



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.

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

**Trabajo de Titulación Previo a la Obtención del Título
de Ingeniero en Electromecánica**

Autores: Miranda Jara, Cristian Joel
Pujos Alcaciega, Roberto Javier

Tutor: Ing. Arteaga López, Oscar Bladimir

Latacunga 2023



AGENDA



AGENDA



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



Los daños en la estructura de los silos se producen por factores como son: corrosión en el material de la estructura, grietas por limitada inspección de la estructura, fallos en soldadura y uniones mecánica



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.



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.

Objetivos Específicos

- 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.

AGENDA





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. Debido a que la estructura del silo es metálica se puede usar un tipo de sujeción magnética con aproximadamente 50 imanes de neodimio

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

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

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

Metodología Propuesta

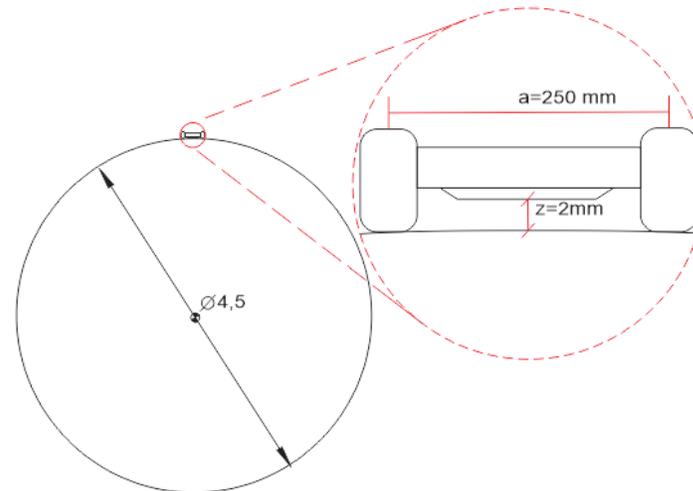
Fuerza portante

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

Metodología Propuesta

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.



Metodología Propuesta

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.

