



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TELEOPERADO PARA
INSPECCIÓN DE TUBERÍAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Carlos Andrés Estrella Macías
Jordy Alberto Quiñónez Muñoz
TUTOR: Ing. Tomás Santiago Gaviláñez Gamboa, MSc.

Guayaquil - Ecuador
2023 - 2024

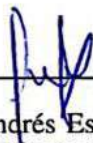
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Carlos Andrés Estrella Macías** con documento de identificación N° **0803296136** y **Jordy Alberto Quiñónez Muñoz** con documento de identificación N° **0953505278**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 07 de marzo del año 2024

Atentamente,



Carlos Andrés Estrella Macías
0803296136



Jordy Alberto Quiñónez Muñoz
0953505278

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Carlos Andrés Estrella Macías** con documento de identificación N° **0803296136** y **Jordy Alberto Quiñónez Muñoz** con documento de identificación N° **0953505278**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TELEOPERADO PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo a final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Guayaquil, 07 de marzo del año 2024

Atentamente,



Carlos Andrés Estrella Macías
0803296136



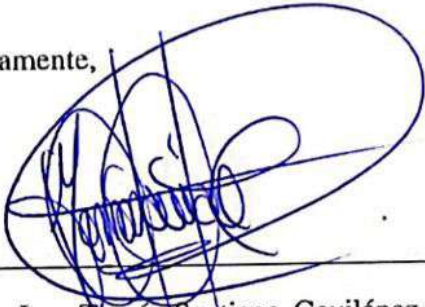
Jordy Alberto Quiñónez Muñoz
0953505278

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Tomás Santiago Gavilánez Gamboa**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT TELEOPERADO PARA INSPECCIÓN DE TUBERÍAS**, realizado por **Carlos Andrés Estrella Macías** con documento de identificación N° **0803296136** y por **Jordy Alberto Quiñónez Muñoz** con documento de identificación N° **0953505278**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 07 de marzo del año 2024

Atentamente,



Ing. Tomás Santiago Gavilánez Gamboa, Mg.
1802792646

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mis padres Andrés Felipe Estrella Valderrama y Letty Karina Macías Yanez, por las enseñanzas de vida, por la confianza, por todo su amor y el gran esfuerzo que hicieron para poder completar mis estudios, agradezco también a mis abuelos y hermana que me han animado a no rendirme con mis estudios y que siempre cuidaron de mí.

Carlos Andrés Estrella Macías

Dedico este trabajo a mi familia, por siempre estar a mi lado apoyándome y por qué siempre han estado para darme ánimos, por tenerme paciencia ya que sin ellos no hubiera logrado esto. Agradezco a todos los profesores que tuve a lo largo de este camino en la universidad ya que por ellos he logrado llegar al final de mi carrera. Y termino esta dedicatoria agradeciendo a mi tutor por siempre ayudarnos a lo largo de este proceso.

Jordy Alberto Quiñónez Muñoz

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios, que sin Él nada de esto sería posible, a mi padre y madre por su apoyo y amor incondicional, gracias a ellos por enseñarme a no rendirme ante las adversidades de la vida.

Quiero expresar mi gratitud al Ing. Tomás Santiago Gavilanez Gamboa por su orientación y sugerencias durante la ejecución de este proyecto, así como para la confianza que me depositó para llevarlo a cabo hasta su conclusión.

Carlos Andrés Estrella Macías

Este agradecimiento es para una de las personas mas importantes en mi vida la cual es mi madre porque es la persona que mas se ha sacrificado por mi a lo largo de todo este camino, siempre estuvo a mi lado dándome ánimos y ayudándome a no rendirme. Y también agradezco a otra de las personas más importantes para mi quien viene siendo mi abuela que estuvo conmigo desde mi infancia y que me verá culminar esta etapa de mi vida. Muchas gracias.

Jordy Alberto Quiñónez Muñoz

RESUMEN

Este proyecto aborda el diseño e implementación de un robot móvil teleoperado destinado a la inspección de tuberías. Se presenta una solución innovadora para la supervisión y el mantenimiento de sistemas de tuberías. El robot, equipado con una cámara de visión 360, demostrando ser una herramienta eficaz para identificar y prevenir posibles fallos, optimizando así los procesos de inspección. Este proyecto no solo contribuye significativamente al campo de la ingeniería robótica sino también propone una mejora considerable en la gestión de infraestructuras de tuberías, destacando los resultados positivos y las posibilidades de futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Palabras claves: robot teleoperado, inspección de tuberías, vision 360, ESP32 CAM, Flysky FS-i6.

ABSTRACT

This project addresses the design and implementation of a teleoperated mobile robot intended for pipe inspection. An innovative solution for the monitoring and maintenance of piping systems is presented. The robot, equipped with a 360° vision camera, proving to be an effective tool to identify and prevent possible failures, thus optimizing inspection processes. This project not only contributes significantly to the field of robotic engineering but also proposes a considerable improvement in pipeline infrastructure management, highlighting positive results and possibilities for future research and practical applications.

Keywords: teleoperated robot, pipe inspector, 360 vision, ESP32 CAM, Flysky FS-i6.

ÍNDICE

I.	Introducción	12
II.	Problemas de Estudio	13
III.	Justificación	14
IV.	Objetivos	15
IV-A.	Objetivo general	15
IV-B.	Objetivos específicos	15
IV-C.	Tabla de objetivos	16
V.	Marco teórico referencial	17
V-A.	Fundamentos de robótica	17
V-A1.	Tipos de robots	17
V-B.	Inspección de tuberías	19
V-B1.	Sistemas de detección de fallos	19
V-B2.	Sensor LIDAR	20
V-B3.	Rayos X	20
V-B4.	Rayos gamma	21
V-C.	Robots exploradores de tuberías	21
V-D.	Sistemas tele-dirigidos	21
V-E.	Componentes de un robot móvil	22
V-E1.	Sistemas electrónicos	22
V-E2.	Sistemas mecánicos	23
V-E3.	Sistema de Control a distancia por Radio Frecuencia	24
V-F.	Sistemas de abastecimiento de agua potable	25
VI.	Metodología	26
VI-A.	Diseño de robot	27
VI-A1.	Diseño	27
VI-A2.	Simulación	28
VI-A3.	Prototipo	30
VI-A4.	Fabricación	31
VI-A5.	Selección de motor	33
VI-A6.	Ruedas	35
VI-B.	Sistema electrónico	35
VI-B1.	Controlador de motor	35
VI-B2.	Cámara	35
VI-B3.	Alimentación de energía del robot	36
VI-B4.	Antena Wifi para ESP32CAM	37
VI-B5.	Control remoto Y receptor	37
VI-C.	Software	38
VI-C1.	Código de ESP32CAM	38
VII.	Resultados	40
VIII.	Cronograma y actividades a desarrollar	44
IX.	Presupuesto	45

X.	Conclusiones	46
XI.	Recomendaciones	46
XII.	Anexos	49

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Robot móvil.	18
2.	Robot SUMMIT-XL.	18
3.	Fuga por rotura de tubería de agua potable.	20
4.	Sensor LIDAR.	20
5.	Inspección mediante rayos X.	21
6.	Robot explorador de tuberías.	21
7.	Elementos y subsistemas de un robot móvil.	22
8.	ESP32CAM.	23
9.	Motor eléctrico.	24
10.	Chasis.	24
11.	Control joytick con receptor.	25
12.	Sistema de abastecimiento de agua potable.	25
13.	Esquema de las partes del robot.	26
14.	Fases de la fabricación.	27
15.	Diseño 3D del robot.	28
16.	Tensión de von Mises.	29
17.	Desplazamiento del análisis estático.	29
18.	Deformación del análisis estático.	30
19.	Factor de seguridad.	30
20.	Primer prototipo.	31
21.	Chasis en 2D.	31
22.	Corte del chasis.	32
23.	Corte de piso superior.	32
24.	Chasis antes del plegado.	33
25.	Plegado de chasis.	33
26.	Cámara del ESP32.	36
27.	Antena para obtener mayor alcance de señal.	37
28.	Radio Control Flysky FS-i6.	38
29.	Lógica de programación del ESP32.	39
30.	Aplicación desde un teléfono móvil.	39
31.	Inicio de tubería.	40
32.	Fin de tubería.	40
33.	Tubería.	40
34.	Datos de latitud y longitud.	41
35.	Validación de datos de latitud y longitud.	41
36.	Vista inferior de la cámara.	42
37.	Vista superior de la cámara.	42
38.	Robot dentro de tubería.	42
39.	Identificación de fisuras.	43
40.	Identificación de perforación.	43
41.	Identificación de sedimentos.	43
42.	Cronograma de actividades para implementación del anteproyecto de tesis.	44
43.	Preparación para el pintado.	49
44.	Pintado de estructura.	49
45.	Conexión de componentes.	49

I. INTRODUCCIÓN

Se conoce al agua potable como el recurso vital con mayor importancia de nuestro planeta. La manera utilizada con frecuencia para distribuir este líquido por toda una ciudad es el sistema de agua potable, el cual está compuesto por sistemas de tuberías, aquel que, por el uso constante, requiere de mantenimientos y análisis para detectar anomalías en la infraestructura. Esto es para garantizar una excelente calidad de agua para las personas que lo utilizan, pero también se sabe que pueden ocurrir fallos inesperados en las tuberías, en los cuales se realiza un análisis que puede durar un tiempo alto. En la actualidad, gracias al avance tecnológico, se pueden desarrollar robots exploradores para diferentes áreas. En base a eso, este proyecto busca la creación de un robot móvil teleoperado, el cual está destinado a la inspección de estas tuberías, mediante una cámara que posee visión 360, lo que agiliza el proceso para detectar daños en la infraestructura de la tubería. Esto ayuda a que los mantenimientos se realicen con menor esfuerzo de trabajo, para así tener una inspección periódica de tuberías y que estos mantenimientos pasen de ser correctivos a preventivos.

II. PROBLEMAS DE ESTUDIO

A nivel mundial surge la necesidad por examinar las condiciones físicas de las conducciones de agua potable para identificar posibles insuficiencias a lo largo de su trayecto, ya que las fugas de agua constituyen un desafío global, tal como lo sugieren investigaciones a nivel internacional ([1]). Conforme al estudio denominado “Análisis de las Fugas de Agua en los Sistemas de Suministro”, se documenta que, en la ciudad de Cali, Colombia, la entidad encargada del suministro de agua presenta una tasa de pérdida de agua que asciende al 3.54 % del recurso agua total disponible [2].

En Ecuador, de acuerdo con informes de diario, expresó en su artículo “Fugas de agua: un sigiloso malestar para los capitalinos” [3]. En los rincones de Quito, a diario se enfrenta un problema que pasa desapercibido. Este problema se refiere a las filtraciones de agua que, además de causar una pérdida considerable del recurso vital, ocasionan incrementos en las facturas de consumo, crean inundaciones en lugares públicos y deterioran las vías de circulación, lo que impide la movilidad normal y conlleva a la degradación del pavimento. El artículo también resalta que, según los datos proporcionados por la Epmaps (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito), en el año anterior se atendieron 23.939 fugas, originadas por diversas causas, abarcando varios sectores, incluso áreas rurales. Hasta el momento, se han efectuado intentos para detectar fallos mediante la implementación de sensores sumergidos en pozos o secciones específicas de las tuberías [4]. No obstante, estas soluciones resultan insuficientes para llevar a cabo un análisis exhaustivo de toda la red de tuberías. Aunque en el mercado internacional existen dispositivos robóticos exploradores de tuberías, su adquisición se complica debido a costos elevados, presentan limitaciones y la mayor parte se encuentra en proceso de desarrollo o se encuentran siendo optimizados.

La realización de reparaciones en tuberías mediante la extracción parcial de los conductos, tras la perforación del suelo en áreas donde se presume una filtración, presenta un desafío crítico. En muchas ocasiones, la dificultad radica en la imprecisión para ubicar con certeza la fuente de la fuga original, lo que conduce a la repetición de reparaciones y a la aparición de nuevas filtraciones a corto plazo. Esto repercute en pérdidas significativas de recursos materiales y económicos, subrayando la necesidad de mejorar las técnicas de detección de fugas y la precisión en su localización para optimizar la eficiencia y la integridad del sistema de suministro de agua [5]. Además, la limitación en el acceso a las tuberías de suministro de agua potable debido a su diámetro reducido y la utilización de materiales delicados en su construcción representa un obstáculo significativo para la implementación de medidas correctivas o preventivas por parte de los operadores y técnicos encargados de mantener el sistema.

