con el fin de garantizar la protección de las muestras recolectadas.

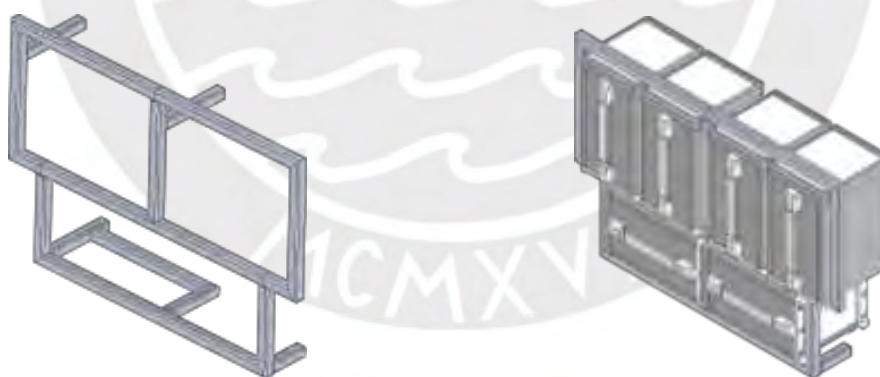
Para el almacenamiento de muestras se emplearán cajas herméticas (MSY133-16-23), mostradas en la Figura 3.48, de la marca Takachi con dimensiones de 160x130x210 mm. Estas cajas, fabricadas en aluminio y con protección IP 67, permiten maximizar la cantidad de

muestras transportadas, sin representar un incremento significativo del peso total del sistema, ya que cada una pesa solo 0.5 kg..



Figura 3.48. Caja hermética MSY133-16-23 (Infante Palacios, 2022)

El vehículo cuenta con espacio disponible en sus laterales y parte posterior. Para albergar las cajas, se modelaron 3 estructuras soldadas. Las estructuras laterales permiten albergar 6 cajas por lado y están hechas en base a tubos cuadrados 20x20x2 de acero inoxidable AISI 430 A continuación, la Figura 3.49 muestra la estructura y el posicionamiento de las cajas. Gracias a las asas de las cajas, los operarios pueden extraerlas fácilmente, y una vez almacenada la muestra, la caja se devuelve a su espacio designado.



(a) Estructura soldada lateral izquierdo (b) Posición de las cajas para muestras

Figura 3.49. Almacenamiento de muestras izquierdo

De manera similar, se diseñó el almacenamiento del lado derecho, tomando en cuenta los cambios por la simetría del vehículo. Por último, para aprovechar el espacio disponible en la parte posterior del vehículo, se diseñó una tercera estructura soldada que se muestra en la Figura 3.50 que alberga 3 cajas para muestras adicionales.

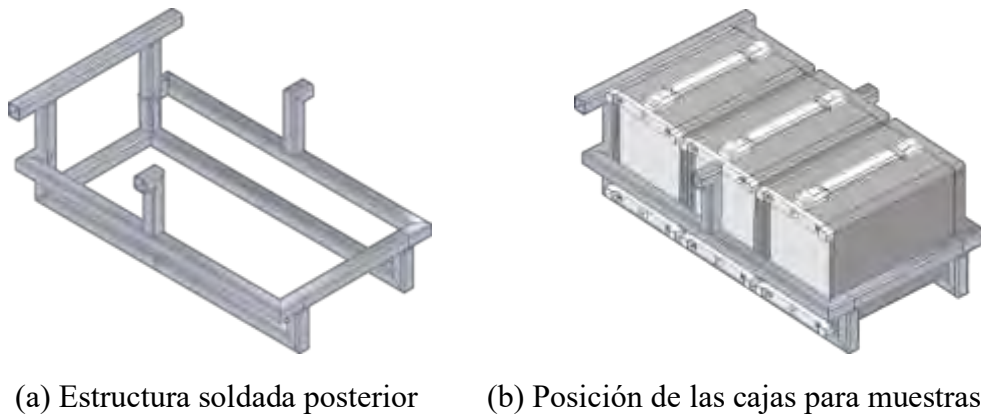


Figura 3.50. Almacenamiento de muestras posterior

Las estructuras soldadas fueron diseñadas con tubos de acero inoxidable AISI 430 para permitir la unión soldada con el chasis principal. Las estructuras laterales pesan 4, al igual que la estructura posterior. Finalmente, en la Figura 3.51 se muestra el vehículo con los almacenamientos ya implementados, sumando 15 cajas para muestras.

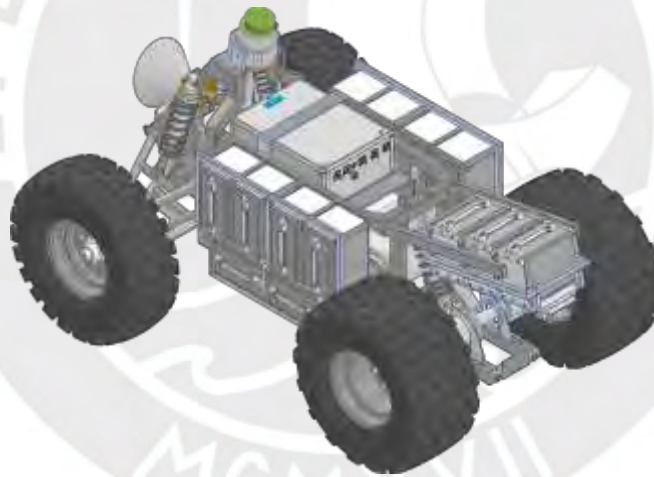


Figura 3.51. Vehículo para almacenamiento para muestras (Infante Palacios, 2022)

3.4.8. Interfaz de usuario

Considerando el uso e interacción con el operario, se diseña una base para transportar la Tablet RT71. Este último soporte se diseña con un fin práctico que mantenga la Tablet en una posición accesible para los operarios. La estructura consta de tres partes: dos soportes y una base de 5 mm de espesor, con hendiduras de 2 mm para la ubicación de los soportes. Las piezas están fabricadas en aluminio y se atornillan al chasis, como se ilustra en la Figura 3.52.



Figura 3.52. Partes del soporte para Tablet

3.4.9. Validación de la estructura

Para finalizar el dominio mecánico, es necesario validar el funcionamiento correcto del vehículo en su totalidad, con respecto a la actividad a realizar. El diseño completo del vehículo se muestra en la Figura 3.53



Figura 3.53. Vehículo completo (Infante Palacios, 2022)

Las validaciones por realizar son: desplazamiento en terreno plano, desplazamiento en pendiente 10° y giro del motor en terreno plano. Solo se realizarán estas validaciones, ya que el alcance del proyecto limita la velocidad de traslación a 1 m/s, por lo cual no es necesario un análisis de la inercia al realizar giros. Asimismo, en el alcance se especificó que el vehículo busca operar en zonas áridas, rocosas con bajo nivel de humedad y pendientes hasta de 10° . Para lograr estas validaciones, es necesario los siguientes parámetros del vehículo.

Tabla 3.20. Especificaciones del vehículo final

Especificaciones modelo final	
Peso vehículo (kg)	200
Peso de muestras (kg)	100
Largo (m)	1.73
Ancho (m)	1.02
Alto (m)	0.90
Distancia entre ejes (m)	1.10
Distancia COG - eje delantero (m)	0.515
Distancia COG - eje trasero (m)	0.582

Para verificar el funcionamiento en pendiente, se trabajará en base al diagrama de cuerpo libre (DCL) de la Figura 3.54. Se asume la condición de rodadura pura y se emplearán las Ecuaciones 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15. Donde θ es la pendiente, a es la aceleración del vehículo, g es la gravedad $9,81\text{m/s}^2$, M es el peso del vehículo, N son las normales, COG significa centro de gravedad, F_{Trac} es la fuerza de tracción, r es el radio de la rueda, T es torque en el eje, T_{motor} es el torque del motor e i es la relación de transmisión.

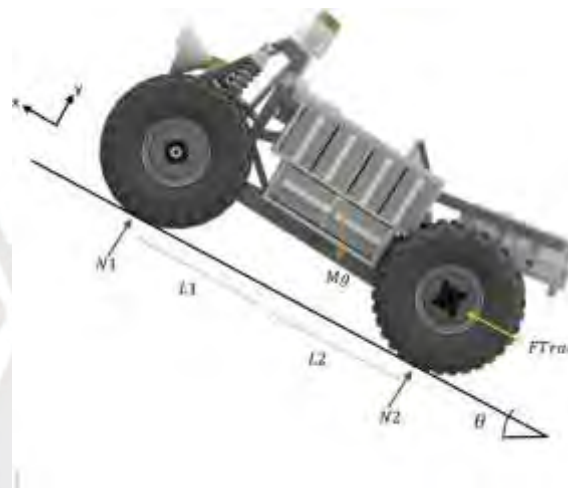


Figura 3.54. DCL análisis de desplazamiento (Infante Palacios, 2022)

$$\Sigma F_x = F_{Trac} - Mg \sin(\theta) = Ma \quad (3.11)$$

$$\Sigma F_y = N_1 + N_2 - Mg \cos(\theta) = 0 \quad (3.12)$$

$$\Sigma T_{COG} = L_1 * N_1 - L_2 * N_2 = 0 \quad (3.13)$$

$$T = r * F_{Trac} \quad (3.14)$$

$$\frac{T}{T_{motor}} = i \quad (3.15)$$

Considerando:

$$\theta = 0$$

$$a = 0,3\text{m/s}^2$$

$$M = 300\text{kg}$$

$$L_1 = 0,515\text{m}$$

$$L_2 = 0,582\text{m}$$

$$i = 3,8$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$F_{\text{Trac}} = 90\text{N}$$

$$T = 24,3\text{Nm}$$

$$T_{\text{motor}} = 6,4\text{Nm}$$

$$N1 = 1\,561,4\text{N}$$

$$N2 = 1\,381,63\text{N}$$

Considerando un factor de seguridad de 1.2, el torque necesario seria de 8 Nm, el cual puede ser suministrado por el motor brushless. Para el análisis del funcionamiento en pendiente se considera lo siguiente:

$$\theta = 10^\circ$$

$$a = 0,3\text{m/s}^2$$

$$M = 300\text{kg}$$

$$L1 = 0,515\text{m}$$

$$L2 = 0,582\text{m}$$

$$i = 3,8$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$$F_{\text{Trac}} = 601\text{N}$$

$$T = 162\text{Nm}$$

$$T_{\text{motor}} = 43\text{Nm}$$

$$N1 = 1\,538\text{N}$$

$$N2 = 1\,361\text{N}$$

Con un factor de seguridad de 1.2, el torque necesario seria de 52 Nm. El motor brushless seleccionado si llega a este punto de operación; sin embargo, hay un incremento en el consumo de corriente. No se recomienda operar a estas condiciones ya que, tiempo de operación se vería reducido.

Para la verificación del giro, se analiza la situación de pendiente nula, para esto se analiza el DCL de la Figura 3.56. Se asume una distribución uniforme de la reacción delantera en ambas ruedas.