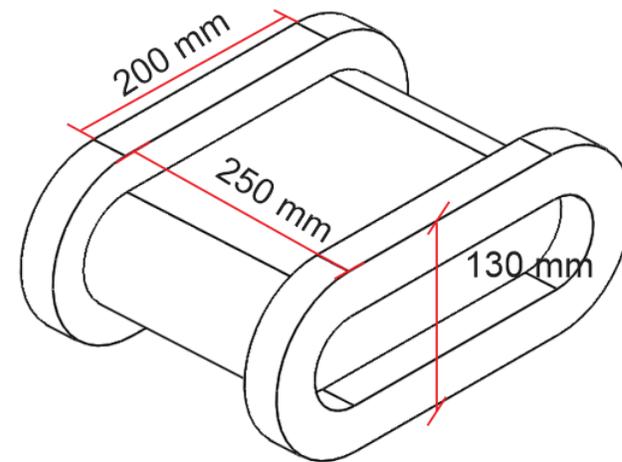
$$v = w * \frac{\phi}{2}$$

$$\phi = \frac{2v}{w}$$

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

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

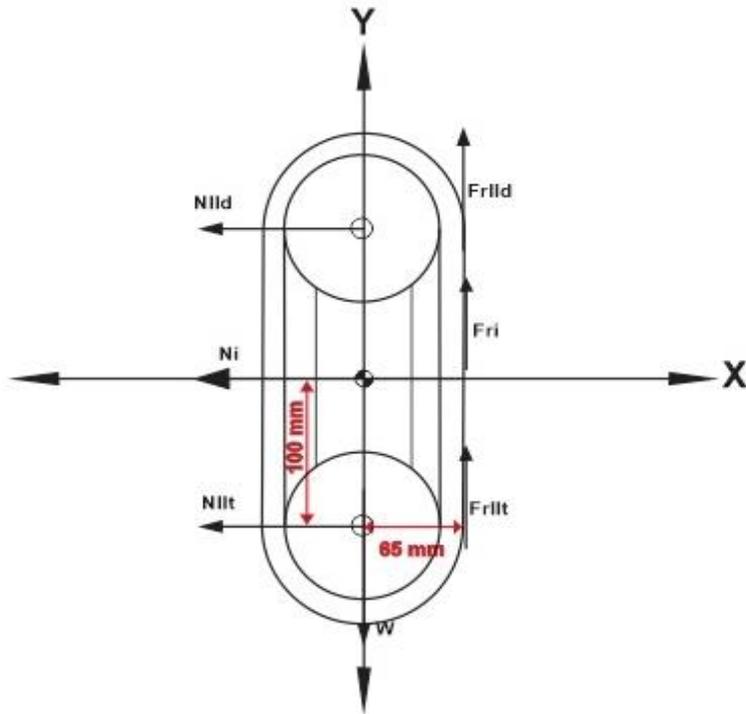
$$\phi \approx 130 \text{ mm}$$



Metodología Propuesta

Análisis estático de cargas

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.



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

$$u_i = 0.74$$

$$u_{ll} = 0.3$$

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

$$F_{rild} = F_{rilt}$$

$$\sum F = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$2F_{rild} + 2F_{rilt} + F_{ri} - W = 0$$

$$4F_{rild} + F_{ri} - W = 0$$

$$F_{rild} = u_{ll} * N_{ild}$$

$$F_{ri} = u_i * N_i$$

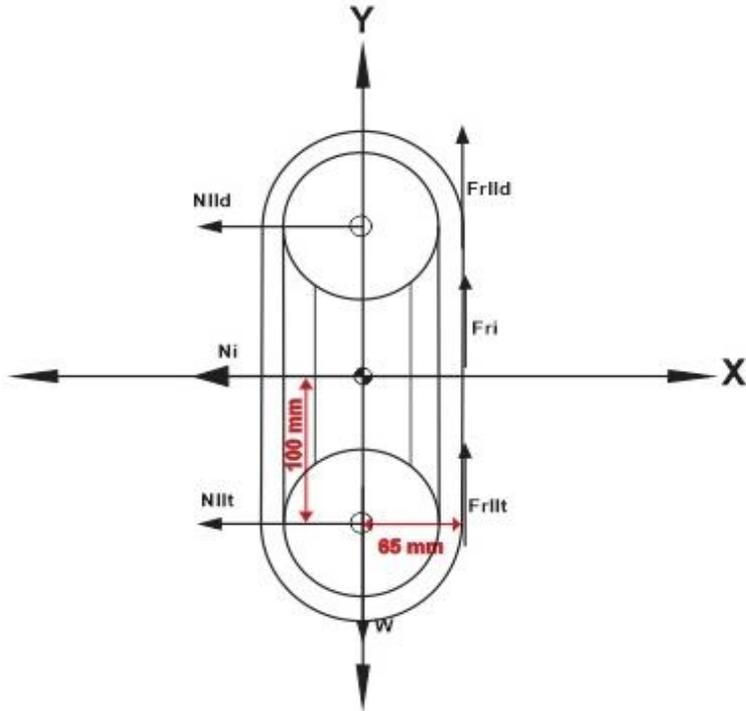
$$4 * u_{ll} * N_{ild} + u_i * N_i - W = 0$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{am} - N_{ild} - N_i - N_{ilt} = 0$$