III. JUSTIFICACIÓN

La relevancia de los robots inspectores equipados con sistemas de visión artificial en el ámbito de la inspección de tuberías se origina a partir de la necesidad de llevar a cabo operaciones autónomas, reduciendo así el potencial de errores([6]). Inicialmente confinada al ámbito industrial, la disciplina de la robótica ha experimentado un proceso de expansión que abarca diversas esferas, tales como la medicina, el ámbito doméstico, aplicaciones militares, el sector comercial, entre otras.

Los robots exhiben la capacidad de realizar tareas de naturaleza repetitiva de manera eficiente. Además, esta tecnología posibilita la automatización de actividades redundantes, prolongadas y exhaustivas, reemplazando la intervención humana con máquinas o algoritmos. En el contexto de entornos mayormente estáticos, estructurados y familiarizados, los robots industriales pueden desempeñar sus funciones con un nivel mínimo de entrada sensorial[7].

En las investigaciones realizadas por [8] propone un robot basado para la identificación mediante un sistema de visión en donde se utiliza un sensor RGB-D para la detección de tomates considerándolo como una mancha roja y realizando visión de localización a través de puntos de referencia artificiales etiquetados con patrones. Otro caso ilustrativo es el robot sugerido por [9].

El presente dispositivo desempeña una función de desinfección mediante la integración de luz ultravioleta en su estructura. Este sistema ha alcanzado una impresionante eficacia del 99,99 % en la erradicación de bacterias y virus, empleando radiación UV de tipo C, que abarca el espectro entre 200 y 290 nanómetros [9]. Además, como parte de esta iniciativa, se ha implementado otro robot autónomo con capacidades de detección de metales y la habilidad de crear representaciones artificiales de los escenarios, lo que le permite identificar irregularidades en su entorno [2].

Los robots mencionados previamente han experimentado avances notables en su funcionamiento, sin embargo, subsisten desafíos que requieren mejoras sustanciales. Un estudio realizado a cabo por [8] evidencia que, en la localización de manchas rojas, como los “tomates”, aún existe un margen de error del 3 %. Con relación al robot propuesto por [9], se enfatiza la importancia de evitar la proximidad a la luz ultravioleta y evitarla mirar directamente cuando está en funcionamiento, ya que la exposición a los rayos emitidos podría resultar en daños oculares y quemaduras cutáneas leves. Además, el trabajo realizado a cabo por [2] indica que dicho robot no es idóneo para la detección de minas debido a la complejidad mecánica involucrada en este tipo de tareas. Estos descubrimientos ponen de relieve la urgencia de abordar y perfeccionar estas áreas específicas con el fin de optimizar tanto la eficiencia como la seguridad de estos sistemas robóticos.

El proyecto busca desarrollar un robot teleoperado con un sistema de cámara 360 para detectar áreas críticas dentro de las tuberías de agua potable, para alargar la vida de la tubería y reduciendo costos frente al cambio de tubería. Los robots programables se adaptan a diversos entornos y tareas, ofreciendo eficacia en operaciones industriales colaborativas [10].

IV. OBJETIVOS

IV-A. Objetivo general

- Implementar un robot teleoperado para la inspección de tuberías de agua potable identificando áreas críticas mediante una cámara 360.

IV-B. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de teloperación para el control remoto en la navegación del robot.
- Identificar áreas críticas implementando una cámara de visión 360.
- Localizar el robot en tiempo real mediante un sistema de localización espacial GPS.

IV-C. *Tabla de objetivos*

Tabla I
MATRIZ DE OBJETIVOS.

OBJETIVO	PLANTEAMIENTO	META	INDICADOR
O.E.1	Diseñar un sistema de teloperación para el control remoto en la navegación del robot.	Teleoperar el robot a una distancia de 20 metros.	Alcanzar distancia de 20 metros.
O.E.2	Identificar áreas críticas implementando una cámara de visión 360.	Detectar áreas críticas.	Alcanzar a detectar 3 áreas críticas.
O.E.3	Localizar el robot en tiempo real mediante un sistema de localización espacial GPS.	Conocer ubicación en tiempo real del robot con variación de 3 metros.	Obtener margen de error de +/- 3 metros.

V. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En el ámbito de la robótica, se define como la combinación de diversas disciplinas de ingeniería, entre las que se incluye la mecatrónica. El catedrático Subir Kumar Saha, investigador reconocido en el campo de la robótica, indica en este campo suscita un constante interés que va en aumento, especialmente entre la generación joven en la actualidad. Esto se debe a que los robots contemporáneos desempeñan un papel esencial al afrontar tareas desafiantes que requieren una precisión excepcional. El núcleo de la robótica reside en la exploración del diseño y la creación de robots, lo que implica un análisis exhaustivo de su funcionamiento y la implementación de medidas de seguridad para los usuarios [11]. Los manipuladores robóticos son máquinas de gran relevancia en diversos sectores como la industria, la medicina, los servicios y la seguridad, y junto con los robots móviles, forman una categoría híbrida que desempeña un papel crucial en una variedad de tareas en estos campos. El modelado, control, planificación y simulación cinemática son aspectos esenciales relacionados con estos robots, lo que subraya la importancia de la investigación en este ámbito. El objetivo principal de este estudio es desarrollar un modelo matemático para el control de un robot móvil omnidireccional y luego implementarlo en un entorno de simulación mediante software. Con el propósito de lograr esto, se recurre a una metodología ágil en la concepción de algoritmos del control, con la intención de verificar tanto el modelo adquirido como su efectividad [12].

La tecnología se ha integrado en diversos aspectos de nuestra vida diaria y está estrechamente vinculada con los progresos en el campo de la robótica. Un ejemplo notable de esta relación se encuentra en los robots autónomos, que desempeñan roles clave en áreas como mecánica [13] en la agricultura, como presenta [14] en la minería, y los devily como desarrolla [15], entre otros campos de aplicación. Dentro de la categoría de los robots móviles teleoperados, existen varios tipos, como los drones terrestres propuestos por [16], que pueden tener sistemas de ruedas, capacidad de trepar o escalar, entre otras configuraciones. También [17] plantea la creación de una app que habilite la teleoperación de sistemas robóticos, con el objetivo de lograr una eficiencia óptima. Para ello, es crucial que la comunicación entre el operador y el robot sea lo más fluida y natural posible. Asimismo, la aplicación debe ser capaz de permitir la teleoperación de una variedad de sistemas robóticos.

V-A. Fundamentos de robótica

El estudio y la utilización de sistemas capaces de interactuar con su entorno son fundamentales para los principios de la robótica. Estos sistemas integran componentes mecánicos y electrónicos para llevar a cabo tareas específicas, desde sensores hasta algoritmos de control. Los robots pueden clasificarse en distintos grupos, como robots móviles que exploran nuevos entornos, robots industriales utilizados en líneas de producción y robots colaborativos que trabajan junto a los humanos. Según el informe World Robotics 2023, en el mercado de robots industriales, elaborado por la Federación Internacional de Robótica (IFR), pone cifras a evolución y apunta a una frontera que supera los 4 millones de robots operativos en toda la industria mundial, lo que subraya la creciente importancia de estas máquinas en diversos sectores industriales y de servicios.

V-A1. Tipos de robots: Se puede identificar una amplia gama de robots que se dividen en dos categorías principales: los de uso industrial y los de servicio. Dentro de estas categorías, se pueden distinguir subconjuntos más específicos, con un enfoque de investigación en aquellos de naturaleza móvil.

- **Robots móviles:** Los robots se organizan de acuerdo al entorno en el cual llevarán a cabo sus operaciones; por ejemplo, los terrestres suelen contar con ruedas o patas para la movilidad en suelo firme, los submarinos están diseñados para operar bajo el agua, y los robots aéreos tienen la capacidad de desplazarse vía aérea. Considerando que los planes de inspección de tuberías tienen como enfoque principal las superficies sólidas, se centran en el desarrollo de robots terrestres como se muestra en la Figura 1. En este contexto, los robots terrestres se dividen en categorías puras y híbridas.



Figura 1. Robot móvil.

Fuente: [18]

- Robots terrestres: Este tipo de robots se especializa en el contexto de este proyecto, ya que están diseñados para una variedad de aplicaciones que incluyen rastreo, transporte y reconocimiento en superficies robustas. Un ejemplo representativo está en el robot 'SUMMIT-XL', que se observa en la Figura 2 y se utiliza en investigaciones y operaciones de vigilancia. Este robot también tiene el potencial de ser utilizado en la inspección de tuberías subterráneas, como se ejemplifica en una aplicación similar. Además, este tipo de robots tiene aplicaciones en la industria, como la evasión de obstáculos, la transferencia de instrumentos médicos en entornos hospitalarios y la inspección de fisuras en tuberías destinadas al transporte de gases o líquidos.



Figura 2. Robot SUMMIT-XL.

Fuente: [19]

- Robots híbridos: La clasificación de estos robots resulta especialmente compleja, dado que integran elementos de todas las categorías previas con el fin de cumplir requisitos específicos.

V-B. Inspección de tuberías

Los problemas en las tuberías pueden ser diversos y variar en función de varios factores, como el tipo de tubería, su edad, el material del que están hechas, entre otros. Algunos de los problemas más comunes incluyen:

- **Corrosión:** La corrosión es uno de los principales problemas en las tuberías, especialmente en las metálicas. Puede ser causada por la exposición a agentes químicos en el fluido que transportan, la presencia de oxígeno en el agua, la temperatura, entre otros factores. La corrosión puede provocar fugas, pérdida de presión y contaminación del agua [20].
- **Obstrucción:** Las tuberías pueden obstruirse debido a la acumulación de sedimentos, incrustaciones minerales, residuos orgánicos, grasa, u otros materiales. Esto puede reducir el flujo de agua, provocar problemas de drenaje y aumentar la presión dentro de las tuberías [21].
- **Fisuras y grietas:** Las tuberías pueden desarrollar fisuras o grietas debido a la presión, movimientos del suelo, vibraciones, fluctuaciones de temperatura, entre otros factores. Estas fisuras pueden provocar fugas de agua, daños estructurales y pérdida de eficiencia en el sistema de tuberías [22].
- **Infiltraciones:** Las infiltraciones pueden ocurrir cuando hay conexiones defectuosas o dañadas en las tuberías, permitiendo que el agua entre o salga de la tubería de manera no deseada. Esto puede provocar pérdida de presión, daños en la estructura circundante, y contaminación del agua [23].

Estos problemas pueden tener diversos efectos negativos, como pérdida de agua potable, daños en la infraestructura, aumento de costos de mantenimiento y reparación, riesgos para la salud pública debido a la contaminación del agua, entre otros. Por lo tanto, es importante llevar a cabo un mantenimiento regular y adecuado de las tuberías para prevenir estos problemas y garantizar su correcto funcionamiento. Este tipo de problemas en las tuberías pueden ser detectado mediante los siguientes sistemas

V-B1. Sistemas de detección de fallos: La detección de fallas es crucial para mantener la integridad y eficiencia de sistemas. Mediante el análisis minucioso de datos y patrones, se identifican y corrigen anomalías antes de que se conviertan en problemas mayores como se muestra en la Figura 3. A continuación se analizarán dispositivos utilizados comúnmente para detección de fallos.

Las tuberías que integran una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP) experimentan desgaste debido a varias variables, como la antigüedad, las propiedades del material, las condiciones ambientales, de instalación y operación, las cargas internas y externas aplicadas a la tubería, así como los procesos de corrosión. La degradación de las tuberías se puede clasificar en dos categorías principales. En primer lugar, se encuentra el deterioro estructural, un proceso que reduce la capacidad de la tubería para resistir diversas tensiones. En segundo lugar, está el deterioro funcional, que provoca una disminución en la capacidad hidráulica de la tubería y una degradación en la calidad del agua que transporta [24].



Figura 3. Fuga por rotura de tubería de agua potable.

