



**Diseño de un robot escalador de alta flexibilidad para medición de tuberías en exteriores**

# **Proyecto de Investigación**

Por

**Daniel Moreno Orduña**

En cumplimiento a los requerimientos para la obtención de  
la Especialidad de Tecnólogo en Mecatrónica

Revisor académico: Dr. Julio César Solano Vargas

Santiago de Querétaro, Qro., México, octubre 2019.



# Índice de Contenido

## Agradecimientos

## Resumen

<b>1. GENERALIDADES DEL PROYECTO .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.1 Objetivo general .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>9</b>
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.1 Alcances.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.2 Limitaciones.....</b>	<b>11</b>
<b>2. FUNDAMENTOS.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1 Robots para inspección de tuberías .....</b>	<b>12</b>
2.1.1.1 Robot de Inspección Visual - iPEK ROVION.....	12
2.1.1.2 EQUUS .....	13
<b>2.1.2 Robots escaladores para inspección de tanques .....</b>	<b>13</b>
2.1.2.1 RMS2.....	13
2.1.2.2 RoboPipe.....	14
<b>2.2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>17</b>
<b>3. DESARROLLO .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 DISEÑO.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.1 Rueda.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2 Soporte delantero .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.3 Soporte trasero .....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>29</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>35</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>36</b>

## Índice de Figuras

ILUSTRACIÓN 2.1 RX-130 IPEK ROVION [2] .....	12
ILUSTRACIÓN 2.2 EQUUS .....	13
ILUSTRACIÓN 2.3 ROBOT RMS2 [3] .....	14
ILUSTRACIÓN 2.4 ROBOPIPE [4] .....	15
ILUSTRACIÓN 2.5 ROBOT EXPLORADOR PRIMERA GENERACIÓN [5] .....	16
ILUSTRACIÓN 2.6 ROBOT EXPLORADOR SEGUNDA GENERACIÓN [5] .....	16
ILUSTRACIÓN 2.7 METODOLOGÍA DEL DISEÑO EN SOFTWARE Y DEL DESARROLLO DEL PROTOTIPO .....	17
ILUSTRACIÓN 3.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	18
ILUSTRACIÓN 3.2 VISTA SUPERIOR DEL PROTOTIPO.....	19
ILUSTRACIÓN 3.3 VISTA INFERIOR DEL PROTOTIPO .....	19
ILUSTRACIÓN 3.4 VISTA FRONTAL DEL PROTOTIPO .....	20
ILUSTRACIÓN 3.5 VISTA TRASERA DEL PROTOTIPO .....	20
ILUSTRACIÓN 3.6 RUEDA MALLA SÓLIDA.....	21
ILUSTRACIÓN 3.7 ANÁLISIS ESTÁTICO 1 .....	22
ILUSTRACIÓN 3.8 ANÁLISIS ESTÁTICO 2.....	22
ILUSTRACIÓN 3.9 DEFORMACIÓN UNITARIA ESTÁTICA.....	22
ILUSTRACIÓN 3.10 DESPLAZAMIENTO ESTÁTICO.....	23
ILUSTRACIÓN 3.11 SOPORTE DELANTERO MALLA SÓLIDA 1 .....	24
ILUSTRACIÓN 3.12 SOPORTE DELANTERO MALLA SÓLIDA 1 .....	24
ILUSTRACIÓN 3.13 ANÁLISIS ESTÁTICO - FUERZA HORIZONTAL.....	24
ILUSTRACIÓN 3.14 DESPLAZAMIENTO ESTÁTICO - FUERZA HORIZONTAL.....	25
ILUSTRACIÓN 3.15 ANÁLISIS ESTÁTICO1 - FUERZA INCLINADA.....	25
ILUSTRACIÓN 3.16 ANÁLISIS ESTÁTICO2 - FUERZA INCLINADA.....	26
ILUSTRACIÓN 3.17 DESPLAZAMIENTO ESTÁTICO - FUERZA INCLINADA .....	26
ILUSTRACIÓN 3.18 DEFORMACIÓN UNITARIA ESTÁTICA - FUERZA HORIZONTAL.....	26
ILUSTRACIÓN 3.19 SOPORTE TRASERO MALLA SÓLIDA 1 .....	27
ILUSTRACIÓN 3.20 SOPORTE TRASERO MALLA SÓLIDA 2.....	27
ILUSTRACIÓN 3.21 ANÁLISIS ESTÁTICO 1 .....	28
ILUSTRACIÓN 3.22 ANÁLISIS ESTÁTICO 2 .....	28
ILUSTRACIÓN 3.23 DEFORMACIÓN UNITARIA .....	28
ILUSTRACIÓN 3.24 PROTOTIPO VISTA LATERAL .....	29
ILUSTRACIÓN 3.25 BALERO SUJETO AL ARCO.....	30
ILUSTRACIÓN 3.26 INCLINACIÓN EN RUEDAS DEL PROTOTIPO .....	31
ILUSTRACIÓN 3.27 PROTOTIPO TERMINADO .....	31
ILUSTRACIÓN 3.28 PRUEBAS DE CAMPO CON EL PROTOTIPO FINALIZADO.....	32
ILUSTRACIÓN 4.1 RESULTADO DE LA PRUEBA DE CAMPO.....	33

## **Agradecimientos**

A mis padres, por su apoyo incondicional que toda la vida me han y me siguen brindando, porque sin ellos difícilmente hubiera llegado hasta acá.

A mis hermanos, porque siempre estuvo presente su apoyo moral que me impulsaba en momentos difíciles.

A mi asesor, el Dr. Julio César Solano Vargas, por sus conocimientos y consejos transmitidos, además de su flexibilidad y apoyo para llevar a cabo este proyecto.

A mis compañeros Juan Manuel Barrera Fernández, Francisco Jiménez Oronia y Kevin Miramontes Escobedo, por su apoyo, asesorías y compañerismo durante todo el periodo de especialidad, y a Diego Alberto Pérez Barraza y Raúl Alberto Tinajero por su apoyo para desarrollar este proyecto.

Al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la oportunidad para cursar este posgrado y poder superarme día con día.

## **Resumen**

En el presente documento se expone la propuesta de un diseño para un robot escalador explorador para tuberías metálicas que será aplicado para ensayos no destructivos y así mismo se muestra el diseño desarrollado en SolidWorks y los análisis de esfuerzos realizados a las principales piezas que se verán sometidas a un mayor esfuerzo; posteriormente se explica cómo es que se fabricó un prototipo para poner a prueba el diseño propuesto y el porqué es que se decidió emplear los recursos usados y fabricarlo de la manera en que se hizo. Finalmente se plantean los resultados obtenidos tras realizar pruebas de campo ya con el prototipo terminado, en las cuales se evaluó la funcionalidad de los mecanismos y que sirvió para detectar debilidades y fortalezas del diseño propuesto.

# **1 Generalidades del Proyecto**

## **1.1 Introducción**

En las últimas décadas la robótica ha ido tomando un papel importante dentro de la industria, ya sea para optimizar procesos, elevar la calidad de los productos o sustituir a los humanos en tareas que requieran una gran precisión o que puedan presentar algún tipo de riesgo para el personal que se encarga de realizar alguna tarea en específico. Debido a esto surge la necesidad de profundizar en dicha área, empleando recursos naturales, para impulsar el desarrollo de nuestro país [1].

A pesar de que anteriormente ya se ha trabajado en algunos proyectos, la experiencia aún es poca en comparación con otros países más desarrollados, por lo cual también existe una falta de confianza por parte del cliente. Pero la necesidad de mejorar debido a la exigencia del mercado obliga a desarrollar nuevas tecnologías que nos ayuden a cumplir con nuestros objetivos [1].

Por esta razón se hace la propuesta de un diseño mecánico de un robot de inspección para la medición de espesores de tuberías el cual tiene como objetivo principal el verificar el buen estado de las mismas con el fin de garantizar la seguridad de la estructura y de esta forma eliminar los riesgos que se presentan al realizar las medidas manualmente, además de optimizar el proceso de medición para reducir tiempos [1].

Este trabajo se enfoca especialmente en el diseño de un robot de inspección capaz de adherirse a las tuberías metálicas gracias a su flexibilidad y a un juego de ruedas magnéticas con las que cuenta, además de tener la particularidad de saltar las bridas que unen a las tuberías y que pueden parecer un obstáculo difícil de superar pero que le es posible debido a su mecanismo [1].