Metodología Propuesta

Análisis estático de cargas



$$\sum F_x = 0$$

$$F_{am} - N_{l1d} - N_i - N_{l2d} = 0$$

$$F_{am} - 2N_{l1d} - N_i = 0$$

$$\sum M = 0$$

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

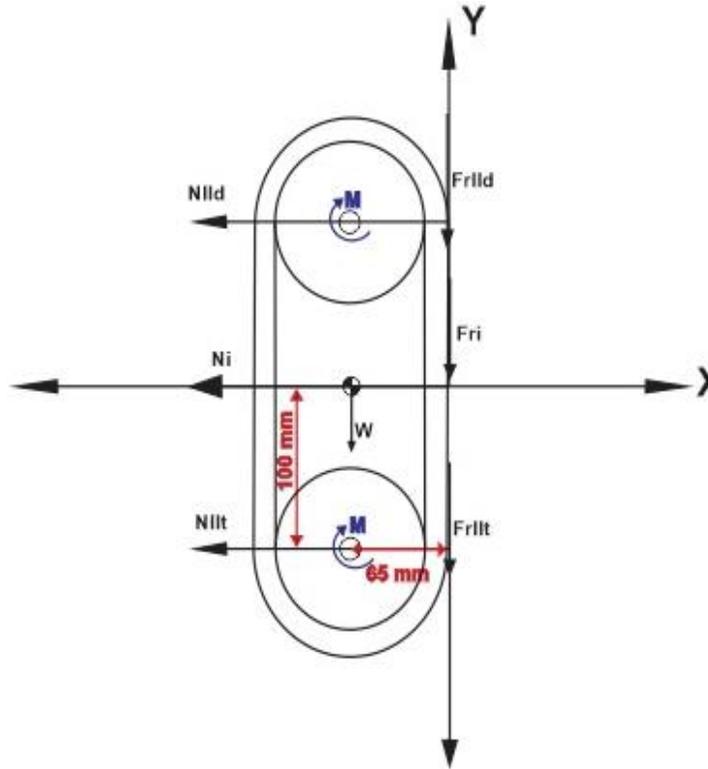
$$N_{l1d} * D_1 + N_{l2d} * D_2 - W * D_3 = 0$$

$$0.2 * N_{l1d} - 0.065 * W = 0$$

Variable	Valor (N)
N_{l1d}	12,88
N_i	30,197
F_{am}	30,197
F_{r1d}	3,87
F_{ri}	22,24
W	31,81

Metodología Propuesta

Análisis dinámico de cargas



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

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

$$\sum F_y = m * a_c$$

$$-2Fr_{ud} - 2Fr_{ut} - Fr_i - W = mc * a_c$$

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

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

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

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

$$F_{am} * d1 - Fr_i * d2 - 2Fr_{ud} * d2 - 4M + N_{ud} * d3 + N_i * d4 = I * \alpha$$

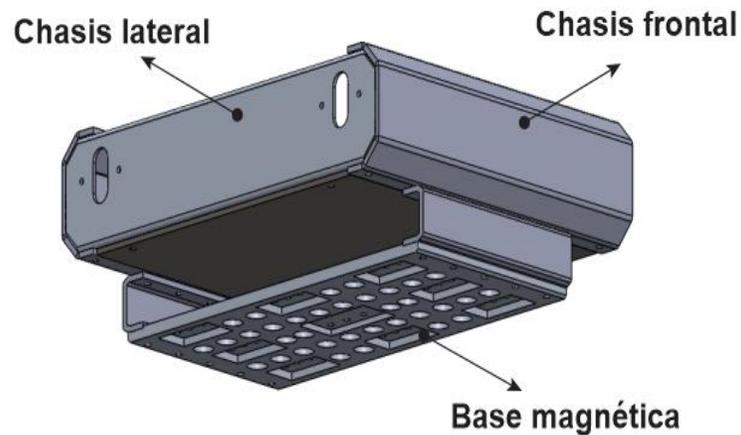
$$M = \frac{F_{am} * d1 - Fr_i * d2 - 2Fr_{ud} * d2 - I * \alpha + N_{ud} * d3 + N_i * d4}{4}$$

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

Metodología Propuesta

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.