Fuente: [25]

V-B2. Sensor LIDAR: El cartografiado y escaneado de la superficie de las tuberías se realiza mediante sistemas de detección de defectos en tuberías que utilizan sensores LIDAR y tecnología láser. Esto permite identificar anomalías como corrosión, deformaciones o grietas, lo que posibilita una inspección precisa y oportuna para detener posibles problemas graves en la infraestructura de las tuberías [26].

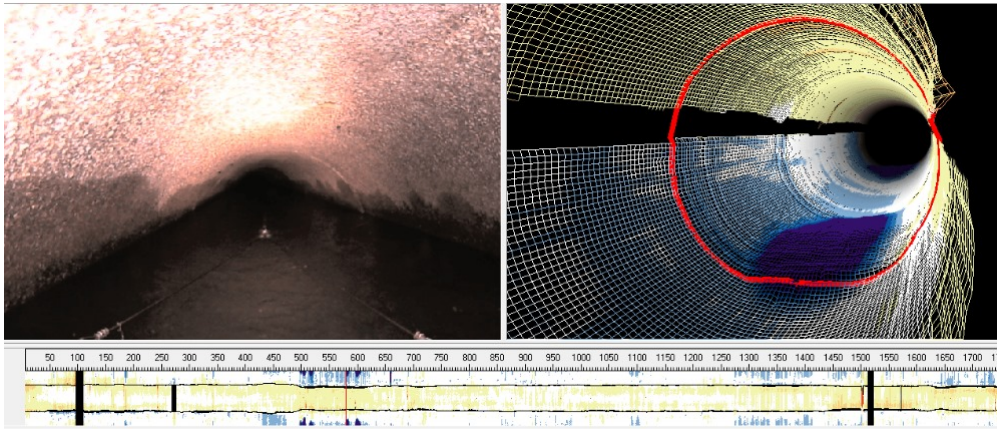


Figura 4. Sensor LIDAR.

Fuente: [27]

V-B3. Rayos X: La detección de fallas en tuberías de agua mediante rayos X implica el uso de radiografías para identificar grietas, corrosión o cualquier anomalía en la estructura de las tuberías. Esta técnica no destructiva proporciona imágenes detalladas del interior de las tuberías, permitiendo una inspección minuciosa y la detección temprana de posibles problemas, facilitando así acciones preventivas o correctivas para mantener la integridad del sistema de agua. La desventaja que presenta el uso de rayos X para detectar fallas en tuberías implica altos costos, necesidad de personal capacitado y riesgos de exposición a radiación [28].



Figura 5. Inspección mediante rayos X.

Fuente: [29]

V-B4. Rayos gamma: La detección de fallas en tuberías de agua mediante rayos gamma implica el uso de isótopos radiactivos para escanear la estructura de las tuberías. Estos rayos pueden penetrar materiales densos y detectar corrosión, grietas u otros defectos, ofreciendo una evaluación interna detallada sin necesidad de desmontar la tubería. Además, esta técnica proporciona datos precisos sobre la integridad de las tuberías, permitiendo acciones preventivas antes de que los problemas se intensifiquen [28]. El inconveniente con el uso de rayos gamma es la radiación, costos, limitaciones de penetración y regulaciones estrictas.

V-C. Robots exploradores de tuberías

A nivel global, se están llevando a cabo numerosas investigaciones y avances en el ámbito de los sistemas de seguimiento diseñados para la evaluación de infraestructuras, que incluyen redes de alcantarillado, tuberías de transporte de petróleo y gas, y conductos. Por ejemplo, un destacado centro de investigación en ingeniería robótica ha desarrollado un robot especializado en la evaluación en tiempo real de conductos de gas subterráneos. Este dispositivo funciona mediante baterías internas, lo que permite realizar inspecciones visuales a larga distancia durante un período prolongado. Además, cuenta con capacidades de comunicación inalámbrica.



Figura 6. Robot explorador de tuberías.

Fuente: [27]

V-D. Sistemas tele-dirigidos

Los robots teledirigidos o por radio control son dispositivos robóticos que son controlados de forma remota por un operador humano a través de una señal de radio. Estos robots son comúnmente utilizados en una variedad

de aplicaciones, desde el entretenimiento hasta usos industriales y militares. El operador puede enviar comandos a distancia para controlar el movimiento, la manipulación de objetos, la recolección de datos u otras funciones específicas del robot [30].

Estos robots son especialmente útiles en situaciones donde la intervención humana directa es difícil, peligrosa o impracticable. Por ejemplo, pueden ser utilizados en operaciones de búsqueda y rescate en áreas peligrosas o de difícil acceso, inspección de estructuras, vigilancia, exploración de terrenos desconocidos, entre otros.

Los robots teledirigidos o por radio control pueden variar en tamaño, forma y complejidad, desde pequeños robots de juguete hasta grandes vehículos robóticos industriales o militares. Además, pueden estar equipados con una variedad de sensores, cámaras, brazos manipuladores u otros dispositivos para llevar a cabo tareas específicas de manera efectiva [31].

En resumen, los robots teledirigidos o por radio control son una herramienta versátil y poderosa que permite a los operadores controlar robots a distancia para una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos.

V-E. Componentes de un robot móvil

La construcción de un robot móvil como se observa en la Figura 7, implica la integración de componentes electrónicos, mecánicos, de control, entre otros. En las siguientes secciones se explorará estos elementos los cuales son de suma importancia para comprender el funcionamiento y diseño correctos.

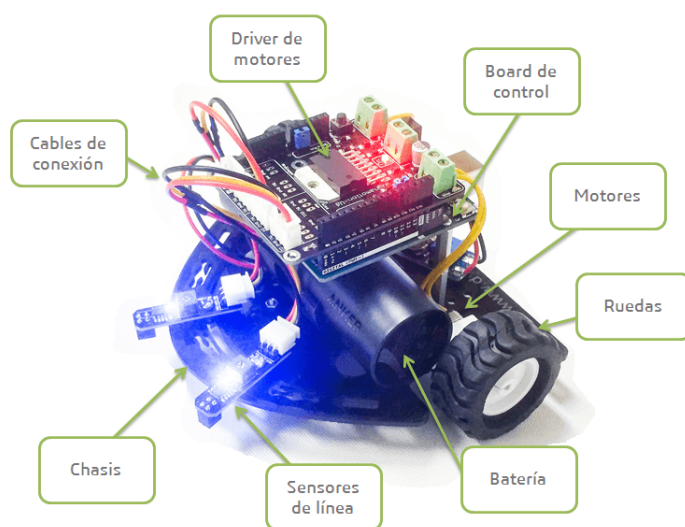


Figura 7. Elementos y subsistemas de un robot móvil.

Fuente: [32]

V-E1. *Sistemas electrónicos*: Los sistemas electrónicos se componen de conjuntos de circuitos que funcionan mediante el procesamiento de señales eléctricas con el fin de llevar a cabo funciones específicas. Estos sistemas tienen dos etapas esenciales: una etapa de entrada encargada de recopilar datos del entorno exterior, como luz, humedad, movimiento entre otros; y una etapa de proceso o control, donde se interpretan, gestionan y elaboran los resultados que determinarán la activación o no de los dispositivos de salida. Estos dispositivos de salida conforman la última fase del sistema [33].

- Microcontroladores: circuito integrado con una alta escala de integración que incorpora en su interior una Unidad Central de Procesamiento (CPU, Central Processing Unit), así como memoria para almacenar código

y datos, temporizadores, fuentes de interrupción y otros recursos esenciales para el desarrollo de aplicaciones, generalmente con un propósito específico. A pesar de que un MCU reúne prácticamente todos los componentes necesarios para ser considerado una computadora en un solo chip, suele no clasificarse como tal en la práctica. Esto se debe a que su uso habitual se centra en la ejecución de funciones de control que involucran interacción con el entorno físico para supervisar condiciones a través de sensores y, en respuesta a esta información, activar o desactivar dispositivos mediante actuadores [34].

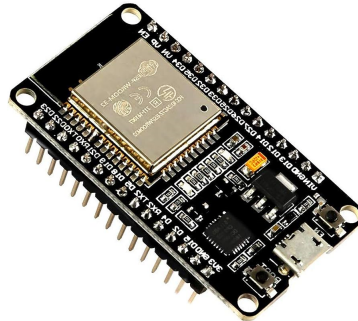


Figura 8. ESP32CAM.

Fuente: [35]

- **Sensores:** Al inicio, resulta fundamental establecer la diferenciación entre los diversos componentes que integran cualquier sistema de automatización. Los elementos centrales que ejercen influencia en el ámbito de la automatización industrial son los sensores y los actuadores, dado que desempeñan un papel crucial en la monitorización y la interacción con el entorno controlado. Los sensores cumplen con la tarea de comunicar a un circuito electrónico la ocurrencia de eventos externos, con respecto a los cuales se debe llevar a cabo una acción específica [36].
- **Baterías:** las baterías de ion de litio se conforman a partir de celdas interconectadas en serie o en paralelo, según las especificaciones eléctricas y la capacidad de almacenamiento de energía necesaria para la carga. Las celdas de las baterías de ion de litio incluyen un electrodo positivo, un electrodo negativo y un separador, todos sumergidos en un electrolito [37].

V-E2. Sistemas mecánicos: Un sistema mecánico o una máquina se define como un conjunto de mecanismos que modifica velocidades, trayectorias, fuerzas o energías a través de una secuencia de transformaciones intermedias [38]. Los desplazamientos que puede experimentar un componente de un mecanismo incluyen: Desplazamiento rectilíneo, alternativo y circular o de rotación

- **Motor:** el dispositivo que se muestra en la Figura 9 convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Este proceso se realiza al introducir una corriente eléctrica en la máquina desde una fuente externa. La corriente interactúa con el campo magnético, lo que resulta en el movimiento de la máquina. Durante este proceso, se genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida que se opone a la corriente, conocida como fuerza contraelectromotriz. En resumen, el motor requiere una entrada de energía eléctrica para producir la energía mecánica correspondiente [39].

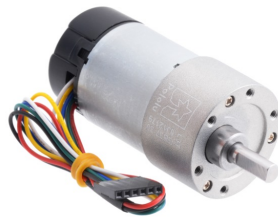


Figura 9. Motor eléctrico.

Fuente: [40]

- Chasis: Es un conjunto de perfiles unidos muy rígidamente en forma de cuadro, de manera que el conjunto es indeformable. El chasis se destina al montaje de una carrocería con elementos desmontables como se logra ver a continuación en la Figura 10 [41].

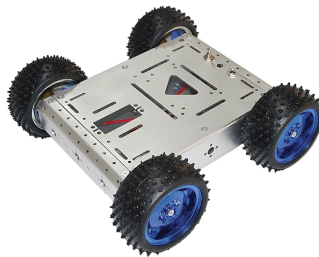


Figura 10. Chasis.

Fuente: [42]

V-E3. Sistema de Control a distancia por Radio Frecuencia : Joystick: un joystick como se muestra en la Figura 9 desempeña un papel crucial al proporcionar orientación en el ámbito de los programas digitales. Su mecanismo de dirección se basa en el uso de una palanca bidimensional, donde dos potenciómetros capturan los movimientos. Es decir, cada desplazamiento en cualquier dirección se controla mediante un potenciómetro específico. Las variaciones en la resistencia del potenciómetro se traducen en cambios de voltaje detectados por el sistema para determinar la dirección deseada por el usuario. Este tipo de joystick resulta económico, lo que contribuye a la reducción de los costos de producción [43].



Figura 11. Control joystick con receptor.
Fuente: [44]

El radiocontrol o Joystick enviara una señal que llega al receptor que dispone de un driver el cual recibe un pwm que sera tranformado en una señal variable para el motor con el cual se accionara.

V-F. Sistemas de abastecimiento de agua potable

Un sistema de suministro de agua potable se compone de una serie de infraestructuras necesarias para captar, transportar, tratar, almacenar y distribuir el agua como se muestra en la Figura 12, ya sea proveniente de fuentes subterráneas o superficiales, hacia las residencias de los beneficiarios del sistema. Un diseño apropiado de este sistema tiene un impacto directo en la mejora de la calidad de vida, la salud y el desarrollo de la población. Es fundamental que el sistema cumpla con las normativas y regulaciones actuales para asegurar su correcto funcionamiento [45].