## 1.2 Planteamiento del problema

Actualmente CIDESI cuenta con un robot de inspección capaz de escalar grandes tanques de hidrocarburos para ser inspeccionados, el cual es el resultado años de experiencia y la evolución de prototipos anteriores que desempeñaban la misma tarea, pero con algunas limitaciones en comparación con la propuesta planteada en este documento. El actual robot tiene un grado de flexibilidad relativamente bajo porque sus requerimientos no le exigen más ya que los tanques para los que fue diseñado tienen diámetros tan grandes que prácticamente el robot se desliza sobre una superficie plana, por lo que no es posible emplearlo en tuberías de 8 in de diámetro debido a que sus limitantes no le permiten igualar la forma de la tubería. Además, los obstáculos más grandes que se le pueden presentar en un tanque de hidrocarburos son los cordones de soldadura los cuales, en comparación con las bridas de las tuberías, son obstáculos pequeños por lo que el diseño no fue creado con un mecanismo que superara estos obstáculos. Por estas razones es necesario diseñar un robot que cuente con un rango de flexibilidad mayor el cual le permita abrazarse a las tuberías de 8 in de diámetro y que además esté diseñado con un mecanismo con el que pueda superar los obstáculos a los que se puede enfrentar, que en este caso son principalmente las bridas, sin dejar de lado el objetivo principal del robot que es la inspección por medio del ultrasonido.

Con esta tecnología se pretende obtener procesos de inspección no destructivos más optimizados y seguros, ya que de esta manera se sustituye la inspección realizada directamente por el personal quien en ocasiones puede poner en riesgo su salud debido a los lugares en los que se encuentre la zona a inspeccionar, como alturas y áreas de difícil acceso, además de comprobar el estado físico de las tuberías.



## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un mecanismo para un robot escalador para inspección de tuberías metálicas para diámetros exteriores, el cual le permita al robot desplazarse libremente sobre tuberías (de 8 in aprox.) sin importar los obstáculos a los que se pueda enfrentar.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Proponer posibles sistemas mecánicos o diseños que le brinden al robot la habilidad de escalar las bridas, las cuales pueden tener alturas de hasta 2.3622 in (6 cm) aproximadamente y que se encuentran presente en las tuberías a inspeccionar, y seleccionar la mejor opción. El diseño también debe de considerar la flexibilidad del robot para ser capaz de adaptarse a las tuberías que tienen 8 in (20.32 cm) de diámetro.
2. Realizar el mecanismo en el software de diseño SolidWorks y aplicar análisis de esfuerzos para comprobar su resistencia.
3. Fabricar un prototipo que cuente con los elementos básicos antes mencionados, los cuales son el mecanismo para brincar bridas y la flexibilidad para abrasarse a las tuberías, para comprobar si el diseño propuesto es funcional o no.
4. Validar resultados de acuerdo con las pruebas realizadas con el prototipo.

## 1.4 Justificación

Debido a la evolución de las industrias, las normas son cada vez más exigentes y plantean nuevos métodos de seguridad por lo que las inspecciones son cada vez más estrictas tanto para la zona a inspeccionar como el método para llevar a cabo dicha inspección. Por lo tanto, surge la necesidad de mejorar estos aspectos donde, en ocasiones como esta, es necesario el mejoramiento, la innovación o la creación de nuevas tecnologías.

El desarrollo de un robot de inspección de tuberías nos brinda diferentes beneficios:

- Implementación de pruebas no destructivas en tuberías de agua las cuales son de suma importancia ya que las paredes de las tuberías suelen desgastarse con el tiempo y presentar adelgazamiento, grietas o algún otro defecto que cause fugas o derrames.
- Procesos optimizados debido a que sustituye el trabajo realizado directamente por el personal y a su vez se elimina todo el equipo de seguridad empleado por el mismo.
- Elimina riesgos para el personal ya que este no se ve obligado a exponer su seguridad en zonas de difícil acceso o donde las alturas son grandes.
- Desarrollo y aportación de tecnología mexicana.

## **1.5 Alcances y limitaciones**

### **1.5.1 Alcances**

Lograr un diseño mecánico tal que sus características, como grados de libertad, flexibilidad, accesorios, entre otros, le permitan desplazarse libremente sobre una tubería metálica, considerando que la inspección únicamente se realizará sobre la parte exterior de las tuberías

### **1.5.2 Limitaciones**

Pocos expertos en el área, además de la poca experiencia en el tema.

Falta de presupuesto para la fabricación de un prototipo robusto y que sea idéntico al diseño propuesto, por lo cual el prototipo fue fabricado con materiales con los que se contaba y que podían ser manufacturado con herramientas con las que también se contaba. Debido a esto el prototipo se centró en los aspectos principales a evaluar del diseño.

## 2 Fundamentos

### 2.1 Antecedentes

En el ámbito de la robótica de inspección han surgido diferentes proyectos con diferentes características que dependen de las necesidades que se buscan cubrir. Existe la inspección por medio de cámaras, por medio del ultrasonido, por interiores, por exteriores, robots escaladores, entre otros.

#### 2.1.1 Robots para inspección de tuberías

##### 2.1.1.1 Robot de Inspección Visual - iPEK ROVION

El sistema robótico de inspección visual de tuberías iPEK ROVION (ilustración 2.1) representa la plataforma de diagnóstico de redes de saneamiento más avanzada del mercado. Realiza la inspección por medio de una cámara zoom oscilo giratoria y es capaz de trabajar en tuberías con diámetros desde 100 mm hasta 2.500 mm, longitudes de cable hasta 200 m, 300 m, 500 m e incluso 1.000 mm en versiones especiales. Adicionalmente el robot de inspección se puede adaptar para sondeos verticales con la incorporación de ruedas magnéticas [2].



Ilustración 2.1 rx-130 iPEK ROVION [2]

### 2.1.1.2 EQU S

El EQU S (ilustración 2.2) es un sistema de inspección por interiores para tuberías de hidrocarburos. Cuenta con un mecanismo que porta 42 sensores ultrasónicos alrededor y puede extenderse para igualar el diámetro del tubo, por lo cual es muy efectivo al momento de realizar la inspección debido a que dichos sensores cubren en su totalidad o en gran parte (dependiendo del diámetro) la inspección realizada a la tubería para determinar así las condiciones de la estructura metálica.

Este sistema de inspección es de los más recientes y ha sido desarrollado por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).



Ilustración 2.2 EQU S  
Fuente: elaboración propia

## 2.1.2 Robots escaladores para inspección de tanques

### 2.1.2.1 RMS2

Otro sistema es el RMS2 (Figura 2.3), es de gran velocidad, el sistema de mapeo de la corrosión ultrasónica de alta precisión de acceso remoto diseñado para evaluar la condición de los activos como tanques de almacenamiento, tuberías, recipientes a presión y otros equipos críticos, apoyando programa de inspección eficiente que apoyan los procesos de gestión de integridad para asegurar un funcionamiento eficaz y seguro [3]. El RMS2 es extremadamente flexible con una gama de cabezales de exploración para adaptarse a diferentes requisitos de inspección, es

decir, existen varias versiones del sistema RMS2, la selección de este depende del área que se desea cubrir.

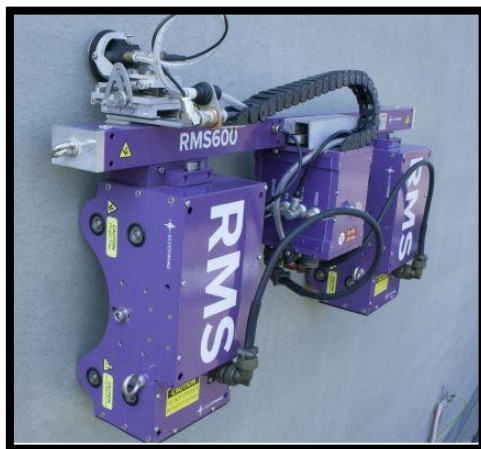


Ilustración 2.3 Robot RMS2 [3]

Estos equipos son de los más utilizados para realizar este tipo de inspección, cabe mencionar que son extranjeros (EUA y Gales, respectivamente), los dos últimos sistemas son de la misma empresa. Los equipos realizan la inspección de la misma manera, es decir, se adhieren a la estructura gracias a sus ruedas magnéticas y utilizan transductores ultrasónicos para realizar la medición, la cual es realizada de manera continua en el caso del Robot Spider de manera puntual, en el caso del Robot Scorpion2 la realiza de manera puntual y de manera continua y el robot RMS de manera continua. En lo que corresponde en sus métodos de operación, el Robot Spider solo modo manual y el Scorpion2 y el RMS2 cuentan con dos modos de operación, entre otras características. Las empresas que cuentan con estos equipos brindan el servicio a compañías que lo requieren, donde los costos son muy elevados.