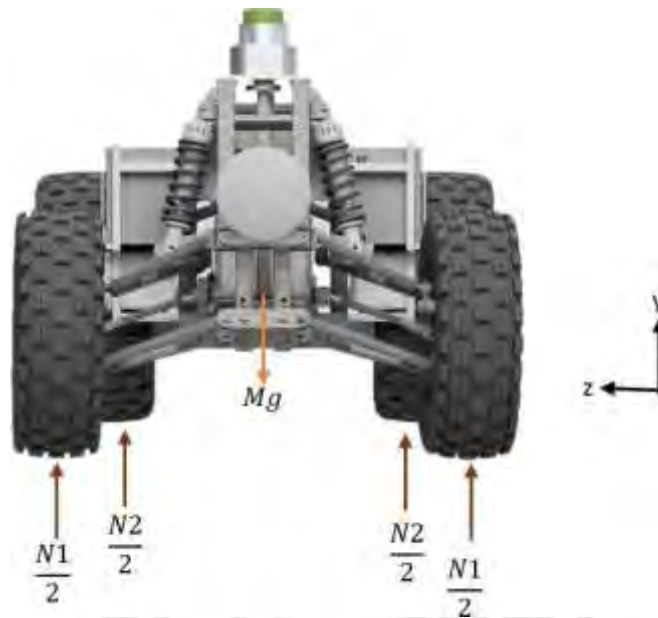


Figura 3.55. DCL análisis de giro (Infante Palacios, 2022)

Ahora se selecciona el tipo de llanta a emplear. Las especificaciones de la llanta se muestran en la Tabla 3.20. Estas especificaciones son necesarias para calcular el área de contacto entre la llanta y el terreno. Para este cálculo se empleará una calculadora virtual. (Techsource,s.f.)

Tabla 3.21. Especificaciones de las llantas a emplear

Especificaciones llanta	
Llanta ATV	23x7-10 36F
Diámetro (mm)	584
Ancho (mm)	254
Aspect Ratio	45
Diámetro de Aro	10 inch
Load Index	72
Speed Ratio	F
Ancho de Aro	7 inch

El DCL a continuación permite analizar el área de contacto de una llanta delantera. Junto a las Ecuaciones 3.16 y 3.17, se calcula el torque para el giro del sistema de Ackerman.

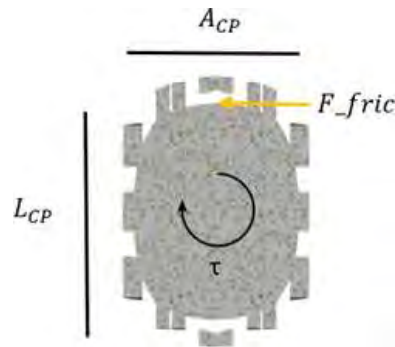


Figura 3.56. DCL análisis área de contacto

$$\Sigma T_{CP} = \tau - \mu * N1 * 0,5 * L_{CP} = 0 \quad (3.16)$$

$$\tau_{servo} = 2 * \tau \quad (3.17)$$

Considerando:

$\mu = 0,5$ extraído de “Rolling resistance of atv tyres in agriculture”

$N1 = 1\,561,4\text{N}$

$A_{cp} = 0,197\text{m}$

$L_{cp} = 0,123\text{m}$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene:

$\tau_{servo} = 48\text{Nm}$ y con un de seguridad de 1.2 el torque necesario seria de 58Nm.

En todas las situaciones analizadas, los valores resultantes son válidos dentro de las capacidades de los actuadores. El motor brushless logra generar 8 Nm para funcionamiento en una superficie plana y es capaz de llegar hasta 52 Nm en una pendiente de 10°. Por otro lado, el servomotor M8025 es capaz de proporcionar los 58 Nm para realizar los giros del sistema de dirección.

3.4.10. Validación de Volcadura

Considerando el terreno sobre el cual el vehículo va a operar, se pueden presentar desniveles que afecten su estabilidad del mismo. Dado que el vehículo puede cargar hasta 100 kg adicionales de muestra, distribuidos en las 15 cajas designadas, existe el riesgo de que, si el operario carga solo un lateral del vehículo, se produzca un desfase del centro de gravedad, incrementando el riesgo de volcadura.

Debido a esto, se realizó un análisis de centro de masa, para poder cuantificar el desfase del centro de masa cuando el vehículo opera con una carga no distribuida. Considerando el diagrama de la Figura 3.57, se emplea las Ecuaciones 3.18 y 3.19 para calcular el desfase del centro de masa, donde M_1 es la masa del vehículo y M_2 es la masa del almacenamiento lateral. El vehículo y el almacenamiento lateral se simplifican para facilitar la visualización, y el centro de masa del vehículo se encuentra alineado con el origen del sistema de referencia.

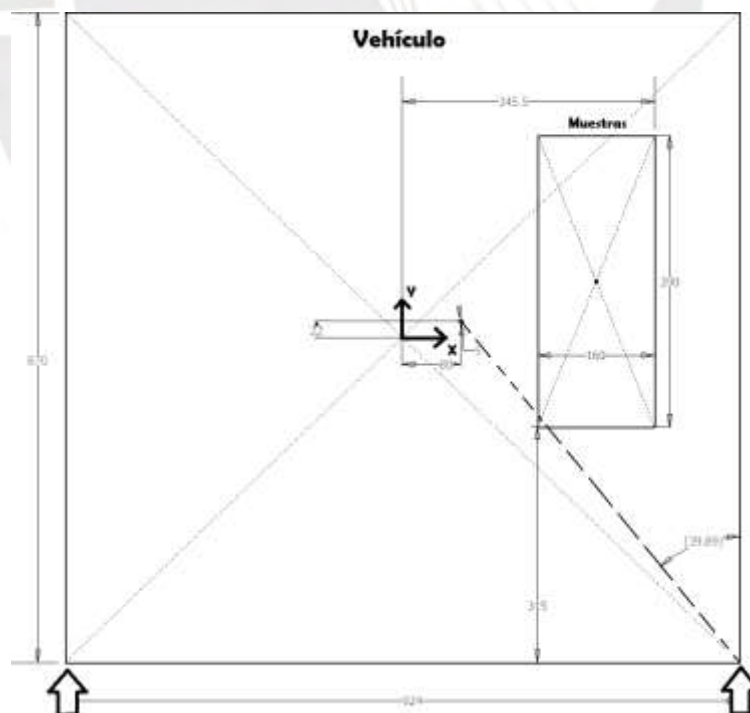


Figura 3.57. Diagrama para cálculo de centro de masa

$$X_{CG} = \frac{M_2 * X_1}{M_1 + M_2} \quad (3.18)$$

$$X_{CG} = \frac{M_2 * X_1}{M_1 + M_2} \quad (3.19)$$

Considerando:

$$M_1 = 200$$

$$M_2 = 100$$

Se obtiene: $X_{CG} = 80\text{mm}$ y $Y_{CG} = 22\text{mm}$. Por medio de geometría, identifica el ángulo entre el centro masa desfasado y la vertical. Debido a la simetría del vehículo, en caso de una carga desbalanceada (a la izquierda o la derecha), se tiene un ángulo crítico de 40° . Considerando que el vehículo va a oscilar debido al movimiento, su aplicación se limita a desniveles de 30° o su equivalente, una diferencia de 500mm entre el nivel de las llantas.

El vehículo ya está equipado en su totalidad y se ha verificado su funcionamiento correcto. Adicionalmente, se especifican las siguientes consideraciones. Las uniones atornilladas deben ser de AISI 430, para que resistan las condiciones ambientales y evitar la corrosión de la unión. Asimismo, los materiales empleados en el diseño fueron AISI 430 y aluminio 6061, seleccionados por su resistencia a la corrosión, mientras que el aluminio 6061 se emplea por su baja densidad, con el fin de evitar un incremento del peso total del vehículo. Para mayor detalle de lo diseñado, los planos de las piezas y ensambles se encuentran en el archivo “20180360_Tesis_Planos”, presente en el archivo zip del trabajo de tesis.

3.5. Dominio de Control

En la presente sección se detallará el dominio de control/software que se empleará para el funcionamiento del vehículo, destacando aspectos como la toma de decisiones, y comportamiento del vehículo. El presente proyecto busca lograr un nivel 3 de autonomía en entornos no controlados, lo que permite un manejo autónomo con supervisión de un operario en caso de situaciones de riesgo o imprevistas. Desde un inicio, se planteó un funcionamiento conjunto.

Para lograr la autonomía del vehículo, es necesario cumplir con los siguientes aspectos: primero, la percepción del entorno; seguido de la localización y mapeo del terreno; y finalmente, la identificación de la ruta.

Para el presente trabajo de tesis, los aspectos de percepción y localización son cubiertos por los componentes seleccionados. El sensor Lidar y las cámaras de profundidad cubren la percepción, mientras que el sensor inercial/GNSS se ocupa de la localización y orientación. En esta sección, se detallarán los aspectos del análisis del entorno y el comportamiento. Estos aspectos se trabajan a un nivel de programación mediante el procesamiento de la información recolectada. En este dominio se detallará la lógica de funcionamiento del vehículo, así como los algoritmos a emplear para el análisis de transitabilidad.

3.5.1. Modelamiento del Vehículo

Inicialmente, es necesario trabajar con un modelo del vehículo que permita simular su comportamiento. Debido a que el vehículo opera a baja velocidad, con un sistema de tracción trasera y un sistema de dirección tipo Ackerman, este puede ser simplificado a un modelo tipo bicicleta. A causa del funcionamiento a baja velocidad, el efecto de la inercia del vehículo no es considerado.

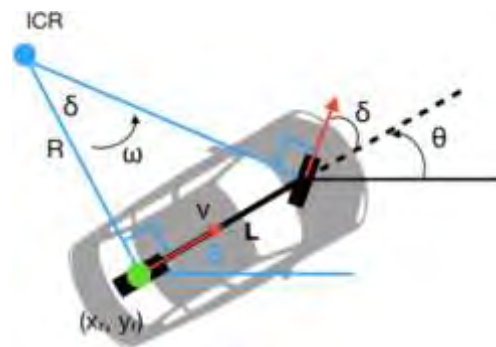


Figura 3.58. Modelo tipo bicicleta (Infante Palacios, 2022)

El diagrama mostrado en la Figura 3.58 ilustra el modelo tipo bicicleta. El modelo tiene como variables de estado X_r , Y_r , θ , que es la orientación del vehículo, δ el ángulo del timón respecto a la orientación. Las variables de entrada son v , que es la velocidad lineal del vehículo, y φ , que es la velocidad angular de la dirección. Estas variables de entrada provienen del motor brushless y del servomotor M8025, respectivamente. Este modelo permite estimar la posición y orientación del vehículo por medio de las relaciones geométricas.

