



Diseño y construcción de una plataforma móvil robotizada tele operada mediante un protocolo de comunicación inalámbrico y presentación de imagen en primera persona, para inspección de silos metálicos

Miranda Jara, Cristian Joel y Pujos Alcaciega, Roberto Javier

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica

Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir

Latacunga, 07 de febrero, 2023

Reporte de verificación de contenido



TESIS_MIRANDA_PUJOS.docx

Scanned on: 16:24 February 7, 2023 UTC



Overall similarity score



Results found



Total words in text

	Word count
Identical	213
Minor Changes	20
Paraphrased	621
Omitted	864

Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir

ID: L00007180

C.C.: 1802379261



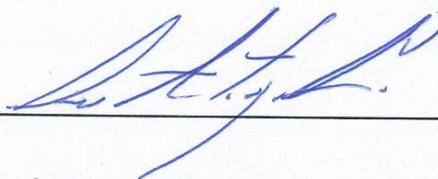
Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “**Diseño y construcción de una plataforma móvil robotizada tele operada mediante un protocolo de comunicación inalámbrico y presentación de imagen en primera persona, para inspección de silos metálicos**” fue realizado por el señor **Miranda Jara, Cristian Joel** y el señor **Pujos Alcaciega, Roberto Javier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 08 de febrero, 2023



Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir

C. C.: 1802379261



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Miranda Jara, Cristian Joel**, con cédula de ciudadanía n° 0940164486 y **Pujos Alcaciega, Roberto Javier**, con cédula de ciudadanía n° 1850432897, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de una plataforma móvil robotizada tele operada mediante un protocolo de comunicación inalámbrico y presentación de imagen en primera persona, para inspección de silos metálicos”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 08 de febrero, 2023

Miranda Jara, Cristian Joel

C.C.: 0940164486

Pujos Alcaciega, Roberto Javier

C.C.: 1850432897



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, **Miranda Jara, Cristian Joel**, con cédula de ciudadanía n° 0940164486 y **Pujos Alcaciega, Roberto Javier**, con cédula de ciudadanía n° 1850432897, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**Diseño y construcción de una plataforma móvil robotizada tele operada mediante un protocolo de comunicación inalámbrico y presentación de imagen en primera persona, para inspección de silos metálicos**”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 08 de febrero, 2023

Miranda Jara, Cristian Joel

C.C.: 0940164486

Pujos Alcaciega, Roberto Javier

C.C.: 1850432897

Dedicatoria

*Dedico este logro a Dios,
que nunca me desampara.*

*Dedico mi esfuerzo y sacrificio a mi familia,
quienes han impulsado a seguir
cada día de pie y a luchar por mis sueños*

*Dedico de manera especial este trabajo a mi padre,
que me cuida desde el cielo, de mi madre que
gracias a sus esfuerzos y apoyo incondicional
son la luz que guían mi camino.*

Cristian

*Dedico este logro a mis padres,
Estela y Luis quienes siempre han
estado presentes, dándome sus consejos y
su apoyo incondicional, siendo ellos la
principal de siempre seguir adelante.*

*Además, dedico este trabajo a mi hermano
Alberto quien a sido un pilar fundamental en este
camino ya que sin su apoyo este logro no hubiese
sido posible.*

*Y Como siempre me dijo mi madre “Quiero
que ustedes sean lo que yo no pude ser”*

Roberto

Agradecimiento

A Dios por darme la fortaleza para nunca rendirme e impulsarme a ser mejor persona cada día en este camino de mi vida. Debo agradecer de manera especial a mi padre Bladimir Miranda y mi madre Rosa Jara, que hicieron todo lo posible para cumplir mis metas, siempre aconsejándome, brindándome su apoyo y amor.

A mi hermano Jefferson que en los momentos más difíciles me brindó su apoyo, a mis hermanos Yomar y Omar que son mis ejemplos para seguir creciendo cada día.

A mi compañero de tesis Roberto por no desistir y brindar su apoyo para la culminación de este trabajo.

Agradezco de manera especial al Ingeniero Oscar Arteaga, por su colaboración dentro de este proyecto de tesis, al club de mecatrónica y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

A Tomas Cobeña que durante el transcurso de este camino supo brindarme la confianza y amistad para seguir adelante y a todas las personas que formaron parte de mi vida dentro de esta extraordinaria experiencia llamada Universidad.

Cristian

Agradezco a Dios por darme la familia en la que tengo. A mi padre Luis Pujos por enseñarme el valor del trabajo duro, a mi madre María Estela Alcaciega que dio todo por sus hijos, a mis hermanos que nunca me fallaron cuando más los necesite.

Un agradecimiento especial mi hermano Alberto, quien ha sido una guía y un apoyo fundamental, y quien a estado a mi lado en las buenas y en las malas.

A mi compañero de tesis Cristian por no desistir y brindar su apoyo para la culminación de este trabajo.

Agradezco de manera especial al Ingeniero Oscar Arteaga, por su colaboración dentro de este proyecto de tesis y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

Roberto

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	8
Índice de contenido	10
Índice de figuras	13
Índice de tablas.....	16
Resumen.....	17
Abstract.	18
Capítulo I: Introducción.....	19
Antecedentes.....	19
Justificación e importancia	20
Alcance del proyecto	20
Hipótesis	21
Variables de investigación.....	21
Objetivos.....	21
<i>Objetivo general.....</i>	<i>21</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>21</i>
Capítulo II: Marco teórico	23
Generalidades.....	23
Robótica móvil.....	23

Robótica móvil de servicio	24
<i>Clasificación</i>	25
Silos	28
Microcontrolador ESP32	30
LoRa	31
<i>Protocolo LoRaWAN</i>	32
IDE de Arduino	32
Motor DC	33
Sistema FPV.....	33
Software CAD	34
Fuerza magnética	34
Capítulo III: Diseño de la plataforma móvil	36
Especificaciones de diseño	37
Fuerza portante	39
Diseño geométrico de la plataforma	41
<i>Cálculo del diámetro de la llanta</i>	42
Análisis estático de cargas.....	44
Análisis dinámico.....	48
Selección de materiales para el diseño mecánico	51
Diseño CAD.....	52
Análisis CAE	53
<i>Chasis frontal</i>	54
<i>Chasis lateral</i>	57
<i>Base magnética</i>	60
Resultados del estudio CAE	62
Selección de componentes electrónico.....	63

<i>Motores</i>	63
<i>Selección del microcontrolador</i>	65
<i>Selección de la gafa y cámara FPV</i>	68
<i>Batería</i>	69
Diseño electrónico	73
<i>Emisor</i>	74
<i>Receptor</i>	75
Programación	76
<i>Emisor</i>	77
<i>Receptor</i>	82
Capitulo IV: Construcción y pruebas	91
Construcción estructural de la plataforma	91
Ensamblaje	93
Conexionado electrónico	98
Plataforma robótica	101
Pruebas y resultados	102
Adherencia magnética	102
Transmisión de imagen	104
Alcance de comunicación LoRa	106
Prueba de seguimiento de ruta	107
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	109
Conclusiones	109
Recomendaciones	110
Bibliografía	111
Anexos	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tipos de robots móviles</i>	24
Figura 2 <i>Robots acuáticos</i>	25
Figura 3 <i>Robots Terrestres</i>	26
Figura 4 <i>Robots aéreos</i>	27
Figura 5 <i>Robots espaciales</i>	28
Figura 6 <i>Silos</i>	29
Figura 7 <i>Esquema de la ESP32</i>	31
Figura 8 <i>IDE de Arduino</i>	32
Figura 9 <i>Motor de corriente continua</i>	33
Figura 10 <i>Sistema FPV</i>	34
Figura 11 <i>Diagrama de fuerza magnética vs separación entre el imán y el objeto</i>	35
Figura 12 <i>Esquema de funcionamiento</i>	36
Figura 13 <i>Variables de dimensión del imán</i>	40
Figura 14 <i>Boceto del prototipo</i>	42
Figura 15 <i>Medidas aproximadas de la plataforma</i>	43
Figura 16 <i>Diagrama de cuerpo libre estático</i>	44
Figura 17 <i>Diagrama de cuerpo libre dinámico</i>	49
Figura 18 <i>Diseño Mecánico</i>	53
Figura 19 <i>Estructura del prototipo</i>	54
Figura 20 <i>Distribución de fuerza del chasis frontal</i>	55
Figura 21 <i>Criterio de Von Mises del chasis frontal</i>	55
Figura 22 <i>Deformación del chasis frontal</i>	56
Figura 23 <i>Factor de seguridad del chasis frontal</i>	57
Figura 24 <i>Distribución de fuerza del chasis lateral</i>	58
Figura 25 <i>Criterio de Von Mises del chasis lateral</i>	58

Figura 26 <i>Deformación del chasis lateral</i>	59
Figura 27 <i>Factor de seguridad del chasis lateral</i>	59
Figura 28 <i>Distribución de fuerza de la base magnética</i>	60
Figura 29 <i>Criterio de Von Mises de la base magnética</i>	61
Figura 30 <i>Deformación de la base magnética</i>	61
Figura 31 <i>Factor de seguridad de base magnética</i>	62
Figura 32 <i>Sabertooth 2x12</i>	67
Figura 33 <i>Batería LiPo</i>	69
Figura 34 <i>Calculadora de tiempo de operación</i>	70
Figura 35 <i>Resultados de la opción 1</i>	71
Figura 36 <i>Resultados de la opción 2</i>	72
Figura 37 <i>Resultados de la opción 3</i>	73
Figura 38 <i>ESP32 Heltec v2</i>	74
Figura 39 <i>Diseño electrónico del transmisor</i>	75
Figura 40 <i>Diseño electrónico del receptor</i>	76
Figura 41 <i>Chasis frontal y chasis lateral</i>	91
Figura 42 <i>Base de policarbonato</i>	92
Figura 43 <i>Maquinado CNC</i>	92
Figura 44 <i>Piezas mecanizadas</i>	93
Figura 45 <i>Ensamblaje del chasis frontal y lateral</i>	93
Figura 46 <i>Ensamble de la base y los motores a la estructura</i>	94
Figura 47 <i>Ensamble de la base magnética</i>	94
Figura 48 <i>Piezas de la rueda</i>	95
Figura 49 <i>Rueda ensamblada</i>	95
Figura 50 <i>Montaje de la Rueda</i>	96
Figura 51 <i>Partes de las llantas</i>	96

Figura 52 <i>Llanta ensamblada.</i>	97
Figura 53 <i>Soporte de la cámara.</i>	97
Figura 54 <i>Montado del soporte de la cámara a la estructura.</i>	98
Figura 55 <i>Conexionado electrónico del receptor.</i>	99
Figura 56 <i>Conexionado del emisor.</i>	100
Figura 57 <i>Conexionado de la cámara.</i>	100
Figura 58 <i>Gafas FPV.</i>	101
Figura 59 <i>Plataforma Robótica.</i>	102
Figura 60 <i>Prueba de sujeción magnética.</i>	103
Figura 61 <i>Prueba de transmisión de video.</i>	105
Figura 62 <i>Visualización de la imagen en tiempo real.</i>	106
Figura 63 <i>Prueba de alcance del LoRa.</i>	106
Figura 64 <i>Prueba de movimiento.</i>	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Dimensiones de los silos</i>	30
Tabla 2 <i>Especificaciones del imán de neodimio</i>	37
Tabla 3 <i>Matriz de decisión para el tipo de llanta</i>	38
Tabla 4 <i>Fuerza portante</i>	41
Tabla 5 <i>Resultados del análisis estático</i>	48
Tabla 6 <i>Matriz de decisión del material de la estructura</i>	52
Tabla 7 <i>Resultados del análisis CAE</i>	63
Tabla 8 <i>Matriz de decisión del motor</i>	64
Tabla 9 <i>Especificaciones del motor</i>	64
Tabla 10 <i>Matriz de decisión del microcontrolador</i>	65
Tabla 11 <i>Especificaciones del microcontrolador</i>	66
Tabla 12 <i>Especificaciones de la sabertooth 2x12</i>	67
Tabla 13 <i>Matriz de decisión del sistema FPV</i>	68
Tabla 14 <i>Especificaciones del sistema FPV</i>	69
Tabla 15 <i>Prueba de adherencia magnética</i>	104
Tabla 16 <i>Prueba de funcionamiento del LoRa</i>	107

Resumen.

El presente trabajo consiste en el diseño y construcción de una plataforma móvil con un sistema de comunicación LoRa y un sistema de sujeción magnética para la inspección de silos metálicos mediante un sistema FPV. Para el diseño de la estructura se consideró la cantidad de imanes, el diámetro del silo, el peso, tipo de superficie, tipo de llanta, además del análisis estático de cargas y dinámico para la selección del motor. Para el diseño electrónico se tiene un protocolo de comunicación LoRa para ser tele operado, el cual se implementó con dos tarjetas ESP32 Heltec V2 que son compatible con el IDE de arduino para su programación, una usada como emisor y el otro como receptor el cual envía la señal pwm para el control de velocidad del motor. Para determinar el estado de la estructura del silo se usa un sistema FPV digital que presenta una calidad de imagen de 720p a 60 fps la cual se puede grabar sobre una tarjeta SD ubicada en el visor. Se realizaron pruebas de adherencia, transmisión de imagen en tiempo real y movilidad sobre una trayectoria vertical no lineal, para la comprobación del funcionamiento y así poder determinar que el prototipo cumple el propósito para el cual está diseñado.

Palabras clave: plataforma móvil, comunicación LoRa, FPV, pwm

Abstract

This work consists in the design and construction of a mobile platform with a LoRa communication system and a magnetic fastening system for the inspection of metal silos through a FPV system. For the design of the structure, the number of magnets, the diameter of the silo, the weight, type of surface, type of tire, and the static and dynamic load analysis were considered for the motor selection. For the electronic design, there is a LoRa communication protocol to be teleoperated, which was implemented with two Heltec V2 ESP32 boards that are compatible with the Arduino IDE for programming, one used as a transmitter and the other as a receiver which sends the PWM signal for motor speed control. A digital FPV system is used to determine the state of the silo structure, which presents a 720p image quality at 60 fps that can be recorded on an SD card located in the viewer. Adhesion tests, real-time image transmission, and mobility over a non-linear vertical path were performed to verify the operation and determine that the prototype meets the purpose for which it was designed.

Keywords: mobile platform, LoRa communication, FPV, pwm

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Los silos son estructuras que se manejan para almacenar enormes cantidades de materia prima solidas a granel. Debido al almacenamiento de grandes cantidades de materia prima, estos pierden sus propiedades mecánicas lo cual repercuten en la seguridad de los trabajadores, provocando pérdidas económicas y detenimiento de la producción de la misma. Para evitar estos problemas es necesario que las empresas que se dedican a estas actividades, tengan un conocimiento lo más amplio posible sobre el estado y gravedad que presentan la estructura que compone un silo. (Villacís & Villalba, 2011)

Los daños en la estructura de los silos se producen por factores como son: corrosión en el material de la estructura, averías en las paredes de tanques de hormigón, exceso de carga en el proceso de llenado y descarga, explosión del producto contenido, colapso estructural, grietas por limitada inspección de la estructura, fallos en soldadura y uniones mecánica. Los daños pueden ser reversibles, realizando inspecciones en la estructura del silo periódicamente (Davinia, 2018)

La inspección de silos por lo general lo realiza una persona exponiendo su integridad física, sin abarcar toda el área del mismo presentando inconvenientes dentro de ella, una pequeña fisura puede provocar el ingreso de agua o humedad dentro de la materia prima que afecta la producción.

El personal debe realizar la inspección por medio del uso de andamios, escaleras y equipo de sujeción, en procesos de inspección en cual la altura supere los 2 metros o se encuentre fuera del alcance del personal. (Cevallos)

La falta de una correcta inspección ha provocado graves accidentes como el desplome de los silos de la empresa Portuaria de barranquilla el 15 de septiembre del 2021 (Puerto Riverport, 2021). Esto suele producirse por una sobrecarga del material a almacenar y por falta de mantenimiento preventivo dentro de los silos.

Justificación e importancia

Dentro del Ecuador existen empresas que trabajan con silos, siendo de importancia la inspección de los mismo para evitar riesgos laborales en las empresas, manteniendo un plan de mantenimiento o una optimización del almacenamiento, por lo que es necesario la inspección del estado de la estructura que compone al silo, la cual tradicionalmente se la realiza mediante andamios por inspección visual, e ahí la importancia de la implementación de un prototipo robotizado para realizar dicha tarea sin causar accidentes. Existen trabajos asociados a la optimización, diseños estructurales de silos, sin embargo, en inspección silos existen una cantidad reducida de trabajos respecto a la implementación de una plataforma robotizada para la inspección de los mismos, por lo que el presente trabajo de titulación busca reducir los riesgos laborales.

Alcance del proyecto

El presente proyecto, tiene como finalidad crear un método de inspección del estado del cilindro del silo, mediante el diseño y construcción de una plataforma móvil tele operada con emisión de imágenes en primera persona, el mismo que permita que el operario evite usar una forma de inspección tradicional, tales como es el armado de andamios o uso de escaleras, que es lo que es necesario para ascender a las alturas que se necesita para la inspección del estado del cilindro del silo, lo cual puede presentar un peligro para el inspector si no se tiene el equipo de seguridad adecuado para este tipo de trabajos en altura.

La metodología propuesta se compone de cinco etapas: reconocimiento del área de trabajo, dimensionamiento de las partes de la plataforma móvil, selección de materiales, diseño CAD del prototipo, construcción y pruebas.

Para verificar y validar el funcionamiento de la plataforma móvil, se procederá a realizar las pruebas en un cilindro de silo de almacenamiento de alimento para aves, con diámetro de cinco metros y seis metros de altura.

Hipótesis

¿Al realizar las pruebas de campo de la plataforma robotizada, el operador logra detectar las fallas en los silos, mediante las imágenes enviadas de manera remota al sistema FPV?

Variables de investigación

- Variable independiente: Plataforma móvil teleoperada.
- Variable dependiente: Detección de fallas en la estructura de los silos.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir una plataforma móvil robotizada tele operada mediante un protocolo de comunicación inalámbrica y presentación de imagen en primera persona, para la inspección de silos.

Objetivos específicos

- Diseñar una plataforma móvil robotizada, mediante un software CAD para desplazarse en una superficie del cilindro del silo.

- Diseñar un sistema de sujeción, mediante un modelo 3D para un avance vertical sobre una superficie metálica.
- Implementar un protocolo de comunicación inalámbrica, utilizando un módulo ESP32 para el control de manera remota del prototipo.
- Construir la plataforma móvil robotizada, por medio de procesos de manufactura para realizar pruebas de campo y así verificar la hipótesis.

Capítulo II

Marco teórico

Generalidades

En Ecuador, hay compañías que utilizan silos para almacenamiento en general, por lo que es esencial realizar inspecciones de estos para prevenir daños en la estructura cilíndrica. En el campo de la inspección estructural de silos, existen pocos trabajos relacionados con la implementación de una plataforma robotizada para la inspección de estas estructuras. Para lograr esto, se puede implementar un prototipo robótico para realizar esta tarea de manera segura y sin causar accidentes.

La robótica móvil se refiere a robots que se mueven en diferentes entornos y tienen habilidades para realizar tareas complejas, ya sea de forma independiente o bajo la supervisión de un humano.

El presente proyecto de investigación busca disminuir los riesgos laborales de inspección estructural, al utilizar la robótica móvil ya que esta tecnología inteligente y autónoma tiene un amplio rango de aplicaciones.