Figura 12. Sistema de abastecimiento de agua potable.
Fuente: [46]

VI. METODOLOGÍA

El objetivo de este estudio es el desarrollo e implementación de un robot móvil que sirva para inspeccionar tuberías de agua potable con el propósito de localizar fallas en las mismas, con el fin de evitar problemas de fugas o deterioros en la estructura, y así alcanzar un mantenimiento adecuado.

Para este proyecto, se empleó una metodología investigativa para determinar la mejor manera de funcionamiento y diseño de un robot móvil aplicable en inspecciones de tuberías.

Para la realización del robot, se siguió un esquema detallado que muestra su armado, como se ilustra en la Figura 13. Se optó por un diseño mecánico que incluye un chasis sólido para proporcionar la estructura y estabilidad necesarias para su operatividad. Los motores del robot son controlados por drivers para los motores Pololu, los cuales permiten un control preciso de los movimientos. Además, el robot es manejado de forma remota mediante un radio control, lo que ofrece una interfaz para el usuario para visualizar en tiempo real lo que el robot percibe. Para mejorar su capacidad de percepción, el robot está equipado con una cámara montada en un soporte que le proporciona una visión completa de 360 grados de su entorno. Esta combinación de componentes mecánicos y electrónicos permite que el robot cumpla con los objetivos propuestos.

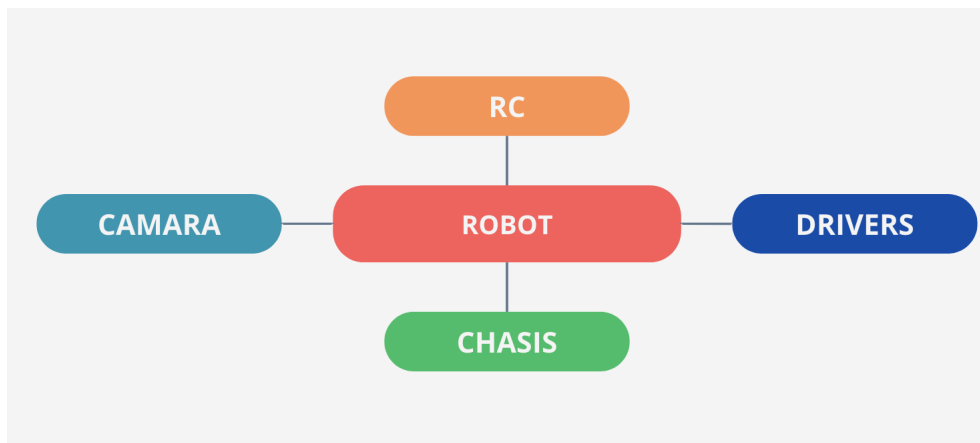


Figura 13. Esquema de las partes del robot.

Fuente: Autores.

Se llevó a cabo un proceso de ingeniería en el desarrollo del robot, como se muestra en la Figura 14, para garantizar que sea tanto efectivo como eficiente. Dicha metodología facilita una evaluación exhaustiva de los requerimientos específicos y las condiciones operativas, indispensable para determinar las necesidades del proyecto y seleccionar los componentes adecuados. Al realizar una revisión sistemática de las tecnologías existentes, se logra identificar y aplicar conocimientos para la mejora del diseño. Este enfoque metodológico no solo promueve el desarrollo del robot, sino que también impulsa la innovación y la aplicación efectiva de soluciones tecnológicas avanzadas, asegurando que el producto final cumpla óptimamente con los objetivos planteados.



Figura 14. Fases de la fabricación.

Fuente: Autores.

En el desarrollo de un robot, la fase de diseño constituye el punto de partida, donde ingenieros y diseñadores conceptualizan la solución mecánica. Durante esta etapa, se emplean herramientas avanzadas de diseño asistido por computadora CAD para la modelación detallada de ensamblajes, lo que facilita la identificación y corrección de posibles problemas de integración y funcionamiento antes de la fabricación física.

VI-A1. Diseño: El diseño mecánico dentro CAD permite una visualización precisa del producto final y facilita la modificación de parámetros antes de la fabricación física. Se configura principalmente el tipo de diseño que se va a hacer, en este caso, un ensamblaje, y se ajustan los parámetros de material y las medidas en milímetros. Se procede a realizar un boceto con sus respectivas medidas y luego se acotan directamente en el software. El siguiente paso realizado consiste en extruir el boceto para crear el objeto en 3D, como se muestra en la Figura 15. Para distribuir el espacio para los componentes internos y externos se tuvo en cuenta la geometría general del robot, los puntos de montaje para las ruedas y otros sistemas implementados.

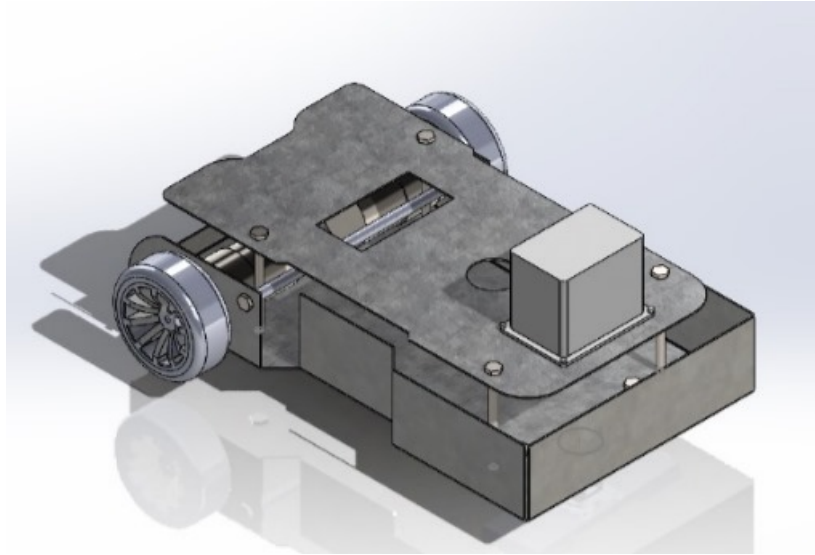


Figura 15. Diseño 3D del robot.

Fuente: Autores.

VI-A2. Simulación: Posteriormente, en la fase de simulación, se utilizan plataformas de software especializado para modelar el comportamiento del robot en un entorno virtual, lo que permite evaluar su desempeño ante diferentes escenarios operativos sin necesidad de construir un modelo físico. Este enfoque reduce significativamente los tiempos y costos asociados con el desarrollo de prototipos físicos, permitiendo optimizaciones iterativas del diseño basadas en resultados de simulación precisos. Para el paso de simulación, se realizó el análisis estático como se muestra en la Figura 16, garantizando con esto que el diseño sea capaz de soportar las cargas que se le van a ejercer, tomando en cuenta las tensiones y deformaciones. Para empezar con el análisis se debe identificar el peso del robot, que es de $3.5 [kg]$, después obtener el peso que va a soportar la base del robot. La fuerza dio un resultado de $34,335[N]$ como se muestra en la ecuación 4.

$$Efy = 0 \quad (1)$$

$$N = W \quad (2)$$

$$W = (3,5) * (9,81) \quad (3)$$

$$W = 34,335N \quad (4)$$

Nombre del modelo: ENSAMBLAJE
Nombre de estudio: Analisis estático 2(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Analisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 73,132

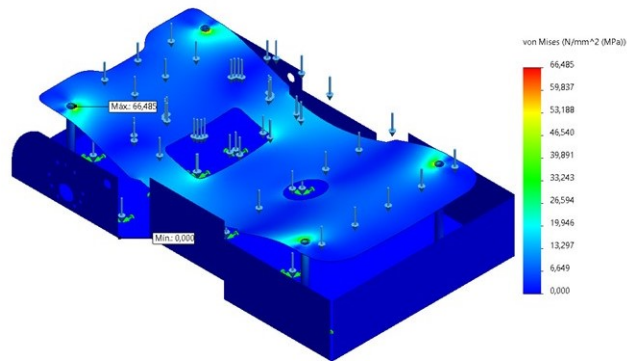


Figura 16. Tensión de von Mises.

Fuente: Autores.

En la Figura 16, se observan las tensiones de von Mises, cuya validación requiere que sean inferiores al límite elástico del acero galvanizado de 203,94 [MPa]. El análisis realizado indica que el valor máximo de tensión es de 66,48 [MPa], lo que demuestra que la estructura es segura. Por otro lado, en la Figura 17, al someter la estructura del robot a una carga de 34,335 [N], se registra un desplazamiento de 0,0002 [mm], lo que indica que es prácticamente nulo. La deformación resultante en el robot es de 0,00002 [mm], lo que sugiere que es prácticamente imperceptible, dado que el diseño del robot está concebido para soportar este tipo de cargas, tal como se muestra en la Figura 18.

Nombre del modelo: ENSAMBLAJE
Nombre de estudio: Analisis estático 2(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 73,132

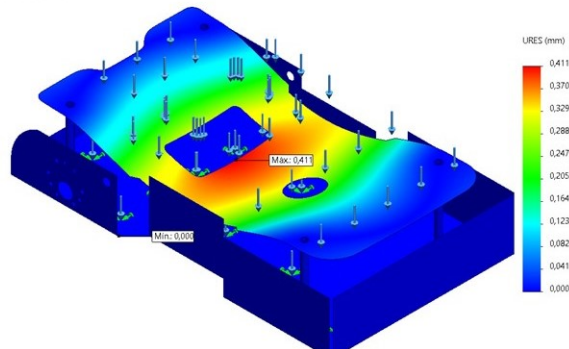


Figura 17. Desplazamiento del análisis estático.

Fuente: Autores.

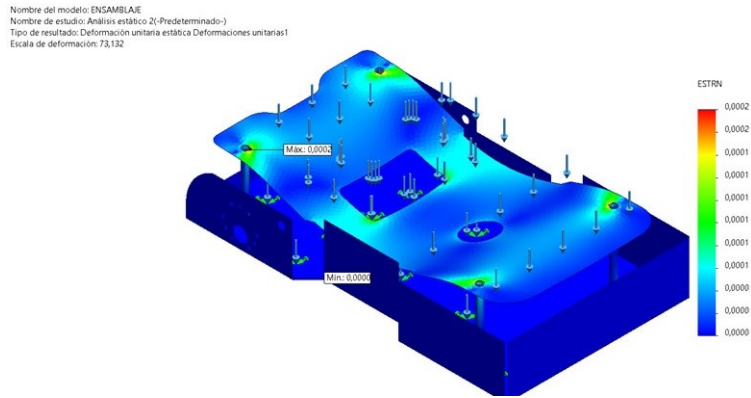


Figura 18. Deformación del análisis estático.

Fuente: Autores.

En la Figura 19, se observa el factor de seguridad de la estructura del robot el cual da un valor mínimo de 2,93, este valor es mayor a 1 lo que muestra que es seguro, este valor se obtuvo al dividir el límite elástico con el esfuerzo máximo de von Mises.

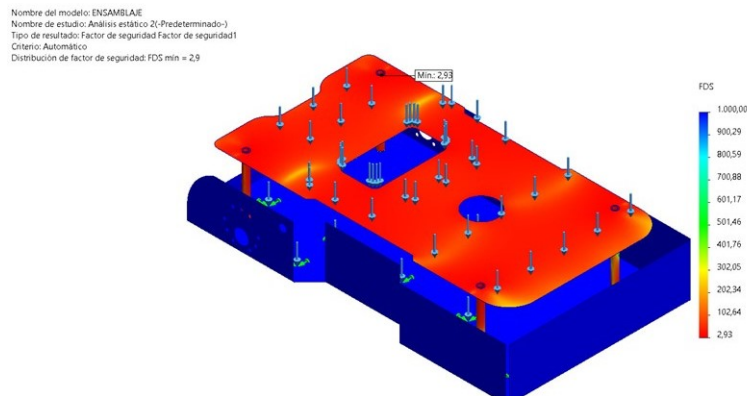


Figura 19. Factor de seguridad.

Fuente: Autores.