Las Ecuaciones 3.20, 3.21 y 3.22 son extraídas del modelo tipo bicicleta.

$$x' = v * \cos\theta \quad (3.20)$$

$$y' = v * \sin\theta \quad (3.21)$$

Relacionando la velocidad angular del centro de rotación instantáneo con la geometría del vehículo

$$\theta' = \omega = \frac{v}{R} = \frac{v * \tan\delta}{L} \quad (3.21)$$

Finalmente se integra al tiempo discreto

$$x_{t+1} = x_t + x'_t * \delta t \quad (3.22)$$

$$y_{t+1} = y_t + y'_t * \delta t \quad (3.23)$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \theta'_t * \delta t \quad (3.24)$$

El sistema de dirección no puede superar los 30° debido a una limitación física, y la velocidad lineal no debe superar 1 m/s debido a una limitación de operación. Por ello, en esta sección se agregan las limitaciones de movimiento.

Dado que en el presente modelo se trabajan con velocidades lineales y angulares, se procede a establecer los lazos de control correspondientes para los actuadores. En el caso del motor brushless, se plantea un algoritmo de control PID simple, donde la velocidad es la variable controlada y se hace una realimentación por medio del sensor hall del motor. Similarmente, para el control de la dirección se plantea un control de posición, con un bloque integrador para realizar el control en base al ángulo deseado y el ángulo actual. La retroalimentación de este lazo, se puede hacer por medio del encoder presente en el servomotor.

3.5.2. Algoritmo de traversabilidad

Para un análisis de la transitabilidad se empleará un algoritmo de navegación basado en el algoritmo TERP (Weerakoon, Sathyamoorthy, Patel, y Manocha, 2022), complementado con un algoritmo de segmentación semántica, el cual incluirá la información recolectada por las cámaras de profundidad. El algoritmo a implementar tiene la siguiente estructura mostrada en la Figura 3.59.

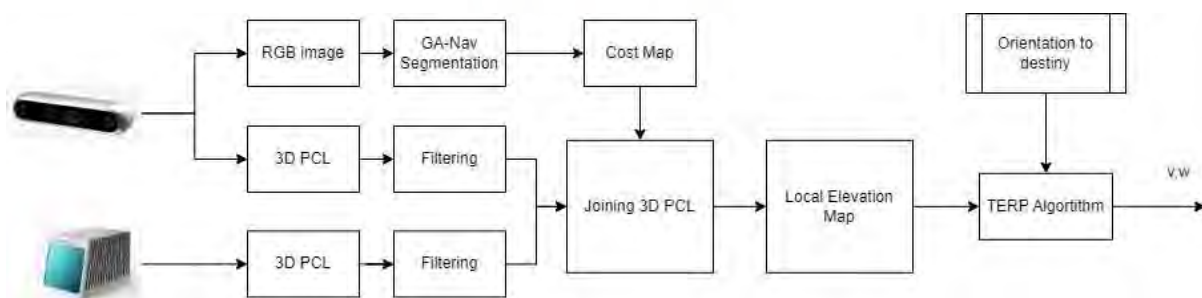


Figura 3.59. Lógica de Navegación autónoma. (Infante Palacios, 2022)

Los datos de navegación son extraídos de manera independiente en base a la ubicación destino ingresada por el operario y la ubicación dada por el dispositivo GNSS. Como primer paso, las coordenadas destino se transforman a un plano 2D. Luego, se genera un mapa de elevaciones en base a la información del sensor Lidar y las cámaras de profundidad. Se identifican las siguientes variables:

- d_g Distancia entre el vehículo y el objetivo
- α_g Ángulo entre la orientación del vehículo y la ubicación destino
- g Posición destino relativa al vehículo
- φ y θ Ángulos de roll y pitch del vehículo.
- h Vector gradiente del mapa de elevación

Con estas variables es posible ingresar al algoritmo TERP cuya estructura se detalla en la Figura 3.60. Una vez procesado el mapa de elevación, se genera un mapa de costos probabilísticos, del cual se seleccionan los puntos de menor costo y se aplica un algoritmo de ventana dinámica (DWA) para la generación de trayectoria y velocidades.

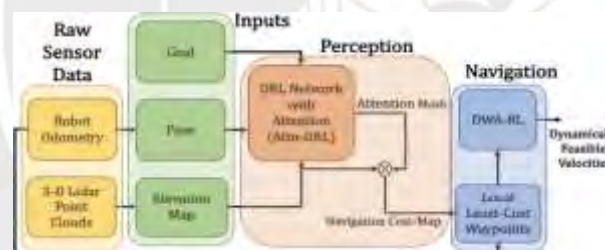


Figura 3.60. Lógica del algoritmo TERP. (Weerakoon et al., 2022)

Como parte de este trabajo de tesis, se busca complementar la información del mapa de costos probabilísticos con información de la transitabilidad del terreno. El análisis de transitabilidad se realizará mediante segmentación semántica, utilizando el algoritmo de acceso libre GA-Nav (Guan et al., 2022). Este algoritmo se emplea para el manejo autónomo de vehículos en entornos no controlados, basándose en la técnica de segmentación semántica de grano grueso, lo que permite una alta eficiencia computacional. La técnica de identificación semántica consiste en identificar los objetos en la imagen y catalogarlos dentro de sus distintos tipos.

El algoritmo ha sido entrenado con los datasets RUGD y RELIS-3D. Logra catalogar la transitabilidad del terreno, la identificación de objetos como “obstáculos” y como fondo “Background”. En la Figura 3.61 se muestra como el algoritmo GA-Nav logra segmentar una imagen.

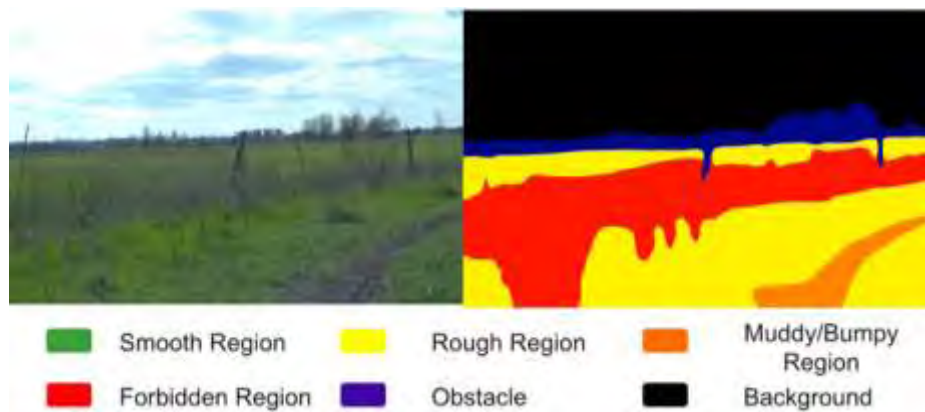


Figura 3.61. Segmentación por el algoritmo GA-Nav (Guan et al., 2022)

Cada región segmentada se asocia con un valor de transitabilidad probabilístico.

- Región Lisa $R_t = 0.1$
- Región rugosa $R_t = 0.3$
- Región irregular $R_t = 0.5$
- Región No transitable $R_t = 1$

Esto permitirá la creación de un mapa probabilístico del entorno que complementará la información extraída por el sensor Lidar. Los resultados obtenidos de la segmentación (cámaras de profundidad) se transforman al sistema de coordenadas del sensor Lidar, permitiendo fusionar ambas nubes de puntos en un solo mapa de elevación.

El mapa de elevación es normalizado y cada punto es asociado con un costo. Tomando como base el algoritmo TERP, el costo de la transitabilidad se calcula con la Ecuación 3.23, donde η representa los pesos de cada variable a considerar, R_d es la distancia hacia el destino, R_h es el ángulo hacia el destino, R_{sta} es la estabilidad del vehículo, R_{gr} es el de elevación y R_t es el asignado debido a la transitabilidad del terreno,

$$R_{tot} = \eta_1 * R_d + \eta_2 * R_h + \eta_3 * R_{esta} + \eta_4 * R_{gr} + \eta_5 * R_t \quad (3.23)$$

$$R_d = |dg| \quad (3.24)$$

$$R_h = |\alpha g| \quad (3.25)$$

$$R_{esta} = \cos\varphi_2 + \cos\theta_2 \quad (3.26)$$

$$R_d = w * h \quad (3.27)$$

Dado que el mapa de costos probabilístico no garantiza que la ubicación destino o referencia se encuentre dentro del alcance, es necesario orientar la ruta hacia el destino. En vista de que se tiene el ángulo α se escoge un sub conjunto del mapa de costos A, resultante de la intersección entre el mapa de elevación y la orientación de interés, como se muestra en la Figura 3.62.

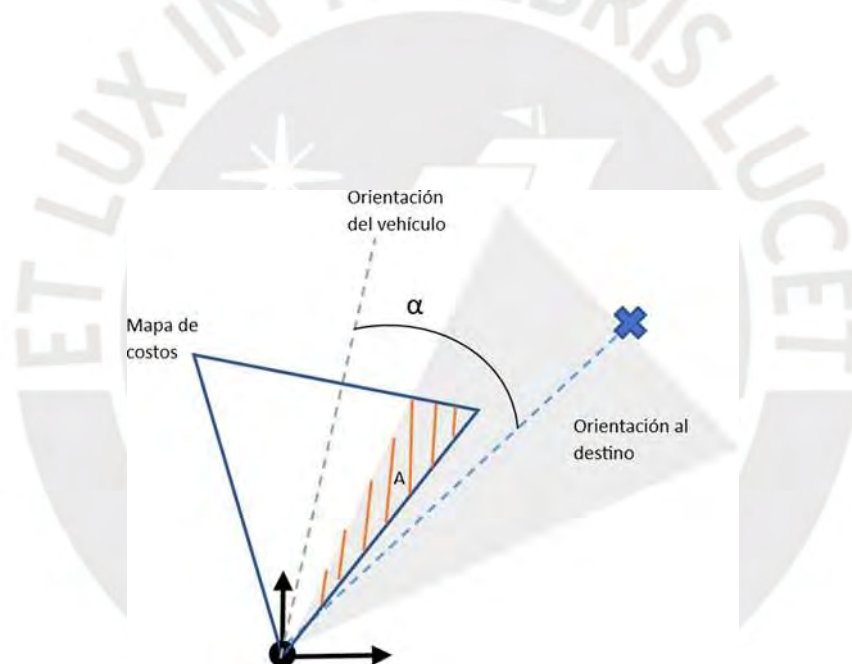


Figura 3.62. Sub conjunto de interés A (Infante Palacios, 2022)

Dentro del sub conjunto A se identifican los puntos de menor costo, empleando la Ecuación 3.28