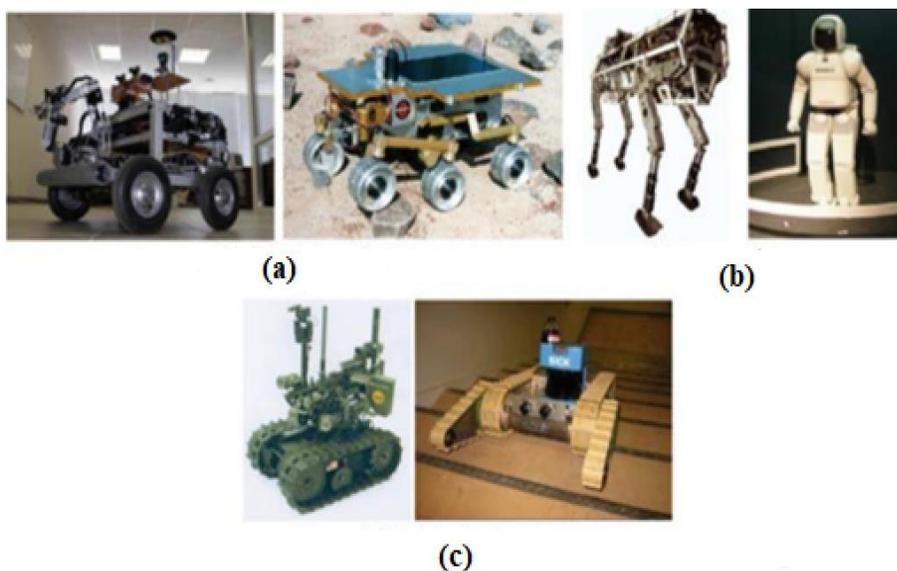
Robótica móvil

Un robot móvil es una máquina electrónica y mecánica que puede moverse de manera independiente y autónoma sin estar fijo en un solo lugar. Utiliza sensores para monitorear su posición en relación a su punto de origen y destino, lo que le permite navegar en su entorno. Su movimiento es controlado mediante un sistema de control en lazo cerrado, lo que significa que los sensores del robot recogen información sobre su entorno y la utilizan para ajustar su movimiento. El desplazamiento es proporcionado mediante dispositivos de locomoción, tales

como ruedas, patas u orugas, como se muestra en la figura 1. Los robots móviles pueden ser utilizados en una variedad de aplicaciones, como la exploración, la industria, la limpieza, la seguridad, entre otras. (Barrientos y otros, 2007, pág. 14)

Figura 1

Tipos de robots móviles



Nota. En la figura se describen los tipos de robots móviles como son: a. Robot de ruedas; b. Robot de patas; c. Robot oruga. Tomado de (Barrientos y otros, 2007)

Robótica móvil de servicio

A través de la historia, los seres humanos siempre han buscado maneras de mejorar el uso y procesamiento de los recursos y materiales en su entorno, lo que ha llevado a la creación de máquinas para automatizar varias tareas. Dentro de estas máquinas, los robots son específicamente diseñados para ayudar a la humanidad en la realización de distintas tareas, ya sea funcionando de manera autónoma o bajo control remoto. (Argudo & Adrian, 2012, pág. 1)

Clasificación

Según las particularidades que los robots móviles de servicio presentan se los puede clasificar en las siguientes categorías:

a. Robots Acuáticos

Los robots acuáticos se utilizan a menudo para la investigación científica y pueden ser impulsados por diferentes métodos. El uso de turbinas y propulsores es el más común, pero también hay diseños que imitan los movimientos de animales acuáticos con aletas u ondulaciones. Ejemplos de estos robots se pueden ver en la figura 2. (Argudo & Adrian, 2012, pág. 3)

Figura 2

Robots acuáticos



Nota. En esta imagen se puede evidenciar como un robot puede transportarse en agua a pesar de tener circuitos electrónicos. Tomado de (Argudo & Adrian, 2012)

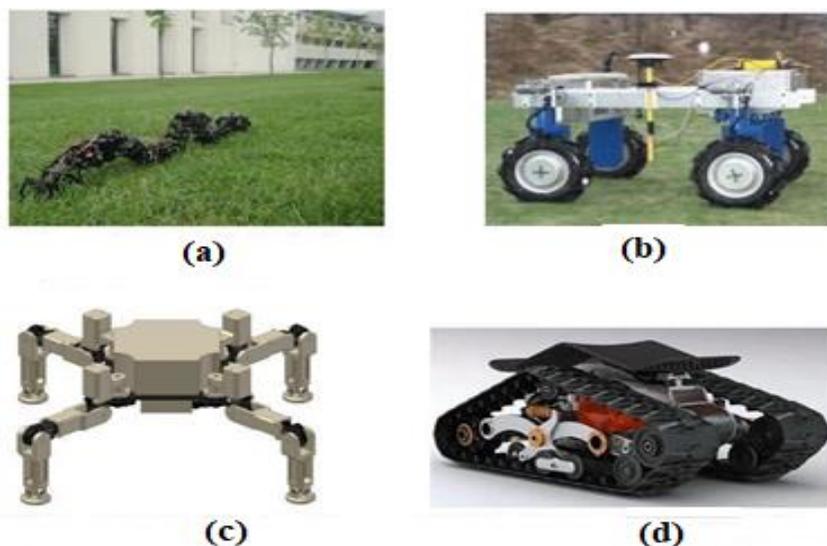
b. Robots Terrestres

Los Robots Terrestres son máquinas que pueden desplazarse en terrenos sólidos

regulares o irregulares. Pueden moverse utilizando diferentes sistemas de locomoción, que suelen ser los más eficientes para su aplicación específica. Según el mecanismo de movimiento, se pueden clasificar en subgrupos como: deslizantes, rodantes, caminantes y rulantes como se observa en la figura 3. (Argudo & Adrian, 2012, pág. 3)

Figura 3

Robots Terrestres



Nota. En la figura se observa los tipos de robots terrestres como son: a. Robot deslizante; b. Robot rodante; c. Robot caminante; d. Robot rulante. Tomado de (Argudo & Adrian, 2012)

c. Robots aéreos

Los robots aéreos son dispositivos que pueden volar. Se utilizan principalmente para fines militares relacionados con la navegación autónoma. En la figura 4 nos muestra los diferentes medios para desplazarse, como hélices, turbinas y alas para los robots con forma de animal, dependiendo de las condiciones del viento. (Argudo & Adrian, 2012, pág. 4)

Figura 4

Robots aéreos



Nota. Los robots aéreos pueden ser usados para inspecciones en lugares altos. Tomado de (Argudo & Adrian, 2012)

d. Robots Espaciales

Los robots espaciales son máquinas diseñadas para viajar en el espacio exterior. Utilizan diferentes tipos de propulsión, como la ionización o el combustible sólido, y suelen incluir sondas para recolectar muestras y tomar imágenes. Es importante que estos robots sean lo más autónomos posible debido a la gran distancia entre ellos y la Tierra, lo que dificulta el control remoto a través de la transmisión de datos y señales. Un ejemplo de este tipo de robots se encuentra en la figura 5. (Argudo & Adrian, 2012, pág. 4)

Figura 5

Robots espaciales



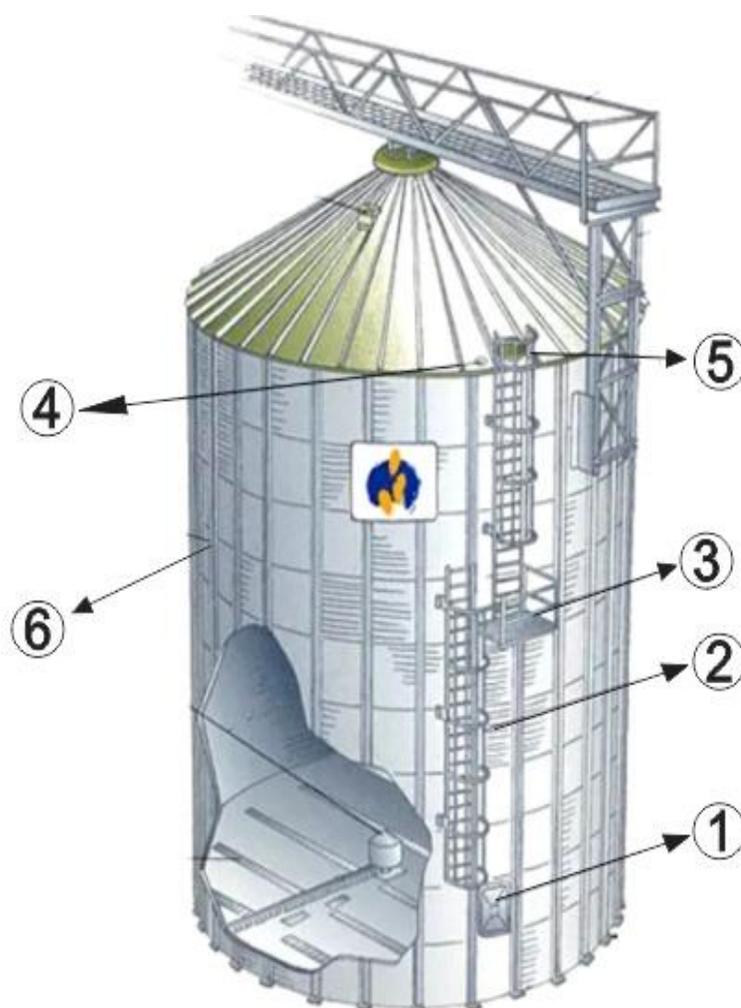
Nota. Los robots han sido de mucha utilidad al momento de explorar sitios de difícil acceso, lo que ha permitido ser enviados al espacio. Tomado de (Argudo & Adrian, 2012)

Silos

Los silos son estructura altas y cilíndricas que se utilizan para almacenar grandes cantidades de materiales sólidos a granel, tales como granos, cereales, polvos, entre otros. Estas estructuras se componen de distintas partes las cuales se ven en la figura 6. Estos son muy comunes en la industria agrícola, alimentaria y química debido a su capacidad de almacenamiento, cuyo aforo esta limita por las dimensiones de su estructura, las mismas que se presentan en la tabla 1. Los silos pueden mantener la calidad y las propiedades de los materiales almacenados a lo largo del tiempo. Además, que permiten un fácil acceso y descarga de los materiales almacenados, lo que facilita el transporte y el procesamiento de estos materiales. (Villacis & Villava, 2011, pág. 1)

Figura 6

Silos



Nota. Los silos son estructuras en las cuales se pueden almacenar grandes cantidades de alimentos u otro material. Estos se componen de 1. Puerta de acceso; 2. Escalera con guardas espaldas; 3. Plataforma de seguridad; 4. Cono del techo; 5. Trampilla de inspección; 6. Cilindro. Tomado de (Villacis & Villava, 2011)

Tabla 1*Dimensiones de los silos*

Diámetro del cilindro	Altura cilindro (m)	Altura cono del techo (m)	Capacidad cilindro (m³)
4,5	5	1,25	79,8
	7,5	1,25	119,7
	10	1,25	159,6
7,25	5	1,7	206,4
	7,5	1,7	309,65
	10	1,7	412,8
	12,5	1,7	516,10
10	5	2,35	392,7
	7,5	2,35	589,05
	10	2,35	785,4
	12,5	2,35	981,75
	15	2,35	1.178,10

Nota. Para el criterio de diseño de las dimensiones de la plataforma móvil se tomará un diámetro de silo de 4,5 metros. Tomado de (Ospina y otros)

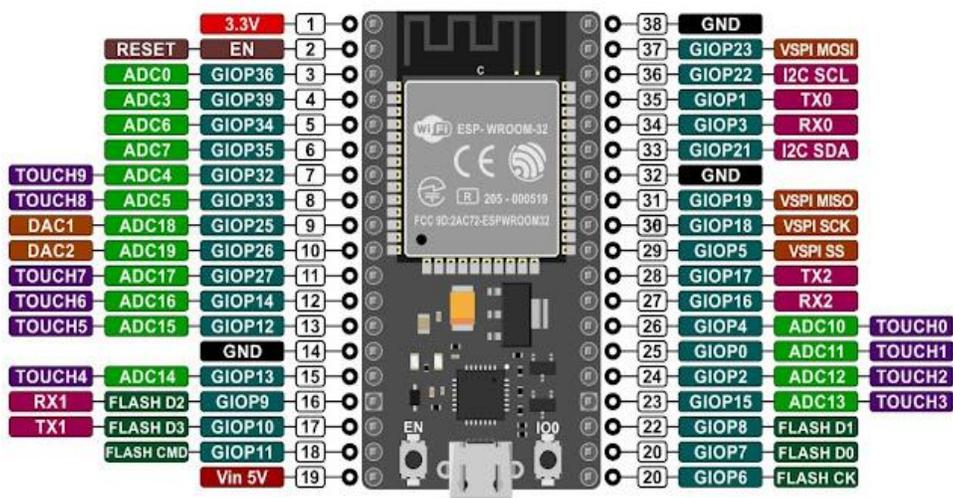
Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador basado en un sistema en chip (SoC) que integra un microprocesador de 32 bits, memoria flash, y diversos periféricos. Incluye 2 núcleos de procesamiento que pueden ser utilizados simultáneamente para tareas diferentes, permitiendo una gran capacidad de procesamiento. Es capaz de conectarse a redes Wi-Fi de 2.4GHz y 5GHz y también incluye Bluetooth v4.2 BR/EDR y BLE, lo que lo hace ideal para aplicaciones de IoT y de automatización doméstica. Además, cuenta con múltiples entradas y salidas digitales y analógicas como se en la figura 7, lo que permite conectar diversos sensores y actuadores.

Es posible programar el ESP32 con diversos lenguajes de programación, incluyendo C/C++, MicroPython y Arduino, lo que lo hace accesible a una amplia gama de desarrolladores. Debido a su bajo costo y alto rendimiento, el ESP32 se ha vuelto muy popular entre los desarrolladores de proyectos IoT y de automatización doméstica (Guerrera)

Figura 7

Esquema de la ESP32



Nota. En la figura se muestra la distribución de las salidas y entradas analógicas y digitales que posee una ESP32. Tomado de (Asanza)

LoRa

La tecnología LoRa es una forma de modulación de capa física que utiliza Chirp Spread Spectrum (CSS) y se basa en el uso de una señal chirp. Esta técnica consiste en aumentar o disminuir la frecuencia de una señal senoidal durante un período de tiempo, utilizando todo el ancho de banda. Esto permite una mayor resistencia a las señales de interferencia y reduce la pérdida de señal debido a la propagación multicamino. Al ser un estándar LPWAN, LoRa permite reducir la velocidad de datos mientras se aumenta el rango de comunicación. (Heredia & Paul, 2021, pág. 25)

Protocolo LoRaWAN

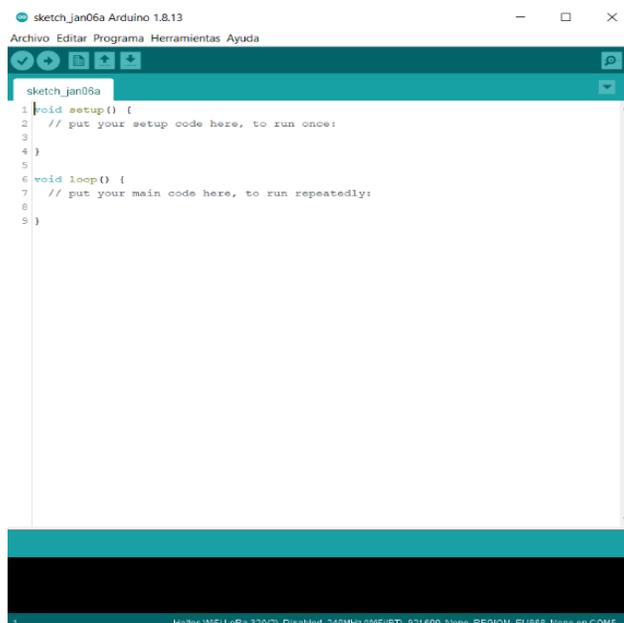
LoRa es una tecnología que se encarga de cumplir con las necesidades de IoT en cuanto a alcance largo, bajo consumo de energía y comunicación bidireccional, lo que permite que los objetos se comuniquen de manera más fácil. (Borja, 2021, pág. 25)

IDE de Arduino

Un IDE es un software libre que consta de un conjunto de utilidades para la programación como: un programa para realizar o modificar un código, un verificador, una herramienta de depuración y una interfaz gráfica (GUI) como se muestra en la figura 8. En el caso del Arduino, también cuenta con la capacidad de cargar el programa ya compilado en la memoria flash del dispositivo hardware. Además, puede estar especializado en un solo lenguaje de programación o ser utilizado para varios. (Arduino, 2016)

Figura 8

IDE de Arduino



Nota. Ambiente de desarrollo del software IDE de arduino. Tomado de (Arduino, 2016)

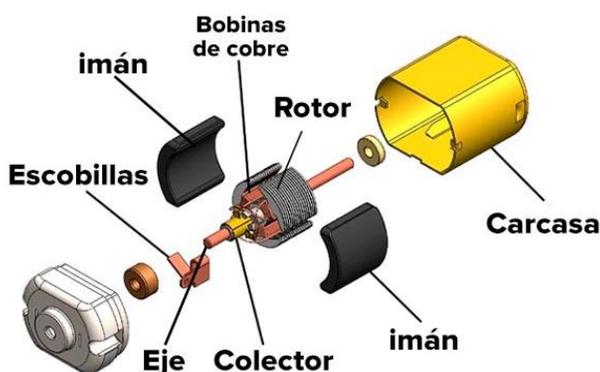
Motor DC

Un motor CC o de corriente continua, convierte la energía eléctrica en energía mecánica mediante un movimiento rotatorio generado por un campo magnético. Está compuesto por dos partes: el estator y el rotor, como se muestra en la figura 9.

El funcionamiento se basa en la repulsión entre los polos magnéticos de un imán permanente y los polos magnéticos de un electroimán montado en el rotor. Cuando la corriente eléctrica circula por la bobina del electroimán, el campo electromagnético generado interactúa con el campo magnético del imán permanente o devanado. El torque magnético generado causa que el rotor supere su inercia y comience a girar en la dirección en la que esté conectado el motor al circuito o la pila. (Evolución, 2018).

Figura 9

Motor de corriente continua



Nota. Partes de un motor de corriente continua. Tomado de (Motor)

Sistema FPV

En la figura 10 se muestra un sistema FPV, el cual consta de un transmisor y un receptor, por lo general posee una cámara, un transmisor de video y unas gafas. En las gafas se puede visualizar en tiempo real lo que está transmitiendo la cámara de una forma remota.

Figura 10*Sistema FPV*

Nota. Sistema FPV de la marca dji. Tomado de (HispaDrones, 2019).

Software CAD

Un software CAD permite crear a sus usuarios modelos 2D y 3D permitiendo desarrollar y visualizar virtualmente lo que se espera obtener en la construcción del mismo. Ayudando a arquitectos, ingenieros, jefes de obra que han sustituido el dibujo manual por un software que les permite optimizar recursos.