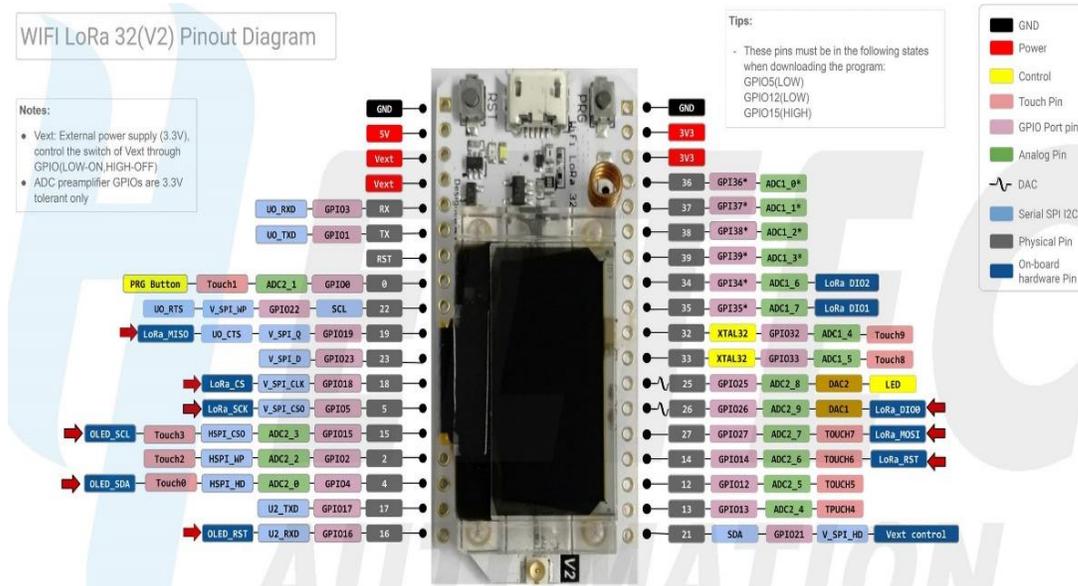


Componente	Imagen	Tensión de von mises (mpa)	Deformación máxima (mm)	Factor de seguridad
Chasis frontal		24.88	0.0187	1.81
Chasis lateral		13.018	0.0147	2.31
Base magnética		21.026	0.0656	1.99

Metodología Propuesta

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.