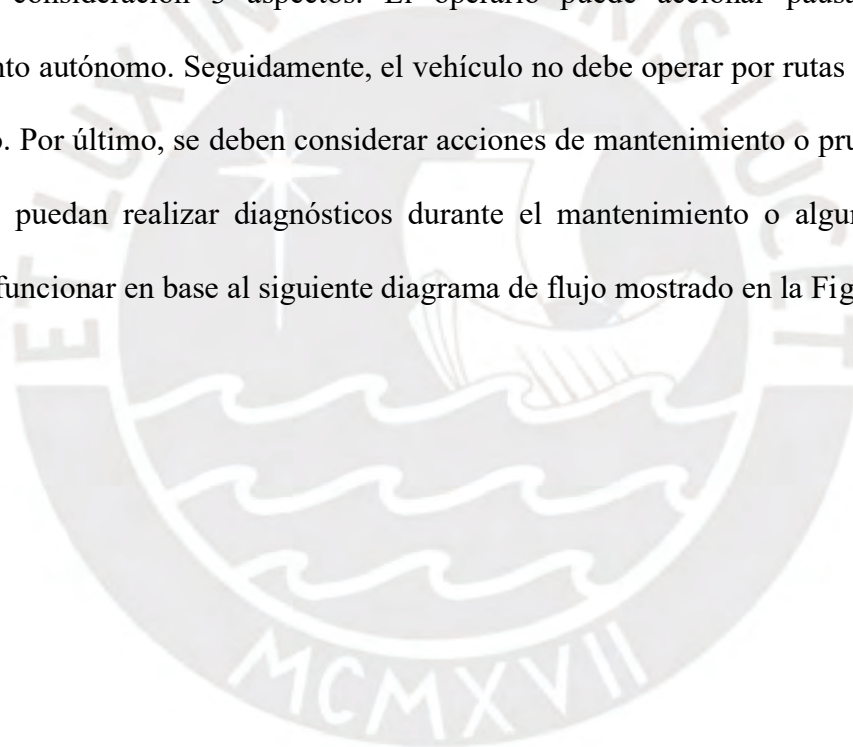
$$x^*, y^* = \operatorname{argmin}(\operatorname{dist}(x, y, \alpha)) \quad (3.28)$$

Con los puntos de menor costo, se ejecuta un algoritmo DWA que calcula las velocidades de desplazamiento lineal y velocidad de giro. Garantizando valores para un tránsito seguro que respeten a las restricciones cinéticas y dinámicas del vehículo.

El algoritmo de ventana dinámica (DWA) calcula posibles velocidades para llegar al siguiente punto, tomando en consideración las capacidades y limitaciones del vehículo. Adicionalmente, los conjuntos de velocidades identificados se evalúan para determinar el conjunto de velocidades que tenga la mejor calificación. Los criterios para la calificación de la velocidad son la proximidad a obstáculos, velocidad y aceleración permisibles.

3.5.3. Diagramas de Comportamiento

A continuación, se presenta el diagrama de comportamiento general del vehículo, tomando en consideración 3 aspectos. El operario puede accionar pausas durante el funcionamiento autónomo. Seguidamente, el vehículo no debe operar por rutas que considere de alto riesgo. Por último, se deben considerar acciones de mantenimiento o prueba, para que los operarios puedan realizar diagnósticos durante el mantenimiento o alguna parada. El sistema va a funcionar en base al siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.63.



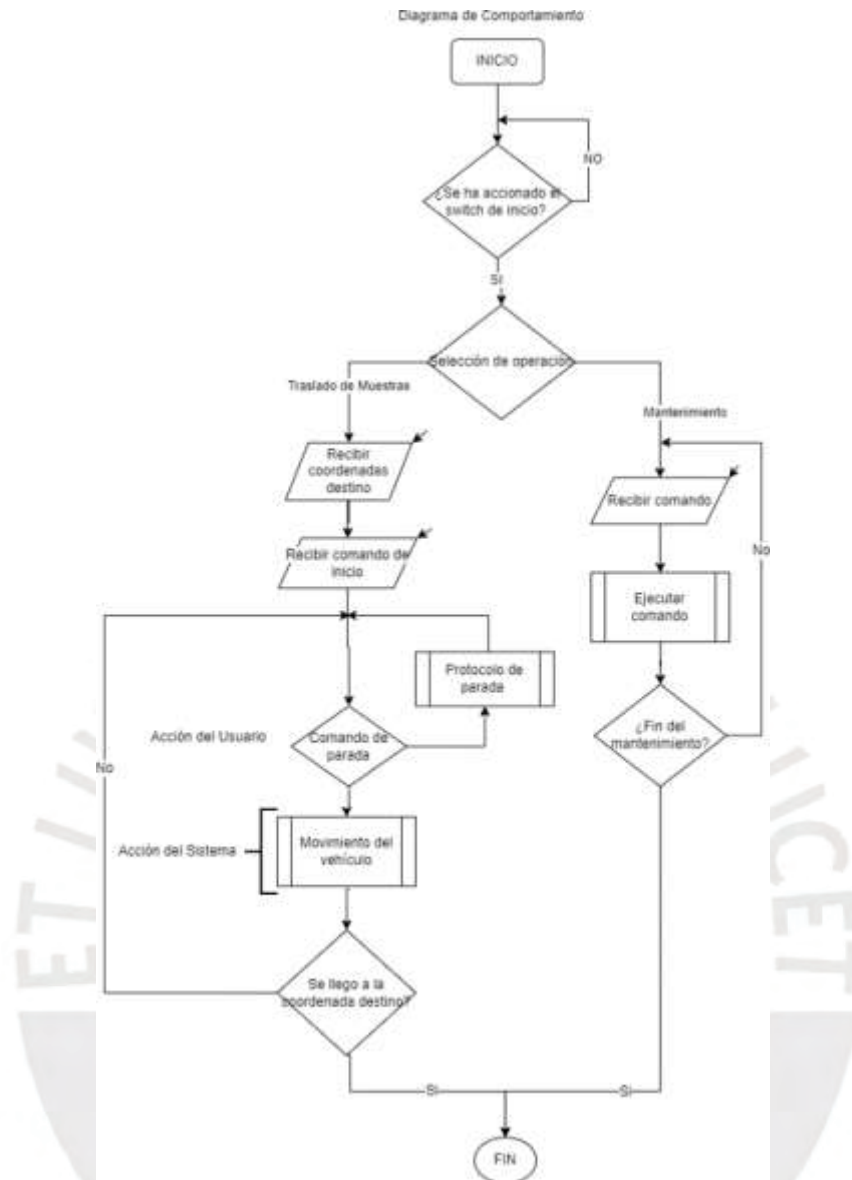


Figura 3.63. Diagrama de Flujo principal (Infante Palacios, 2022)

En base a lo observado del diagrama anterior, el vehículo cuenta con un modo de operación específico para acciones de mantenimiento y prueba. Por otro lado, en su modo de operación principal, la ruta se ingresa por medio de coordenadas de referencia y la coordenada destino, permitiendo que el vehículo pueda ir avanzando con objetivos cercanos y garantizando un mejor traslado dentro de la ruta planeada. Como se muestra en la Figura 3.64, ingresar coordenadas referencia permitirá un mejor seguimiento de la ruta. Ingresar solo la coordenada destino no garantiza que se siga la ruta delimitada en la etapa de gabinete.

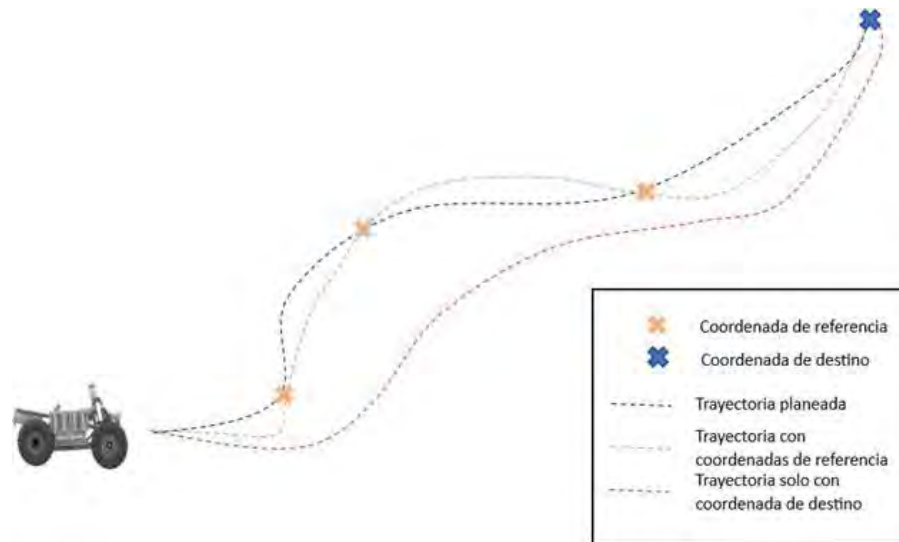


Figura 3.64. Ingreso de ruta sugerido (Infante Palacios, 2022)

El diagrama principal considera que durante la operación se pueda accionar una parada. Esta acción interrumpe el movimiento del vehículo y pone en pausa el recorrido autónomo. Adicionalmente, durante la pausa, se pueden realizar las acciones de mantenimiento. El diagrama de flujo del protocolo de parada se muestra en la Figura 3.65. Además, se presenta una lista de los comandos de mantenimiento disponibles para el operario.

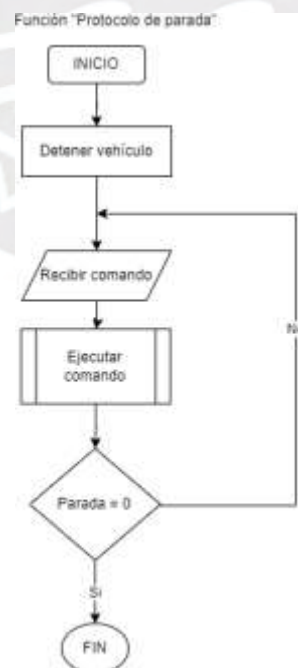


Figura 3.65. Protocolo de parada (Infante Palacios, 2022)

En este modo de operación se pueden desarrollar los siguientes comandos:

- Comandos de tracción
- Comandos de giro
- Visualizar cámara delantera
- Visualizar cámara posterior
- Lectura de IMU
- Lectura de GPS
- Lectura de Batería

3.5.4. Interfaz de Usuario

En el alcance del presente trabajo de tesis, no se contempla el diseño a detalle de la interfaz de usuario. Por ello, se presentará un mockup de la interfaz de usuario. En la Figura 3.66 se muestra la pantalla de inicio del sistema. Acorde a su planteamiento de control, se tienen dos ventanas principales de inicio de ruta y de mantenimiento.



Figura 3.66. Pantalla de inicio (Infante Palacios, 2022)

La ventana de mantenimiento (Figura 3.67) permite realizar lectura de los sensores, visualización de cámaras y pruebas de actuadores. La prueba de actuadores y lectura de sensores se muestran en Figura 3.68, donde en los cuadros grises se puede leer el comando que está siendo recibido o enviando, en el caso de la prueba de actuadores. La ventana para ver las cámaras se diseña como se muestra en la Figura 3.68b, y el vídeo corresponde a la cámara seleccionada.