VI-A3. Prototipo: Luego de que el diseño ha sido optimizado mediante simulaciones, se procede a la fase de prototipado, en la cual se fabrica una versión física del robot. Esta etapa es crucial para validar tanto la factibilidad de fabricación de los componentes diseñados como la integración y funcionamiento del sistema en condiciones reales, permitiendo identificar y corregir errores no anticipados durante las fases de diseño y simulación. La fabricación de prototipos suele aprovechar técnicas de manufactura aditiva, como la impresión 3D, para la producción rápida y costo-efectiva de componentes con geometrías complejas, así como métodos de fabricación tradicionales para partes que requieren materiales o tolerancias específicas.

En esta parte el material que se está utilizando para el primer prototipo es de madera de 4mm de espesor. Luego de tener todas las piezas se procede a hacer un ensamble manual de la estructura del robot como se muestra en la Figura 20, para continuar con las siguientes fases del diseño del robot.



Figura 20. Primer prototipo.

Fuente: Autores.

VI-A4. Fabricación: La siguiente fase es tomar el diseño en 3D y desplegarlo como chapa metálica para luego exportar el diseño en 2 dimensiones, como se muestra en la Figura 18.

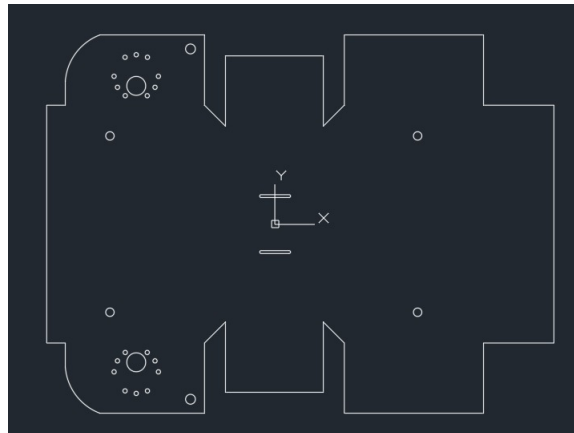


Figura 21. Chasis en 2D.

Fuente: Autores.

Paralelamente al diseño conceptual, se realiza la selección de materiales de la estructura de robot. Para un robot destinado a ambientes húmedos como las tuberías de agua potable, es crucial elegir materiales que sean resistentes a la corrosión y la humedad. Es por eso que el material que se seleccionó para utilizarlo en la estructura del robot es acero galvanizado ya que por su propiedades de no corroerse fácilmente con el agua.

Una vez obtenido este archivo, Figura 21, se procede a la última fase de diseño. El proceso de corte de piezas en acero galvanizado utilizando una máquina CNC de plasma implica varias etapas, desde la preparación del diseño hasta el corte real y las consideraciones posteriores al corte. Se ajustan los parámetros de corte en la máquina,

incluyendo la corriente del plasma, la presión del gas, la altura de la antorcha sobre el material y la velocidad de corte. Estos parámetros dependen del grosor del material y del tipo de corte deseado. El acero galvanizado se coloca sobre la mesa de corte de la CNC de plasma. Es importante asegurarse de que el material esté plano y bien sujeto.

Se inicia el proceso de corte siguiendo el código G. La antorcha de plasma se mueve automáticamente siguiendo las instrucciones del código, cortando el material según el diseño preparado. Durante el corte, se debe monitorear constantemente la operación para asegurarse de que el corte se está realizando correctamente y ajustar los parámetros si es necesario. En la Figura 22 y 23 se puede evidenciar el resultado del proceso de corte para cada una de los sólidos.

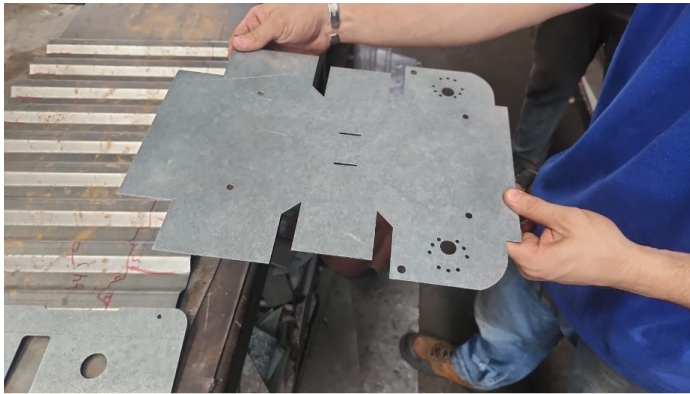


Figura 22. Corte del chasis.
Fuente: Autores.



Figura 23. Corte de piso superior.
Fuente: Autores.

A partir de los planos de diseño, se determinan los ángulos de plegado, la secuencia de operaciones y las dimensiones finales de las piezas plegadas. Se calcula la posición exacta de la línea de plegado teniendo en cuenta el espesor del material y el radio de plegado deseado.

Se eligen el punzón (parte superior de la herramienta de plegado) y la matriz (parte inferior) adecuados para el tipo de plegado y el espesor del material. Se configura la dobladora hidráulica según los parámetros específicos del trabajo, como la fuerza de plegado, la distancia de la parada trasera y el ángulo de plegado. Estos ajustes dependen del material y del diseño de la pieza. La pieza de acero galvanizado se coloca en la máquina entre el punzón y la matriz. La posición se ajusta manualmente o mediante controles automáticos para alinear la línea de plegado con la herramienta. Para plegados repetitivos o en serie, se utiliza la parada trasera para asegurar la consistencia en la posición de plegado entre múltiples piezas. En la Figura 24 se observa la placa de acero galvanizado antes de realizar el plegado.

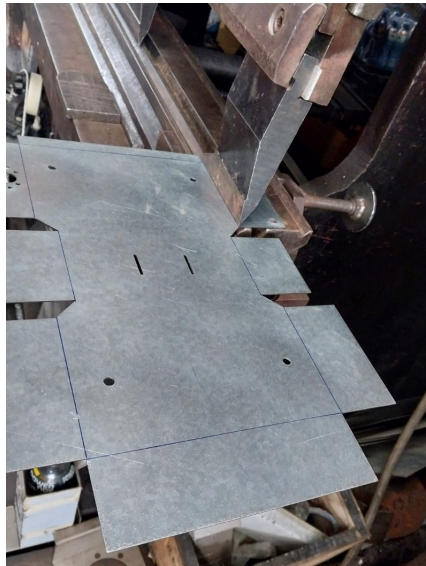


Figura 24. Chasis antes del plegado.
Fuente: Autores.

Una vez posicionada la pieza, se activa la dobladora. El punzón desciende con fuerza hidráulica, presionando el material contra la matriz para formar el plegado como se muestra en la Figura 25. Es crucial monitorear el proceso de plegado para ajustar cualquier desviación y asegurar la precisión del ángulo y la posición del plegado.

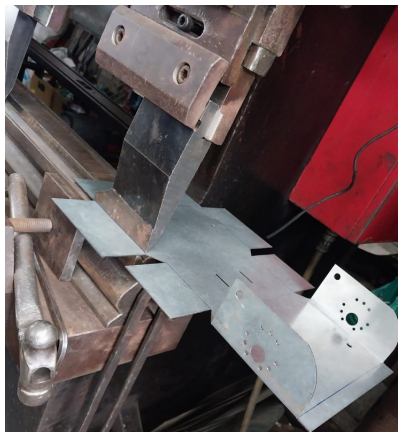


Figura 25. Plegado de chasis.
Fuente: Autores.

VI-A5. Selección de motor: Se decide escoger el motor Pololu GBS-50 porque es una opción sólida debido a su potencia, controlabilidad, durabilidad, eficiencia, fiabilidad. Debido a que esto nos ayudara al buen funcionamiento de las ruedas utilizadas para el robot móvil.

Para calcular la velocidad lineal de las ruedas, utilizamos la relación entre la velocidad angular del motor y la velocidad lineal de la circunferencia de la rueda. La velocidad angular, está dada en revoluciones por minuto (rpm), se convierte primero a radianes por segundo (rad/s), y luego se usa para calcular la velocidad lineal de la rueda.

La velocidad angular ω en radianes por segundo se calcula a partir de las revoluciones por minuto (rpm) usando

Motor	PololiGBS-50	XR25-370
Durabilidad	8	7
Torque	9	6
Consumo energético	7	8
Velocidad	8	6
Costo	6	9
Aprobación	Si	No

la siguiente fórmula:

$$V_{rad/s} = \frac{RPM \cdot 2\pi}{60} \quad (5)$$

Dado que el motor gira a 200 rpm:

$$V = \frac{200 \cdot 2\pi}{60} \quad (6)$$

$$V = \frac{400\pi}{60} \quad (7)$$

$$V = \frac{20\pi}{3} [rad/s] \quad (8)$$

Para calcular La velocidad lineal v de la rueda se puede calcular utilizando la velocidad angular ω y el radio de la rueda r , mediante la fórmula:

$$V = \omega \cdot r \quad (9)$$

Como el diámetro de la rueda es de 120 mm, por lo tanto, el radio r es de 60 mm o 0.06 m

$$V = \frac{20\pi}{3} \cdot (0,06) \quad (10)$$

$$V = \frac{4\pi}{3} [m/s] \quad (11)$$

$$V = 4,19 [m/s] \quad (12)$$

Por lo tanto, la velocidad lineal de las ruedas es aproximadamente 4.19 metros por segundo. Este cálculo asume que no hay deslizamiento entre las ruedas y la superficie sobre la que se mueven.

Para convertir la velocidad de metros por segundo (m/s) a kilómetros por hora (km/h), utilizamos la relación entre ambas unidades. Sabemos que 1m/s es equivalente a 3.6km/h. Por lo tanto, podemos multiplicar la velocidad obtenida en m/s por 3.6 para obtener su equivalente en km/h.

Dado que calculamos una velocidad lineal de aproximadamente 4.19m/s, la conversión sería:

$$V_{km/h} = (V_{m/s}) \cdot (3,6) \quad (13)$$

$$V_{km/h} = (4,19) \cdot (3,6) \quad (14)$$

$$V_{km/h} = 15,08 [km/h] \quad (15)$$

Por lo tanto, la velocidad lineal de las ruedas, cuando el motor opera a 200 rpm con ruedas de 120 mm de diámetro, es aproximadamente 15.08 kilómetros por hora.

VI-A6. Ruedas: La elección de ruedas de caucho para este robot de inspección de tuberías responde a la necesidad de un desplazamiento eficiente y seguro dentro de un ambiente que puede ser tanto húmedo como irregular. Las ruedas de caucho, conocidas por tener un agarre superior y capacidad de para absorber vibraciones, son ideales para mantener la estabilidad del robot durante la navegación y la inspección visual. Este tipo de ruedas se adhieren mejor a las superficies lisas, lo que reduce el riesgo de deslizamiento y garantiza un control más preciso del movimiento, lo cual es crucial cuando se maneja el robot a distancia.

VI-B. Sistema electrónico

VI-B1. Controlador de motor: El controlador KINGMODEL 10AX2 sería una buena opción debido a sus características. Tiene una corriente máxima por canal de 10A, lo que le permite manejar motores con una potencia considerable. Además, posee un voltaje máximo de 30V, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones. También cuenta con protección contra sobrecorriente y sobretensión, lo que garantiza la seguridad del motor y del driver en situaciones de carga excesiva. Es compatible con motores de corriente continua (DC) y tiene un precio asequible de 35 dolares

Controlador	Corriente máxima por canal (A)	Voltaje máximo (V)	Protección contra sobrecorriente	Protección contra sobretensión	Tipo de motor	Precio	Aprobación
KINGMODEL 10AX2	10	30	Si	Si	DC	35	Si
Controlador de motor de alta potencia pololu doble G2 18v18	18	24	Si	Si	DC	50	No
SparkFun monster motor shield	14	16	Si	Si	DC	40	No

VI-B2. Cámara: La implementación de una cámara con visión de 360 grados en el robot de inspección de tuberías es un componente crucial para lograr una visión integral del entorno interno durante las operaciones de inspección. La cámara seleccionada para este proyecto es una que es compatible con la placa ESP32, conocida por su capacidad de integración con sistemas de Internet de las Cosas (IoT) y su eficiente procesamiento de señales de video.

La cámara de ESP32-CAM será equipada con un sistema de movimiento que contará con varios servomotores para poder girar la cámara, lo cual facilita la captura de imágenes y la transmisión de video en un campo de visión de 360 grados, como se muestra en la Figura 26. Este rango de visión completa es esencial para inspeccionar la tubería sin puntos ciegos, asegurando que todas las áreas sean examinadas para detectar posibles fallos o deterioros.