#### 2.1.2.2 RoboPipe

El RoboPipe es un robot capaz de inspeccionar las tuberías de la industria química y petroquímica (ilustración 2.4).

El robot prototipo equipado con una cámara y sistema de ultrasonido inspecciona las tuberías y de manera visual verifica la corrosión externa. Sube verticalmente mientras se sostiene con

imanes, puede pasar obstáculos como codos de 90 grados mientras el personal a nivel de piso registra y monitorea los datos. Se trata de un robot muy pequeño que puede pasar entre dos tubos, en un espacio de 88 milímetros

Este trabajo fue diseñado por la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. de C.V. (COMIMSA) de manera conjunta con el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Saltillo [4].



Ilustración 2.4 RoboPipe [4]

En México estos equipos son los que generalmente utilizan para realizar las tareas de inspección. Debido a que el sector de almacenamiento de hidrocarburos es muy abundante en el territorio mexicano, el departamento de Energía del CIDESI optó por el desarrollo del Robot Explorador, el primer robot medidor de espesores hecho en México, actualmente se cuenta con la segunda versión de este robot y que a su vez se tienen avances en su tercera versión. Ambos proyectos son llevados a cabo en el laboratorio de robótica industrial y de Inspección a cargo del Dr. Julio Cesar Solano Vargas.

El Robot Explorador primera y segunda generación físicamente son distintos, pero con la misma finalidad. La primera generación del Robot Explorador (Figura 2.5) cuenta con un transductor para la medición de espesores de manera puntual, con un sistema para la detección de obstáculos, todo controlado gracias a un controlador digital y es operado por medio de un control remoto.



Ilustración 2.5 Robot Explorador Primera Generación [5]

Por otra parte, la segunda generación, (Figura 2.6) cuenta con un sistema de medición de espesores de manera puntual y continua, con ayuda de un acoplante, de igual manera cuenta con un sistema de detección de obstáculos manejado por un controlador digital de altas prestaciones, es operado por medio de un control remoto y cuenta con diferentes modos de operación.



Ilustración 2.6 Robot Explorador Segunda Generación [5]



## 2.2 Metodología

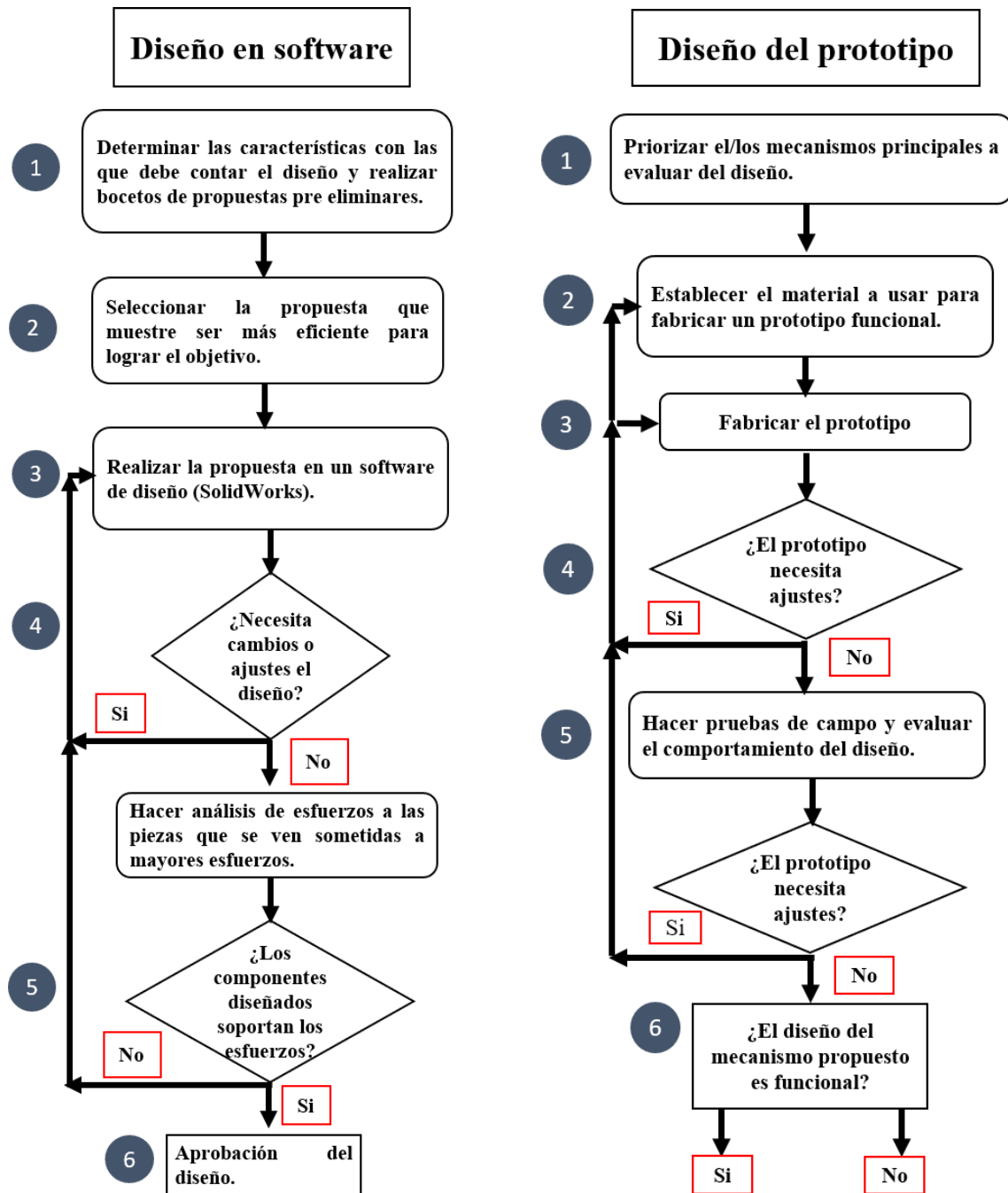


Ilustración 2.7 Metodología del diseño en software y del desarrollo del prototipo  
Fuente: elaboración propia

## 3 Desarrollo

### 3.1 Diseño

Tomando en cuenta el objetivo a cumplir, se comenzó con una lluvia de ideas en las que se plantearon diferentes propuestas con las cuales se solucionaba el objetivo principal abordado anteriormente. Las primeras propuestas presentaban inconvenientes que no permitían lograr en su totalidad con el objetivo, pero cada idea fue acercando cada vez más a la propuesta final. Esta propuesta cumple características que le permitieron ser la más apta para el proyecto, que son:

- Mecanismo capaz de superar las bridas de las tuberías a inspeccionar.
- Flexibilidad para adaptarse al diámetro de las tuberías.

Una vez establecida la propuesta se procedió a desarrollar el diseño en SolidWorks.

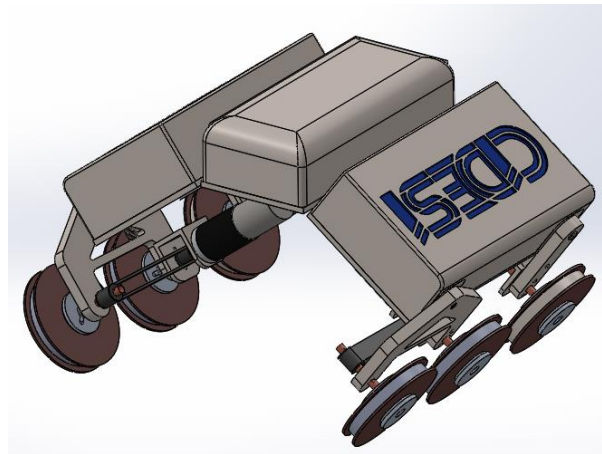


Ilustración 3.1 Diseño del prototipo  
Fuente: elaboración propia

El diseño consta de 3 cuerpos unidos entre ellos de tal forma que exista una flexión para aumentar o disminuir los grados de apertura, que es lo que le da la facilidad al robot de adaptarse al diámetro de las tuberías, y a su vez estos cuerpos sirven para colocar dentro toda la electrónica y/o componentes que requiera.