Figura 3.67. Pantalla de Mantenimiento (Infante Palacios, 2022)



(a) Pantalla de sensores y actuadores

(b) Pantalla para cámaras

Figura 3.68. Ventanas de mantenimiento

En la Figura 3.68a se muestra la pantalla de lectura. Los rectángulos de color gris muestran la información de los sensores y comandos. La medición inercial muestra los ángulos de Euler “Roll: xxx Pitch: xxx Yaw: xxx Heading: xxx”. La ubicación actual se muestra en “DDmm.mmmm.N” para longitud y latitud. Los comandos de tracción se envían como comandos de velocidad, mientras que los comandos de giro se dan por un control de posición mostrando el ángulo actual de la dirección del vehículo.

Cuando la actividad de la prospección se va a realizar y se desea emplear el vehículo, se accede a la ventana de “Iniciar Ruta” en la Figura 3.66. Primero, el operario debe ingresar las coordenadas destino y coordenadas de referencia (Figura 3.69) en el formato string “DDmm.mmmm. N”. En este formato, DD representa grados, mm minutos, mmmm segundos y N la ubicación (N/S) en caso de coordenadas de latitud y E/W en caso de coordenadas de longitud). Ingresar las coordenadas en este formato facilita la interpretación de la ubicación correspondiente a el formato de lectura del GNSS.



Figura 3.69. Pantalla de ingreso de ruta (Infante Palacios, 2022)

Las coordenadas se registrarán y mostrarán en un mapa, para hacer didáctica la interacción. El usuario debe añadir de manera ordenada las coordenadas de referencia para permitir que el vehículo itere entre estas hasta la coordenada destino. Una vez ingresadas las coordenadas, se envía el comando de inicio al vehículo y se dará paso a la ventana de operación (Figura 3.70). En la ventana de operación se muestra una barra de progreso. Además, se puede accionar el botón de parada, ya sea por una emergencia o una parada programada.



Figura 3.70. Pantalla de operación (Infante Palacios, 2022)

3.5.5. Método de validación del sistema propuesto

Como sección final del dominio de control, se presentan los criterios con los cuales se evaluaría el sistema de navegación. Debido a la naturaleza de la actividad, es necesario recolectar la mayor cantidad de información sobre el terreno, de esta manera el sistema puede tomar mejores decisiones. Sin embargo; también es necesario poder cuantificar el desempeño del vehículo, durante su operación. A continuación, se indican los criterios para evaluar el sistema de navegación y el terreno a transitar.

Tabla 3.22. Tabla de indicadores de validación.

Criterio	Descripción	Propósito	Tipo
Error de Navegación	Diferencia entre la ubicación ingresada y la ubicación final.	Permite identificar el error de medición y/o orientación	Indicador de confiabilidad del vehículo
Tolerancia ante perturbaciones	Tiempo promedio para regresar/arribar a la ubicación destino ante un cambio en la lectura de orientación	Al transitar en terreno no controlado, el vehículo esta sometido a inestabilidad que pueden afectar su trayectoria	Indicador de robustez del algoritmo
Alcance	Medida proporcional a la cantidad de desnivel identificado en el terreno	Dato estadístico que permite brindar información del terreno a transitar	Indicador de Seguridad
Traversabilidad	La diferencia del costo entre la ruta delimitada y la ruta recorrida.	Permite cuantificar el efecto de la incertidumbre del dispositivo de localización y como afecta al sistema en términos de exigencia.	Indicador de exigencia

3.6. Costos

3.6.1. Costos componentes eléctricos

En la presente sección se muestra la Tabla 3.22 que lista los componentes electrónicos

Tabla 3.23. Precio componentes electrónicos, actuadores y sensores

Componente	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Servomotor M8025	1	\$490	\$490
Motor QS 4000W 138 90H	1	\$375	\$375
Driver RGLB1960	1	\$965	\$965
RUG-IMX-5-Dual	1	\$3,300	\$3,300
Livox MID-70	1	\$1,100	\$1,100
Inertial RealSense D457	2	\$500	\$1,000
Nvidia Jetson Orin	1	\$2,000	\$2,000
STM32L432KC	1	\$11	\$11
AWUS036ACH	1	\$70	\$70
Tablet RT71	1	\$730	\$730
Mini LED Work light	3	\$14	\$43
Epoch B36100B	1	\$1,700	\$1,700
Rele de Seguridad	1	\$117	\$117
Convertor THM 60-4812WI	1	\$186	\$186
USB HUB 3.0	1	\$15	\$15
Conectores SLPIRATPSB0	6	\$11	\$63
Switch Encendido	1	\$15	\$15
Takachi FCW15-40-30K	1	\$125	\$125
Antenas GPS	2	\$30	\$60
Conector Switchcraft 5182-2PG-530	3	\$11	\$32
Conector Switchcraft 4182-2SG-300	3	\$9	\$27
Conector Switchcraft W4B82-8SG-300	2	\$20	\$39
Conector Switchcraft W5B82-8PG-535	2	\$15	\$29
Conector Switchcraft 4282-5SG-3ES	1	\$14	\$14
Conector Switchcraft 5282-5PG-521	1	\$10	\$10
Conector Switchcraft DCC-US3AT-180	3	\$18	\$55
Conector Switchcraft DCP-US3AB-US3C	3	\$25	\$74
PCB de Energía	1	\$10	\$10
Componentes PCB de Energía	1	\$20	\$20
PCB DB25	1	\$2	\$2
Cable AWG siliconado	0	\$10	\$0
Total			\$12,700.00

Como algunos componentes deben ser importados, se requiere necesario aplicar un factor de importación de 1.2 al costo total de los componentes. El costo final de los componentes electrónicos, incluyendo el costo de importación, sería de \$15 240.

3.6.2. Costos componentes mecánicos

En esta sección se listan los precios de los componentes mecánicos empleados en la construcción del sistema. La Tabla 3.23 incluye el precio de todas los componentes mecánicos. Estos precios fueron calculados en base a cotizaciones referenciales. El precio del componente varía dependiendo del material, tamaño y complejidad. La mayoría de las piezas son hechas a base de planchas dobladas y agujeros; sin embargo, si existen piezas solidas cuya geometría requiere procesos más complejos, como fresado o torneado CNC.

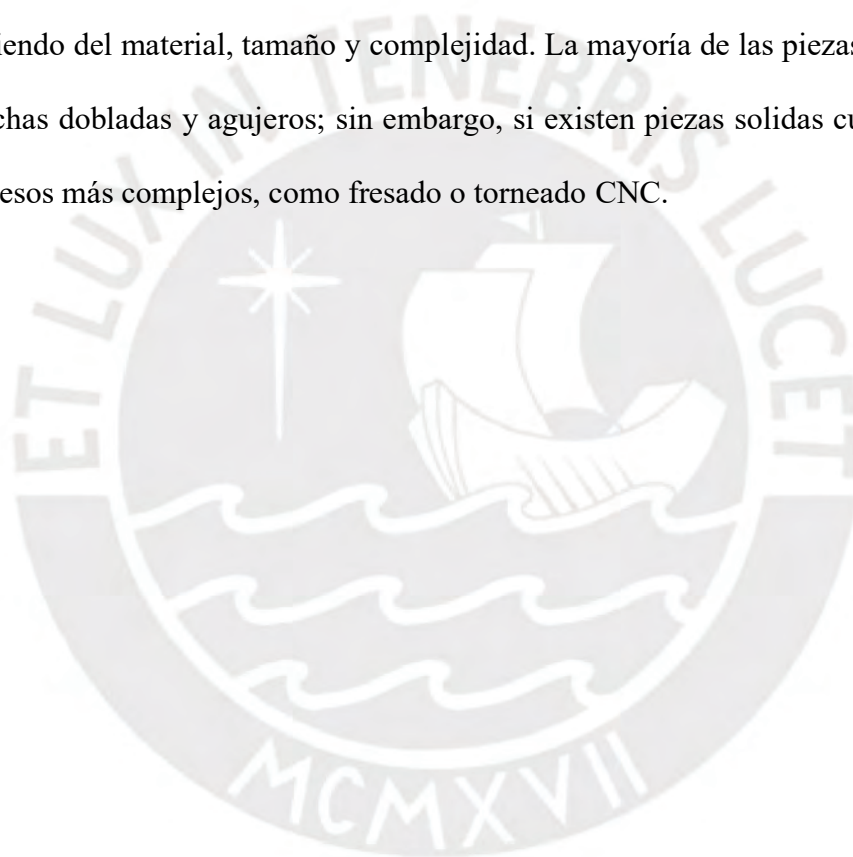


Tabla 3.24. Precio componentes mecánicos

Componente	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
Chasis Cuatrimoto	1	\$1 000	1000
Takachi MSY133-16-23	15	\$30	\$450
Perno M4x 10,20,25,30,65	100 (20 c/u)	—	\$25
Arandela plana y presion A4	200 (100 c/u)	—	\$10
Tuerca M4	100	—	\$5
Perno M5 x 10,16,30,50	100 (25 c/u)	—	\$24
Arandela plana y presion A5	200 (100 c/u)	—	\$12
Tuerca M5	100	—	\$6
Tuerca Remachable M5	50	—	\$20
Arandela plana y presion A6	100 (50 c/u)	—	\$12
Tuerca M6	50	—	\$6
Tuerca Remachable M6	12	—	\$12
Perno M8 x 30	25	—	\$6
Arandela plana y presion A6	100 (50 c/u)	—	\$12
Tuerca M6	50	—	\$6
Tuerca Remachable M6	12	—	\$12
Perno M10 x 65	10	—	\$4
Arandela plana y presion A10	20 (10 c/u)	—	\$8
Tuerca M6	10	—	\$4
Tuerca M14	6	—	\$3
Plancha central caja electrónica	1	—	\$20
Apoyo delantero caja electrónica	1	—	\$20
Apoyo trasero caja electrónica	1	—	\$25
Seguro caja electrónica	1	—	\$15
Base batería	1	—	\$30
Base sensor Lidar	1	—	\$20
Soporte cámara delantera	1	—	\$25
Soporte cámara trasera	1	—	\$25
Tapa del rotor encapsulado M8025	1	—	\$80
Cuerpo central encapsulado M8025	1	—	\$100
Tapa posterior encapsulado M8025	1	—	\$80
Acople eje de dirección	1	—	\$40
Acople para servomotor	1	—	\$40
Soporte servomotor M8025	1	—	\$120
Estructura soldada lateral izquierdo	1	—	\$200
Estructura soldada lateral derecho	1	—	\$200
Estructura soldada posterior	1	—	\$200
Soporte para Tablet	2	\$20	\$40
Base para Tablet	1	—	\$20
Total	-	-	2937

Aunque los costos ya establecidos son aproximados, se redondea el costo total al valor de \$3 000, en caso exista alguna diferencia en los servicios de manufactura o proveedores locales.