Estos servomotores ofrecen la capacidad de movimiento panorámico (movimiento horizontal) y de retrato (movimiento vertical), dando al operador el control remoto total sobre la posición y el ángulo de la cámara. La integración con la placa ESP32 permite que estos movimientos sean precisos y suaves, lo que es fundamental para mantener la calidad de la imagen durante la inspección.



Figura 26. Cámara del ESP32.

Fuente: Autores.

La capacidad de giro completo asegura que todas las partes de la tubería, incluidas las juntas y las conexiones, sean inspeccionadas meticulosamente, lo cual es crucial para detectar fugas, destaca el investigador. La movilidad de la cámara facilita la concentración en áreas de interés, permitiendo al operador enfocarse de cerca en características específicas como corrosión, grietas o acumulaciones. Al ser controlada remotamente, la cámara brinda al operador la capacidad de realizar inspecciones desde una ubicación segura y accesible, reduciendo al mínimo los riesgos asociados con el trabajo en espacios confinados. Además, señala el investigador, las imágenes y videos capturados pueden ser almacenados y analizados posteriormente, lo que resulta beneficioso para mantener registros de la condición de la tubería y llevar a cabo seguimientos de las áreas previamente inspeccionadas.

VI-B3. Alimentación de energía del robot: El robot de inspección de tuberías estará alimentado por baterías para garantizar una movilidad completa y autónoma dentro de las tuberías. Para este robot, se elegirán baterías de iones de litio debido a su eficiencia, capacidad de carga rápida, y su ciclo de vida relativamente largo. La capacidad de la batería se calculará en base a la carga promedio que el robot requerirá durante una sesión típica de inspección, asegurando que el robot pueda operar por un período de tiempo adecuado antes de necesitar una recarga.

Cantidad	Componente	Potencia (W)	Consumo energético (Wh)	Corriente (A)
2	Motores pololu	28,8	28,8	2,4
1	ESP32-CAM	2,4	2,4	0,2
3	Servomotores SG90	4,32	4,32	0,36
1	Sistema de comunicación Flysky	1,2	1,2	0,1
1	GPS GT-U7	0,36	0,36	0,03
	Total			3,09

El investigador realiza cálculos sobre el consumo de los elementos del robot, observando que en conjunto suman un total de 3,09[Ah]. Para abordar esta demanda energética, planea utilizar una batería de 3300[mAh], lo que proporcionaría una autonomía de aproximadamente una hora. Considerando futuras mejoras, sugiere la posibilidad de añadir otra batería en paralelo para aumentar la autonomía del robot a aproximadamente dos horas.

La batería LiPo de 3S (11,1V) es una buena opción para el robot móvil debido a su alta capacidad de energía, que le permite proporcionar suficiente energía para su funcionamiento. Además, las baterías LiPo son ligeras y compactas, lo que las hace ideales para aplicaciones de robótica móvil donde el espacio y el peso son críticos.

Características	Batería de LiPo de 3s (11,1V)	Batería de LiFePO4 de 3s (9,9V)
Tensión nominal	9	10
Capacidad	8	9
Estabilidad y seguridad	7	10
Peso	9	7
Duración de batería	8	9
Costo	7	6
Aprobación	Si	No

VI-B4. Antena Wifi para ESP32CAM: Se usara una antena, como se muestra en la Figura 27, con más ganancia para el ESP32-CAM es una estrategia eficaz para aumentar el alcance de la conectividad Wi-Fi del dispositivo, permitiendo que el robot opere a distancias mayores de un router o punto de acceso Wi-Fi.



Figura 27. Antena para obtener mayor alcance de señal.

Fuente: Autores.

Al concentrar la potencia de la señal en direcciones más específicas, se puede aumentar significativamente el alcance de la conexión Wi-Fi, permitiendo que el ESP32-CAM se comunique a distancias mayores. La antena de mayor ganancia puede mejorar la calidad de la conexión en situaciones donde la señal Wi-Fi es débil o inestable, proporcionando una transmisión de datos más confiable. Al focalizar la señal, hay menos dispersión hacia direcciones no deseadas, lo que puede ayudar a reducir las interferencias con otros dispositivos Wi-Fi.

VI-B5. Control remoto Y receptor: Se escoge el control Flysky FS-i6 por que posee 6 canales, lo que permite un control multifuncional del robot. Esto significa que se puede asignar diferentes funciones o movimientos a cada canal, brindando flexibilidad en la operación del robot.

Características	Flysky FS-i6	FS-CT6B	Radio Link TBFB
Alcance	8	7	9
Números de canales	6	6	8
Pantalla LCD	9	6	7
Facilidad de configuración	8	7	9
Duración de la batería	7	6	8
Compatibilidad	9	7	8
Ergonomía	8	7	8
Precio	9	8	7



Figura 28. Radio Control Flysky FS-i6.

Fuente: Autores.

Para la configuración de controlador, cada motor debe estar conectado a un canal en el receptor mediante su controlador electrónico de velocidad. Enciende el transmisor (la emisora) y el receptor en el robot. Realiza el proceso de vinculación según el manual del radio control mostrado en la Figura 28. Esto usualmente implica mantener presionado un botón de vinculación en el receptor mientras se enciende el transmisor, hasta que un indicador LED confirme que la vinculación ha sido exitosa. Luego asigna cada joystick y botón a un canal específico.

VI-C. Software

VI-C1. Código de ESP32CAM: Para programar el ESP32CAM se utilizó Arduino IDE2 como compilador de la tarjeta de programación y se explicara la lógica que se usó para programar el robot

Este módulo combina una cámara y un microcontrolador ESP32, que proporciona conectividad Wi-Fi y la capacidad de manejar imágenes. El código es un sketch de Arduino que configura el módulo de cámara y establece un punto de acceso Wi-Fi para que puedas conectarte y recibir imágenes a través de un navegador web.

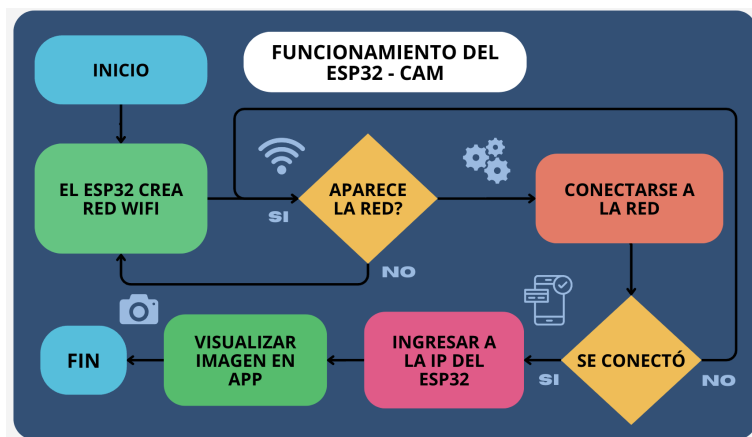


Figura 29. Lógica de programación del ESP32.

Fuente: Autores.

La lógica de programación, que se muestra en la Figura 29, funciona de la siguiente manera: el primer paso consiste en crear un punto de acceso WiFi, el usuario deberá comprobar si el punto de acceso ya existe y está visible. Si el punto de acceso no está visible, debería reiniciar el ESP32. El segundo paso implica conectarse a la red utilizando las credenciales configuradas previamente (SSID y contraseña). Una vez que el usuario se haya conectado, se comienza a transmitir los datos recopilados por el sensor de la cámara del ESP32 hacia la interfaz de usuario. Esto permite verificar la trayectoria que debe seguir el robot dentro de las tuberías.

El código está estructurado para que el módulo ESP32-CAM funcione como un servidor de cámara inalámbrico. Después de cargar este sketch y alimentar el ESP32, se conectara al punto de acceso Wi-Fi configurado y, utilizando la dirección IP proporcionada en el monitor serial, podemos acceder a la interfaz web del servidor de la cámara, como se muestra en la Figura 30, para ver el video en vivo y realizar otras operaciones de cámara.

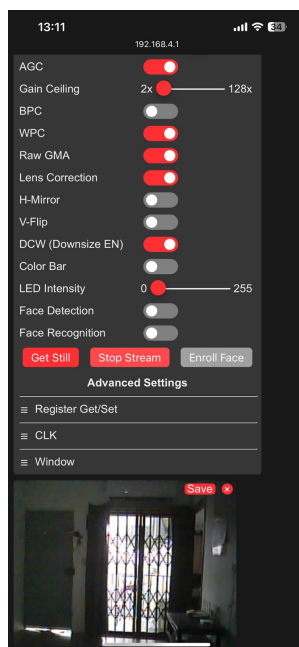


Figura 30. Aplicación desde un teléfono móvil.

Fuente: Autores.

VII. RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados de una serie de pruebas para evaluar el rendimiento del robot móvil en entornos reales. Se realizó pruebas para la cámara de visión 360, proyección de imagen para identificación de errores e incorporación del gps. En relación con la señal, se decidió investigar su alcance dentro de una tubería de 20 metros, tal como se ilustra en la Figura 33. El robot siguió meticulosamente toda la trayectoria de la tubería. Durante la operación del equipo, no se observaron interferencias de señal.



Figura 31. Inicio de tubería.
Fuente: Autores.



Figura 32. Fin de tubería.
Fuente: Autores.



Figura 33. Tubería.
Fuente: Autores.

Una vez validado el alcance del robot se procede a verificar el funcionamiento del gps, se ejecuta y compila el programa dentro del software donde se programa la interfaz de la cámara, nos arroja datos de latitud y longitud, como se muestra en la Figura 34, para comprobar la información que arrojó el software se ingresó los datos mencionados a otra aplicación de gps, como se muestra en la Figura 35.

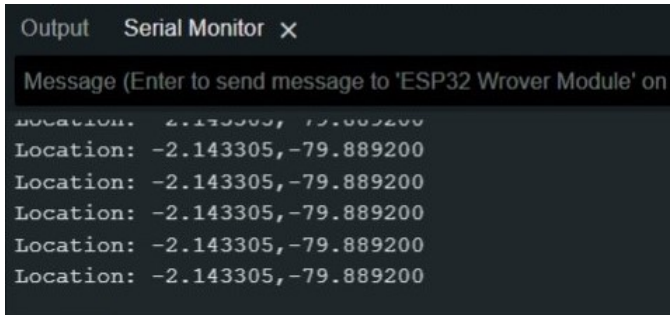


Figura 34. Datos de latitud y longitud.

Fuente: Autores.

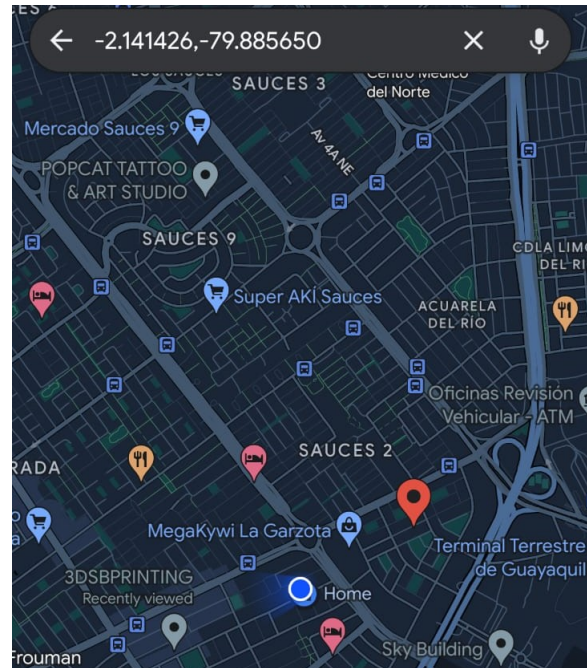


Figura 35. Validación de datos de latitud y longitud.

Fuente: Autores.

En este contexto, para lograr la visión 360 de la cámara, se implementaron 2 servomotores, uno para el giro vertical y otro para el giro horizontal, con el fin de permitir un amplio rango de movimiento, como muestra la Figura 36 y 37. La integración de estos servomotores se llevó a cabo meticulosamente, asegurando su sincronización para lograr un giro completo de 360 grados, lo que proporciona una cobertura completa en la inspección de las tuberías. Esta función habilita al operador para dar órdenes de giro mediante el radio control, lo que facilita la exploración de las tuberías de manera efectiva. Además, gracias al ESP32 CAM, el sistema puede identificar las imperfecciones dentro de las tuberías, ofreciendo una visualización detallada de la condición de las mismas.