Fuerza magnética

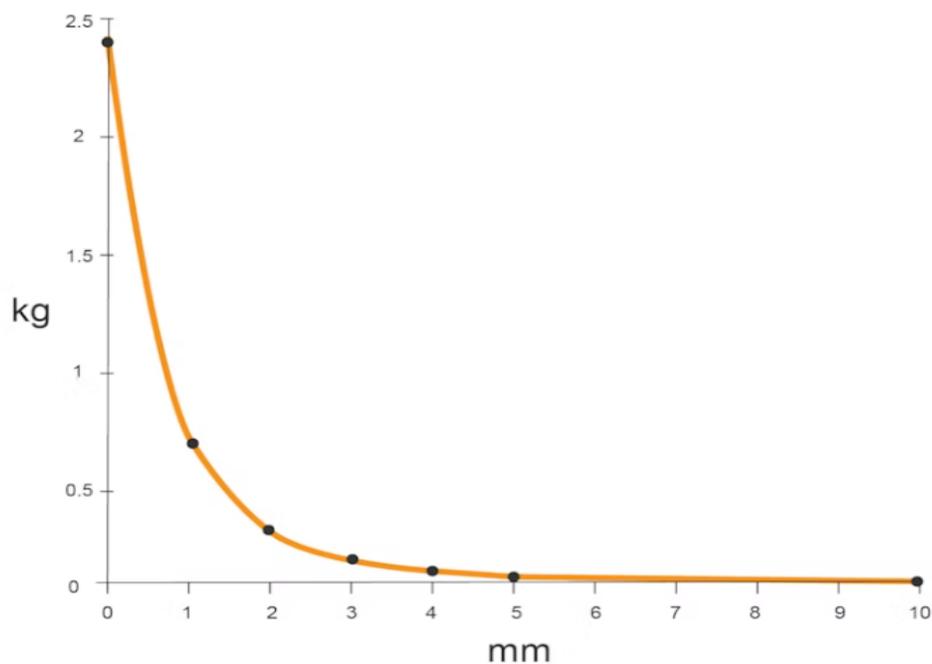
La fuerza de sujeción máxima de un imán se logra cuando se aplica una fuerza en dirección perpendicular a la superficie de contacto. Sin embargo, debido a la fuerza de desplazamiento, se necesita una fuerza de sujeción significativamente mayor para soportar el mismo peso cuando se aplica en una dirección de movimiento, reduciendo la fuerza de sujeción aproximadamente al 15-20% de la fuerza de sujeción teórica, como se ve en la figura 11. Por ejemplo, para mantener un peso de 1 kg en una pared con un imán, se requiere al menos 6 kg de fuerza de sujeción magnética. Además, la naturaleza de las dos superficies de contacto

también puede afectar la fuerza de sujeción, por ejemplo, colocar goma o caucho en el imán aumenta la distancia entre el imán y la superficie de contacto, pero al mismo tiempo protege el imán de resbalarse. (Supermagnete)

Cuando no hay contacto directo entre el imán y el objeto al que se desea adherir, la fuerza de sujeción disminuye significativamente con el aumento de la distancia. Incluso un pequeño espacio de alrededor de medio milímetro puede reducir la fuerza de sujeción a la mitad. Además, una capa fina de pintura en el objeto también puede reducir la fuerza de sujeción.

Figura 11

Diagrama de fuerza magnética vs separación entre el imán y el objeto.



Nota. En el diagrama se muestra la fuerza que puede cargar un imán en función a la distancia se separación de los cuerpos. Tomado de (Supermagnete)

Capítulo III

Diseño de la plataforma móvil

Para desarrollar el prototipo robotizado se debe considerar aspectos muy importantes, como el orden de implementación. Por lo cual el diseño del mismo debe cumplir con un proceso que permita identificar fallas, para optimizar el prototipo y así lograr el objetivo propuesto en el presente proyecto, como se puede apreciar dentro de la figura 12, cuyo orden se puede ejecutar de una forma segura después de una exhaustiva investigación.

Figura 12

Esquema de funcionamiento.



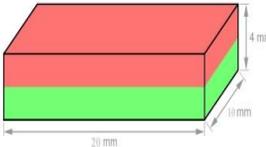
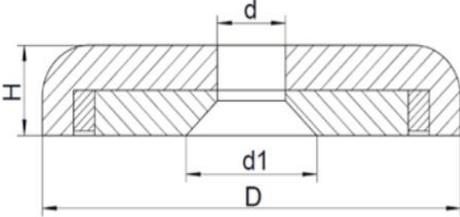
Nota. En el esquema se describen el proceso que se va a llevar a cabo para el diseño de la plataforma móvil robotizada.

Especificaciones de diseño

La plataforma móvil deberá ascender de forma vertical a la estructura cilíndrica del silo, tomando en cuenta un peso aproximado de 40 newtons, un diámetro del silo mínimo de 4.5 m y alcanzando una velocidad máxima prevista de 1 m/s. Además, se debe tomar en cuenta en qué tipo de superficies el robot va a trabajar, las cuales son de tipo metálico, libres de pintura, aceite, grasa u otro factor que afecte el rozamiento y la fuerza de adherencia del prototipo a la estructura. Debido a que la estructura del silo es metálica se puede usar un tipo de sujeción magnética con aproximadamente 50 imanes de neodimio, cuyas características se muestra tabla 2.

Tabla 2

Especificaciones del imán de neodimio

Especificaciones	Imanes	
Imagen		
Forma	Bloque	Anillo
Tamaño	20 x 10 x 4 mm	D =12; H=3; d=4; d1=6 mm
Magnetización	N52	N52
Fuerza. Sujec. Aprox.	2,2 kg	1,5 kg
Fuerza de desplazamiento aprox.	540 g	310 g
Peso	4,37 g	3,21 g

Nota. En la tabla se muestran las características de los imanes que se implementaran en el prototipo como forma de sujeción magnética. Tomado de (Supermagnete)

El prototipo debe estar diseñado para captar imágenes en tiempo real del estado la estructura del silo, para así poder detectar fallos en dichas estructuras, al trabajar en exteriores

se debe considerar el estado del clima como ambientes húmedos o con lluvia los cuales son un factor que puede afectar en gran medida el funcionamiento del prototipo.

El robot podrá movilizarse en superficie irregulares, por lo cual deberá tener un tipo de llanta que se adapte a este tipo de superficies y aumente el área de contacto del prototipo con la estructura cilíndrica del silo, para así lograr una mayor tracción. Tomando como referencias los tipos de llantas y sus características mostradas en la tabla 3 para la selección de la misma.

Tabla 3

Matriz de decisión para el tipo de llanta

Tipo de llanta	Imagen	Mayor área de contacto	Peso ligero	Adherencia	Total
Rueda		2	5	3	10
Oruga		5	3	4	12
Omnidireccionales		3	4	4	11

Nota. En la elección de las llantas es importante considerar características como la adherencia y el área de contacto con la superficie, por lo que se opta por llantas de tipo oruga, ya que estas aprovechan la fricción para mejorar la adherencia

Para la tele operación se requiere un microcontrolador que tenga una comunicación bidireccional a largas distancias, sin perder el envío y recepción de datos siendo resistente a interferencias y con un bajo consumo de energía.

Fuerza portante

La fuerza portante de un imán se refiere a la cantidad de fuerza que el imán ejerce sobre otro objeto. Esta es causada por el campo magnético generado por el imán. Esta fuerza puede ser medida en unidades de newtons (N) y se puede calcular usando la ley de la fuerza de Lorentz. La fuerza portante de un imán también puede variar dependiendo de la distancia entre el imán y el objeto afectado, así como de la orientación y la posición relativa de ambos. (García, 1987).

Para determinar la fuerza portante de los imanes seleccionados descritos en la tabla 1, se debe calcular el campo magnético de un imán de bloque mediante la ecuación 1 y para un imán de tipo anillo se utiliza la ecuación 2, para lo cual será necesario conocer las medidas que se observan en la figura 13.

$$B = \frac{B_r}{\pi} * \left[\tan^{-1} \left(\frac{L * W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{L * W}{2 * (D + z)\sqrt{4 * (D + z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right] \quad \text{Ec. 1}$$

$$B = \frac{B_r}{2} \left[\frac{D + z}{\sqrt{R_a^2 + (D + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_a^2 + z^2}} - \left(\frac{D + z}{\sqrt{R_i^2 + (D + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_i^2 + z^2}} \right) \right] \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

B_r = Remanencia (teslas)

L = Largo

W = Ancho

D = Espesor

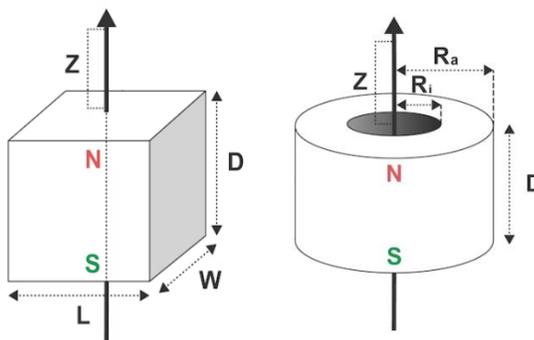
R_i = Radio interno

R_a =Radio Externo

z = distancia de separacion del iman a la superficie

Figura 13

Variables de dimensión del imán



Nota. En la figura se muestra las variables necesarias de medida que tienen los imanes de tipo rectangular y de anillo, para el caculo del campo magnético del imán Tomado de (Supermagnete)

Con la ecuación 3 se determina la fuerza portante de los imanes anteriormente descritos

$$F_p = \frac{1}{2} * \frac{B^2}{\mu_0} * 2 * S \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

B = Campo magnético (teslas)

μ_0 = Permeabilidad magnética

S = área transversal del imán

En la tabla 3 se muestran los resultados al variar z de la ecuación 1 de los imanes de neodimio N52 de tipo bloque y la ecuación 2 de tipo anillo. Dando como resultado la fuerza portante necesaria para desprender la superficie con el imán.

Tabla 4*Fuerza portante*

Separación (mm)	Fuerza portante (n)		# de imanes		Fuerza portante total (n)	Peso w (n)	Ancho a (mm)
	Rectangular	Anillo	Rectangular	Anillo			
0	4,95	3,66	22	24	157	40	120
0,25	4,59	3,27	22	24	144	40	130
0,5	4,27	2,87	22	24	130	40	145
0,75	3,93	2,48	22	24	117	40	160
1	3,64	2,11	22	24	105	40	180
1,25	3,36	1,75	22	24	93	40	200
1,5	3,06	1,44	22	24	82	40	215
1,75	2,77	1,14	22	24	71	40	230
2	2,53	0,87	22	24	61	40	250
2,5	2,09	0,56	22	24	48	40	300
3	1,71	0,32	22	24	36	40	400

Nota. Para la tabla se toma un rango de medida de separación Z de 0 a 3 mm, en intervalos de 0,25 mm, para así poder determinar la cantidad de imanes necesarios para dimensionar la base magnética

Diseño geométrico de la plataforma

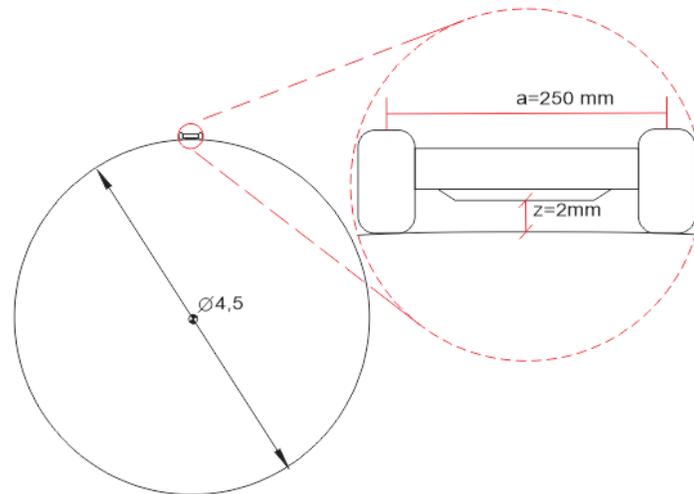
El diseño geométrico de la plataforma móvil consiste en establecer las dimensiones adecuadas del prototipo, la cual se basa en una estructura acopladas a unas llantas de tipo oruga y en un sistema de sujeción magnética, para un silo que sea superior a un diámetro de 4.5 m y 5 m de altura.

De la tabla 4 se observa la fuerza portante total, debe ser igual o mayor que la fuerza que ejerce el peso para fijarse a la superficie metálica. Por criterio de diseño se toma la distancia z de 2 mm, para tener un rango de tolerancia en la distancia de separación de la superficie del silo a la base magnética. Se toma una dimensión de 250 mm de ancho para el prototipo, tomando en consideración la cantidad de imanes que se deben ubicar en la base

magnética y la ubicación de los componentes electrónicos de la plataforma móvil, como se ve en la figura 14.

Figura 14

Boceto del prototipo



Nota. En la figura se muestra un boceto inicial del prototipo montado en un silo de 4,5 metros de diámetro. Fuente autor

Para determinar el largo del prototipo se puede dimensionar tomando en consideración que la superficie del cilindro del silo es de tipo ondulada, por lo que se requerirá una mayor área de contacto para que así los motores puedan traccionar de manera que el robot pueda vencer la fricción y fuerza magnética del robot, para eso se toma una dimensión de 200 mm de largo entre ejes.

Cálculo del diámetro de la llanta

Debido que los motores mayormente utilizados para este tipo de aplicación son de 12 V a 150 rpm, alcanzando una velocidad máxima 1 m/s. Donde el diámetro de la llanta se obtiene de la ecuación 4.

$$v = w * \frac{\phi}{2} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\phi = \frac{2v}{w} \quad \text{Ec. 5}$$

$$\phi = \frac{2 \text{ m/s}}{150 \text{ rpm}} * \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ rev}}{2\pi} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ mi}}$$

$$\phi = 127.32 \text{ mm}$$

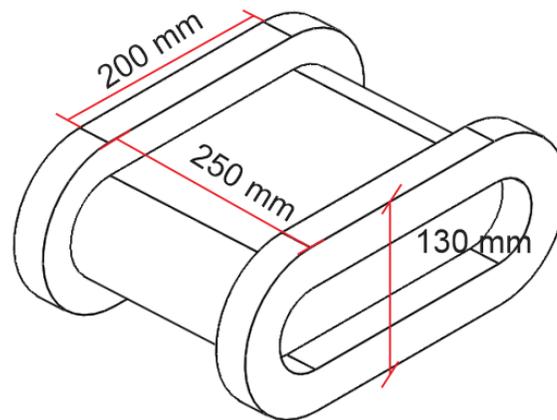
$$\phi \approx 130 \text{ mm}$$

De la ecuación 5 se obtuvo como resultado un valor de diámetro aproximado de llanta de 130 mm, la cual se considerará como la altura aproximada que deberá tener el diseño del prototipo.

Mediante un software CAD se procede a dibujar el boceto inicial del prototipo de la plataforma móvil como se observa en la figura 15.

Figura 15

Medidas aproximadas de la plataforma



Nota. En la figura se muestran las dimensiones del prototipo

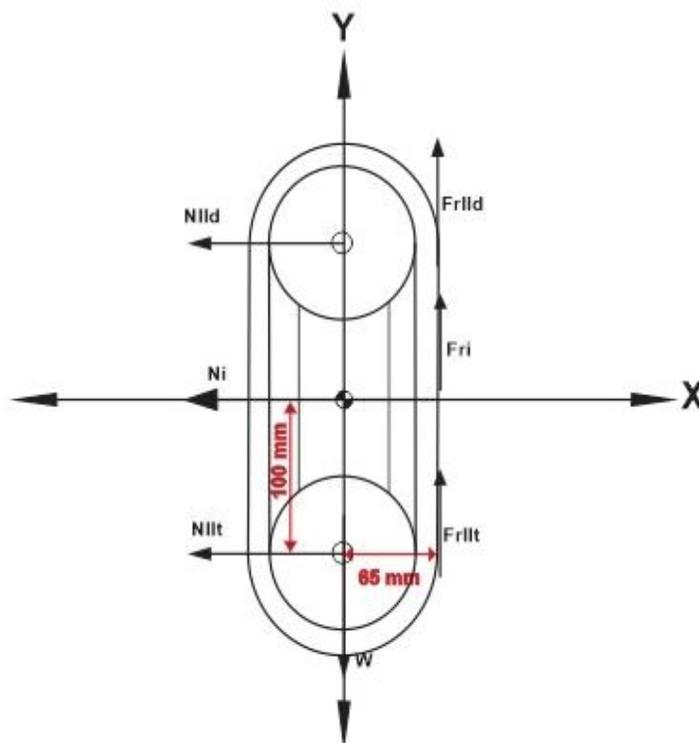
Análisis estático de cargas

La plataforma móvil se debe mantener en forma estática en la superficie cilíndrica del silo, para lo cual se debe calcular la fuerza magnética de los imanes, en conjunto con las fuerzas de fricción entre las llantas y la superficie.

Para que un cuerpo de la plataforma móvil que está sujeta la superficie del cilindro del silo se encuentre en equilibrio según la tercera ley de Newton la sumatoria de fuerzas deben ser iguales a 0. Para realizar el análisis estático de cargas es necesario un diagrama de cuerpo libre como se muestra en la figura 16 para analizar todas las fuerzas involucradas.

Figura 16

Diagrama de cuerpo libre estático



Nota. En prototipo se encuentra en posición vertical, puesto que así será como ascenderá el cilindro del silo, entonces se colocan las fuerzas que interactúan con la misma.

Donde:

mc = masa del cuerpo

W = Peso

Fr_{ld} = Fuerza de fricción de la llanta delantera.

Fr_{lt} = Fuerza de fricción de la llanta trasera.

Fr_i = Fuerza de fricción del imán.

N_{ld} = Fuerza normal de la llanta delantera.

N_{lt} = Fuerza normal de la llanta trasera.

N_i = Fuerza normal del imán.

F_{am} = Fuerza magnética.

u_i = coeficiente de fricción estático del acero con acero.

u_{ll} = coeficiente de fricción estático del caucho con el acero.

g = gravedad

Datos:

$$mc = 8.5 \text{ lb} = 3.864 \text{ Kg}$$

$$u_i = 0.74$$

$$u_{ll} = 0.3$$

$$W = mc * g = 37.81 \text{ N}$$

Ec. 6

$$Fr_{ld} = Fr_{lt}$$

$$\sum F = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$2Fr_{ud} + 2Fr_{ut} + Fr_i - W = 0 \quad \text{Ec. 7}$$

$$4Fr_{ud} + Fr_i - W = 0$$

$$Fr_{ud} = u_{ul} * N_{ud}$$

$$Fr_i = u_i * N_i$$

$$4 * u_{ul} * N_{ud} + u_i * N_i - W = 0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{am} - N_{ud} - N_i - N_{ut} = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

$$F_{am} - 2N_{ud} - N_i = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

$$\sum M = 0$$

$$D_1 = 0.1m \quad D_3 = 0.065m \quad D_2 = D_1$$

$$N_{ud} * D_1 + N_{ut} * D_2 - W * D_3 = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

$$0.2 * N_{ud} - 0.065 * W = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

Resolver el sistema de ecuaciones por el método de Cramer.