3.6.3. Costo Total

El costo de componentes del proyecto está estimado en un total de \$18 240, considerando lo calculado en la sección de componentes electrónicos y componentes mecánicos. Adicionando el costo de personal necesario para ejecutar el proyecto, se estima preliminarmente un tiempo de 3 meses para un equipo de 4 personas que trabajen en los distintos dominios. Considerando 2 personas especializadas y 2 integrantes de soporte, el costo de personal puede bordear los \$10 000 incluyendo costos administrativos como traslados para las pruebas en terreno. Tomando ambos costos en consideración, el proyecto bordea un total de \$28 000, lo cual es un costo menor a los \$30 000; por lo tanto, se cumple el planteamiento inicial de lograr una propuesta económicamente accesible para el sector minero. Adicionalmente, este proyecto presenta varias aplicaciones dentro del sector y podría escalar a una gran variedad de aplicaciones dentro de la industria o sectores similares.

Capítulo IV

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

En conclusión, el objetivo general se cumplió, ya que el sistema propuesto plantea un funcionamiento autónomo en terrenos irregulares, operando en conjunto con el equipo de prospección a una velocidad segura de 0.75m/s. Además, en su diseño cuenta con una estructura específica para los esfuerzos torsionales a los que será expuesto, así como una suspensión y neumáticos seleccionados específicamente para terrenos arenosos y húmedos. El vehículo cuenta con 15 compartimientos, lo que incrementa la capacidad de carga del equipo de prospección en 100 kg de muestra, eliminando los riesgos ergonómicos para los operarios y facilitando sus actividades. De tal forma, los 3 dominios desarrollados garantizan un funcionamiento seguro y adecuado del vehículo.

Con respecto al dominio de control, el diseño incorpora 3 algoritmos independientes. El algoritmo GA-Nav emplea segmentación semántica para contribuir al mapa de elevación generado. Por su parte, los algoritmos TERP y DWA se utilizan para la identificación de la ruta óptima para transitar. Adicionalmente, el control de posición para la dirección y el control de velocidad para la tracción limitan los comandos enviados, evitando que se filtren comandos no permitidos. Se concluye que los 3 algoritmos y lazos de control, trabajando en sincronía, garantizarán un correcto análisis del entorno y de la orientación, permitiendo calcular las velocidades y direcciones de movimiento para la navegación, y proporcionando seguridad en la operación autónoma del vehículo.

El diseño del sistema electrónico ha logrado establecer una comunicación eficiente y segura entre los sensores, procesadores y actuadores mediante la implementación de una tarjeta electrónica central que facilita la adaptación entre los protocolos TTL-RS232 para el motor brushless y el protocolo CAN para el servomotor. La separación de los lazos de tierra entre los dispositivos de actuación y control ha mejorado significativamente la seguridad operativa. Además, el cumplimiento con el grado de protección IP especificado asegura que los componentes y conexiones sean aptos para operar en entornos húmedos y áridos. Adicionalmente, se tomó en consideración el consumo energético, permitiendo un funcionamiento continuo hasta 8 horas. En resumen, el sistema diseñado cumple con los requisitos de funcionalidad, seguridad y adaptabilidad necesarios para su aplicación en condiciones ambientales exigentes.

En el desarrollo del dominio mecánico, el enfoque principal se orientó hacia una distribución óptima de los componentes. Al usar un vehículo comercial, no fue necesario validar el chasis ante los esfuerzos torsionales. Sin embargo, se seleccionaron una suspensión independiente delantera y una suspensión dependiente trasera para garantizar la capacidad de carga del vehículo. Los neumáticos también fueron elegidos para adaptarse a terrenos irregulares. Finalmente, se llevaron a cabo pruebas de estabilidad y funcionamiento del sistema completo, tomando en cuenta los componentes seleccionados. Esto garantizó el funcionamiento en terreno plano y en pendientes de hasta 10° , así como la capacidad de operar en desniveles de hasta 50 cm o inclinaciones laterales de 30° sin riesgo de volcadura. Además, los materiales fueron seleccionados con un alto grado de resistencia a la corrosión para evitar problemas al operar en entornos hostiles. En conclusión, el sistema demuestra un funcionamiento adecuado en terrenos irregulares, cumpliendo con los requisitos de estabilidad, resistencia y adaptabilidad necesarios para su aplicación en condiciones ambientales exigentes.

La sección de costos concluyó lo planteado en los dominios electrónicos y mecánico, indicando un costo aproximado cerca de \$18 000. Adicionalmente, al incluir los costos administrativos y de personal, que se estiman en aproximadamente \$10 000, el costo total del proyecto asciende a \$28 000, cumpliendo el objetivo de lograr un sistema económicamente accesible, considerando que los presupuestos del sector minero son mucho mayores.

A lo largo del desarrollo del presente trabajo, se realizó una exhaustiva investigación para la selección de componentes, destacando la importancia de realizar un correcto análisis de las hojas de datos y evaluar las condiciones de operación y compatibilidad entre componentes. Esto dio paso a una selección balanceada entre los beneficios técnicos y el costo. La meticulosa investigación y análisis realizados aseguran que los componentes seleccionados cumplen con los requisitos técnicos y representen la mejor costo-beneficio. En conclusión, el trabajo realizado a cabo subraya la relevancia de una selección informada y equilibrada de componentes para el éxito de proyectos técnicos complejos.

4.2. Recomendaciones

El presente proyecto se enfoca principalmente en la prospección exploratoria. Sin embargo, la prospección sistemática emerge como una aplicación de gran cercanía con las siguientes consideraciones: mayor accesibilidad y mayores cargas. Se sugiere considerar un vehículo de mayor dimensión para las mayores cargas. Adicionalmente, se debe desarrollar una lógica distinta para el movimiento sistemático, teniendo en cuenta que el operario no estará en cercanía al vehículo. Se recomienda emplear esta base de autonomía Off Road para la automatización de actividades de mayor complejidad en entornos irregulares, como el monitoreo de vida salvaje e inspección de terrenos peligrosos (zonas de guerra, radioactivas, contaminadas). Esta tecnología permite llegar de manera segura a lugares donde la integridad de las personas peligran.

El presente trabajo se desarrolló en base a un modelo CAD de cuatrimoto. Por ello, se recomienda el diseño y validación del chasis seleccionado, así como un diseño a detalle de la suspensión. De esta manera, la plataforma física facilita la implementación física del sistema propuesto; aprovechando los distintos elementos diseñados en el dominio mecánico.

Otro aspecto de mejora se encuentra en la transmisión de potencia. En concordancia con el objetivo de la adaptación de un vehículo comercial, se mantuvo la transmisión de cadena estándar en cuatrimotos. Sin embargo, durante las validaciones de funcionamiento, se identificó que este tipo de transmisión no permite generar altos torques, limitando el funcionamiento en pendientes bajas y resultando en el consumo excesivo de corriente. El diseño de un sistema de reducción, de sencilla implementación, podría ampliar el rango de funcionamiento, aprovechando mejor la potencia proporcionada por el motor brushless. Esto permitiría que se opere en mayores pendientes, con mayor peso y que la exigencia eléctrica sea menor, incrementando el tiempo de operación del vehículo.

Bibliografía

- Alzahrani, M. (2010). The main stages of mining project. King Abdulaziz University. Cangalaya, L. (2020). Muestreo geológico. CINGEO UNMSM.
- Clearpath. (2023). Clearpath robotics. (<https://clearpathrobotics.com/>)
- Cruz, E. (2022). Minería representa casi el 15 % del pbi nacional por la actividad misma e impacto en otros sectores. (<https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/mineria-pbi-nacional/>)
- Dammert, A. (2020). La importancia del sector minero para el Perú. *Journal of Economics Finance and International Business*, 4(1), 33–40.
- Erian, K. H., Mhapankar, S., Conrad, J. M., y Gambill, S. (2019). System integration over a can bus for a self-controlled, low-cost autonomous all-terrain vehicle. En 2019 southeastcon (p. 1-8). doi: 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020379
- Guan, T., Kothandaraman, D., Chandra, R., Sathyamoorthy, A. J., Weerakoon, K., y Manocha, D. (2022). Ga-nav: Efficient terrain segmentation for robot navigation in unstructured outdoor environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3), 8138-8145. doi: 10.1109/LRA.2022.3187278
- Hensley, C., y Marshall, M. (2022). Off-road navigation with end-to-end imitation learning for continuously parameterized control. En Southeastcon 2022 (p. 591-597). doi: 10.1109/SoutheastCon48659.2022.9763997
- Hoffmann, G. M., Tomlin, C. J., Montemerlo, M., y Thrun, S. (2007). Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing. En 2007 american control conference (p. 2296-2301). doi: 10.1109/ACC.2007.4282788
- Infante Palacios, F. (2022). Vehículo autónomo para traslado de muestras.
- ISEM. (2016). Exploración minera: riesgos, controles y entrenamiento. (<https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/exploracion-minera-riesgos-controles-y-entrenamiento/>)
- Jiregna, I., y Sirata, G. (2020, Nov.). A review of the vehicle suspension system. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 4(2), 109-114. Descargado de <https://www.jmee.tu.koszalin.pl/ojs/index.php/jmee/article/view/171> doi: 10.30464/jmee.2020.4.2.109
- Jones, E., Fulkerson, B., Frazzoli, E., Kumar, D., Walters, R., Radford, J., y Mason, R. (2006). Autonomous off-road driving in the darpa grand challenge. En 2006 iee/ion position, location, and navigation symposium (p. 366-371). doi: 10.1109/PLANS.2006.1650624
- Kelly, A., Amidi, O., Bode, M., Happold, M., Herman, H., Pilarski, T., . . . Warner, R. (2004, 01). Toward reliable off road autonomous vehicles operating in challenging environments. En (Vol. 25, p. 599-608). doi: 10.1007/1155224657
- Mihai Rasidescu, J. B., Glen Arneson. (1999). Estructura para vehículo todo terreno.
- Minem. (2020). Perú: país minero. (<https://mineria.minem.gob.pe/institucional/peru-pais-minero/:text=Per%C3%BA%20es%20el%20segundo%20productor,de%20dep%C3%B3sitos%20m>)

- Papadakis, P. (2013). Terrain traversability analysis methods for unmanned ground vehicles: A survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(4), 1373-1385. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095219761300016X>doi:<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.01.006>
- Perú, G. (2019). Sector minería brinda empleo a más de 216 mil personas. (<https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/50632-sector-mineria-brinda-empleo-a-mas-de-216-mil-personas>)
- Petterson, T., y Gooch, S. (2020, 05). Rolling resistance of atv tyres in agriculture. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 2561-2570. doi: 10.1017/dsd.2020.75
- Ponce, R. Z. (2012). Muestreo de depósitos minerales.
- Santana Pedro, F. N. M., Flores Luis Miguel. (2013). Estructura para vehículos todo terreno.
- Sánchez, M., Morales, J., & Martínez, J. L. (2023). Reinforcement and curriculum learning for off-road navigation of an UGV with a 3D LiDAR. *Sensors*, 23(6), 3239.
- Sepruma. (2007). Manipulación manual de cargas.
- Techsource, B. (s.f). Tire data calculator. (<http://bndtechsource.ucoz.com/index/tiredatacalculator/0-20>)
- VARDİN, S., DEMİRCİOĞLU, P., & BÖĞREKÇİ, İ. (2022). Development and implementation of an unmanned ground vehicle for off-road applications. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, 65(1S).
- Verhelst, S. (2016). *Automotive technology*. Clarendon Press.
- Weerakoon, K., Sathyamoorthy, A. J., Patel, U., y Manocha, D. (2022). Terp: Reliable planning in uneven outdoor environments using deep reinforcement learning. En *2022 international conference on robotics and automation (icra)* (p. 9447-9453). doi: 10.1109/I-CRA46639.2022.9812238
- Xiao, X., Biswas, J., y Stone, P. (2021, July). Learning inverse kinodynamics for accurate high-speed off-road navigation on unstructured terrain. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(3), 6054-6060. doi: 10.1109/LRA.2021.3090023

Anexo A

Cálculos Previos de Torque

Para iniciar el cálculo del Torque es necesario conocer las dimensiones del vehículo, así como la ubicación del centro de gravedad del vehículo. Esta información se muestra en la Figura A1 y se extrajo del modelo CAD inicial. Para calcular el torque a vencer por el servomotor es necesario la fuerza sobre las llantas delanteras y el área de contacto de la llanta sobre el terreno.