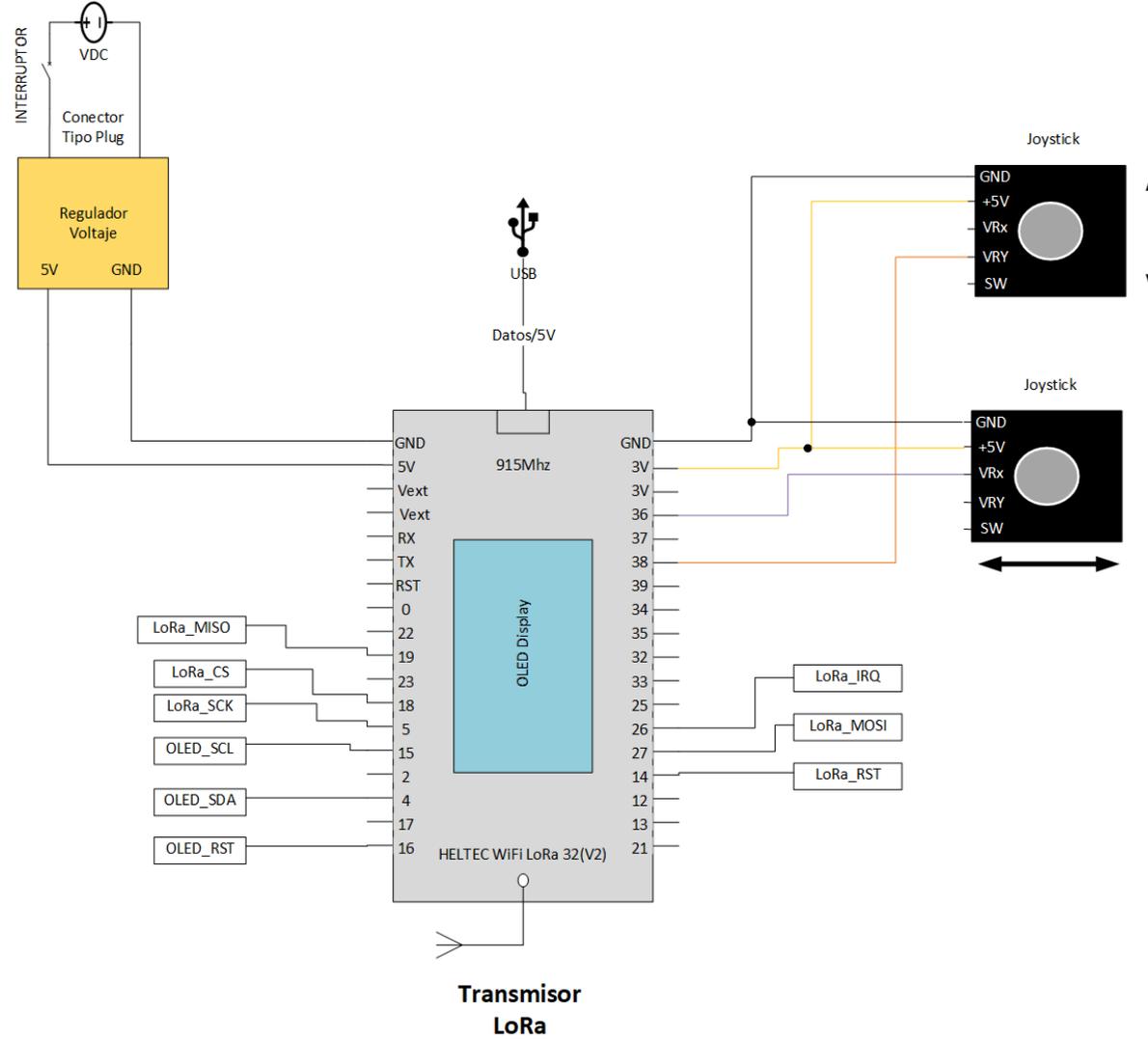
Emisor

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 además de los pines habilitados internamente con la programación para el LoRa y el display.