El sistema de ecuaciones tiene la forma.

$$1.2 * N_{ud} + 0.74 * N_i - 37.81 = 0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$F_{am} - 2N_{ud} - N_i = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

$$0.2 * N_{ud} - 2.5 = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

Calculamos la fuerza normal de la llanta delantera.

$$N_{ud} = \frac{1.85}{0.144} = 12.887 \text{ N} \quad \text{Ec. 13}$$

Calculamos para la fuerza normal del imán.

$$N_i = \frac{4.335}{0.144} = 30.197 \text{ N} \quad \text{Ec. 14}$$

Calculamos la fuerza magnética necesaria o mínima para que el prototipo se quede fijo en la estructura cilíndrica del silo, para lo que es necesario sobredimensionar para una superficie irregular.

$$F_{am} = \frac{8.035}{0.144} = 30.197 \text{ N} \quad \text{Ec. 15}$$

Obteniendo:

$$Fr_{ud} = u_u * N_{ud} = \quad \text{Ec. 16}$$

$$Fr_{ud} = 0.3 * 12.887 = 3.866 \text{ N}$$

$$Fr_i = u_i * N_i = \text{Ec. 17}$$

$$Fr_i = 0.74 * 30.197 = 22.346 \text{ N}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5

Tabla 5

Resultados del análisis estático

Variable	Valor (N)
N_{lId}	12,88
N_i	30,197
F_{am}	30,197
F_{rllId}	3,87
F_{ri}	22,24
W	31,81

Nota. En la tabla se encuentran el resultado final de las fuerzas que son necesarias para que la plataforma móvil se encuentre en equilibrio sobre la superficie del silo

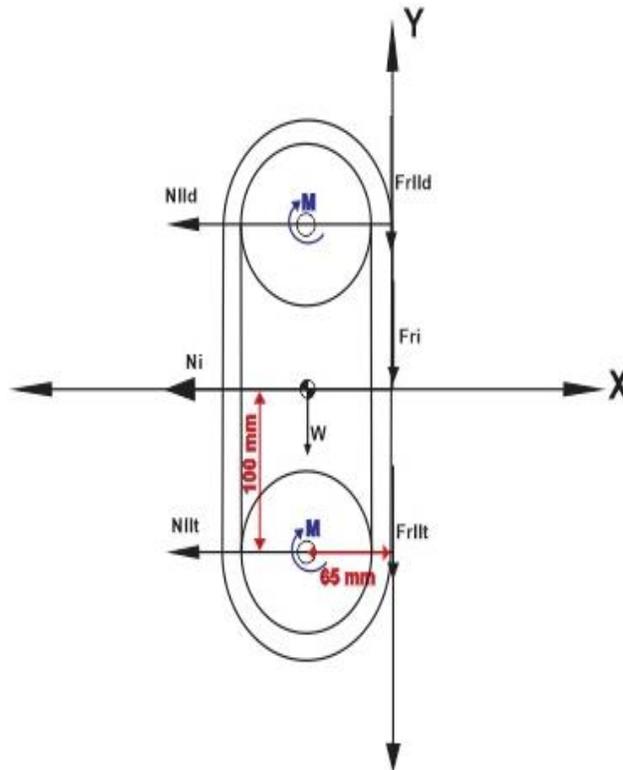
Análisis dinámico

La plataforma para alcanzar el objetivo de inspeccionar el silo se debe desplazar de forma vertical por la superficie metálica. Para lograr el movimiento vertical dentro de esta superficie se debe realizar un análisis dinámico para determinar el par o torque necesario del motor para que cumpla el desplazamiento.

Para obtener el torque se designa un punto donde se realizará el análisis para lograr con el objetivo el cual será el centro de la plataforma como se muestra en el diagrama de cuerpo libre de la figura 17. De la figura se observa todas las fuerzas que influyen en el análisis.

Figura 17

Diagrama de cuerpo libre dinámico



Nota. En prototipo se encuentra en posición vertical, puesto que así será como ascenderá el cilindro del silo, entonces se colocan las fuerzas que interactúan con la misma.

Donde:

W = Peso

Fr_{ld} = Fuerza de fricción de la llanta delantera.

Fr_{lt} = Fuerza de fricción de la llanta trasera.

Fr_i = Fuerza de fricción del imán.

N_{ld} = Normal de la llanta delantera.

N_{lt} = Normal de la llanta trasera.

N_i = Normal del imán.

F_{am} = Fuerza magnética.

u_{di} = Coeficiente de fricción dinámico del acero con acero.

u_{du} = Coeficiente de fricción dinámico del caucho con el acero.

g = Gravedad

M = Momento de la llanta

I = Inercia del eje de movimiento

r = radio de la llanta

Datos:

$$mc = 8.5 \text{ lb} = 3.864 \text{ Kg}$$

$$u_{di} = 0.74$$

$$u_{du} = 0.3$$

$$N_i = 30.197 \text{ N}$$

$$N_{ud} = 12.887 \text{ N}$$

$$Fr_{ud} = 3.222 \text{ N}$$

$$Fr_i = 17.212 \text{ N}$$

$$F_{am} = 30.197 \text{ N}$$

$$r = 0.0535 \text{ m}$$

$$I = mc * r^2 = 0.011 \text{ kg} * m^2$$

Ec. 18

$$Fr_{ud} = Fr_{ut}$$

$$\sum F_y = m * a_c$$

$$-2Fr_{uld} - 2Fr_{ult} - Fr_i - W = mc * a_c \quad \text{Ec. 19}$$

$$a_c = -\frac{W + 4Fr_{uld} + Fr_i}{mc} = -17.576 \frac{m}{s^2}$$

$$\sum M = I * \alpha$$

$$\alpha = -\frac{a_c}{r} = 328.53 \frac{1}{s^2}$$

$$d1 = 0.097 \text{ m} \quad d2 = 0.063 \text{ m} \quad d3 = 0.194 \text{ m} \quad d4 = d2$$

$$F_{am} * d1 - Fr_i * d2 - 2Fr_{uld} * d2 - 4M + N_{uld} * d3 + N_i * d4 = I * \alpha \quad \text{Ec. 20}$$

$$M = \frac{F_{am} * d1 - Fr_i * d2 - 2Fr_{uld} * d2 - I * \alpha + N_{uld} * d3 + N_i * d4}{4} \quad \text{Ec. 21}$$

$$M = 1.076 \text{ N * m}$$

Este es el torque que deberá cumplir cada motor.

Selección de materiales para el diseño mecánico

Para proceder con el diseño de la estructura es necesario conocer los materiales con los cuales se va a construir la plataforma, así como la selección de las llantas que serán requeridas para el mismo, como se observa en la tabla 6 donde se describen las ponderaciones de sus características según el tipo de material.

Tabla 6*Matriz de decisión del material de la estructura*

Material	Imagen	Resistencia a la corrosión.	Peso ligero	Ductilidad	Bajo costo	Suma total
Acero		3	2	3	5	13
Titanio		4	5	3	2	14
Aluminio		5	4	4	4	17
Fibra de carbono		5	4	4	2	15

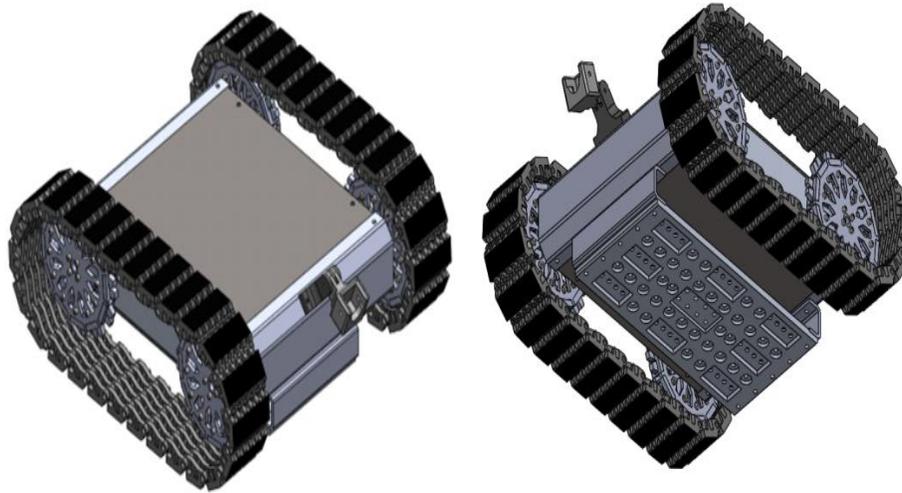
Nota. Se puede ver que el aluminio es el material óptimo para trabajar debido a su peso ligero, resistencia a la corrosión, bajo costo y facilidad para ser maquinado, lo cual lo convierte en la opción más favorable

Diseño CAD

Una vez determinadas las dimensiones de la plataforma móvil y el material con el que se va a trabajar, se obtiene un prototipo final donde se puede visualizar el modelo 3D en la figura 18. Donde posteriormente se determinará si el material seleccionado, cumple con las especificaciones requeridas para el prototipo

Figura 18

Diseño Mecánico



Nota. En la figura se muestra el diseño CAD final de la plataforma móvil

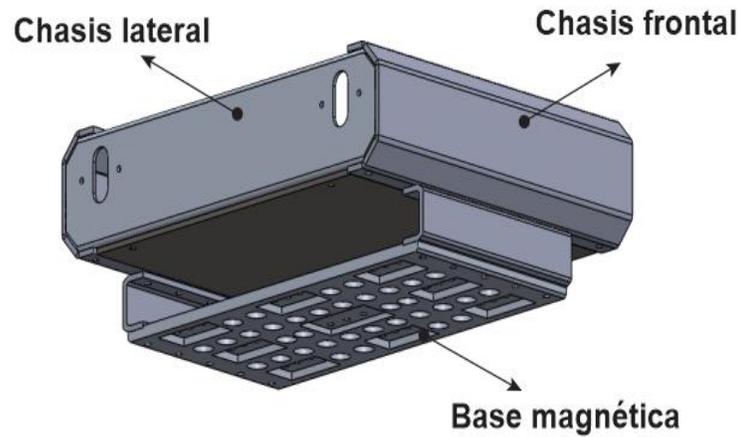
Análisis CAE

Mediante la simulación se podrá determinar el comportamiento de la estructura sometida a las fuerzas que se calcularon anteriormente. Determinando la deformación máxima (mm), fallo elástico y factor de seguridad en la estructura del prototipo, para así determinar si el diseño y el material es el óptimo para cumplir el propósito para el cual está diseñado.

Para el realizar el análisis de elementos finitos es necesario hacer el estudio por partes descritas en la figura 19 para optimizar los recursos computacionales y obtener un mallado de calidad para que así los resultados puedan ser lo más reales posible y a su vez que se pueda sobredimensionar las cargas, para obtener un factor de seguridad mayor a 1,5 y así lograr una estructura óptima en el diseño.

Figura 19

Estructura del prototipo



Nota. Las partes que serán sometidas al estudio CAE se muestran en la figura las cuales son las importantes y necesarias conocer si serán capaces de soportar el propósito para el cual está diseñada.

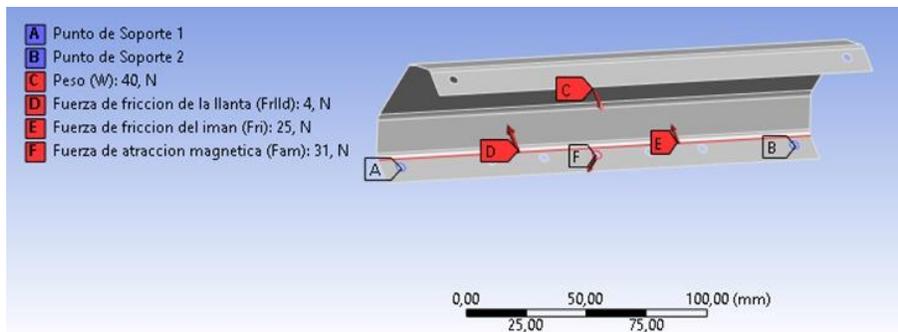
Chasis frontal

Análisis de Von Mises. Para el estudio de fallo elástico se analiza el criterio de Von Mises el cual nos indica que en un material dúctil sufre el fallo elástico cuando la energía de distorsión supera los valores indicados por el fabricante.

Se aplica las fuerzas resultantes resumidas en la tabla 5 como se muestra en la figura 20.

Figura 20

Distribución de fuerza del chasis frontal

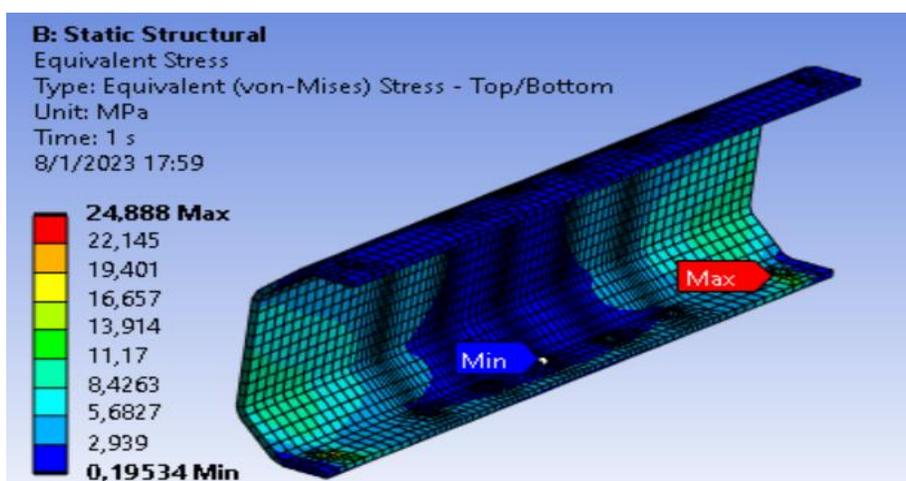


Nota. Mediante el un software CAE se procede a colocar los puntos fijos y fuerzas que actúan sobre la estructura.

Mediante un software CAE se obtiene la energía de distorsión elástica máxima, usando la barra de colores como un indicador del punto máximo y mínimo de la simulación, siendo 24.88 MPa el valor máximo como se indica en la figura 21.

Figura 21

Criterio de Von Mises del chasis frontal



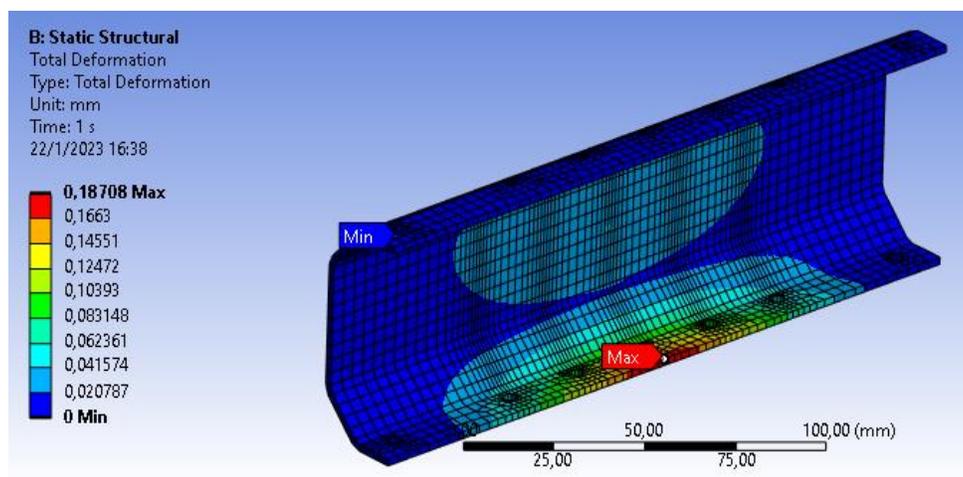
Nota. En la imagen se muestra los resultados del análisis de Von Mises.

Deformación máxima. Para el análisis de deformación se evalúa el resultado de diseño en a base a la aplicación de fuerzas las cuales van a actuar hasta el límite elástico del material, entonces este estudio permitirá saber que si el material elegido permanezca dentro del rango de elasticidad que indica el fabricante.

En la figura 22 se muestra el resultado del estudio, dando el valor máximo y mínimo de deformación el cual va de un rango de 0 a 0.187 mm. Siendo una barra de colores un indicador del punto máximo y mínimo de deformación y los puntos en donde se dará la deformación máxima en donde el color rojo será indicador de esto.

Figura 22

Deformación del chasis frontal

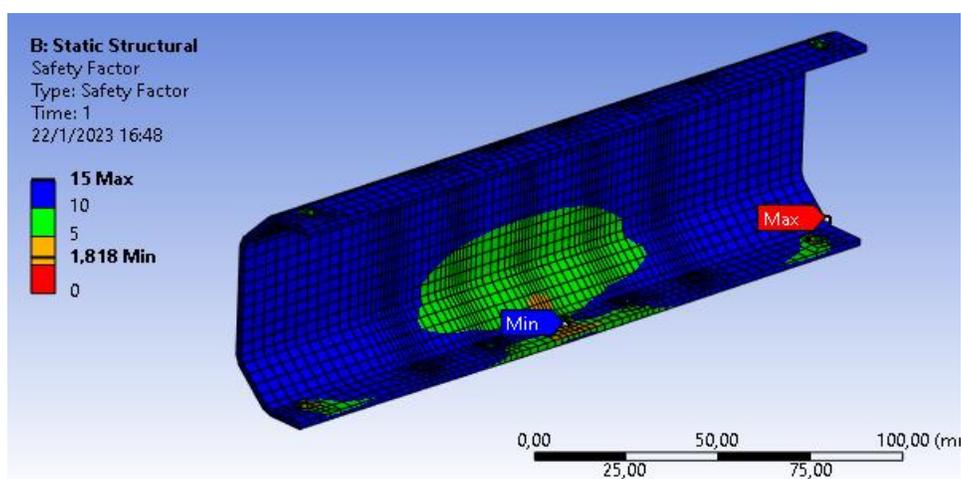


Nota. Los resultados de deformación máxima se observan en la figura

Factor de seguridad. El factor de seguridad es el coeficiente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor real esperado. La comprobación del factor de seguridad evalúa la seguridad del modelo. En la figura 23 se observa el análisis del factor de seguridad, el cual debe ser superior a 1 lo que nos indica que el material escogido está por encima del factor de seguridad.

Figura 23

Factor de seguridad del chasis frontal



Nota. El factor de seguridad debe ser superior a 1, para mantener la estructura sea segura para cumplir con la función para la que está diseñada

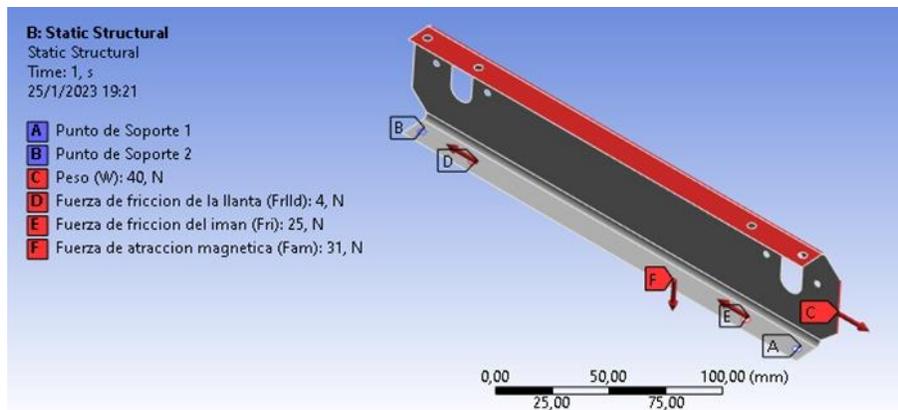
Como resultado del análisis CAE obtenemos un valor de 1.81 de factor de seguridad.

Chasis lateral

Análisis de Von Mises. Se aplica las fuerzas resultantes resumidas en la tabla 5 como se muestra en la figura 24.