Características del Modelo	Valor	Unidad
Gravedad	9.81	m/s ²
Peso del Chasis	60.00	kg
Peso de las muestras	80.00	kg
Peso Llantas	48.00	kg
Peso Baterías	40.00	kg
Peso Componentes	30.00	kg
Peso Total	258.00	kg
Distancia entre ejes	1.16	m
Distancia Centro de Gravedad a Eje delantero	0.68	m
Distancia Centro de Gravedad a Eje trasero	0.48	m

Figura A1. Características del Modelo CAD

Previo al cálculo del área de contacto entre la llanta y el terreno, se necesaria la información de la llanta que se muestra en la Figura A2.

Especificaciones de la llanta		
Llanta para ATV	23x7-10 36F	
Ancho	254.00	mm
Aspect Ratio	45.00	
Diámetro de aro	10.00	inch
Load Index	72.00	
Speed Ratio	F	
Ancho de aro	7.00	inch

Figura A2. Información de las llantas del vehículo

El área de contacto fue calculada usando una calculadora virtual (Techsource, s.f.). Como se muestra en la Figura A3 se llegó a identificar que el torque necesario para mover la dirección del vehículo es de aproximadamente 60Nm y la selección del servomotor se hará en base a este requerimiento.

Cálculos		
F Eje Delantero	1050.57	N
F Eje Trasero	1480.41	N
F llanta Delantera	525.29	N
F llanta trasera	740.20	N
Calculo del área de contacto en la llanta delantera		
Coefficiente de Fricción	0.60	
Fuerza de Fricción Delantera	315.17	N
Carga en la llanta	53.55	kg
Presión de aire	0.70	bar
Velocidad de movimiento	2.70	km/h
Ancho del área de contacto	199.00	mm
Largo del área de contacto	119.00	mm
Torque de fricción en la llanta delantera	18.75	N*m
Torque para girar la dirección	37.51	N*m
Factor de Seguridad	1.50	
Torque necesario por el motor	56.26	N*m

Figura A3. Cálculos servomotor de dirección

Cálculos Previos de Motor brushless DC

Para el cálculo de la potencia necesaria por el vehículo se usó el libro de “Automotive Technology” de la universidad de Ghent (Verhelst, 2016). Para el cálculo de potencia del motor se establece su funcionamiento crítico, que se daría en un terreno con pendiente. La Figura A4 muestra las características del vehículo a considerar para realizar el cálculo.

Con las fórmulas encontradas en la sección 3.2 de “Automotive Technology” se realizaron los cálculos mostrados en la Figura A5. El coeficiente de rodadura (Roll_Coef) se extrajo de “Rolling resistance for ATV Tyres in agriculture” (Pettersen y Gooch, 2020). Así mismo el coeficiente aerodinámico fue considerado 0.6.

Información del vehículo		
Gravedad	9.81	m/s ²
Peso del Chasis	60.00	kg
Peso de las muestras	80.00	kg
Peso Llantas	12.00	kg
Peso Baterías	40.00	kg
Peso Componentes	30.00	kg
Peso Total	258.00	kg
Distancia entre ejes	1.16	m
Altura centro de gravedad con respecto a los e	0.07	m
Distancia Centro de Gravedad a Eje delantero	0.68	m
Distancia Centro de Gravedad a Eje trasero	0.48	m
Pendiente	0.00	grados
	0.00	rads
Diámetro de la llanta	584.20	mm
Dinamic Roll Radius	0.27	m
Velocidad objetivo	1.50	m/s
Velocidad motor radianes	20.54	rad/s

Figura A4. Información del Vehículo

Cálculo de la Fuerza de Tracción		
Rolling Resistance		
Roll Coef	0.05	
F_Rolling	126.55	N
Climbing Resistance		
F_Pendiente	439.50	N
Aerodynamic Drag		
Densidad Aire	1.29	kg/m ³
Velocidad max	1.50	m/s
S	0.83	m ²
Drag Coef	0.60	
F_Aerodynamic	0.72	N
Inertial Drag		
Inercia Llantas	1.75	
Coef_km	1.08	
aceleración	0.20	m/s ²
F_inercial	55.73	N
F_Tracción	622.50	N

Figura A5. Cálculo Fuerza de Tracción

Una vez calculada la fuerza de tracción se puede hacer un cálculo de la potencia necesaria por el motor, tomando en cuenta la transmisión de cadena que se va a emplear. Como se muestra en la Figura A6 se buscará un motor brushless DC que pueda dar hasta 2 kW de potencia.

Potencia del Motor		
Torque	168.07	W
Eficiencia Cadena	0.98	
Dientes de piñón	10.00	
Dientes del Eje	40.00	
Ratio	0.25	
Torque nominal	42.02	Nm
Potencia_torque	863.10	W
Potencia_velocidad	933.74	W
FS	2	
Potencia Requerida	2	KW

Figura A6. Cálculo Potencia del Motor



Tablas para selección de cadena

RENOLD**METODO DE SELECCION****INTRODUCCION**

La cadena seleccionada utilizando este método, debidamente instalada y lubricada, debería tener una vida útil de 15000 horas.

Las Tablas de Selección (páginas 39-40) exceden los límites standard, por lo que los valores indicados solo serán válidos para CADENAS RENOLD.

SIMBOLOS, TERMINOLOGIA Y UNIDADES

- Z₁ = Número de dientes del piñón motriz.
- Z₂ = Número de dientes del piñón conducido.
- C = Distancia entre centros (mm).
- P = Paso de la cadena (mm).
- i = Relación de transmisión.
- L = Largo de cadena (en pasos).

METODO DE SELECCION PARA CADENAS BS/DIN Y ANSI

Para seleccionar una transmisión por cadena es necesario conocer la siguiente información básica:

- Potencia a transmitir en kilovatios.
- Velocidad de los ejes motriz y conducido.
- Características del grupo motriz.
- Distancia entre centros.

De esta información básica se deriva la selección de potencia que se obtendrá de la Tablas.

RESUMEN DE LA SELECCION

		Página
1	Seleccionar relación y piñones Z ₁ = 19 dientes mínimo	36
2	Establecer el factor f _t tomando en cuenta las cargas dinámicas Factor de dientes f _t (19/Z ₁)	37
3	Calcular la selección de potencia = potencia x f _t x f _v (kw)	38
4	Seleccionar cadena Utilizando Tablas de valores	39-40
5	Calcular el largo de la cadena utilizando la correspondiente fórmula	38
6	Calcular la distancia exacta entre centros	38
FOR-BEHLER	Seleccionar sistema de lubricación	41

1 SELECCIONAR LA RELACION DE TRANSMISION Y PIÑONES

Utilice la Tabla 1 para seleccionar un ratio en base a los piñones standard que haya disponibles. Se recomienda utilizar un número impar de dientes combinado a un número par de pasos de cadena.

Para un buen funcionamiento, deberán utilizarse piñones con un mínimo de 19 dientes. Si la cadena trabaja a alta velocidad o está sometida a cargas impulsivas, el piñón pequeño debería tener un mínimo de 25 dientes y ser tratado térmicamente.

El máximo de dientes recomendado es 114.

La relación de transmisión puede calcularse de la siguiente manera:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Para relaciones muy altas, comprobar que el ángulo de contacto con Z₁ no es inferior a 120 grados.

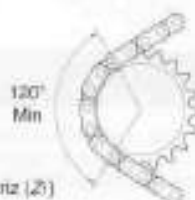
**SELECCIONAR LA RELACION Y LOS PIÑONES $\frac{Z_2}{Z_1}$** **RELACION DE REDUCCION DE LA TRANSMISION UTILIZANDO LOS PIÑONES SELECCIONADOS**

TABLA 1

No de dientes del Piñón Conducido Z ₂	No de dientes del Piñón Motriz Z ₁					
	15	17	19	21	23	25
25	-	-	-	-	-	1.00
38	2.53	2.23	2.00	1.80	1.65	1.52
57	3.80	3.35	3.00	2.71	2.48	2.28
78	5.07	4.47	4.00	3.62	3.30	3.04
95	6.33	5.58	5.00	4.52	4.13	3.80
114	7.60	6.70	6.00	5.43	4.98	4.58