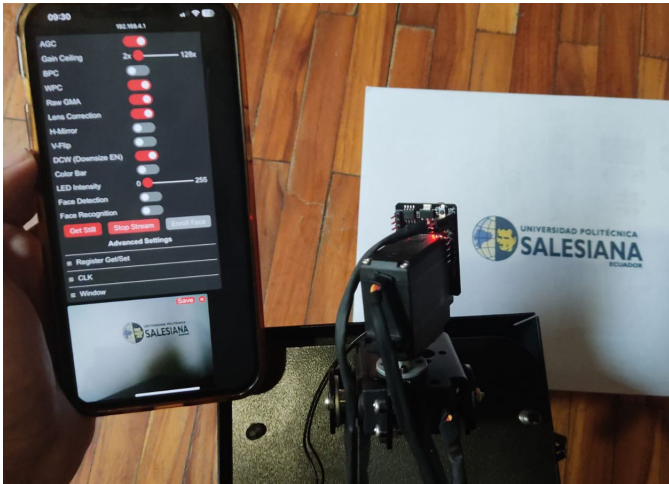


Figura 36. Vista inferior de la cámara.
Fuente: Autores.



Figura 37. Vista superior de la cámara.
Fuente: Autores.

La inclusión y funcionamiento adecuado de los componentes mencionados resultaron esenciales para la ejecución exitosa de las pruebas del robot. Para validar el funcionamiento de todos los componentes, se llevaron a cabo una serie de pruebas en tuberías reales, donde se evaluó la calidad de la conexión, la claridad de la visualización proporcionada por la cámara y la ubicación del robot, que se determinó mediante el uso del sistema de posicionamiento global (GPS). Estas pruebas garantizaron que el robot cumple con los estándares requeridos y estuviera preparado para su aplicación en situaciones reales de inspección de tuberías, como muestra la Figura 38.

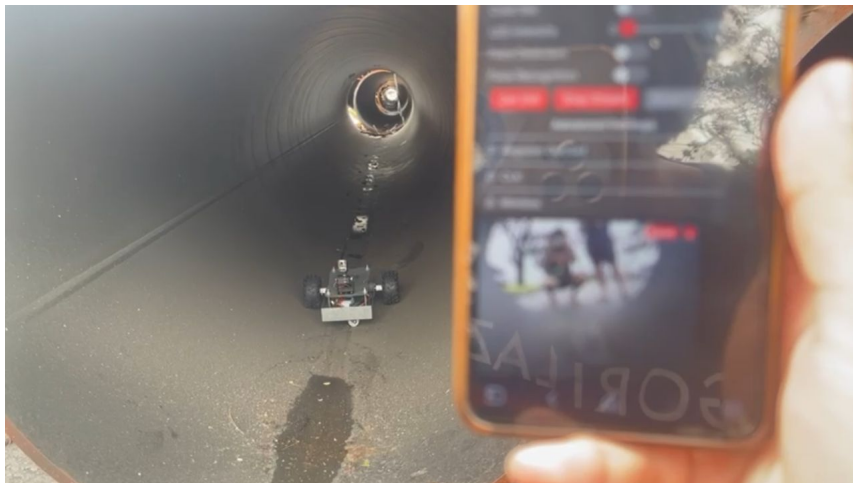


Figura 38. Robot dentro de tubería.
Fuente: Autores.

Para validar la Identificación de anomalías, se utilizó tuberías con desperfectos, en donde, el uso del sistema se pudo identificar los siguientes tipos de fallas: fisuras, perforación y sedimentos, como muestra en las Figuras 39, 40, 41. El sistema únicamente es capaz de detectar fisuras y perforaciones de tamaño significativo.

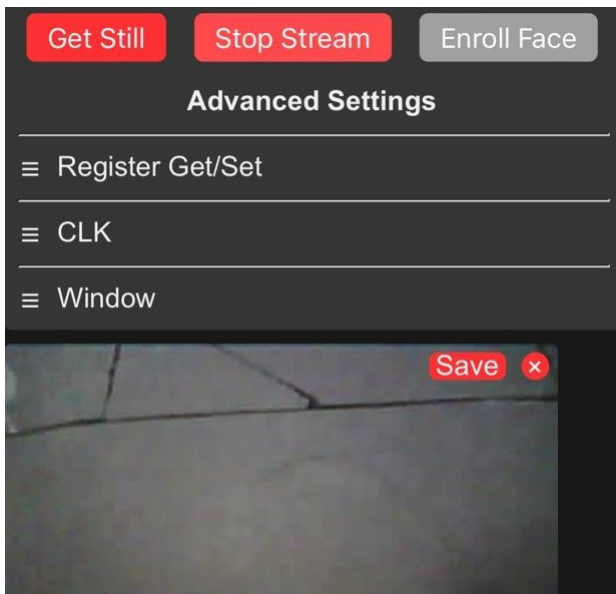


Figura 39. Identificación de fisuras.
Fuente: Autores.

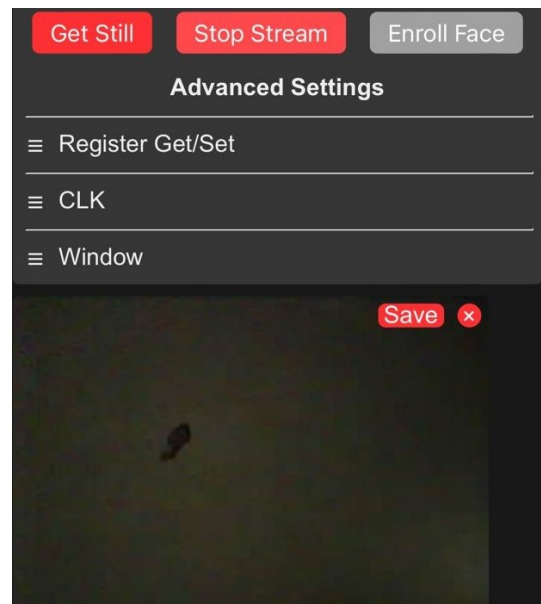


Figura 40. Identificación de perforación.
Fuente: Autores.

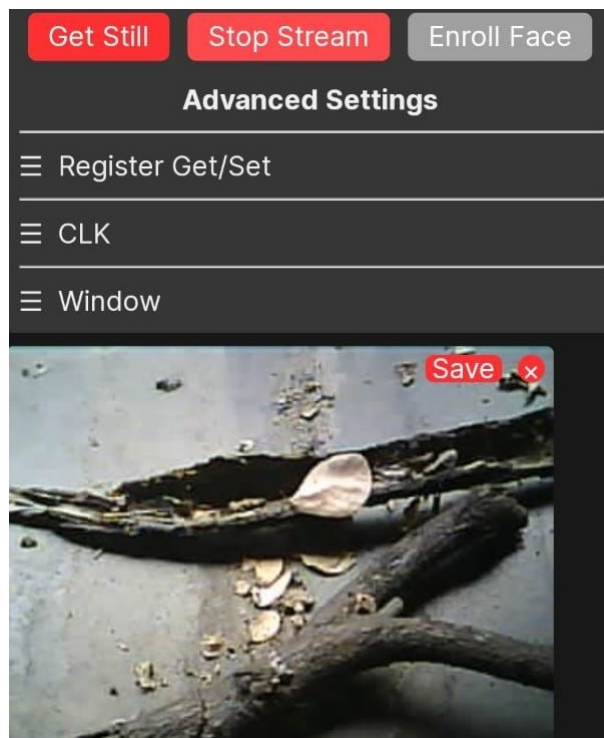


Figura 41. Identificación de sedimentos.
Fuente: Autores.

VIII. CRONOGRAMA Y ACTIVIDADES A DESARROLLAR

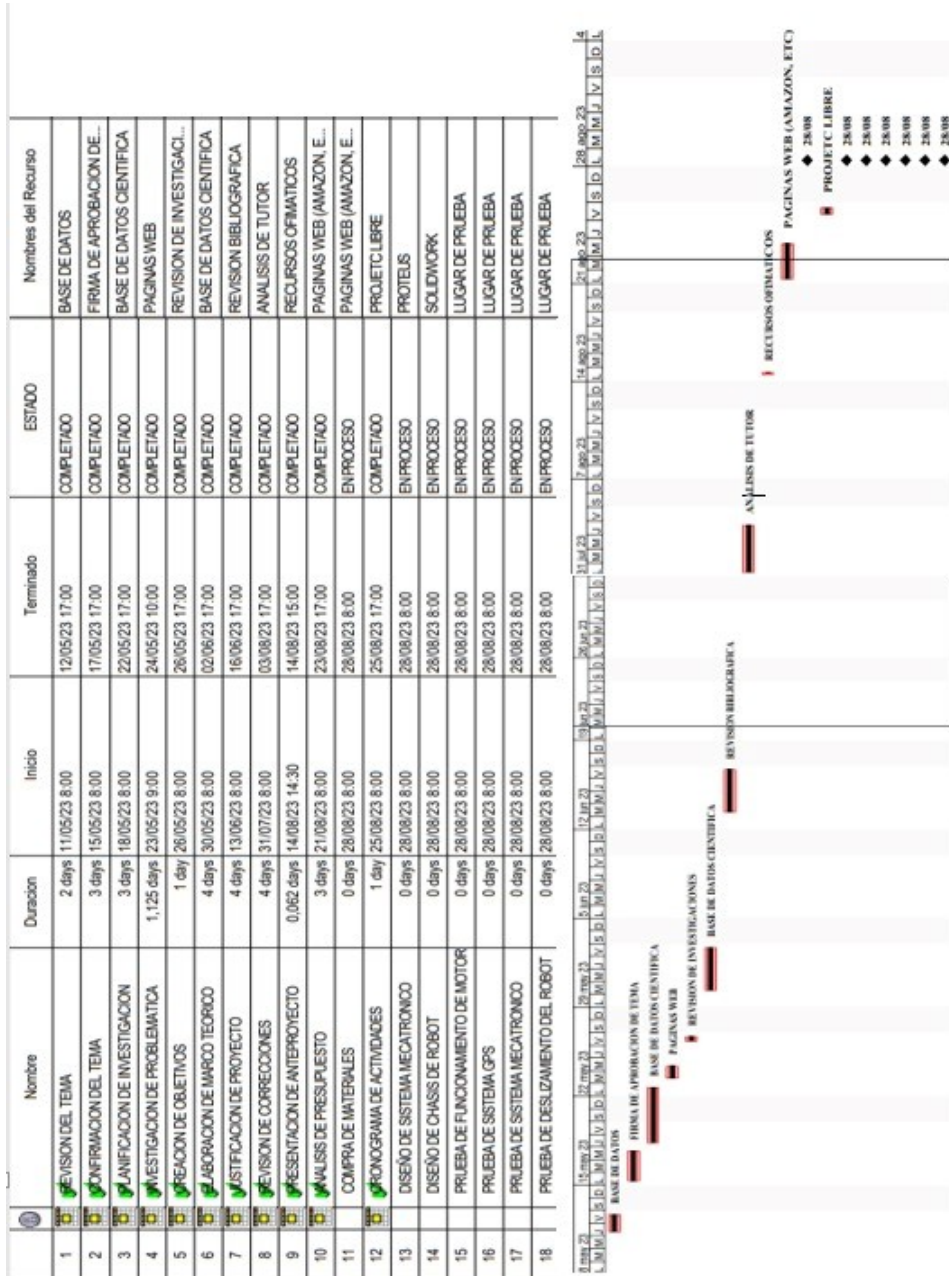


Figura 42. Cronograma de actividades para implementación del anteproyecto de tesis.