Figura 24

Distribución de fuerza del chasis lateral

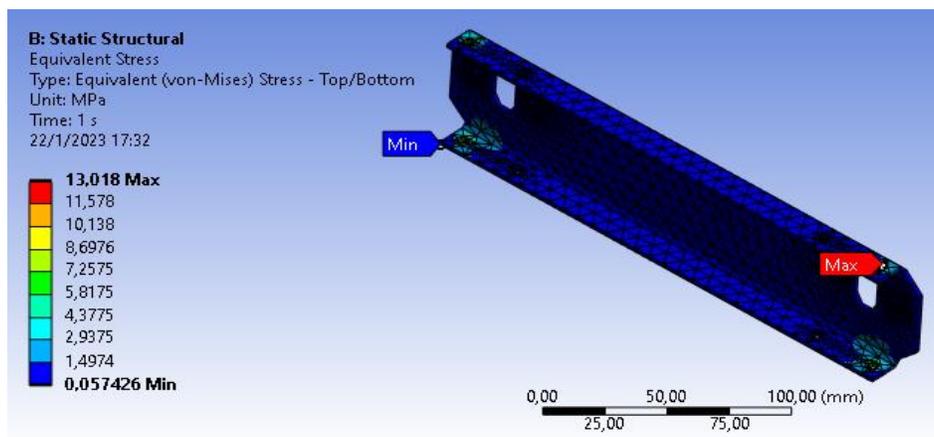


Nota. Mediante el un software CAE se procede a colocar los puntos fijos y fuerzas que actúan sobre la estructura.

Mediante un software CAE se obtiene la energía de distorsión elástica máxima, usando la barra de colores como un indicador del punto máximo y mínimo de la simulación, siendo 13.018 MPa el valor máximo como se indica en la figura 25.

Figura 25

Criterio de Von Mises del chasis lateral

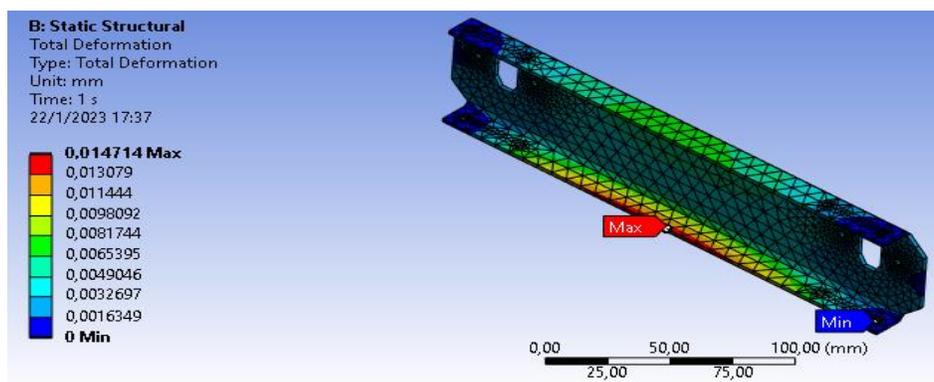


Nota. En la imagen se muestra los resultados del análisis de Von Mises

Deformación máxima. En la figura 26 se muestra el resultado del estudio, dando el valor máximo y mínimo de deformación el cual va de un rango de 0 a 0.0147 mm. Siendo una barra de colores un indicador del punto máximo y mínimo de deformación y los puntos en donde se dará la deformación máxima en donde el color rojo será indicador de esto.

Figura 26

Deformación del chasis lateral

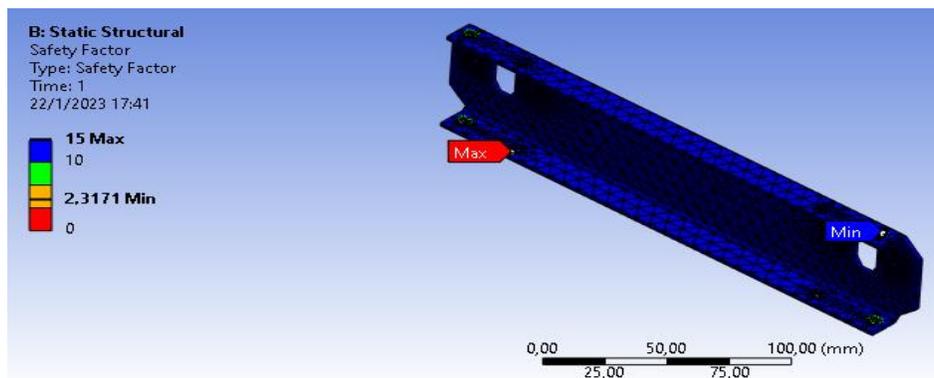


Nota. Los resultados de deformación máxima se observan en la figura.

Factor de seguridad. En la figura 27 se observa el análisis del factor de seguridad.

Figura 27

Factor de seguridad del chasis lateral



Nota. El factor de seguridad debe ser mayor a 1 para que la estructura sea segura para cumplir con la función para la que está diseñada.

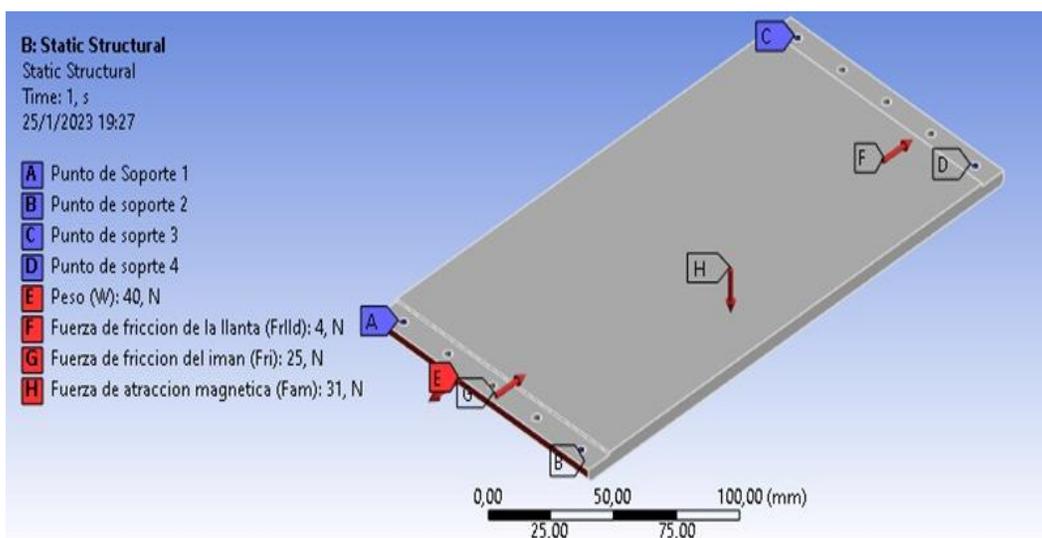
Como resultado del análisis CAE obtenemos un valor de 2.317 de factor de seguridad.

Base magnética

Análisis de Von Mises. Se aplica las fuerzas resultantes resumidas en la tabla 5 como se muestra en la figura 28.

Figura 28

Distribución de fuerza de la base magnética

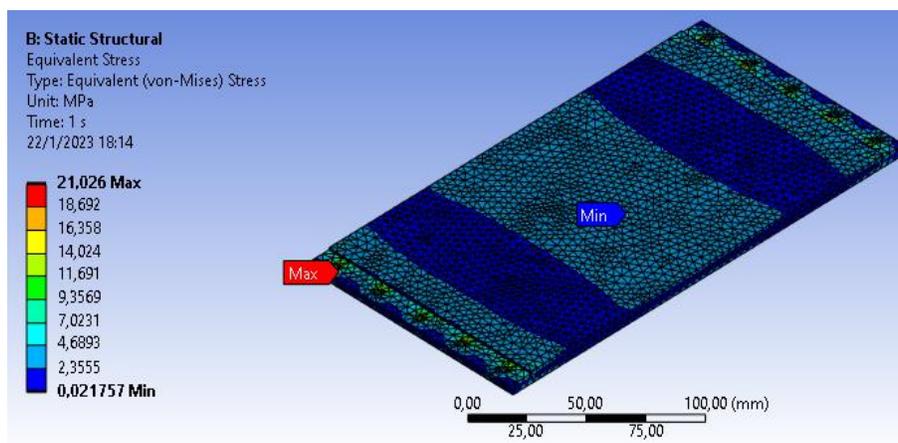


Nota. Mediante el un software CAE se procede a colocar los puntos fijos y fuerzas que actúan sobre la estructura.

Mediante un software CAE se obtiene la energía de distorsión elástica máxima, usando la barra de colores como un indicador del punto máximo y mínimo de la simulación, siendo 21.026 MPa el valor máximo como se indica en la figura 29.

Figura 29

Criterio de Von Mises de la base magnética

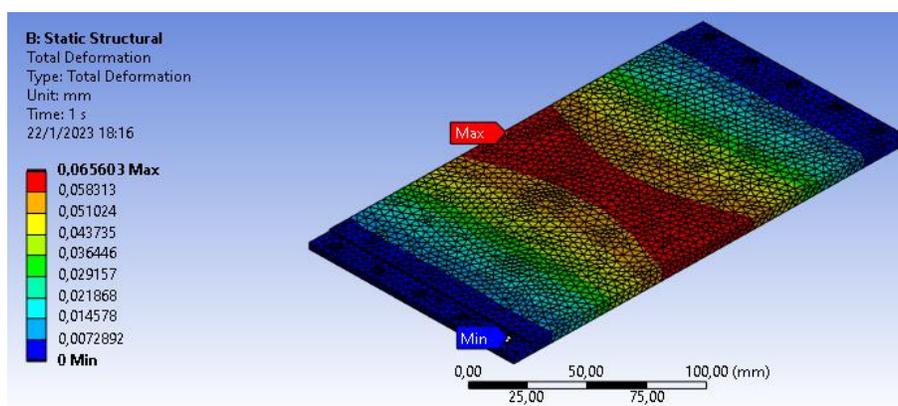


Nota. En la imagen se muestra los resultados del análisis de Von Mises

Deformación máxima. En la figura 30 se muestra el resultado del estudio, dando el valor máximo y mínimo de deformación el cual va de un rango de 0 a 0.065 mm. Siendo una barra de colores un indicador del punto máximo y mínimo de deformación y los puntos en donde se dará la deformación máxima en donde el color rojo será indicador de esto.

Figura 30

Deformación de la base magnética

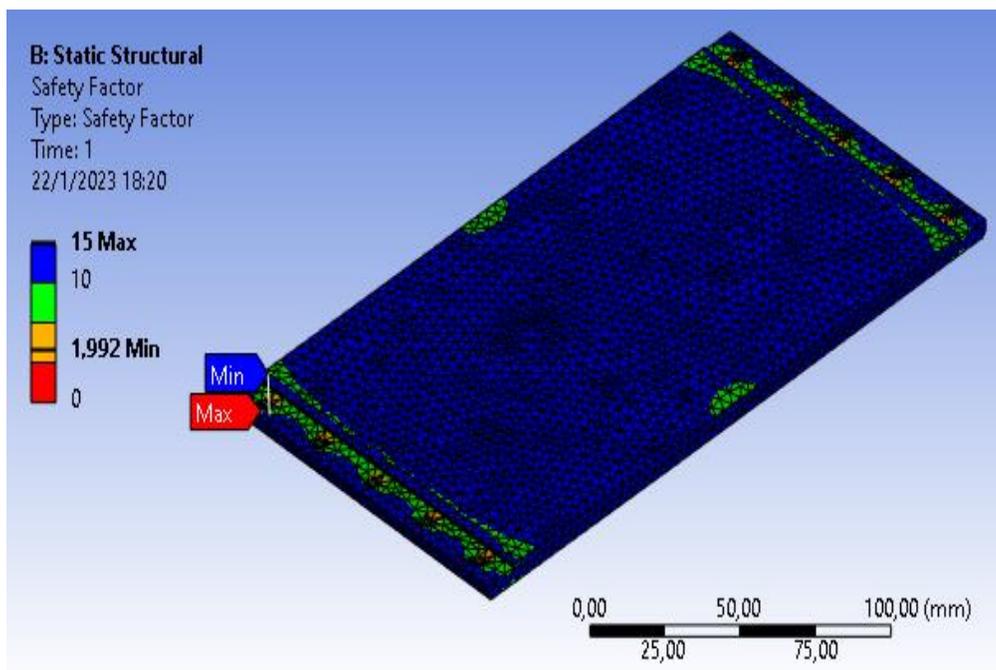


Nota. Los resultados de deformación máxima se observan en la figura

Factor de seguridad. En la figura 31 se observa el análisis del factor de seguridad.

Figura 31

Factor de seguridad de base magnética



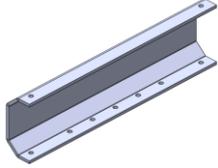
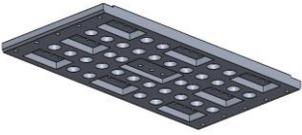
Nota. El factor de seguridad debe ser mayor a 1 para que la estructura sea segura para cumplir con la función para la que está diseñada

Como resultado del análisis CAE obtenemos un valor de 1.992 de factor de seguridad.

Resultados del estudio CAE

Por medio del análisis estático realizado en el software CAE con las propiedades mecánicas y físicas resultantes del aluminio. Se compara los valores de tensión, elasticidad y factor de seguridad con los valores resultantes, con las tablas de las características mecánicas dadas por el fabricante, descritas en la tabla 7.

Tabla 7*Resultados del análisis CAE*

Componente	Imagen	Tensión de von mises (mpa)	Deformación máxima (mm)	Factor de seguridad
Chasis frontal		24.88	0.0187	1.81
Chasis lateral		13.018	0.0147	2.31
Base magnética		21.026	0.0656	1.99

Nota. En la tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis CAE para la estructura del prototipo.

Selección de componentes electrónico

Para la selección de componentes electrónicos es necesario saber el espacio que se tiene para la ubicación dentro de la plataforma robótica. Así también es necesario el dimensionamiento de varios de ellos.

Motores

Para que la plataforma logre el movimiento en vertical se necesita aproximadamente 1.1 N.m resultado obtenido de la ecuación dieciséis y 150 rpm por lo que se busca un motor que tenga un valor superior al mismo como se observa en la tabla 8, esto permite al prototipo desplazarse sin inconvenientes por el silo metálico.

Tabla 8*Matriz de decisión del motor*

Motores	Imagen	Relación de reducción	Alimentación de voltaje dc	Torque	Total
Motorreductor pololu 37dx54l mm 12v 50:1		4	4	4	12
12vdc 152rpm 20.8oz-in ghm-13 spur gear head motor		5	4	5	14
Micro motorreductor 12vdc – 200 rpm (eje de 20mm)		2	4	2	8

Nota. Como se observa en la tabla el motor que presenta mayor torque y una buena caja reductora es el 12vdc 152rpm 20.8oz-in ghm-13 spur gear head motor cuyas características se muestran en la tabla 9.

Tabla 9*Especificaciones del motor*

Relación de engranajes	50:1
Voltaje nominal	12 v
Rpm sin carga	152 rpm
Corriente sin carga	0.155a
Rpm nominales	132
Par nominal	20.83 oz-in
Corriente pico	3.8 a
Par de parada	222 oz-in
Tipo de eje	En forma de d

Nota. En el prototipo se pretende utilizar 4 motores, para tener una mayor tracción. Tomado de (Robotshop, s.f.)

Selección del microcontrolador

Para el controlador se debe escoger un microcontrolador que tenga una comunicación bilateral para poder enviar y recibir datos inalámbricamente, por lo que es necesario que venga incorporada en el microcontrolador

Tabla 10

Matriz de decisión del microcontrolador

Microcontrolador	Imagen	Bajo costo	Comunicación bidireccional	Alcance de transmisión de datos	Total
Esp32 heltec v2		5	5	5	13
Esp8266		3	3	3	10
Arduino nano		2	2	2	9

Nota. La mejor opción para la aplicación se tiene que es el microcontrolador ESP32 HELTEC V2.

En la actualidad existen una gran variedad de microcontroladores como se observa en la tabla 10, dependiendo el uso y la aplicación. Debido a la comunicación bidireccional y de largo alcance se escoge la ESP32 Heltec v2 que viene incluido con LoRa y un display, cuyas características se muestran en la tabla 11, dado que tiene un alcance de 2 km sin interferencias, las aplicaciones son muy diversas ya que estas actúan como un emisor y un receptor a largas distancias.

Tabla 11*Especificaciones del microcontrolador*

ESP32 Heltec V2	
Voltaje de alimentación	Usb 5V, batería 3,7 V
Frecuencia LoRa	915 Mhz
Operación de trabajo en temperaturas	-40°C a 90°C
Wifi	2.4Ghz
Bluetooth	4.2 con BLE
Conector	JST GH 1,25 mm de dos pines para baterías
Interfaces de comunicación	<ul style="list-style-type: none"> • UART x3 • SPI x2 • I2C x2 • I2S x1 • Entrada ADC de 12 bits x18 • Salida DAC de 8 bits x2 • GPIO x28 • GPI x7
Flash	SPI 8MB
SRAM	520 Kb
Pantalla	Oled de 0,96" – 128x64 pixeles
Soporta	Sniffer, estación, softAP y modos directos Wi-Fi
Velocidad de datos	150 Mbps @ 11n HT40, 72 Mbps @ 11n HT20, 54 Mbps @ 11g, 11 Mbps @ 11b
Potencia de transmisión	19,5 dBm @ 11b, 16,5 dBm @ 11g, 15,5 dBm @ 11n
Sensibilidad del receptor	hasta-98 dBm
UDP	continúa aumentando por 135 Mbps

Nota. Para poder controlar el motor se necesita de un driver y debido a la corriente que presentan los motores de 3.8 Amperios cada uno se opta por una sabertooth 2x12 como se muestra en la figura 32, quiere decir que soporta 12 amperios por cada canal donde cada uno estarán conectados dos motores, como se muestran en la tabla 12. Tomado de (EscapeQuotes, 2021)

Tabla 12

Especificaciones de la sabertooth 2x12

SABERTOOTH 2X12	
Corriente continua que soporta por canal	12 a
Corriente pico que soporta por canal	25 a
Continúa aumentando por 135 mbps	Analog, r/c, simplified serial, packetized serial
Tamaño	2.3" x 3" x .7" 59 x 75 x 17 mm

Nota. La sabertooth es un controlador mayormente usado en vehículos que son controlados por radio control. Tomado de (Mybotshop)

Figura 32

Sabertooth 2x12.



Nota. Para controlar el movimiento se prioriza usar un joystick para ir hacia delante y atrás y otro para girar, esto se logra mediante la programación ya que estos son sensores análogos.

Tomado de (Mybotshop)

Selección de la gafa y cámara FPV

En la actualidad existen diferentes tipos de cámaras como son las análogas y las digitales de las cuales se debe tener una imagen de excelente calidad para poder realizar la inspección.

Tabla 13

Matriz de decisión del sistema FPV

Gafas y cámara	Imagen	Resolución	Alcance	Velocidad de transmisión	Total
Análogas	 <p>Sistema FPV análogo para drones de carrera</p> <p>Goggles DJI con un módulo VTX para adaptarla a los VTX</p>	3	4	3	10
Digitales	 <p>Sistema FPV de DJI</p>	5	5	5	15

Nota. Para que la transmisión de datos y la calidad de la imagen sean excelente y en tiempo real, se escoge una cámara digital al igual sus gafas como se muestra en la tabla 13. Consta de transmisión de video conectada a una cámara, además de una transmisión de video en las gafas de 720 p a 120 fps, en la tabla 14 se puede observar las características del sistema FPV.

Tabla 14

Especificaciones del sistema FPV

Sistema fpv	
Transmisión de video de baja latencia y rango máximo de transmisión.	28 ms/ 4 km
Calidad de imagen para las gafas dji fpv.	720 p/120 fps
Se puede visualizar simultáneamente	8 dispositivos
Video grabado por la unidad	1080 p/ 60 fps
Transmisión de baja latencia entre dji fpv rc y dji fpv air unit	7 ms
Control integrado para el dji fpv rc	4-en-1

Nota. El sistema FPV de la marca dji tiene una calidad de imagen suficiente para que el piloto pueda observar las características de la estructura a ser inspeccionada. Tomado de (dji, s.f.)