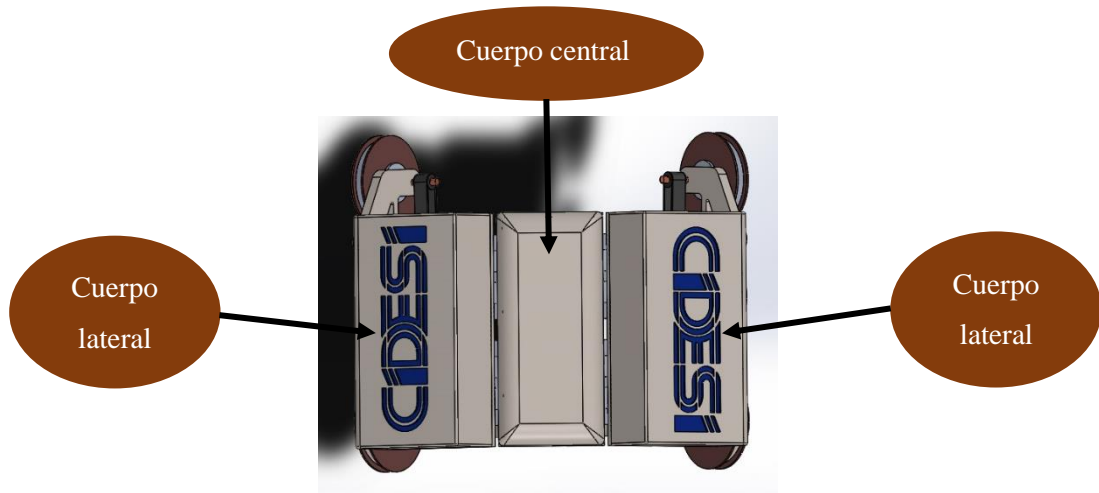


Ilustración 3.2 Vista superior del prototipo  
Fuente: elaboración propia

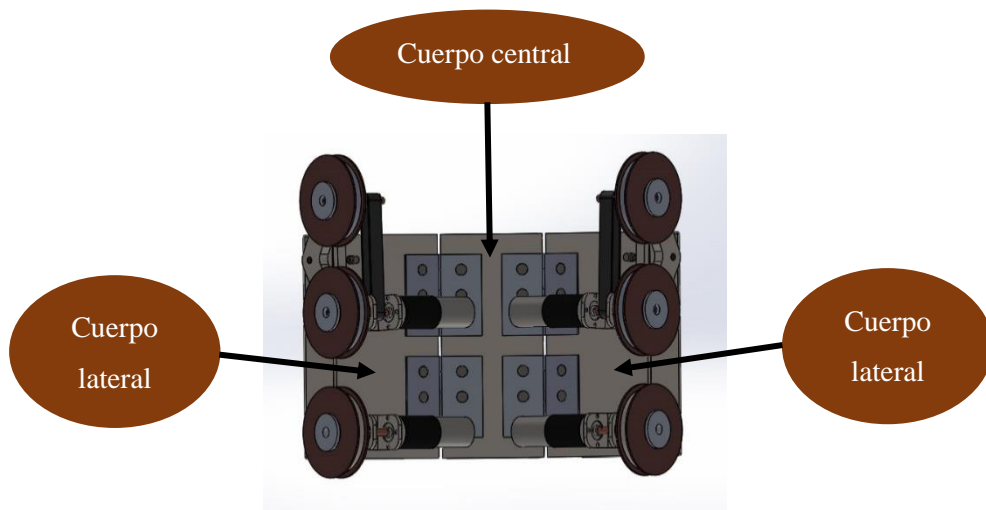


Ilustración 3.3 Vista inferior del prototipo  
Fuente: elaboración propia

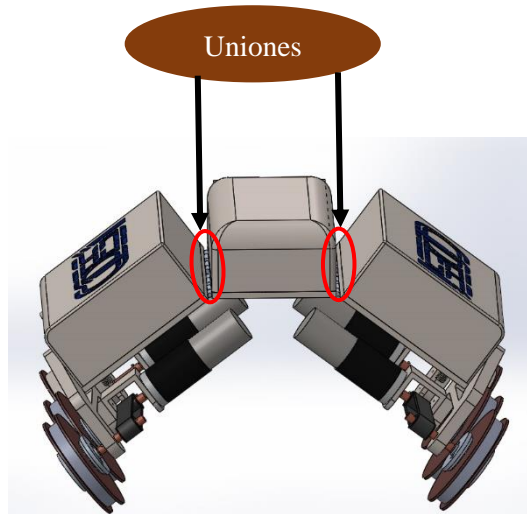


Ilustración 3.4 Vista frontal del prototipo  
Fuente: elaboración propia

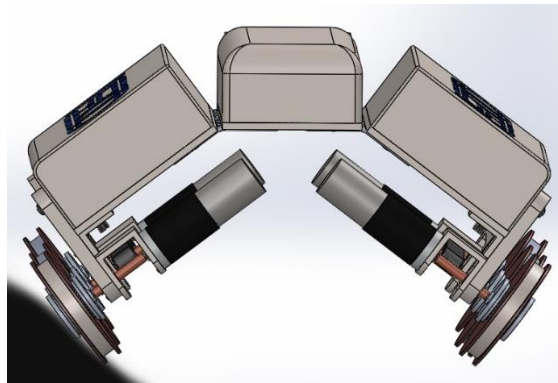


Ilustración 3.5 Vista trasera del prototipo  
Fuente: elaboración propia

Para la parte de la tracción, el diseño consta de un juego de 6 ruedas magnéticas, 3 en cada lado y de las cuales 2 son delanteras y van unidas al mecanismo que le permite avanzar por encima de las bridas. La tercera es una rueda trasera que tiene como función ser un punto de apoyo, agarre e impulso que sirve para minimizar el riesgo de que el robot pueda desprenderse y al mismo tiempo da más fuerza al avance por ser una tracción más.

La parte delantera del mecanismo es una especie de triángulo que une las 2 llantas de adelante para moverlas al mismo tiempo. Al sujetar ambas llantas en esta posición se logra que al desplazarse el robot pueda rodar por encima de la brida manteniendo 2 puntos de agarre (las 2 llantas) sobre esta.

## 3.2 Análisis de esfuerzos

Una vez aprobado el diseño se procedió al análisis de esfuerzos para comprobar que las piezas resistirían las fuerzas a las que se verán sometidas o si era necesario rediseñar la propuesta. Dichos análisis de esfuerzos se aplicaron a los 2 soportes de las ruedas, el triangular delantero y la barra trasera, así como a las ruedas. Dichos componentes fueron seleccionados debido a que, de acuerdo con el funcionamiento del robot, son los que se ven sometidos a los mayores esfuerzos en el momento en que el robot tiene que pasar sobre una brida.

Para el caso de los soportes, los esfuerzos simulados fueron aplicando una fuerza igual a la de los motores, pero en sentido contrario, con puntos de presión sobre las áreas en donde los soportes hacen contacto con los ejes a los que se encuentran unidos las ruedas y los motores, y para el caso de las ruedas se aplicó donde estas hacen contacto contra la brida.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

### 3.2.1 Rueda

Se aplicó una fuerza tangencial en las paredes del centro de la rueda simulando la fuerza transmitida por el cople unido a la flecha del motor. Posteriormente se simuló una fuerza perpendicular en un punto en específico sobre la cara exterior de la rueda ya que es esta parte la que chocaría con la brida y donde se genera una fuerza de reacción en contra.