IX. PRESUPUESTO

Producto	Cantidad	Valor unitario USD	Valor total USD
Motor pololu	2	30	60
Soporte con servos	1	25	25
Juego de ruedas todo terreno	1	7	7
Flysky FS - i6	1	25	25
KINGMODEL 10Ax2	1	45	45
ESP32CAM	1	70	70
Batería 3S de 11,1V	1	45	45
		Total:	277

X. CONCLUSIONES

La estructura presenta una capacidad de carga de $3,5[kg]$, con una deformación de $0,00002[mm]$ y un esfuerzo máximo de $68,48[MPa]$, tal como se evidencia en las Figuras 17 y 18; por consiguiente, se asegura que la estructura está apta para soportar las cargas presentes en la implementación sin contratiempos.

El diseño mecánico implementado en el software CAD, como se ilustra en la Figura 15, ha permitido una visualización del robot teleoperado construido con material anticorrosivo, ya que, el robot emplea su operación dentro de un ambiente húmedo.

La inclusión del microcontrolador ESP32CAM con un mecanismo de giro 360, facilita la observación en tiempo real de la imagen del interior de la tubería, consecuentemente, el robot cubre la necesidad de hallar las imperfecciones en el interior de la tubería.

Además, en la Figura 29 se detalla la lógica de programación diseñada para que el microcontrolador genere una interfaz que permita al operador visualizar en tiempo real la imagen proyectada por la cámara.

El sistema para visualizar anomalías presentó un rendimiento aceptable en cuanto se observó los desperfectos, como se muestra en las Figuras 39 , 40 y 41. Dando resultados para que el operador tenga una visión de lo que presenta dentro de la tubería para poder realizar su respectiva acción.

XI. RECOMENDACIONES

Se pueden emplear repetidores o dispositivos de mayor alcance inalámbrico para extender la red local. Utilizar impresiones en 3D puede reducir costos al permitir la visualización de aspectos físicos reales. También, aconseja el uso de tuberías con diámetro superior a 500mm para el análisis de fallas, ya que las dimensiones del robot limitan su capacidad en diámetros más pequeños. Además, es preferible utilizar un ordenador con un procesador de última generación para un procesamiento adecuado de imágenes y una mejor observación de fallas. Por último, se recomienda el uso de una cámara web para evitar el cableado o la incorporación de un miniordenador en el robot, lo cual aumentaría sus dimensiones y peso.

REFERENCIAS

- [1] J. C. Soto Mejías, «Diseño de un sistema de medición de agua no contabilizada en la Asociación Administradora del Acueducto y Alcantarillado,» 2020.
- [2] C. M. Peña González, «Diseño y construcción de un robot móvil para un equipo detector de metales capaz de realizar búsqueda de minas antipersonal. Bucaramanga, Colombia,» 2020.
- [3] J. M. Duran Juárez y A. Torres Rodríguez, «Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media,» *Espiral (Guadalajara)*, vol. 12, n.º 36, págs. 129-162, 2006.
- [4] D. A. C. Solano y C. Parra, «Aplicación de sistemas de monitoreo remoto tendientes a mejorar la disponibilidad de los sistemas de levantamiento artificial de crudo de la superintendencia de operaciones putumayo (SOP)-ECOPEL SA,»
- [5] C. D. Alonso Guzmán, «Modelo híbrido para la toma de decisiones en programas de rehabilitación de tuberías para sistemas de abastecimiento de agua: Aplicación a la ciudad de Celaya, Gto.(México),» Tesis doct., Universitat Politècnica de València, 2010.
- [6] V. Villani, F. Pini, F. Leali y C. Secchi, «Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications,» 2018.
- [7] A. Caverzasi, F. Saravia, O. Micolini, L. Mathé y L. F. Lichtensztein, «Robot móvil autónomo para crear mapas 3D en un ambiente acotado,» en *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, IEEE, 2014, págs. 786-791.
- [8] F. García-Luna y A. Morales-Díaz, «Towards an artificial vision-robotic system for tomato identification,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n.º 16, págs. 365-370, 2016.
- [9] C. J. Jami Quinatoa, «Diseño y construcción de un robot de desinfección de superficies en ambientes cerrados por medio de rayos ultravioletas controlado mediante una app,» 2021.
- [10] A. Odorico, «Marco teórico para una robótica pedagógica,» *Revista de informática educativa y medios audiovisuales*, vol. 1, n.º 3, págs. 34-46, 2004.
- [11] H.-y. Zhang, W.-m. Lin y A.-x. Chen, «Path planning for the mobile robot: A review,» *Symmetry*, vol. 10, n.º 10, pág. 450, 2018.
- [12] M. J. M. Salazar, M. X. D. Villegas y M. d. L. P. Robalino, «Modeling, Simulation and Control of An Omnidirectional Mobile Manipulator Robot,» *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 11, n.º 5s, págs. 229-237, 2023.
- [13] Á. A. Rodríguez, J. A. Figueredo y J. A. Chica, «Navegación de un robot móvil autónomo aplicado a la agricultura de precisión: Principios y aplicaciones de geolocalización en un cultivo de prueba,» en *Desarrollo e innovación en ingeniería*, Instituto Antioqueño de Investigación (IAI), 2019, págs. 280-289.
- [14] C. Papachristos, S. Khattak, F. Mascarich y K. Alexis, «Autonomous navigation and mapping in underground mines using aerial robots,» en *2019 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, 2019, págs. 1-8.
- [15] Y. Liu, «Planificación de múltiples trayectorias de un solo robot móvil en un entorno de obstáculos dinámicos basado en el aprendizaje de refuerzo= Using reinforcement learning for multiple way-points path planning of single mobile robot in the dynamic obstacle environment,» Tesis doct., ETSI_Informatica, 2022.
- [16] R. Ríos-Hernández, «Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión,» *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 11, n.º 4, págs. 75-84, 2021.
- [17] E. I. Jiva, «Desarrollo de la teleoperación de robots industriales y colaborativos mediante técnicas avanzadas de visión artificial,» 2019.
- [18] R. components. «B1 Robot cuadrúpedo.» (2016), dirección: <https://www.roscomponents.com/es/inicio/b1-robot-cuadrupedo?rewrite=b1-robot-cuadrupedo>.
- [19] Robotnik. «Robots móviles autónomos.» (2022), dirección: <https://robotnik.eu/es/productos/robots-moviles/>.
- [20] J. M. Benites Ramírez, «Análisis comparativo de métodos de inspección para establecer los espesores en tuberías por corrosión,» 2022.
- [21] F. A. Meza Zorrilla et al., «Diseño del proceso de producción de una plataforma móvil de inspección de tuberías,» 2018.

- [22] G. C. Briseño, «Desarrollo de un sistema electrónico para el sistema de control de desplazamiento de un robot de inspección para tuberías de 8 pulgadas.» 2019.
- [23] A. R. Córdoba Malaver, «Desarrollo de un robot móvil para inspección del interior de tuberías.» 2019.
- [24] M. M. G. González, J. P. R. Sánchez y P. D. F. D. Ingeniería, «MODELACIÓN ESTADÍSTICA DE FALLAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. CASO DE ESTUDIO: BOGOTÁ, COLOMBIA,» 2018.
- [25] Netjet. «¿Cuáles son los tipos de roturas en las tuberías?» (2018), dirección: <https://www.netjet.es/cuales-son-los-tipos-de-roturas-en-las-tuberias/>.
- [26] A. F. Segovia Razo, «Diseño e implementación de un robot móvil con un sistema de sensores inteligentes para la detección de fallas en tuberías primarias de Lima Norte,» 2020.
- [27] S. Vue. «Multisensor nspección de tuberías.» (2015), dirección: <https://sewervue.com/multi-sensor-pipe-inspection-system.html>.
- [28] L. M. Rosas Romero, «Estado del arte de técnicas no destructivas para inspección de soldadura en tuberías,» 2019.
- [29] P. T. Eli Dayan NOVO DR LTD. «Pipe Inspection with Digital Radiography.» (2014), dirección: https://www.ndt.net/article/ndtnet/papers/Pipe_Inspection_with_Digital_Radiography.pdf.
- [30] G. A. Piedrahita, «Robot operado con aplicación móvil ROCA: Prototipo de robot teledirigido Jeimy R. Sosa G. Camila A. Gutiérrez L. 2,» *INVESTIGACIÓN FORMATIVA EN INGENIERÍA*, pág. 273, 2018.
- [31] K. M. Castro Coro y S. A. Flores Ortiz, «Construcción de un robot de batalla de tres libras aplicando controles de tecnología de radio control.,» 2023.
- [32] C. un robot. «Qué es un robot. partes de un robot. tipos y ejemplos de robots.» (2017), dirección: <https://construyendounrobot3e.blogspot.com/2017/05/entrada-2.html>.
- [33] R. Rodriguez y J. Gomez, «Electrónica Analógica,» 2017.
- [34] F. S. Espinosa, *LOS MICROCONTROLADORES AVR DE ATMEL*, Primera. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA, 2012.
- [35] Robotics. «Wifi + bluetooth ESP32-CAM.» (2023), dirección: <https://roboticsec.com/producto/wifi-bluetooth-esp32-cam/>.
- [36] A. R. M. Pontes, J. M. Holderbaum, V. G. Laim y D. J. Chivers, *The Forests of Maracá Northern Brazilian Amazonia: Structure, Phenology, Fruit Assessment and an Illustrative Field Guide to Their Fruit*. Editora da Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- [37] F. V. M. Pillco y L. M. G. González, «Análisis y modelado de baterías de Ion Litio para vehículos eléctricos,» 2018.
- [38] V. Hevás, *Elementos de Máquinas y Sistemas*. 2017.
- [39] F. Contreras y R. Sánchez, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRÁCTICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS, COMO APOYO A LA ASIGNATURA DISEÑO DE MÁQUINAS II,» 2010.
- [40] S. electrónica. «Pololu-4752.» (2022), dirección: <https://www.sigmaelectronica.net/producto/pololu-4752/>.
- [41] D. N. García, «Diseño del chasis y carcasa del robot móvil New Guardian,» 2018. dirección: <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/180393>.
- [42] ROBOTICS. «Kit chasis carro metalico/robot batalla + motorreductores metalicos.» (2023), dirección: <https://roboticsec.com/producto/kit-chasis-carro-metalico-robot-batalla-motorreductores-metalicos/>.
- [43] T. S. Gabriel, O. A. Guevara y J. L. O. Avila, «Electrical design for control of wheelchair mechanism economically accessible in honduras,» Latin American y Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2020, ISBN: 9789585207141. DOI: 10.18687/LACCEI2020.1.1.239.
- [44] A. model lingtutor. «Transmisor rc flysky fs-i6 2.4g 6ch ppm con receptor fs-ia6b.» (2024), dirección: <https://aeromodellingtutor.in/products/flysky-fs-i6-2-4g-6ch-ppm-rc-transmitter-with-fs-ia6b-receiver>.
- [45] I. José y M. J. Terán, «MANUAL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO SANITARIO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL CAMPUS XALAPA UNIVERSIDAD VERACRUZANA,» 2017.
- [46] V. S. D. Acquisto. «Cómo dimensionar tuberías en sistemas de agua potable.» (2022), dirección: <https://www.sabspa.com/es/como-dimensionar-tuberias-en-sistemas-de-agua-potable/>.

XII. ANEXOS



Figura 43. Preparación para el pintado.
Fuente: Autores.



Figura 44. Pintado de estructura.
Fuente: Autores.

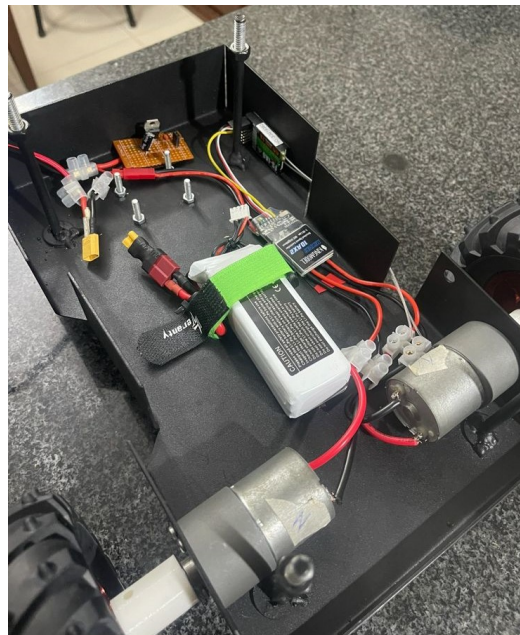


Figura 45. Conexión de componentes.
Fuente: Autores.