Metodología Propuesta

Emisor

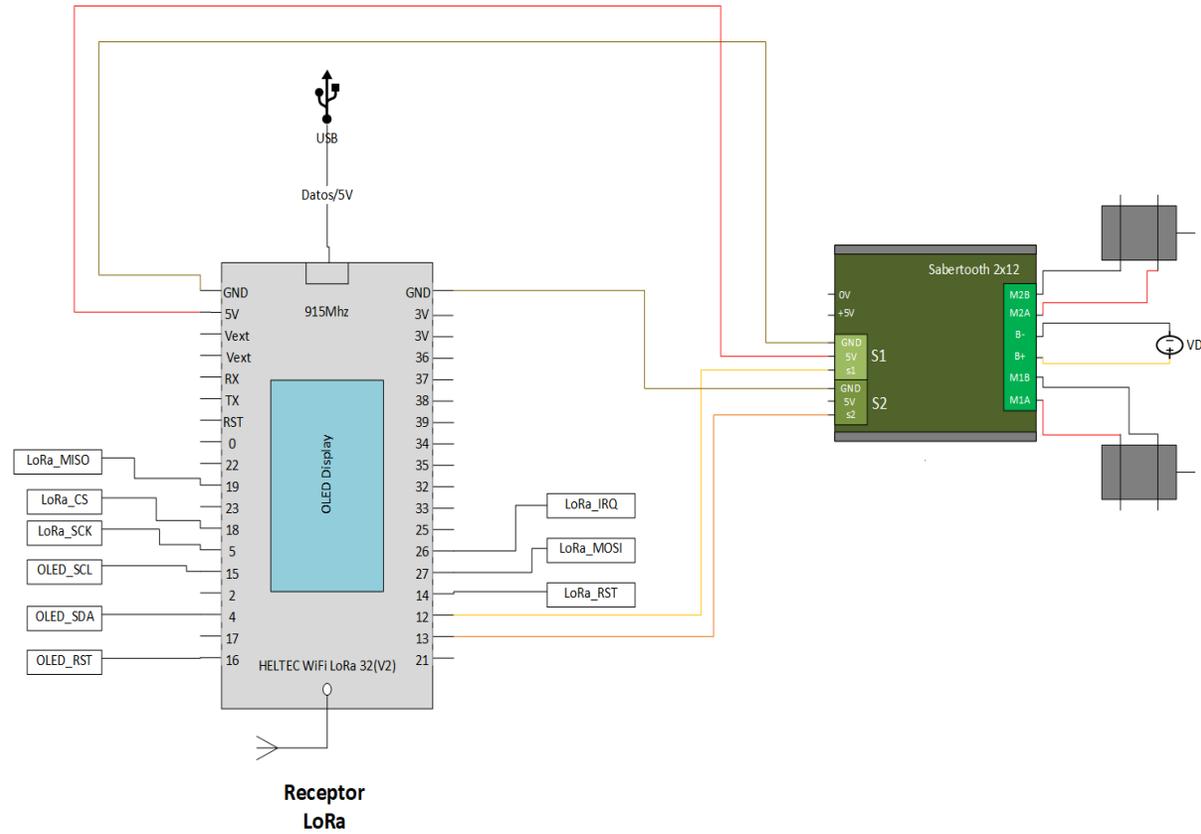


Receptor

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. Donde habilitamos los pines internamente conectados del LoRa y el display mediante la programación.

Metodología Propuesta

Receptor

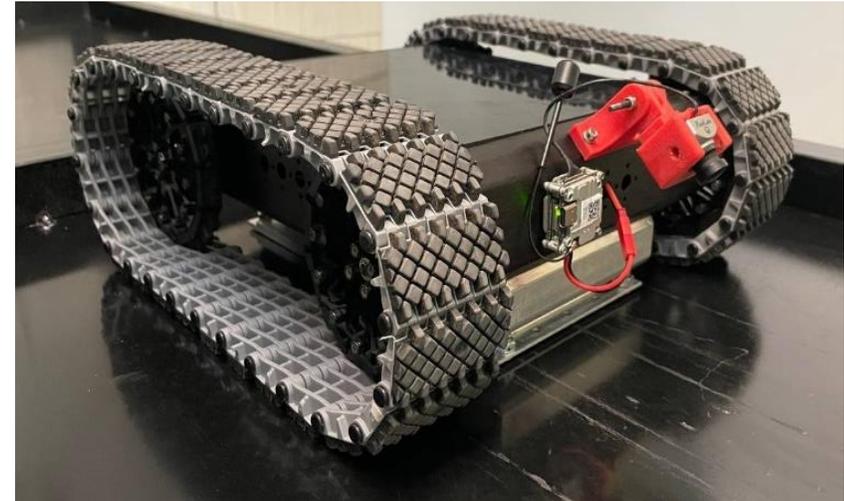


AGENDA



Resultados

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, 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.