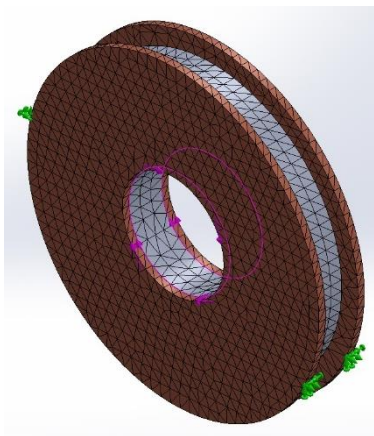


Ilustración 3.6 Rueda malla sólida  
Fuente: elaboración propia

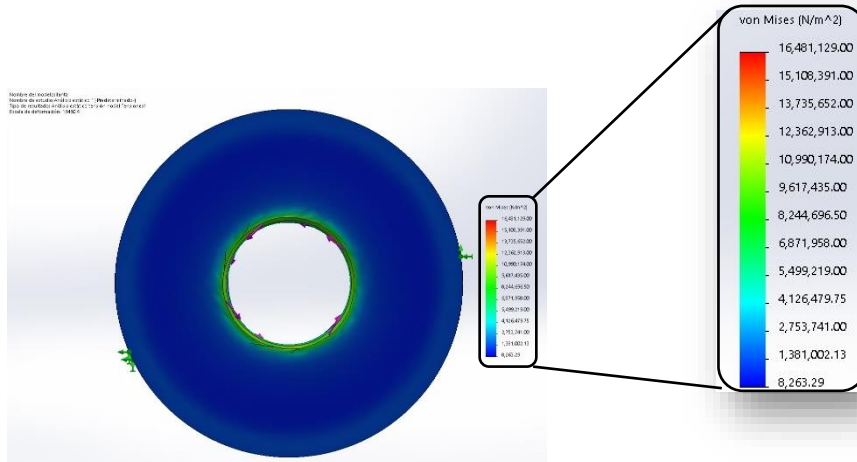


Ilustración 3.7 Análisis estático 1  
Fuente: elaboración propia

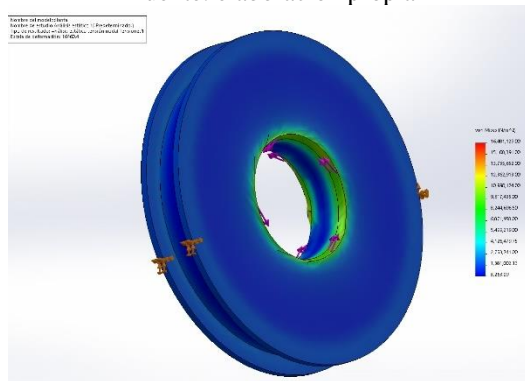


Ilustración 3.8 Análisis estático 2  
Fuente: elaboración propia

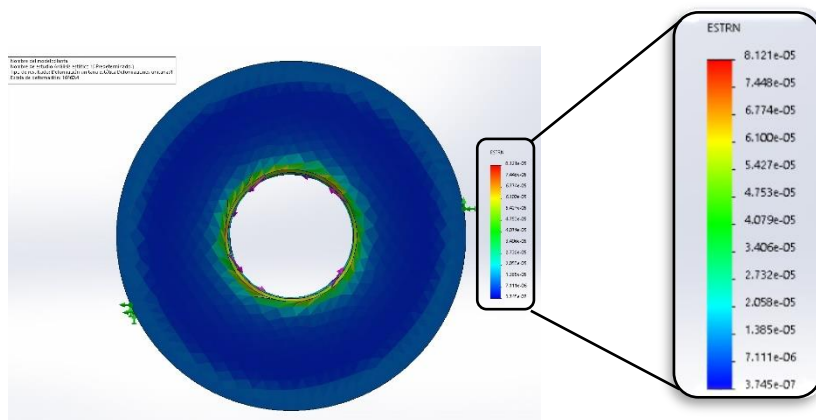


Ilustración 3.9 Deformación unitaria estática  
Fuente: elaboración propia

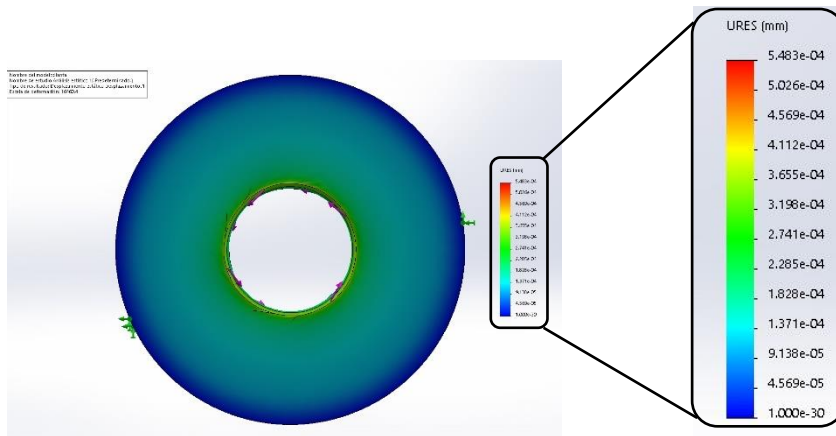


Ilustración 3.10 Desplazamiento estático  
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados arrojados por SolidWorks la rueda resiste bastante bien las cargas a las que será sometido, no presenta deformaciones lo que nos indica que el material usado es el adecuado para trabajarlo en este proyecto.

### 3.2.2 Soporte delantero

Para el soporte delantero se hicieron 2 estudios aplicando fuerzas distintas debido a que se consideraron diferentes puntos de la rueda delantera contra la brida ya que conforme esta sube las fuerzas de reacción van variando su dirección.

Ambas fuerzas, tanto la de empuje como la de reacción, son transmitidas desde las ruedas hacia los barrenos del soporte que es donde descansan los coples que unen los ejes de las ruedas y motor.

La primera fuerza analizada es la fuerza horizontal que se presenta cuando la rueda delantera choca con la brida y la rueda trasera genera un empuje hacia adelante, obteniendo otra fuerza de reacción en sentido contrario.

La segunda fuerza es una fuerza inclinada que se produce al momento de que la rueda delantera va subiendo la brida y la segunda rueda sigue generando un empuje. El cambio de ángulo en el soporte delantero produce también un cambio de ángulo respecto al soporte en la fuerza de reacción.





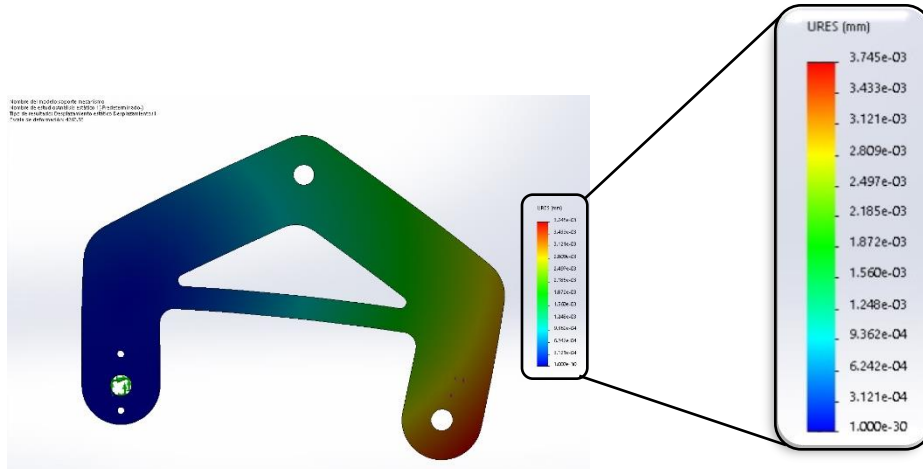


Ilustración 3.14 Desplazamiento estático - Fuerza horizontal  
Fuente: elaboración propia

En las próximas ilustraciones (de la 3.18 a la 3.21) se tienen los resultados de la segunda fuerza aplicada. Similar a la fuerza anterior, en los resultados de análisis estáticos (imagen 3.18 y 3.19) se obtuvo una resistencia bastante buena por parte del material y el diseño del soporte. En las otras 2 imágenes (3.20 y 3.21) se muestra lo que es el desplazamiento estático y la deformación unitaria, respectivamente. En ambas la tendencia a la deformación, contrario a la primera fuerza, es el soporte doblándose hacia afuera ya que la dirección de la fuerza de reacción ha cambiado.