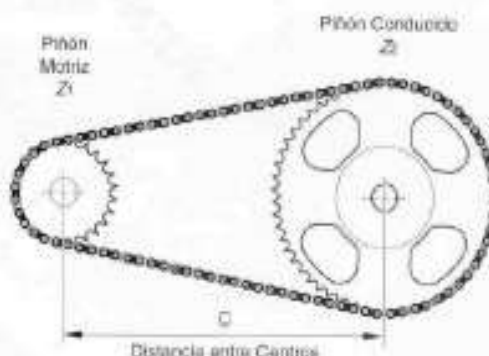
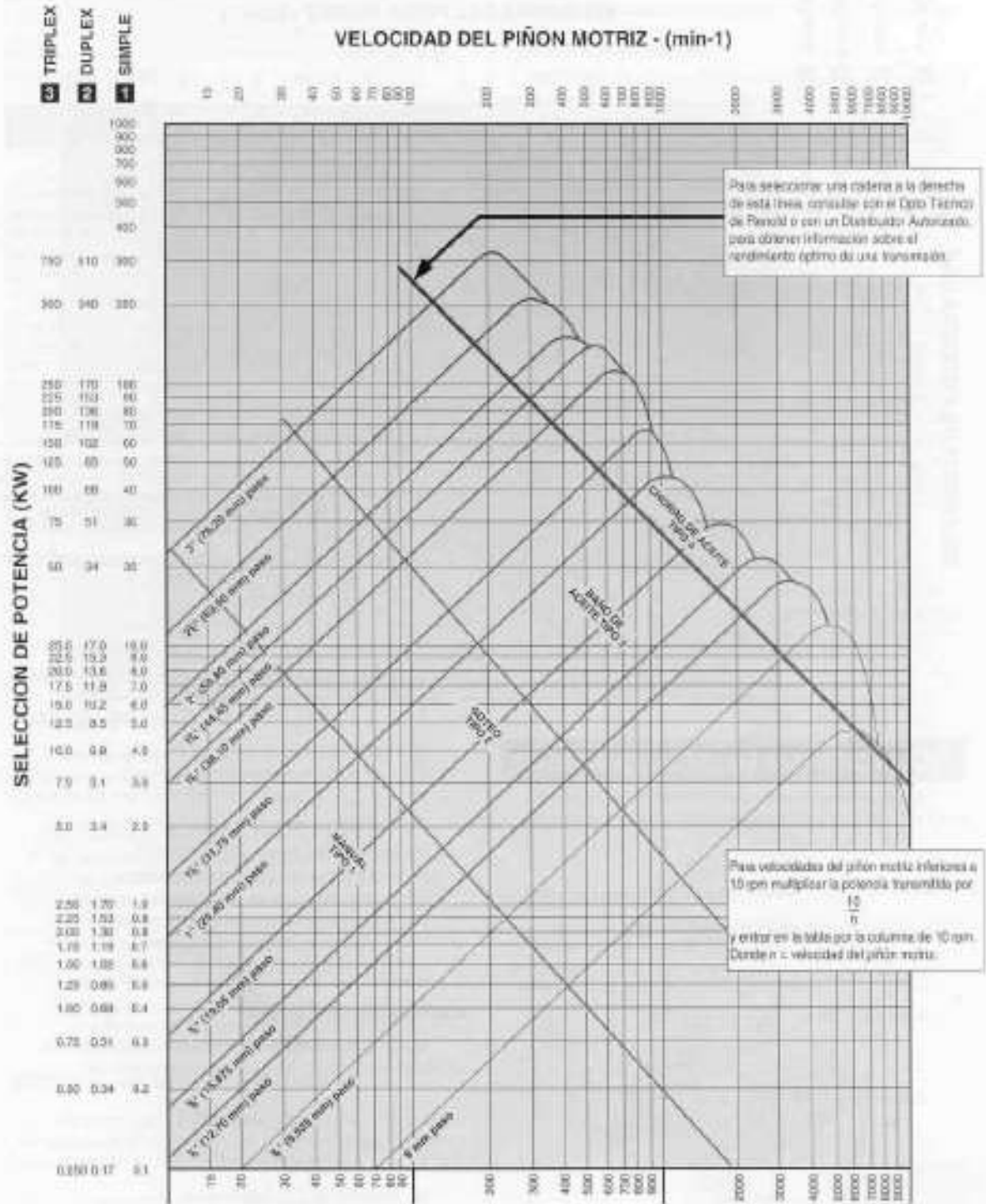


TABLA DE SELECCION BS/ISO

CADENAS DE TRANSMISION NORMAS EUROPEAS - Tabla de Selección utilizando piñón motriz de 19 dientes



1 KiloWatt = 1,34 hp.

Identificación de pines de interés

En esta sección se adjuntan los Pinouts de la STM32L432KC, el servomotor M8025E25B50L y el driver RGLB1860

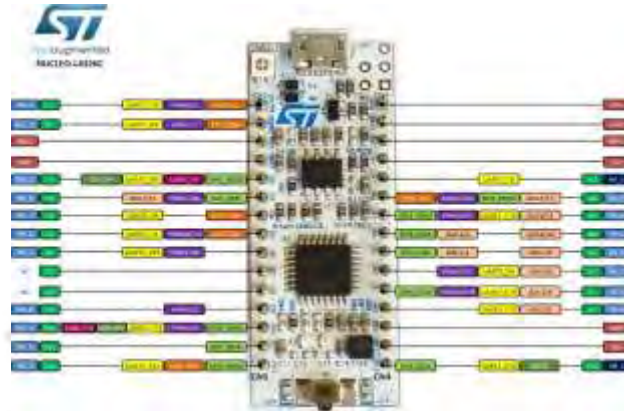


Figura A7. Pinout STM32L432KC

Basado en la Figura 0.9 se requieren los siguientes pines

- PA_9: UART1_TX para driver RGLB1860
- PA_10: UART1_RX para driver RGLB1860
- PA_11: CAN1_RD
- PA_12: CAN1_TD
- GND
- 5V
- PB_0: Digital Pin para control de Luces

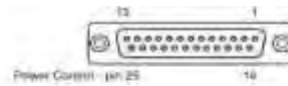


FIGURE 4. IAS Connector Pin Locations

TABLE 3

Connector Pin	Power	Dout	Com	Pulse	Ana	Dinput	Enc	Default Config
1	GND							
14	5VOut							
2			RS TxD					RS232Tx
16			RS RxD	PIN1 (1)	ANA1	DIN1		RS232Rx
3				PIN2 (1)	ANA2	DIN2		
16				PIN3	ANA3	DIN3		
4				PIN4	ANA4	DIN4		
17								
5	GND							
18		DOUT1						
6		DOUT2						
19		DOUT3						
7		DOUT4						
20			CANH					
8			CANL					
21				PIN5	ANA5	DIN5	ENC2A	
9						DIN6		
22				PIN6	ANA6	DIN6	ENC2B	
10						DIN7		
23			RS485+					RS485+
11			RS485-					RS485-
24				PIN7	ANA7	DIN7	ENC1A	
12				PIN8	ANA8	DIN8	ENC1B	
25	PowerCtrl							
13	GND							

Note: Not recommended for MultiPWM.

Figura A8. Pinout RoboteQ RGLB1960

Por lo que se identifica en la Figura 0.8 es necesario un cable con una conexión de DB25 para conectar con el driver RGLB1860. Se usarán los pines:

- Pin1 : GND
- Pin2 : RS_TxD
- Pin3 : RS_RxD
- Pin8 : CANL
- Pin20 : CANH

Communication and output interface



DB9 Male head								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
PU+	PU-	DIR+	DIR-	WR+	ZO	COM	CANL	CANH
BLUE	BLUE BLACK	GREEN	GREEN BLACK	RED WHITE	YELLOW	BLACK WHITE	BROWN	WHITE

Terminal serial number	Name	Function
1	PU+	Pulse control signal; the rising edge of the pulse is valid; PU+ is 3.3~5V at high level, and 0~0.5V at low level.
2	PU-	For reliable response to pulsed signals, the pulse width should be greater than 1.2μs. If +12V or +24V is used, a series resistor is required.
3	DIR+	Direction signal: high/low level signal, in order to ensure the reliable commutation of the motor, the direction signal should be established at least 5μs before the pulse signal. DIR- 3.3~5V at high level, 0~0.5V at low level.
4	DIR-	
5	WR+	Alarm signal output, the internal output is optocoupler NPN. Normally, it is in high impedance state, and it is connected to COM during alarm.
6	ZO	Encoder zero output. There is a zero signal optocoupler NPN output conduction signal.
7	COM	The output signal is common to the 485 power supply.
8	CANL	Can Communication port CANL, built-in isolated power supply.
9	CANH	Can Communication port CANH, built-in isolated power supply.

Figura A9. Pinout M8025E25B50L

Por último, para conectar con el servomotor M8025E25B50L es necesario un conector DB9 como se muestra en la Figura 0.8. Se usarán los terminales

- Terminal 8: CANL
- Terminal 9: CANH

Matriz Morfológica

#	User Requirements (What)																Requirements list						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Design requirement (how)	Demand or Wish	Absolute weight (W _a)	Relative weight (W _r)	Technical/Economic classification	Values (How much)	Verification Method
1	1	0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	Control de tracción	D	23	2	T	Control de la aceleración y desaceleración del vehículo, máximo 0.06 km/h ²	Lazo de control
2	1	0	2	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	Control de dirección	D	25	2	T	Control de ángulos<- 30 grados	Lazo de control	
3	2	0	2	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	Analizar Transitabilidad	D	40	4	T	Identificar zona transitable y no transitable	Inferencias del algoritmo	
4	2	1	2	2	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	Traslado de muestras	D	38	3	T	Trasladarse a 3.6 km/h	Valores dados por el sensor	
5	2	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Control de estabilidad	D	24	2	T	Empleo de un sistema de navegación inercial (INS)	Listado de componentes	
6	1	1	2	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Estructura de buena estabilidad	D	34	3	T	Arreglo de llantas y suspensión	Planos mecánicos	
7	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	Análisis del entorno por apariencia	D	20	2	T	Emplear cámaras para identificar el entorno a 20 m	Listado de componentes	
8	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	Análisis del entorno por geometría	D	20	2	T	Señado del entorno hasta 20 m	Listado de componentes	
9	1	1	2	0	0	1	0	0	0	1	0	2	1	0	2	Dimensionamiento adecuado	D	41	4	T	Dimensiones máximas de 1.8x1.2x1.3 (L x W x H)	Planos mecánicos	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	Costos de fabricación bajos	W	8	1	E	Inversión menor a 30000\$	Reporte teórico	
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	Capacidad de carga	D	15	1	T	Cargar entre 50 - 100 kg adicionales	Manual de operación	
12	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	Compartimentos de almacenamiento	D	23	2	T	Poder almacenar hasta 20 muestras adicionales	Planos mecánicos	
13	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	Uso de energías renovables	D	16	2	T/E	Capacidad mínima de 500Wh	Especificación de los componentes	
14	1	1	2	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	1	Diseño robusto	D	33	3	T	Diseñar con factor de seguridad mayor a 2	Memoria de cálculo	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	Interfaz de usuario simple	W	4	0	T	Indicadores, selector de modos, configuración, inicio y parada	Diseño de la interfaz de control	
16	1	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	2	Dispositivos de localización	W	24	2	T	Componentes de localización con precisión mínima de 10m	Especificaciones del componente	
17	1	0	1	2	2	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	Componentes resistentes al ambiente	D	37	4	T	Conexiones con IP 45	Especificación de los conectores	
18	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	Almacenamiento aislado	D	22	2	T	Almacenamiento con grado IP 44	Especificación del producto	
19	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	Distribución ergonómica	D	11	1	T	Alturas de trabajo de 85-90 cm	Planos mecánicos	
20	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Manual de uso simple	W	10	1	T	Modo "Traslado Autonomo" y "Realizar Mantenimiento"	Manual de usuario	
21	2	0	2	2	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	1	Operación en terrenos irregulares	D	41	4	T	Terrenos aridos, roccosos y/o con nivel de agua menor a 30 cm	Manual de operación	
22	2	0	2	1	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	2	Operación en zonas remotas	D	42	4	T	Funcionamiento autónomo nivel 3	Manual de operación	

Add column Remove column
Add row Remove row