Batería

Para la batería se opta por una batería LiPo, ya que estas por su reducido peso, tamaño y su eficiencia, esto permite que la plataforma no sea de gran tamaño sino lo necesario para poder desplazarse. Cada batería puede llegar a tener un voltaje máximo de 4.2 por cada celda y el amperaje del mismo la cual mientras sea de mayor amperaje mayor será la autonomía de la misma. Como se observa en la figura 33.

Figura 33

Batería LiPo



Nota. Al estar trabajando con cuatro motores en el prototipo es necesario usar una batería de larga duración, para tener un mayor tiempo de inspección de la estructura. Tomado de (translatorscafe, 2023)

Para estimar el tiempo que el robot puede usarse durante la inspección se la puede determinar mediante una calculadora en línea, en la calculadora de tiempo de duración de la batería se observa en la figura 34 donde ingresando los datos de la batería y el consumo se puede establecer la batería más óptima. La batería debe ser de 3 celdas debido que los motores son de 12 V

Figura 34

Calculadora de tiempo de operación

Número de motores	
N_{motors}	<input type="text" value="4"/>
Corriente máxima por motor	
I_{motor}	<input type="text" value="3.8"/> amperio (A) <input type="button" value="v"/>
Corriente máxima consumida por otros equipos del multicoptero	
I_{other}	<input type="text" value="0.1"/> amperio (A) <input type="button" value="v"/>
Número de serie de células de la batería	
N_{series}	<input type="text" value="3"/> 3S
<input type="radio"/> Tensión nominal de la batería (factor de 3,7 V)	
V_{bat} nominal	<input type="text" value="11.1"/> V
Capacidad de la batería	
Q	<input type="text" value="1450"/> miliamperio-hora (mA·h) <input type="button" value="v"/>
Tasa C de la batería	
C_{rate}	<input type="text" value="75"/>
Regla de descarga de la batería	
DR	<input type="text" value="80"/> %
Carga de vuelo	
L_{flying}	<input type="text" value="30"/> %

Nota. Mediante esta calculadora se podrá determinar el tiempo de duración de la batería con las cargas que posee el circuito. Tomado de (translatorscafe, 2023)

a. Opción 1

Se escoge un modelo de la marca Liperior Pro de 1550mAh, 75C de descarga. Obteniendo una duración de la batería de aproximadamente 19 minutos como se observa en la figura 35.

Figura 35

Resultados de la opción 1

Resultados	
Corriente máxima consumida de la batería a plena carga de vuelo	
$I_{\text{max full load}}$	15,3 A
Corriente consumida de la batería con la carga de vuelo seleccionada	
$I_{\text{flying load}}$	4,59 A
Número necesario de baterías; depende de la tasa C, la corriente total y la capacidad de la batería	
$N_{\text{bat req}}$	1
Tiempo de vuelo previsto	
t_{flight}	18 Min 57 Seg
Tiempo de vuelo previsto, regla del 80%	
La regla del 80% se puede cambiar en el campo Regla de descarga de la batería.	
$t_{\text{flight 80\%}}$	15 Min 10 Seg
Consumo máximo de energía	
W_{max}	169,83 W
Especificaciones del cargador:	
Velocidad de carga de la batería	
I_{charger}	1,45 A
Potencia del cargador requerida	
P_{charger}	21,92 W
Tensión del cargador	
V_{charger}	12,6 V

Nota. Datos de cargas de consumo de energía de la batería. Tomado de (translatorscafe, 2023)

b. Opción 2

se escoge un modelo de la marca Maxamps de 2800mAh, 100 C de descarga. Obteniendo una duración de la batería de aproximadamente 36 minutos como se observa en la figura 36.

Figura 36

Resultados de la opción 2

Resultados

Corriente máxima consumida de la batería a plena carga de vuelo

$I_{\text{max full load}}$ A

Corriente consumida de la batería con la carga de vuelo seleccionada

$I_{\text{flying load}}$ A

Número necesario de baterías; depende de la tasa C, la corriente total y la capacidad de la batería

$N_{\text{bat req}}$

Tiempo de vuelo previsto

t_{flight}

Tiempo de vuelo previsto, regla del 80%
La regla del 80% se puede cambiar en el campo **Regla de descarga de la batería.**

$t_{\text{flight 80\%}}$

Consumo máximo de energía

W_{max} W

Especificaciones del cargador:

Velocidad de carga de la batería

I_{charger} A

Potencia del cargador requerida

P_{charger} W

Tensión del cargador

V_{charger} V

Nota. Datos de cargas de consumo de energía de la batería. Tomado de (translatorscafe, 2023)

c. Opción 3

se escoge un modelo de la marca Liperior Pro de 2200mAh, 35C de descarga.

Obteniendo una duración de la batería de aproximadamente 28 minutos como se observa en la figura 37.

Figura 37

Resultados de la opción 3

Resultados

Corriente máxima consumida de la batería a plena carga de vuelo

$I_{\text{max full load}}$ A

Corriente consumida de la batería con la carga de vuelo seleccionada

$I_{\text{flying load}}$ A

Número necesario de baterías; depende de la tasa C, la corriente total y la capacidad de la batería

$N_{\text{bat req}}$

Tiempo de vuelo previsto

t_{flight}

Tiempo de vuelo previsto, regla del 80%

La regla del 80% se puede cambiar en el campo **Regla de descarga de la batería.**

$t_{\text{flight 80\%}}$

Consumo máximo de energía

W_{max} W

Especificaciones del cargador:

Velocidad de carga de la batería

I_{charger} A

Potencia del cargador requerida

P_{charger} W

Tensión del cargador

V_{charger} V

Nota. Datos de cargas de consumo de energía de la batería. Tomado de (translatorscafe, 2023)

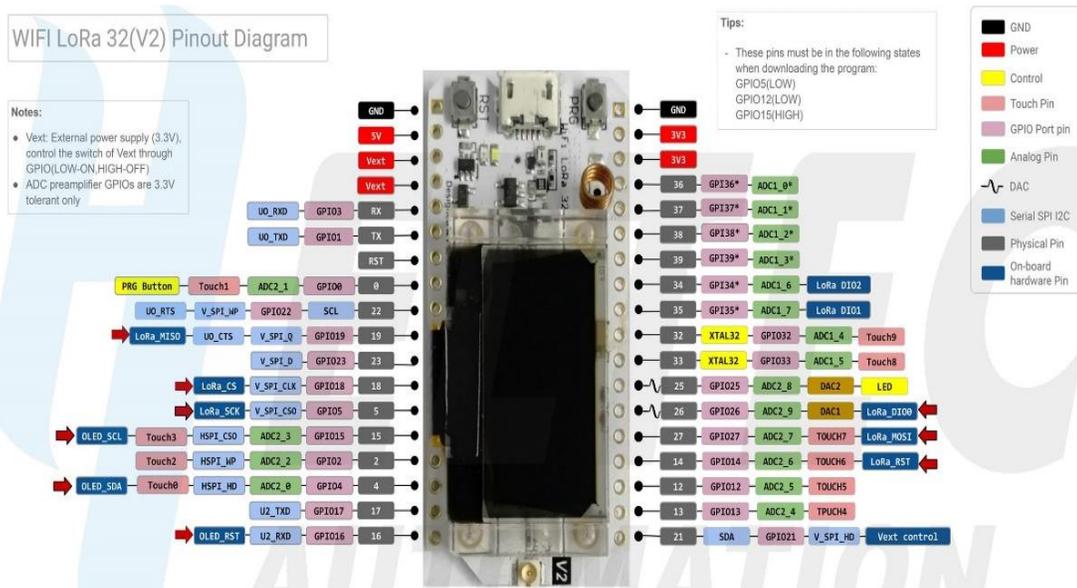
Se optó por la opción dos que presenta una autonomía o duración de la batería de 36 minutos lo que será suficiente para la inspección de un grupo de silos.

Diseño electrónico

Para el diseño electrónico se debe tener en cuenta los pines necesarios, identificar cuáles son los pines que habilitan el display y cuales habilitan los del LoRa. Como se muestra en la Figura 38

Figura 38

ESP32 Heltec v2



Nota. En la figura se muestra la distribución de las salidas y entradas analógicas y digitales que posee una ESP32 Heltec. Tomado de (EscapeQuotes, 2021)

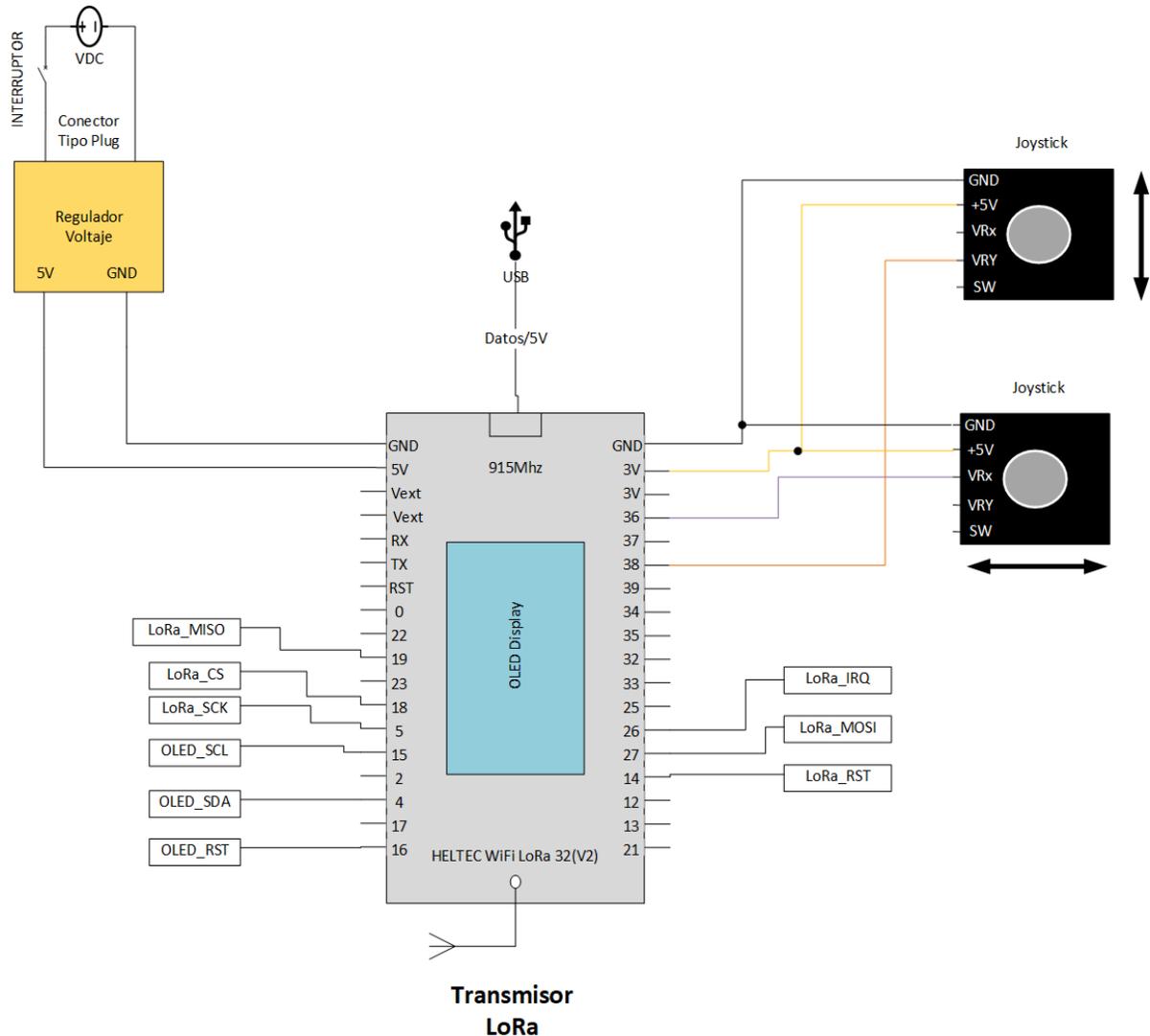
Emisor

El emisor consta de dos Joystick los cuales mandan una señal analógica a la ESP32, el primer joystick enviara la señal para que el prototipo se pueda desplazar hacia delante y hacia atrás, el segundo para que se desplace hacia la derecha o la izquierda.

La distribución y la conexión de cada uno de los pines se puede visualizar en la figura 39 además de los pines habilitados internamente con la programación para el LoRa y el display.

Figura 39

Diseño electrónico del transmisor



Nota. El control remoto está compuesto de 2 joystick para mover el prototipo hacia la izquierda y derecha, arriba y abajo. Fuente autor

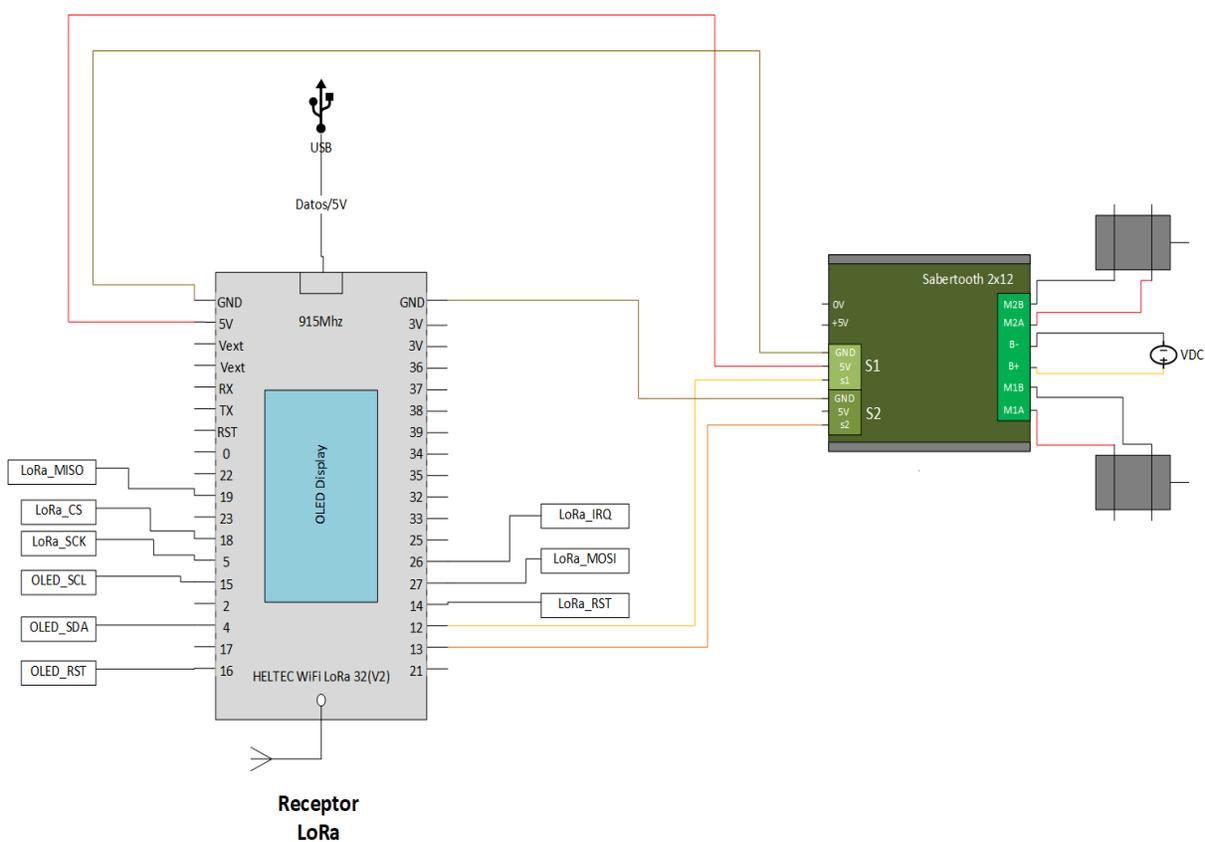
Receptor

El receptor consta de 4 motores y un driver (sabertooth), los motores derechos van conectado al canal 1 del driver y los dos izquierdos al canal 2 del mismo. Alimentamos el driver

con una batería externa mayor a 12 V y mediante los canales alimentamos la ESP32, y de la misma saldrá la señal PWM para el driver como se puede visualizar en la figura 40. Donde habilitamos los pines internamente conectados del LoRa y el display mediante la programación.

Figura 40

Diseño electrónico del receptor



Nota. El receptor tiene un retraso de recepción del dato enviado del emisor de 2 segundos.

Programación

Para la programación se debe tener en cuenta las librerías que son muy importantes para poder cargar el programa en el microcontrolador. La ESP32 puede trabajar con el IDE de

arduino, lo que hace que la programación se la puede desarrollar sin problema al ser un software libre.