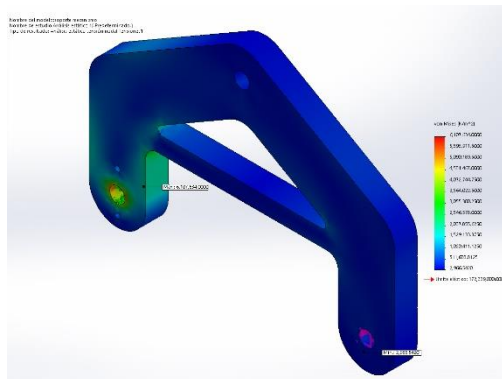


Ilustración 3.15 Análisis estático1 - Fuerza inclinada  
Fuente: elaboración propia

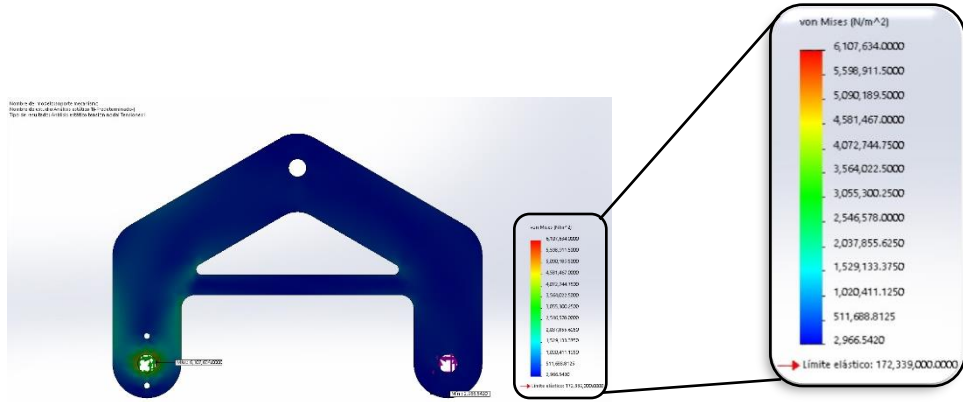


Ilustración 3.16 Análisis estático2 - Fuerza inclinada  
Fuente: elaboración propia

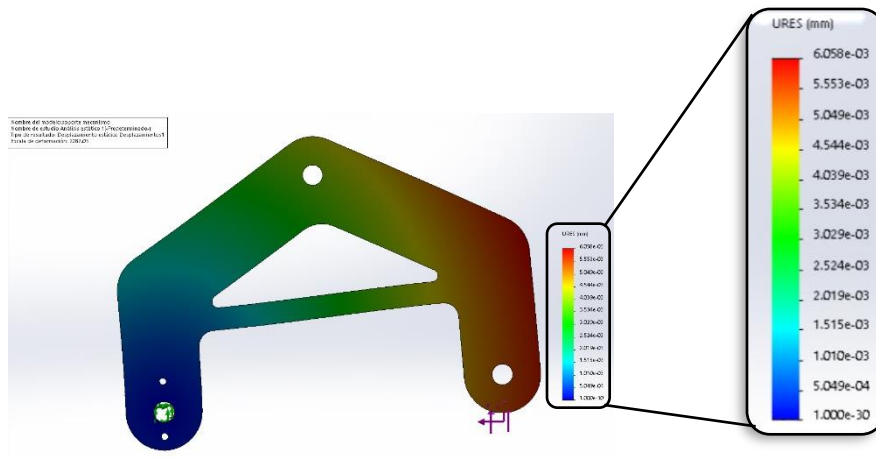


Ilustración 3.17 Desplazamiento estático - Fuerza inclinada  
Fuente: elaboración propia

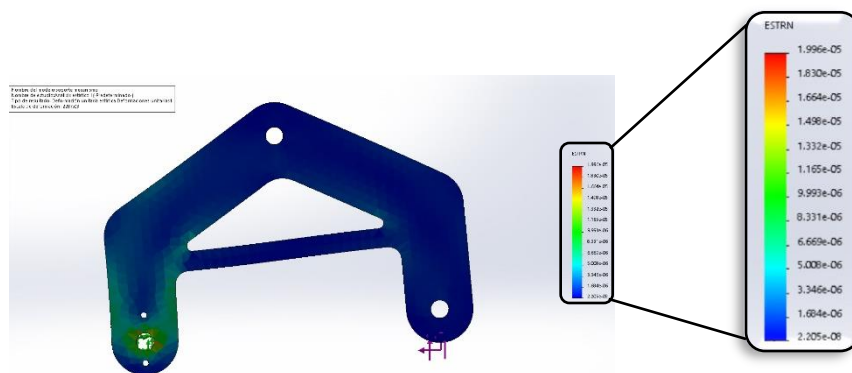


Ilustración 3.18 Deformación unitaria estática - Fuerza horizontal  
Fuente: elaboración propia

### 3.2.3 Soporte trasero

A esta tercera pieza que es el soporte trasero se le colocó una sujeción fija en el barreno superior ya que así se consideró en el diseño, y se aplicó sólo una fuerza horizontal debido a que la sujeción no le permite cambiar su posición y por lo tanto tampoco cambia la dirección de la fuerza de reacción. La fuerza aplicada, igual que el soporte delantero, se simuló dentro del barreno inferior. Los resultados fueron los siguientes:

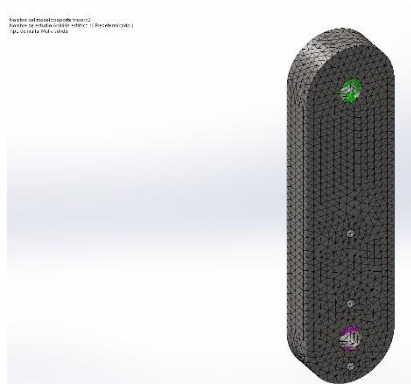


Ilustración 3.19 Soporte trasero malla sólida 1  
Fuente: elaboración propia

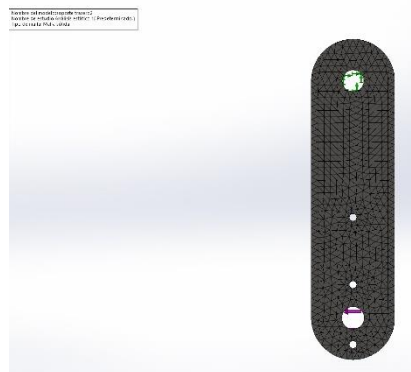


Ilustración 3.20 Soporte trasero malla sólida 2  
Fuente: elaboración propia

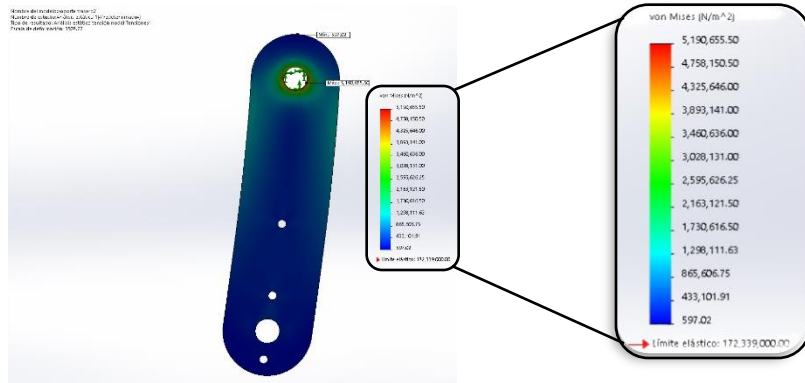


Ilustración 3.21 Análisis estático 1  
Fuente: elaboración propia

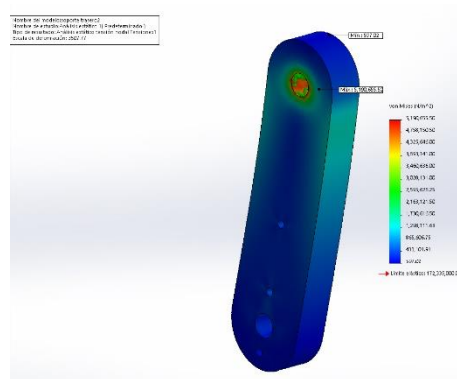


Ilustración 3.22 Análisis estático 2  
Fuente: elaboración propia

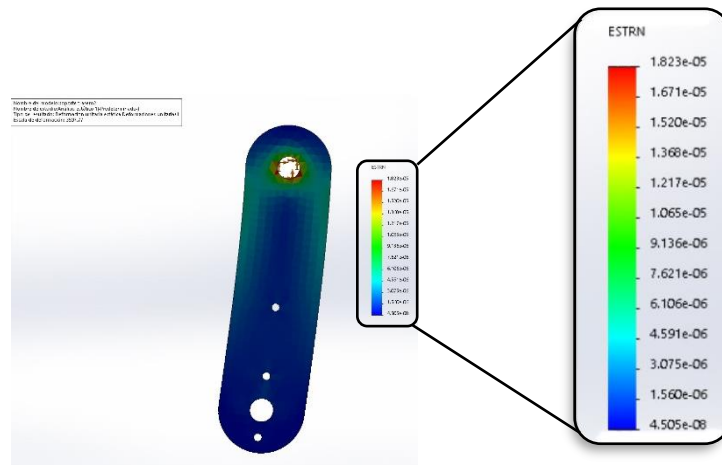


Ilustración 3.23 Deformación unitaria  
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos por los análisis aplicados a las tres piezas podemos concluir que todos los diseños son bastante buenos para llevar a cabo su función. Incluso, conociendo la gran resistencia con la que cuentan, se puede considerar un rediseño con el fin de minimizar el material empleado y así reducir costos del prototipo.