Resultados

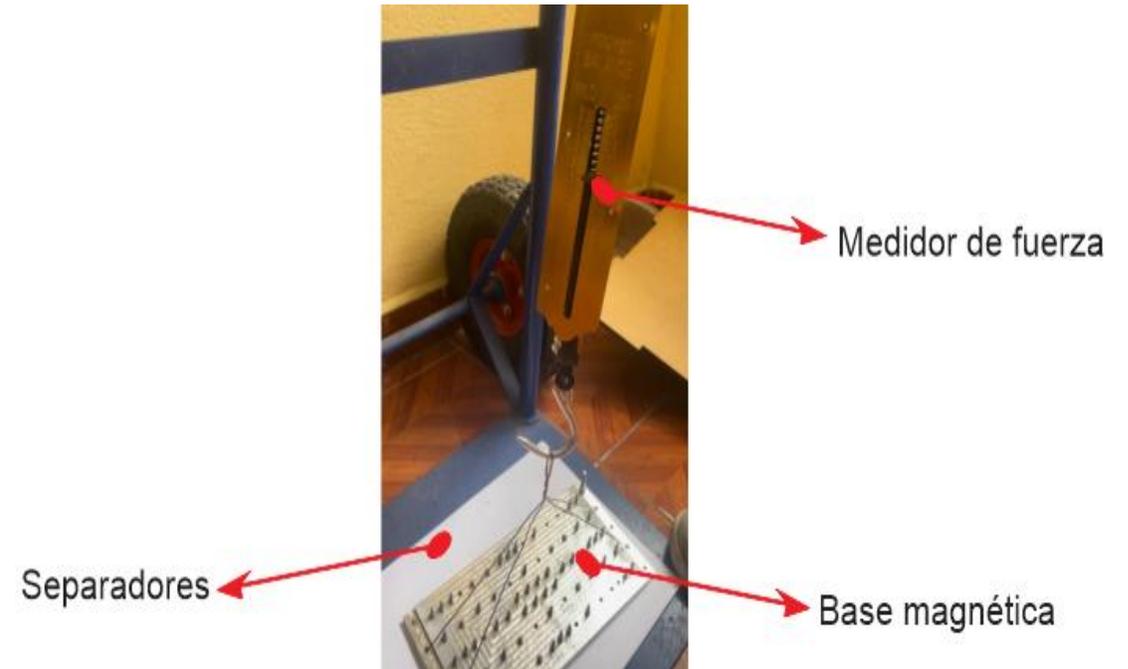
Adherencia magnética

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:

- 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. Se va colocando los separadores para medir la reducción de fuerza



Resultados

Adherencia magnética

Separación (mm)	# De imanes		Fuerza total (N)
	Rectang ular	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

Resultados

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 . La cámara debe estar ubicada en la parte frontal del prototipo, permitiendo observar la estructura metálica del silo.



Resultados

Alcance de comunicación LORA

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

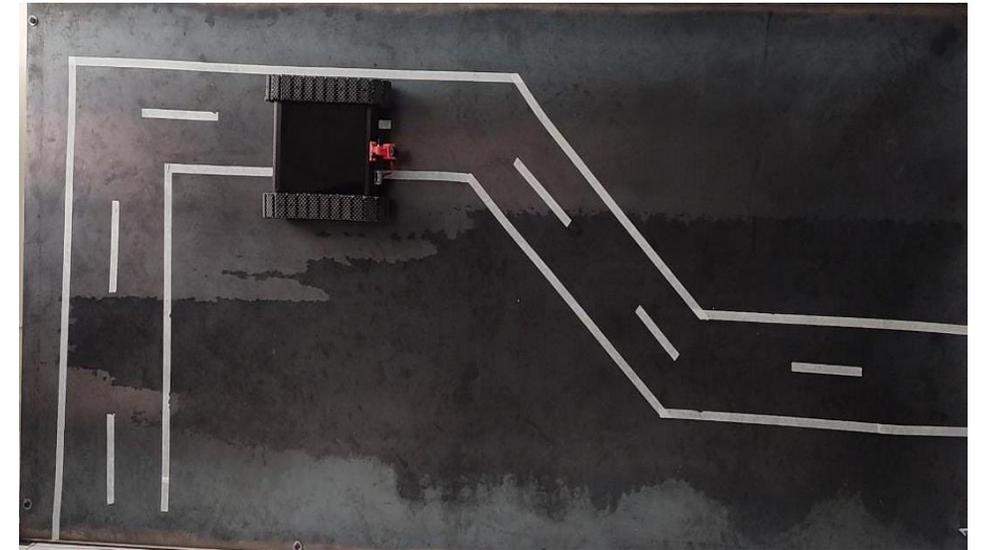


Distancia	Funciona	Observaciones
5	✓	No existe interferencia de comunicación
25	✓	No existe interferencia de comunicación
50	✓	No existe interferencia de comunicación
100	✓	No existe interferencia de comunicación
150	✓	No existe interferencia de comunicación
200	✓	Existe un retardo en la comunicación

Resultados

Prueba de seguimiento de ruta

En esta prueba se define una trayectoria vertical sobre una plancha de acero como se muestra en la figura, 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



AGENDA



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.

Conclusiones

- ❑ 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.

Referencias

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