Emisor

Para desarrollar la programación del Emisor hay que verificar que tipo de señal manda el sensor para definir el PIN dentro de la misma y asignar su respectiva variable la cual se enviara los datos al receptor por medio de las funciones.

```
//Librerias
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#define OFF 0
#define ON 1

// SPI LoRa Radio
#define LORA_SCK 5
#define LORA_MISO 19
#define LORA_MOSI 27
#define LORA_CS 18
#define LORA_RST 14
#define LORA_IRQ 26

// I2C OLED Display trabaja con el driver SSD1306
#define OLED_SDA 4
#define OLED_SCL 15
#define OLED_RST 16
```

```
// configuración de la pantalla
U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_SW_I2C Display(U8G2_R0, /* clock=*/ OLED_SCL, /*
data=*/ OLED_SDA, /* reset=*/ OLED_RST); // Full framebuffer, SW I2C

//const int blueLED = LED_BUILTIN;

//Definir pines del sensor
const byte AxisX = 36;
const byte AxisY=38;

//variables generales
String outgoing;
byte id = 10;
byte localAddress = 0xAA;
byte destination = 0xAB;
unsigned long lastSendTime = 0;
const long interval = 1;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Sender");

  Display.begin();
```

```
Display.enableUTF8Print();
Display.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);

// Habilitar pines SPI
SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS); //Habilita Comunicacion SPI

// configuración de pines de LoRa
LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ); //Inicializa comunicacion con modulo LoRa

//Configuracion de pines
pinMode(AxisX, INPUT); // Lectura sensor UV
pinMode(AxisY, INPUT); //Lectura referencia sensor UV

if (!LoRa.begin(915E6)) {
  Serial.println("Starting LoRa failed!");
  while (1);
}

// Configurar los rangos de envío y recepción de la misma forma
LoRa.setSpreadingFactor(12);

// cambiar la potencia de transmisión
//LoRa.setTxPower(14, PA_OUTPUT_RFO_PIN);
LoRa.setTxPower(14, PA_OUTPUT_PA_BOOST_PIN);
// delay(1000);
}
```

```
void loop() {  
  if (millis() - lastSendTime > interval) {  
    function_all();  
    lastSendTime = millis(); // timestamp the message  
  }  
}  
  
//Funciones  
void function_all(){  
  
  //Inicio de rutina  
  //Lecturas  
  unsigned int AxisXValue = analogRead(AxisX);  
  unsigned int AxisYValue = analogRead(AxisY);  
  AxisXValue=map(AxisXValue,0,4095,0,512); //Dato para enviar  
  AxisYValue=map(AxisYValue,0,4095,0,512); //Dato para enviar  
  
  // enviar datos  
  // digitalWrite(blueLED, ON);  
  String message = String(AxisXValue)+","+String(AxisYValue);  
  sendMessage(message);  
  Serial.println("Sending " + message);  
  //Adelante  
  String estado="";  
  if (AxisXValue<=230){  
    estado="ADELANTE";
```

```
}  
  
//Atras  
if (AxisXValue>=240){  
    estado="ATRAS";  
}  
  
//Derecha  
if (AxisYValue<=225){  
    estado="DERECHA";  
}  
  
//Izquierda  
if (AxisYValue>=235){  
    estado="IZQUIERDA";  
}  
  
//Stop  
if ((AxisXValue>230&&AxisXValue<240)&&(AxisYValue>225&&AxisYValue<235)){  
    estado="STOP";  
}  
  
// información presentada en el display.  
Display.clearBuffer();  
Display.setCursor(0,15); Display.print("----- Transmisor -----");  
Display.setCursor(0,30); Display.print("Estado: " + estado); // ASCII+alt=°  
Display.setCursor(0,45); Display.print("EjeX: " + String(AxisXValue));  
Display.setCursor(0,60); Display.print("EjeY: " + String(AxisYValue));  
Display.sendBuffer();  
  
// digitalWrite(blueLED, OFF);
```

```

}

//Función para enviar datos por medio del protocolo LoRa
void sendMessage(String outgoing) {
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.write(destination);
    LoRa.write(localAddress);
    LoRa.write(id);
    LoRa.write(outgoing.length());
    LoRa.print(outgoing);
    LoRa.endPacket();
}

```

Receptor

Para la recepción de datos hay que configurar el SPI de los dos módulos en una misma configuración. De igual forma hay que definir las librerías necesarias y definir las variables ya que este es el que recibe los datos enviados desde el otro microcontrolador, este permitirá el control de los motores con el driver sabertooth.

```

//Librerias
#include <SoftwareSerial.h>
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Separador.h>
#include <ESP32Servo.h>

//Variable para separar los datos
Separador dataLoRa;

```

```
#define OFF 0

#define ON 1

// SPI LoRa Radio

#define LORA_SCK 5 // GPIO5 - SX1276 SCK

#define LORA_MISO 19 // GPIO19 - SX1276 MISO

#define LORA_MOSI 27 // GPIO27 - SX1276 MOSI

#define LORA_CS 18 // GPIO18 - SX1276 CS

#define LORA_RST 14 // GPIO14 - SX1276 RST

#define LORA_IRQ 26 // GPIO26 - SX1276 IRQ (respuesta de interrupcion)

// I2C OLED Display, trabaja con driver SSD1306

#define OLED_SDA 4

#define OLED_SCL 15

#define OLED_RST 16

// configuración de la pantalla

U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_SW_I2C Display(U8G2_R0, /* clock=*/ OLED_SCL, /*
data=*/ OLED_SDA, /* reset=*/ OLED_RST);

//definir pines

const int PinPWMS1 = 12;

const int PinPWMS2 = 13;

//const int blueLED = LED_BUILTIN;

//Variables globales
```

```
unsigned int MotorPWM1=235;
unsigned int MotorPWM2=230;
String estado="";
byte id = 11;
byte localAddress = 0xAB;
unsigned long lastSendTime = 0;
const long interval = 1;

//Declaramos los motores a controlar
Servo ST1, ST2;

//Funcion void
void setup() {

    Serial.begin(9600);
    // asignación de temporizadores
    //ESP32PWM::allocateTimer(0);
    //ESP32PWM::allocateTimer(1);
    //ESP32PWM::allocateTimer(2);
    //ESP32PWM::allocateTimer(3);
    //ST1.setPeriodHertz(50);
    //ST2.setPeriodHertz(50);
    ST1.attach(PinPWMS1,1000,2000);
    ST2.attach(PinPWMS2,1000,2000);

    Serial.println("LoRa Receiver");
```

```
Display.begin();

Display.enableUTF8Print();

Display.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr); // Seteo el tamaño de fuente

// Configuración SPI

SPI.begin(LORA_SCK, LORA_MISO, LORA_MOSI, LORA_CS);

// Configurar pines del LoRa

LoRa.setPins(LORA_CS, LORA_RST, LORA_IRQ);

//pinMode(blueLED, OUTPUT);

if (!LoRa.begin(915E6)) {
  Serial.println("Starting LoRa failed!");
  while (1);
}

// Configurar el envío y recepción de datos de la misma manera

LoRa.setSpreadingFactor(12);

//LoRa.setSignalBandwidth(500E3);

}

//Funcion Loop

void loop() {
```

```

//El programa se ejecuta de forma cíclica
if (millis() - lastSendTime > interval) {
    // Analisa el paquete de datos
    onReceive(LoRa.parsePacket());

    //Logica de control

    //Sabertooth: 90(Apagado Salida motores)

    //    90 a 180 (Gira motores en sentido horario), siendo 180 máximo
    //    90 a 0 (Gira motores en sentidoAntihorario), siendo 0 máximo

    //Calibración

    const int zeroSabertooth=90;

    const int maxSabertoothDir1=180;

    const int maxSabertoothDir2=31;

    //Adelante

    if (MotorPWM1<=230){
        estado="ADELANTE";

        int pos=map(MotorPWM1,230,0,zeroSabertooth,maxSabertoothDir1);

        ST1.attach(PinPWMS1,1000,2000);

        ST2.attach(PinPWMS2,1000,2000);

        ST1.write(pos);           // Establece la posición del motor con el valor escalado

        ST2.write(pos);

        Serial.println("ServoAdelante:"+String(pos));

        delay(10);
    }

    //Atras

    if (MotorPWM1>=240){
        estado="ATRAS";
    }
}

```

```
int pos=map(MotorPWM1,240,512,zeroSabertooth,maxSabertoothDir2);

  ST1.attach(PinPWMS1, 1000, 2000);

  ST2.attach(PinPWMS2, 1000, 2000);

  ST1.write(pos);

  ST2.write(pos);

  Serial.println("ServoAtras:"+String(pos));

  delay(10);

}

//Derecha

if (MotorPWM2<=225){

  estado="DERECHA";

  int pos=map(MotorPWM2,225,0,zeroSabertooth,maxSabertoothDir1);

  ST1.attach(PinPWMS1,1000,2000);

  ST2.attach(PinPWMS2,1000,2000);

  ST1.write(pos);

  ST2.write(90);

  Serial.println("ServoDerecha:"+String(pos));

  delay(10);

}

//Izquierda

if (MotorPWM2>=235){

  estado="IZQUIERDA";

  int pos=map(MotorPWM2,235,512,90,0);

  ST1.attach(PinPWMS1,1000,2000);

  ST2.attach(PinPWMS2,1000,2000);
```

```

    ST1.write(0);
    ST2.write(pos);

    Serial.println("Servolzquierda:"+String(pos));
    delay(10);
}
//Stop
if ((MotorPWM1>230&&MotorPWM1<240)&&(MotorPWM2>225&&MotorPWM2<235)){
    estado="STOP";
    ST1.detach();
    ST2.detach();
    delay(10);
}
delay(100);
lastSendTime = millis();      // timestamp the message
}
}

//Funcion para recibir datos de dispositivos LoRa de la Red
void onReceive(int packetSize) {

    if (packetSize == 0) return;

    //digitalWrite(blueLED, ON); // Turn blue LED on
    // read packet header bytes:
    //byte recipient = LoRa.read();

```

```

// byte sender = LoRa.read();
// byte incomingMsgId = LoRa.read();
// byte incomingLength = LoRa.read();

String incoming = "";

while (LoRa.available()) {
    incoming =LoRa.readString();
}
Serial.println(incoming);

// if (incomingLength == incoming.length() && recipient == localAddress && sender == 0xAA) {

    MotorPWM1=(dataLoRa.separa(incoming,',',0)).toInt();
    MotorPWM2=(dataLoRa.separa(incoming,',',1)).toInt();

// }else{
//     Serial.println("error: mensaje no coincide con la longitud y este mensaje no es valido. ");
//     return;
// }

// Display Info
Display.clearBuffer();
Display.setCursor(0,12); Display.print("***Receptor***");
Display.setCursor(0,24); Display.print("Estado: " + estado );

```

```
Display.setCursor(0,36); Display.print("EjeX: " + String(MotorPWM1)+ "EjeY: " +  
String(MotorPWM2));  
Display.setCursor(0,48); Display.print("RSSI: " + String(LoRa.packetRssi()));  
Display.setCursor(0,60); Display.print("Snr: " + String(LoRa.packetSnr()));  
Display.sendBuffer();  
  
//digitalWrite(blueLED, OFF);  
  
}
```

Capítulo IV

Construcción y pruebas

Construcción estructural de la plataforma

En la construcción de la estructura de la plataforma móvil se utilizó aluminio 6061-T6 en planchas de 30 x 30 cm con un grosor de 2.5 mm, mediante las medidas obtenidas del plano del ANEXO A, tanto para el corte del chasis frontal, como para el corte del chasis lateral. Para luego proceder al doblado de las mismas, hasta obtener la forma del modelo CAD, como se observa en la figura 41.

Figura 41

Chasis frontal y chasis lateral



Nota. Para una mayor precisión se utiliza corte plasma para la obtención de la estructura.

Para la base de la estructura se cortó con láser una placa de acrílico de 3 mm con un área de 20x20 cm como se muestra en la figura 42.

Figura 42

Base de policarbonato



Nota. Puesto que la base cumple la función de sostener los elementos electrónicos se opta por tomar un material muy ligero como es el policarbonato.

La estructura de la base magnética se mecanizo de un bloque de aluminio de 6061-T6, utilizando una CNC de 3 ejes como se muestra en la figura 43. La cual consta de tres partes como se muestra en la figura 44. Siendo la parte base en donde se colocará los imanes de neodimio, por ende, esta tendrá que soportar la fuerza magnética necesaria para que el prototipo permanezca adherido al cilindro del silo, sin riesgo a desprenderse.

Figura 43

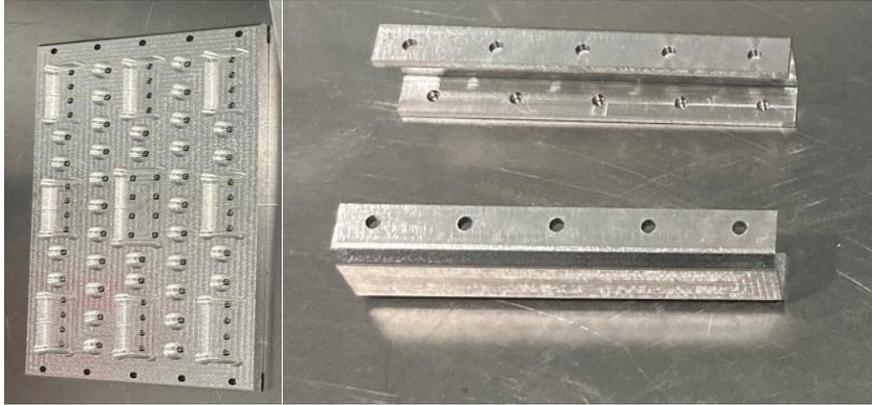
Maquinado CNC



Nota. Se utiliza mecanizado CNC por la precisión que nos brinda.

Figura 44

Piezas mecanizadas



Nota. Las piezas que forman parte de base magnética posee una hendidura la cual servirá para poder nivelarla al nivel del piso.

Ensamblaje

Después de haber obtenido las piezas frontal, trasera, lateral derecho y izquierdo, procedemos a ensamblar utilizando pernos M3x10 mm como se observa en la figura 45.

Figura 45

Ensamblaje del chasis frontal y lateral



Nota. En la figura se muestra la forma final de la estructura de la plataforma móvil.

Procedemos a colocar la base inferior en la estructura, además fijamos los motores CC de 12 V a 152 rpm a las partes laterales del prototipo, como se ve en la figura 46. Siendo necesarios 4 motores instalados en el prototipo para así poder ejercer el torque necesario para mover el mismo.

Figura 46

Ensamble de la base y los motores a la estructura



Nota. En la figura se muestra la posición y ensamblado de los motores a la estructura

Ensamblamos las partes de la base magnética con la estructura con los imanes ya acoplados para que se adhiera a la superficie cilíndrica del silo, ver la figura 47.

Figura 47

Ensamble de la base magnética



Nota. La base magnética está sobredimensionada con respecto a la cantidad de imanes a colocar, por lo que no se utilizaron todos los espacios mecanizados.

Para el ensamble de las ruedas se tienen que acoplar cada una de las piezas mostradas en la figura 48. Una vez armada la rueda se puede apreciar en la figura 49, las mismas que tiene un acople con un prisionero para adaptar al motor.

Figura 48

Piezas de la rueda



Nota. las ruedas se componen de 3 piezas principales las cuales son 2 caras para la rueda y de dientes que se acoplaran a la llanta tipo oruga.

Figura 49

Rueda ensamblada

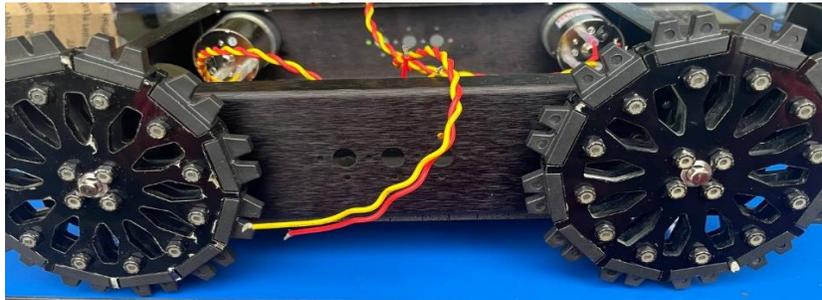


Nota. En la figura se presenta la forma final de las ruedas que se utilizarán en el prototipo.

Una vez ensamblada la rueda se acopla a cada motor, deben estar alineados para que la llanta no afecte el movimiento del prototipo.

Figura 50

Montaje de la Rueda

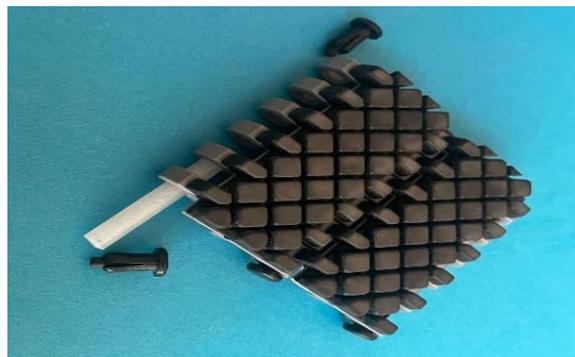


Nota. la rueda posee un prisionero que será el encargado de acoplar el eje a la rueda.

Procedemos a ensamblar las llantas como se puede apreciar en la figura 54 consta de varias partes desmontables para poder llegar a formar un solo cuerpo como se observa en la figura 55 cuya función es acoplarse a la rueda dentada para transmitir el movimiento de los motores en un solo cuerpo por lado.

Figura 51

Partes de las llantas



Nota. en la figura se muestra un eslabón que forma parte de la llanta de tipo oruga.

Figura 52

Llanta ensamblada



Nota. Forma final de la llanta de tipo oruga.

Para ensamblar la cámara en la estructura se debe diseñar un soporte para la misma cuyo material será de PLA realizado en impresión 3D como se muestra en la figura 53, ya que no estará sometido a un esfuerzo grande ya que la cámara pesa aproximadamente 40 gramos. Una vez impresas las piezas se procede al montaje en la estructura como se puede visualizar en la figura 54.

Figura 53

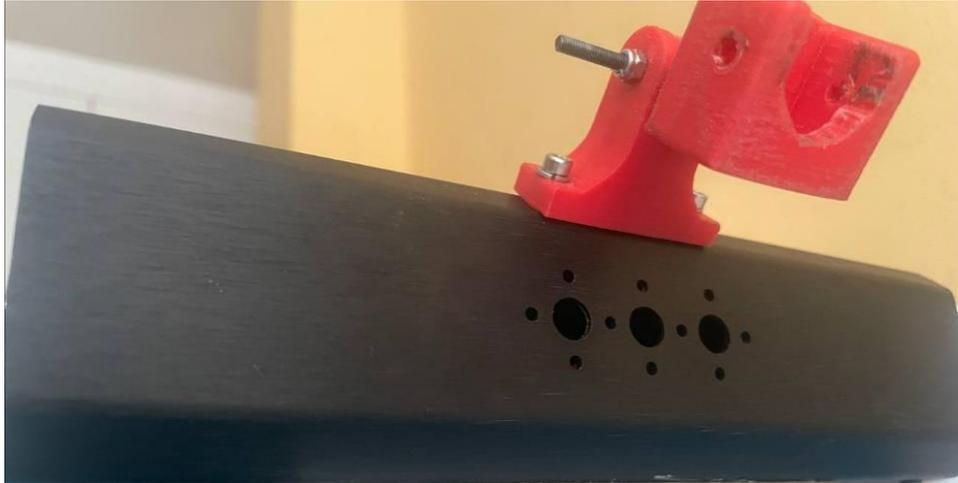
Soporte de la cámara



Nota. Impresión en 3D del soporte de la cámara Fuente autor.

Figura 54

Montado del soporte de la cámara a la estructura



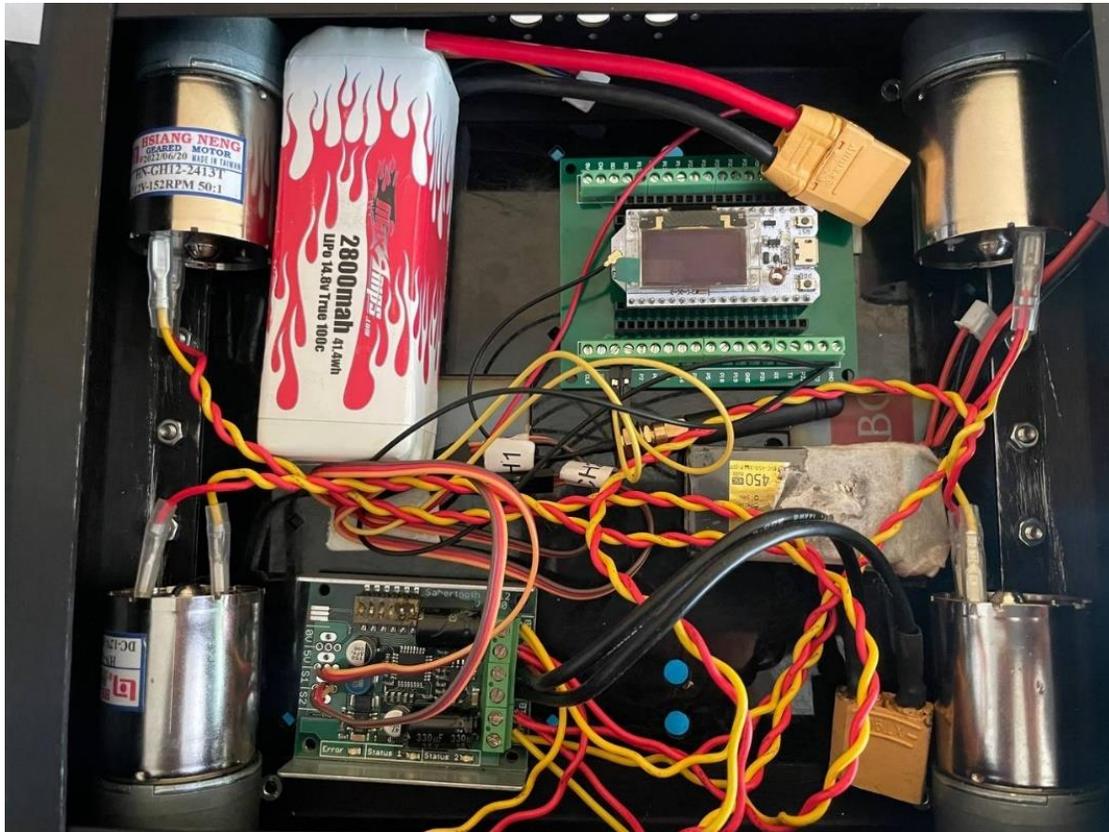
Nota. Soporte de la cámara montada en chasis frontal del prototipo para captar la imagen de la estructura.