### 3.3 Fabricación del prototipo

Debido a que al momento de fabricar el prototipo no se contaba con presupuesto y/o equipo para trabajar con material con el que se contaba, se optó por emplear recursos fáciles de conseguir y que pudieran trabajarse con la herramienta con la que se cuenta. Por la misma razón el prototipo se enfoca en los mecanismos principales del robot ya que el objetivo del prototipo es ver si el diseño es funcional o no, y en caso de que no poder visualizar la dinámica para determinar las mejoras y correcciones que habría que considerar.

Lo primero que se buscó fue fabricar el mecanismo salta bridas, que viene siendo el soporte delantero de la propuesta diseñada. Aunque en el diseño se presenta como un triángulo por conveniencia de diseño, lo que realmente le da la facilidad de brincar es el espacio que existe entre las dos ruedas y el triángulo, por lo que esta facilidad se mantiene aún si ese triángulo se sustituye por un arco. Para fabricar dicho arco se usó un material flexible que se fue rigidizando con varias capas, según se fue considerando la resistencia del prototipo.

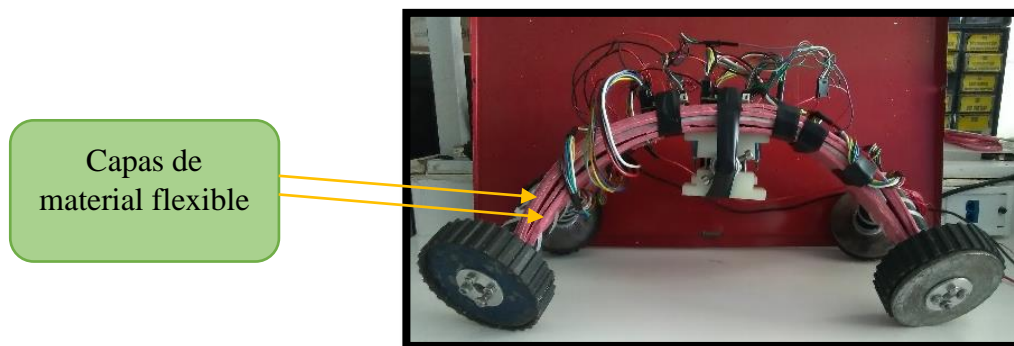


Ilustración 3.24 Prototipo vista lateral  
Fuente: elaboración propia

En la ilustración anterior (3.27) se aprecian varias capas del material usado para fabricar el arco y del cual se sujetaron las ruedas. En total se fabricaron dos arcos, uno para cada lado.

Los laterales del prototipo se encuentran unidos gracias a una barra cilíndrica metálica que sujeta ambos arcos del mecanismo. Esta barra descansa dentro de unos soportes los cuales se encuentran unidos a los arcos por medio de unas bases, como se muestra en la siguiente ilustración (3.28)

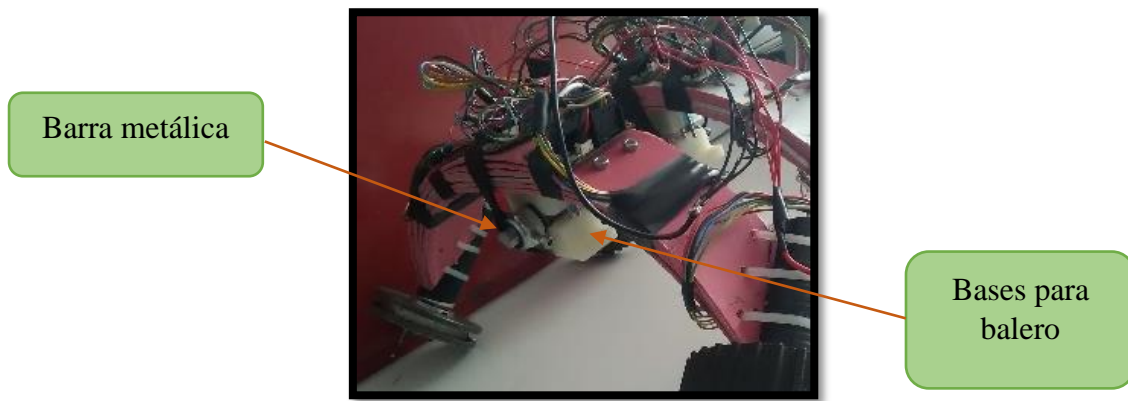


Ilustración 3.25 Balero sujeto al arco  
Fuente: elaboración propia

Con la fabricación de los arcos y la unión usando baleros se cumple el primero dos de los requerimientos principales:

- Mecanismo capaz de superar las bridas de las tuberías a inspeccionar.
- Flexibilidad para adaptarse al diámetro de las tuberías.

Para el último requerimiento fue un poco más difícil debido a las limitaciones para fabricar el prototipo, por lo tanto, se acordó establecer un ángulo fijo en las ruedas para que se adaptara únicamente a tuberías de 8 in (20.32 cm) que es la principal medida a la que se enfrentará.

Para determinar el ángulo fue necesario medir directamente sobre una tubería de prueba con la que se cuenta en CIDESI. Una vez determinado la inclinación se procedió a trabajar en los arcos para montar las ruedas con sus respectivos motores, procurando que la alineación de estas sea la óptima posible. Constantemente se estuvo verificando la inclinación de los motores con ayuda de la tubería para corroborar que esta fuese la correcta.

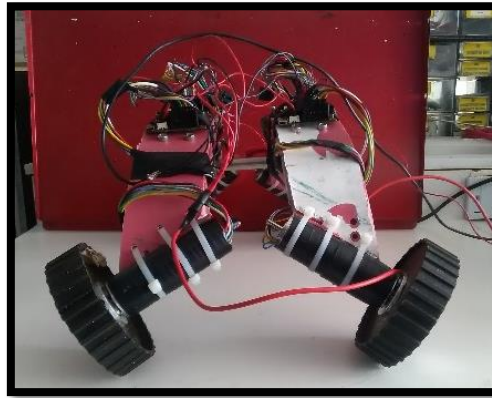


Ilustración 3.26 Inclinación en ruedas del prototipo  
Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, se colocó una banda dentada sobre las ruedas para que el robot tenga más agarre sobre los obstáculos y que éstas no derrapen.

Cuando se terminaron de fabricar los mecanismos y que estos fueron aprobados por el asesor del proyecto, con ayuda de especialistas se configuraron, conectaron y montaron los drivers para poner a trabajar los motores.

Finalmente, el prototipo quedó de la siguiente manera (ilustración 3.30):

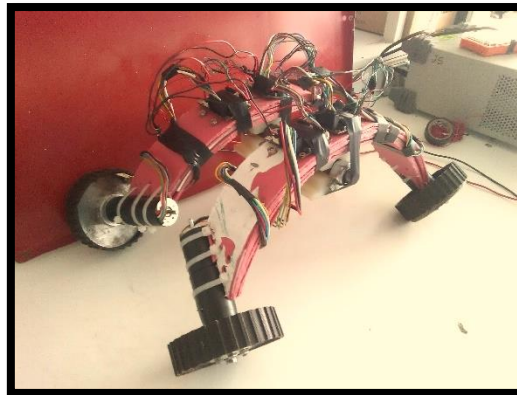


Ilustración 3.27 Prototipo terminado  
Fuente: elaboración propia



Posteriormente se procedió a realizar las pruebas de campo sobre las tuberías de prueba con las que se estaba trabajando, para así visualizar el comportamiento tanto del prototipo como de los mecanismos propuestos y determinar si son funcionales o no.



Ilustración 3.28 Pruebas de campo con el prototipo finalizado  
Fuente: elaboración propia



## 4 Resultados

Los resultados obtenidos fueron un éxito. Tras realizar varias pruebas se comprobó la funcionalidad de los mecanismos de la propuesta planteada inicialmente. El soporte para montar las llantas le brinda al mecanismo una buena tracción y movilidad para poder pasar por encima de las bridas.

A continuación, se presentan imágenes de una de las pruebas realizadas.

En el primer recuadro se aprecia que una rueda a ha subido primero, esto es posible gracias al movimiento independiente que existe entre los laterales del diseño (grado de libertad en el eje) el cual le permite mantener las ruedas restantes con un mejor agarre hacia la tubería ya que al no ser rígido no transfiere los esfuerzos de la misma forma ni con la misma magnitud.

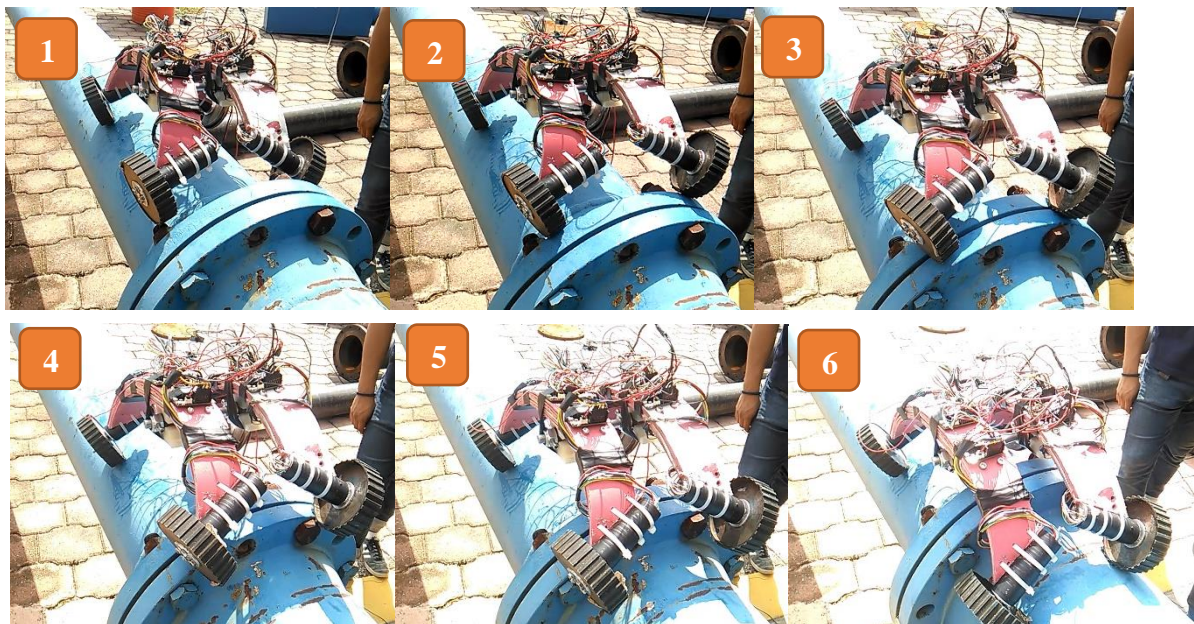


Ilustración 4.1 Resultado de la prueba de campo  
Fuente: elaboración propia

Pero también existieron algunos inconvenientes. No puedo ser evaluado la adaptación del prototipo a distintos diámetros, debido a la manera en que fue fabricado, por lo que no sé conoce si es funcional o no ya que existe la posibilidad de que pueda alterar el comportamiento del robot.

Por otra parte, los materiales usados en el prototipo resultaron no ser muy robustos. Debido a esto, las pruebas realizadas fueron limitadas ya que en cada prueba el prototipo presentaba un deterioro notable que le causó cambios en su desempeño.

## 5 Conclusiones

El mecanismo diseñado para escalar las bridas mostró ser apto para lograr su objetivo de escalar bridas ya que, debido a su forma, este logra mantener un buen agarre hacia la tubería lo que ayuda a no perder tracción y así poder desplazarse por encima de la brida.

El grado de libertad que permiten el movimiento independiente entre los laterales del robot resultó ser otro factor importante en el diseño, específicamente al momento de que sólo un lado del robot se ve alterado por algún obstáculo. Dicho grado de libertad dota al robot con la capacidad de adaptar un lateral al obstáculo presentado sin alterar el cuerpo completo y aun así seguir adelante, manteniendo una gran estabilidad en el robot.

A pesar de las limitaciones del prototipo, fue posible evaluar gran parte del comportamiento de la propuesta de diseño para el robot de inspección. Con ello no sólo se comprobó su funcionalidad, sino que también se pudo visualizar debilidades y/o aspectos a considerar para el diseño final y con ello garantizar un producto de calidad.

Es necesario fabricar otro prototipo (o trabajar el actual), en el que se implemente el mecanismo de adaptación a distintos diámetros, que es el mecanismo que no fue evaluado, para analizar cómo es el comportamiento del robot en conjunto con los otros mecanismos y determinar si se deben de realizar ajustes, y en caso de que así sea, qué ajustes son y cómo podrían afectar a lo que ya se tiene.

Con los resultados obtenidos es posible comenzar a trabajar en una propuesta para conseguir fondos que ayuden a hacer este proyecto realidad. Además, por el nivel del proyecto existen varios sub proyectos con nivel de maestría, lo que permite a los alumnos involucrados relacionarse con proyectos aplicados a la industria.

## 6 Bibliografía

- [1] J. C. S. Vargas, Artist, Desarrollo del sistema de control de un "robot" orientad a la medición de espesores de pared de tanques de almacenamiento. [Art]. CIDESI, 2002.
- [2] PANATEC, «Robot de Inspección Visual - iPEK ROVION,» PANATEC, [En línea]. Available: <http://www.panatec-agua.com/robot-inspeccion-ipek.php>. [Último acceso: 18 08 2019].
- [3] SILVERWING, «SILVERWING,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.silverwingndt.com/ultrasonic-testing/rms2-aut-corrosion-mapping>. [Último acceso: 09 08 2019].
- [4] dicyt, «Un robot que inspecciona tuberías de plataformas petroquímicas,» dicyt, 26 08 2013. [En línea]. Available: <http://www.dicyt.com/noticias/un-robot-que-inspecciona-tuberias-de-plataformas-petroquimicas>. [Último acceso: 18 08 2019].
- [5] J. C. S. Vargas, «CIDESI Repositorio,» 09 2002. [En línea]. Available: <http://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/180>. [Último acceso: 02 09 2019].
- [6] SolidWorks, «INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS,» [En línea]. Available: [https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_ES.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf). [Último acceso: 09 07 2019].
- [7] SolidWorks, «Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks®,» [En línea]. Available: [https://www.solidworks.com/sw/docs/Student\\_WB\\_2011\\_ESP.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ESP.pdf). [Último acceso: 15 07 2019].
- [8] SolidWorks, «Introducción a las aplicaciones de análisis de tensión con SolidWorks Simulation, Guía del estudiante,» [En línea]. Available: [https://www.solidworks.es/sw/images/content/Training/SolidWorks\\_Simulation\\_Student\\_Guide\\_ESP.pdf](https://www.solidworks.es/sw/images/content/Training/SolidWorks_Simulation_Student_Guide_ESP.pdf). [Último acceso: 18 07 2019].
- [9] SolidWorks, «Introducción a las aplicaciones de análisis de movimiento con SolidWorks Motion, Guía del instructor,» [En línea]. Available: [https://www.solidworks.com/sw/docs/Motion\\_Sim\\_Instructor\\_WB\\_2011\\_ESP.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/Motion_Sim_Instructor_WB_2011_ESP.pdf). [Último acceso: 25 07 2019].
- [10] R. G. Budynas y j. Keith Nisbett. [En línea]. Available: <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2015/03/disec3b1o-en-ingenierc3ada-mecc3a1nica-de-shigley-8-edicic3b3n-budynas.pdf>. [Último acceso: 29 07 2019].
- [11] M. J. Saiz, «TEMA 5: ROBÓTICA - MECÁNICA,» [En línea]. Available: [https://profemjesus.webcindario.com/tpr\\_4/T5\\_mecanica.pdf](https://profemjesus.webcindario.com/tpr_4/T5_mecanica.pdf). [Último acceso: 04 08 2019].