Conexión electrónico

Como se muestra en la figura 40 del diseño electrónico se observa las conexiones de cada elemento. Donde la batería alimenta la sabertooth 2x12, esta placa viene incorporada una fuente de 5v en los canales de control de cada motor, se conecta esa entrada de 5v a la ESP32 heltec v2 las mismas cuyas salidas manejan la señal pwm que manda a la sabertooth por medio de los canales de señal del mismo, además que se debe conmutar el negativo de la sabertooth con la ESP32. Una vez realizado el conexionado se puede apreciar en la figura 55.

Figura 55

Conexión electrónico del receptor

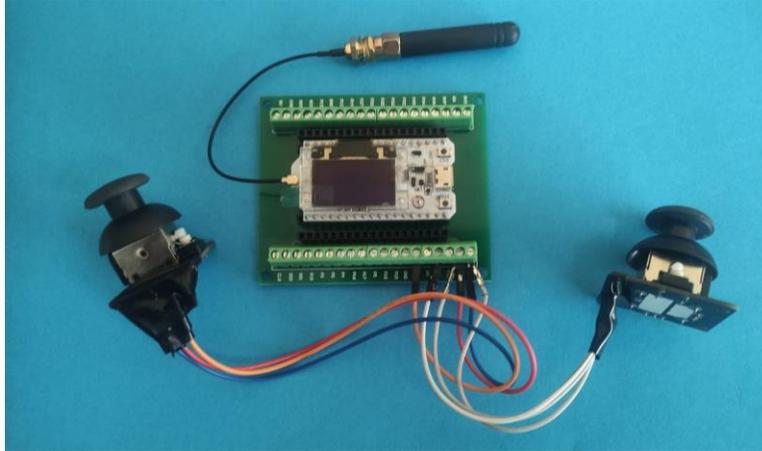


Nota. En la figura se muestra los componentes electrónicos que forman parte del receptor del prototipo.

Como se puede apreciar en la figura 39 del conexionado del emisor se procede con la conexión de los sensores joysticks como se observa en la figura 56, con las entradas analógicas seleccionadas en la programación los cuales enviaran los datos al receptor. La alimentación será externa por un cable v8 conectado a un cargador de 5v o al computador

Figura 56

Conexión del emisor



Nota. ESP32 Heltec utilizado como emisor, haciendo la función de control remoto del prototipo.

Para el conexionado de la cámara, se debe alimentar con una batería de 2s a 8s en el conector rojo que se muestra en la figura 57, una vez conectado se debe emparejar con las gafas FPV que se muestra en la figura 58.

Figura 57

Conexión de la cámara



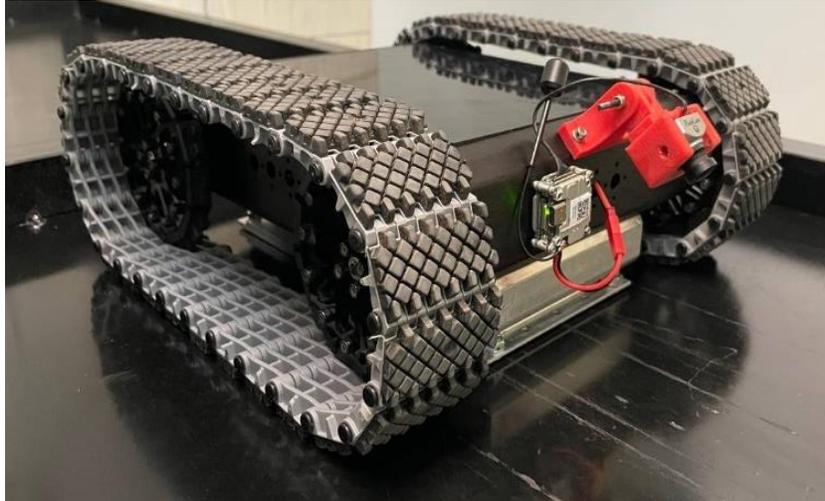
Nota. Cámara FPV utilizada para emisión de imágenes para determinar el estado de la estructura del silo.

Figura 58*Gafas FPV*

Nota. las gafas que el operario tendrá colocadas para poder obtener el video de la inspección del silo.

Plataforma robótica

Una vez ensamblada la estructura y realizado el circuito electrónico, se finaliza con la construcción de la plataforma móvil, la cual se puede apreciar en la figura 59, para así proceder a realizar las pruebas necesarias para comprobar el funcionamiento del mismo. Para identificar la parte frontal de la plataforma móvil, se usará como referencia la cámara, que se utilizará para la inspección del cilindro del silo.

Figura 59*Plataforma Robótica*

Nota. Forma final de la plataforma móvil, lista para ser probada en campo.

Pruebas y resultados

La finalidad de llevar a cabo pruebas de funcionamiento en la plataforma móvil es evaluar el rendimiento del robot en situaciones reales, sometiéndolo a las condiciones normales de trabajo y a las fuerzas a las que está expuesto, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

Adherencia magnética

El tipo de superficie en la cual se va movilizar la plataforma móvil es de tipo rugosa, por lo cual se determina la distancia mínima de separación de la base magnética a la superficie metálica.

Se debe comprobar la fuerza que poseen el conjunto de imanes colocados en la base magnética mediante un proceso el cual se describe a continuación.

Elementos (ver figura 60):

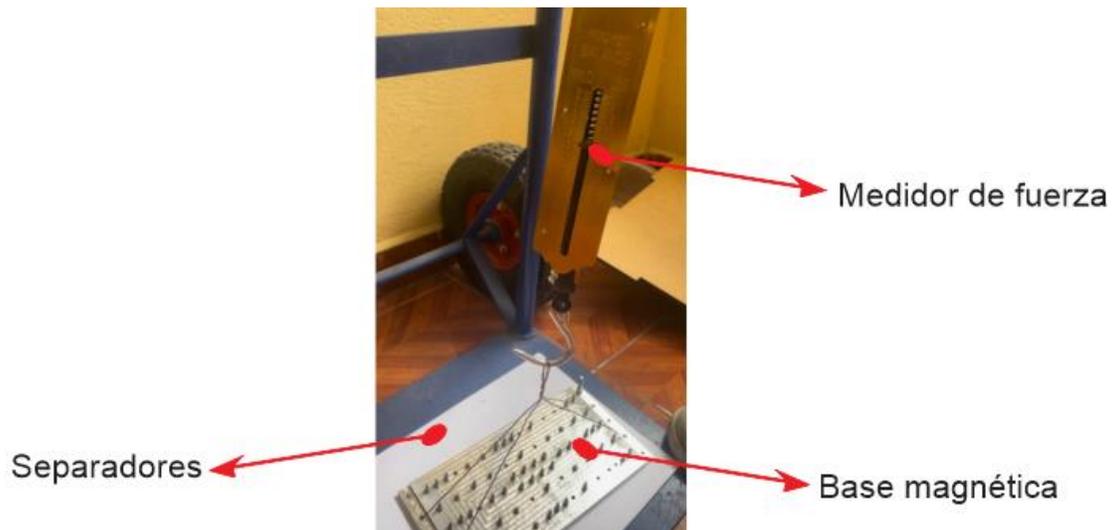
- Base magnética
- Conjunto de imanes
- Una plancha de acero
- Separadores de 0,25 mm de espesor
- Medidor de fuerza.

Proceso:

- 1) Se colocan los imanes en la base mecanizada en los espacios dispuestos para estos.
- 2) Se ajusta la base magnética al medidor de fuerza.
- 3) Se va colocando los separadores para medir la reducción de fuerza.

Figura 60

Prueba de sujeción magnética



Nota. En la figura se puede apreciar el medidor de fuerza, la misma que esta enganchada a la base magnética para verificar la fuerza de sujeción.

Además, se debe mencionar que utilizo 22 imanes rectangulares y 24 tipo anillo de neodimio de tipo N52. Por tanto, se procede a realizar pruebas de distancia, descritas en la tabla 15.

Tabla 15

Prueba de adherencia magnética

Separación (mm)	# De imanes		Fuerza total (N)
	Rectangular	Anillo	
0	22	24	200
0,25	22	24	171
0,5	22	24	157
0,75	22	24	128
1	22	24	114
1,5	22	24	64
2	22	24	53
2,5	22	24	43
3	22	24	29

Nota. Como resultado se puede evidenciar que, a una distancia mayor a 2 mm de separación entre la plataforma móvil y la estructura metálica, no existirá fuerza de atracción magnética suficiente para mantener en equilibrio al robot.

Transmisión de imagen

Se establece la comunicación entre la cámara y las gafas FPV cuya funcionalidad es la transmitir en tiempo real lo que se observa en la cámara digital. Para ello se debe alimentar la

cámara y las gafas con una batería de 5 voltios, deben estar emparejados a la misma frecuencia para no perder la señal en la calidad del video, como se observa en la figura 61. La cámara debe estar ubicada en la parte frontal del prototipo, permitiendo observar la estructura metálica del silo.

Figura 61

Prueba de transmisión de video



Nota. Piloto manejando a la plataforma móvil sobre una superficie en forma vertical.

Usando una cámara RunCam Phoenix se puede visualizar una calidad de video de 720 megapíxeles a 60 fps como se puede observar en la figura 62. Los videos obtenidos serán registrados en una micro SD instalada en las gafas FPV, para el análisis del estado de la estructura cilíndrica del silo.

Figura 62

Visualización de la imagen en tiempo real



Nota. Primeras imágenes transmitidas por la cámara hacia las gafas.

Alcance de comunicación LoRa

Para verificar la comunicación entre el emisor y receptor, se procedió a realizar pruebas de distancia descritas en la tabla 16, utilizando como delimitante el punto en el que la plataforma móvil ya no sea visible para el operario, como se observa en la figura 63.

Figura 63

Prueba de alcance del LoRa



Nota. El pilo se encuentra a una distancia de aproximadamente de 25 metros de separación del prototipo.

Tabla 16*Prueba de funcionamiento del LoRa*

Distancia	Funciona	Observaciones
5	✓	No existe interferencia de comunicación
25	✓	No existe interferencia de comunicación
50	✓	No existe interferencia de comunicación
100	✓	No existe interferencia de comunicación
150	✓	No existe interferencia de comunicación
200	✓	Existe un retardo en la comunicación

Nota. De acuerdo a los resultados de la tabla 16, para el caso de estudio actual no serán necesarios más de 100 metros por las dimensiones de alto y radio del cilindro del silo, además que por las dimensiones del prototipo ya no será visible a esa distancia.

Prueba de seguimiento de ruta

En esta prueba se define una trayectoria vertical sobre una plancha de acero como se muestra en la figura 64G, para la prueba se hace un recorrido tanto de ida y vuelta. Esta prueba se realizó con el fin de verificar la adherencia de la plataforma móvil a la superficie metálica, además de la comprobación de la calidad para desplazarse con la comunicación LoRa.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- El modelo 3D que se realizó en el software CAD, se ajustó a las especificaciones técnicas requeridas (peso, tamaño y motricidad), para que la plataforma móvil se desplace sobre la superficie irregular de los cilindros de los silos por medio del uso de un modelo de llanta de tipo oruga, que es la que mejor se adaptó por el aérea de contacto que posee.
- Se desarrolló un sistema de sujeción magnética, mediante el uso de imanes de neodimio de grado N52, los que permitieron fijar la plataforma móvil a la estructura metálica, en las pruebas se pudo evidenciar que al separar 3 mm la base magnética con la estructura metálica, se comenzó a deslizarse debido al peso del mismo.
- Se desarrolló un control de radio frecuencia con un protocolo de comunicación LoRa, cuya funcionalidad es controlar al robot a largas distancias. La velocidad de procesamiento enviada desde el emisor al receptor no es rápida por lo que el robot tarda 2 segundos en recibir la señal pwm transmitida del receptor a la sabertooth. La misma que afecta el control para desplazarse a una alta velocidad, por lo que se redujo 40 % la velocidad en cada motor.
- La transmisión de video se realizó con una cámara digital la cual envía la imagen en tiempo real a las gafas FPV, donde registramos los videos del estado de la estructura metálica en una micro SD, para así analizarlos en un dispositivo de reproducción como celular, laptop o PC, obteniendo así una inspección más detallada.

Recomendaciones

- Para silos de grado alimenticio se recomienda usar otro tipo de sujeción, ya sea por succión, un sistema de ventosas neumáticas debido que el acero inoxidable no es magnético, por lo que los imanes de neodimio no podrían adherirse y desplazarse sobre ellas.
- Cambiando a un sistema de suspensión con amortiguadores al prototipo, se podría adaptar a superficies que presenten una mayor irregularidad para obtener más tracción en cualquier punto del aérea de contacto.
- Para el sistema mecánico que sujeta la cámara, se puede implementar el uso de servo motores, para que así el piloto pueda controlar la posición de la cámara y tener una mayor área de visualización, de la superficie a la que se está realizando la inspección.

Bibliografía

Aliexpress. (s.f.). *M3 3mm A2 304 Acero inoxidable Allen tornillo hexagonal*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de es.aliexpress.com: <https://es.aliexpress.com/item/4000341453902.html>

Arduino, A. (29 de Febrero de 2016). *Entorno de Programación de Arduino (IDE)*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2022, de aprendiendoarduino.wordpress: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/03/29/entorno-de-programacion-de-arduino-ide/>

Argudo, G., & Adrian, A. (2012). *Diseño y construcción de un robot móvil tele operado para la asistencia en operaciones de alto riesgo del cuerpo de bomberos*. Repositorio digital . Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2424>

Asanza, V. (s.f.). *Especificaciones del módulo ESP32*. Recuperado el 27 de Diciembre de 2022, de vasanza.blogspot.com: <https://vasanza.blogspot.com/2021/07/especificaciones-del-modulo-esp32.html>

AUTOMATION, H. (s.f.). *WiFi LoRa 32 (V2.1) Phaseout*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de <https://heltec.org/>: <https://heltec.org/product/wifi-lora-32-v2/>

Barrientos, V., Garcia, J., & Silva, R. (2007). Robots Móviles: Evolución y estado del arte. *Polibits*(35), 17.

Bohman. (s.f.). *Perno allen cabeza cilindrica clase 12.9-diámetro 6 mm-1.00 unc- pavonado*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de bohman.com.ec: <https://bohman.com.ec/shop/product/perno-allen-cabeza-cilindrica-clase-12-9-diametro-6-mm-1-00-unc-pavonado-48361#attr=25857,25858,25859,25860,25856,25861,25862>

Borja, A. (2021). *Implementación de una red LPWAN para el control de consumo de agua potable utilizando tecnología LoRa*. Repositorio digital. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/25837/1/T-ESPE-044763.pdf>

Cevallos, J. (s.f.). Análisis del estado actual de los silos y recipientes móviles (bulks) de la empresa BJS Services mediante ensayos no destructivos y determinación de zona crítica mediante software de elementos finitos. 2019. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Pichincha, Ecuador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1520/1/CD-2204.pdf>

Davinia, G. (2018). *Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento de un fluido de alta temperatura*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Recuperado el 2023 de Enero de 10

dji. (s.f.). *Reimagine Your FPV World*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de dji: <https://www.dji.com/fpv>

EscapeQuotes. (23 de 02 de 2021). *ESP32 LoRa Heltec v2 with display – pinout diagram*. Recuperado el 05 de 11 de 2022, de <https://escapequotes.net/>: <https://escapequotes.net/esp32-lora-heltec-v2-with-display-pinout-diagram/>

Evolución, F. (24 de Octubre de 2018). *Motor DC*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2022, de <https://www.factor.mx/>: <https://www.factor.mx/portal/base-de-conocimiento/motor-dc/>

García, G. (1987). *Sistema de unidades Físicas*. REVERTÉ S.A.

Guerrera, J. (s.f.). *ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de <https://programarfacil.com/>: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/curso-de-arduino/>

Guillén, D., Galan, B., & Tello, D. (2009). *Estudio, diseño y construcción de una pata para un robot cuadrúpedo escalador*. Repositorio digital . Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/29>

Heredia, A., & Paul, L. (2021). *Diseño e implementación de una red inalámbrica de sensores con tecnología LoRa para monitoreo industrial orientado a OPC de arquitectura unificada*. Repositorio digital . Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/35875/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>

HispaDrones. (01 de Agosto de 2019). *SISTEMA DIGITAL DE FPV DE DJI*. Recuperado el 27 de Diciembre de 2022, de [hispadrones.com](https://www.hispadrones.com/profesionales/componentes/sistema-digital-fpv-dji/): <https://www.hispadrones.com/profesionales/componentes/sistema-digital-fpv-dji/>

Motor, M. (s.f.). *¿Qué es un motor de CC (corriente continua) y como funciona?* Recuperado el 27 de Diciembre de 2022, de [mundodelmotor.net](https://www.mundodelmotor.net/que-es-un-motor-de-cc-corriente-continua-y-como-funciona/): <https://www.mundodelmotor.net/que-es-un-motor-de-cc-corriente-continua-y-como-funciona/>

Mybotshop. (s.f.). *Sabertooth motorcontroller duale 2x12a*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de [mybotshop](https://www.mybotshop.de/Sabertooth-Motorcontroller-Duale-2x12A): <https://www.mybotshop.de/Sabertooth-Motorcontroller-Duale-2x12A>

Ospina, J., BOGOTA, S., (Colombia), S. N., Hernandez, & Jose. (1989). *Manejo y almacenamiento de granos a nivel rural*. Imprenta Nacional, 1989.

Prometec. (s.f.). *Lo que hay que saber para elegir una batería lipo*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de [Prometec](https://www.prometec.net/elegir-bateria-lipo/): <https://www.prometec.net/elegir-bateria-lipo/>

Puerto Riverport, C. (16 de 09 de 2021). *Desplome de silo para almacenamiento de granaos de ja dos fallecidos*. Recuperado el 20 de 07 de 2022, de Mundomaritimo: <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/puerto-riverport-colombia-desplome-de-silo-para-almacenamiento-de-granaos-de-ja-dos-fallecidos>

Robotshop. (s.f.). *Lynxmotion Aluminum A4WD1 MTS 12T Rover Kit*. Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de robotshop: <https://www.robotshop.com/products/lynxmotion-aluminum-a4wd1-mts-12t-rover-kit>

Supermagnete. (s.f.). *¿Cómo se calcula la densidad de flujo magnético?* Recuperado el 30 de Diciembre de 2022, de supermagnete: <https://www.supermagnete.de/eng/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density>

Supermagnete. (s.f.). *¿Qué factores influyen en la fuerza de sujeción y la potencia de un imán?* Recuperado el 28 de Diciembre de 2022, de supermagnete.es: <https://www.supermagnete.es/faq/Que-factores-influyen-en-la-fuerza-de-sujecion-y-la-potencia-de-un-iman>

Villacís, A., & Villalba, D. (2011). *Determinación de los sitios de inspección mediante elementos finitos, elaboración de la inspección con ensayos no destructivos*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Villacís, A., & Villava, D. (2011). *Determinación de los sitios de inspección mediante determinación de los sitios de inspección mediante elementos finitos, elaboración de la inspección con ensayos no destructivos y determinación del procedimiento para la certificación de los silos*. Repositorio digital. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4306/1/CD-3921.pdf>

Anexos