



Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial

Proyecto Industrial Terminal

Diseño mecánico en SolidWorks de un robot de inspección de ductos

**PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD EN:
TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA**

PRESENTADO POR:

Ing. José Alejandro Alonso Tovar

007747

Tutor de Planta: Dr. José Luis Sánchez Gaytán
Tutor Académico: Dr. Antonio Ramírez Martínez.

Santiago de Querétaro, Querétaro, México, Diciembre 2015

RESUMEN

Los ductos que transportan turbosina en nuestro país fueron instalados hace más de 30 años, varios de ellos ya cumplieron su vida útil, lo que puede ocasionar peligros inminentes al ecosistema y poblaciones de zonas aledañas. Lo anterior presenta una problemática; se requiere una herramienta capaz de realizar la inspección y determinación física de los ductos. El diseño mecánico del robot debe garantizar una inspección completa durante el recorrido y así localizar anomalías (como lo son: corrosión, golpes, laminaciones y desgastes), para generar un reporte del estado de los ductos. Existe la oportunidad de llevar a cabo estudios e investigación para desarrollar y presentar una solución a esta problemática.

El proyecto está enfocado en el desarrollo del diseño mecánico, con el objetivo de adaptarse y desplazarse a través de ductos de diámetros variables, con trayectorias rectas y curvas, estas últimas van hasta los 60 grados, sumado a las conexiones perpendiculares como codos y uniones tipo "T" que existen de otros ductos a lo largo del recorrido.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar conmigo y acompañarme en todo momento a lo largo de la vida y por la fortaleza que me brinda para tomar nuevos retos.

A mi madre Bibiana Tovar, por ser mi principal motivo y ejemplo de dedicación y esfuerzo, la confianza que tiene en mí para que enfrente los retos de la vida y seguir siempre adelante.

A mi familia, por ser parte de mi vida y por estar siempre a mi lado apoyándome en todo momento.

A mi novia Mónica Vanoye, por emprender conmigo este reto, que a pesar de la distancia cuento con su apoyo incondicional y las palabras de ánimo que me brinda para dar lo mejor de mí.

A mis asesores, el Dr. José Luis Sánchez Gaytán y el Dr. Antonio Martínez Ramírez, por su apoyo y dedicación a la realización de este proyecto de especialidad.

Al CIDESI por brindar las instalaciones y el apoyo institucional, para lograr las diferentes tareas relacionadas en la especialidad, así como a Conacyt por el apoyo económico recibido durante el transcurso de mis estudios.

CONTENIDO

RESUMEN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	VI
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	11
1.4.1 Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 ROBOT DE INSPECCIÓN.....	12
2.1.1 Análisis de sistemas de inspección interna de ductos.....	13
2.1.2 Análisis de sistema de navegación inercia.....	14
2.1.3 Sistemas de medición de distancias.....	15
2.1.3.1 El odómetro.....	16
2.1.4 Motor Brushless.....	17
2.2 DUCTOS DE TRANSPORTACIÓN.....	19
2.2.1 Trampas de envío y recibo	19
2.2.2 Características de trampas.....	20
CAPÍTULO 3: CÁLCULOS PARA EL DISEÑO MECÁNICO.....	22
3.1 CÁLCULO DE FUERZA EN LAS RUEDAS.....	22

3.2 CENTRO DE MASA Y CENTROIDE.....	26
3.3.1 Propiedades de masa del robot de inspección.....	26
CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO PRELIMINAR.....	31
4.1 OBJETIVOS DEL DISEÑO.....	31
4.2 METODOLOGÍA.....	31
4.2.1 Análisis del estado del arte.....	32
4.2.2 Análisis y segmentación del proyecto.....	33
4.2.3 Diseño mecánico del robot de inspección.....	34
CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	41
5.1 Pruebas y resultados.....	41
CONCLUSIONES.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diablo instrumentado.....	13
Figura 2. Robot “MagneScan”.....	14
Figura 3. Plano coordenado de tres ejes referido al cuerpo.....	15
Figura 4. El odómetro y su funcionamiento.....	16
Figura 5. Medición de distancia utilizando efecto Doppler.....	17
Figura 6. Partes del motor Brushless.....	18
Figura 7. Trampa de recibo del robot de inspección.....	20
Figura 8. Topología básica de trampas para robots de inspección.....	21
Figura 9. Esquema general de las fuerzas que actúan con el robot de inspección.....	24
Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre el robot de inspección.....	24
Figura 11. Propiedades mecánicas del Aluminio 2024 obtenidas de la base de datos de <i>SolidWorks</i>	27
Figura 12. Centro de masa de módulo 1.....	28
Figura 13. Centro de masa de módulo 2.....	29
Figura 14. Metodología del diseño mecánico.....	32
Figura 15. Conexión básica del ducto.....	33
Figura 16. Diseño a detalle del robot de inspección.....	35
Figura 17. Vista superior del robot de inspección.....	35
Figura 18. Vista isométrica del robot de inspección.....	36
Figura 19. Vista trasera del robot de inspección.....	36

Figura 20. Módulo principal.....	37
Figura 21 Módulo secundario.....	38
Figura 22. Brazo del robot de inspección.....	38
Figura 23. Porta sensores.....	39
Figura 24. Odómetro.....	39
Figura 25. Junta universal.....	40
Figura 26. Disposición física del robot de inspección en el ducto.....	41
Figura 27. Disposición física del robot de inspección del funcionamiento de la junta universal.....	42
Figura 25. Adaptación a la superficie interna del ducto.....	42

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 INTRODUCCIÓN

Existen miles de líneas de ductos instalados en el territorio mexicano. Este sistema ha provisto de un medio confiable para la transportación de hidrocarburos por más de 50 años. Una gran cantidad de ese sistema de líneas ha alcanzado, o pronto lo hará, el fin de su vida útil para el cual fue diseñado. Muchos de los ductos operan en ambientes hostiles, transportando productos corrosivos y como resultado sufren el mismo tipo de daño. Se estima que seguirán utilizándose estas líneas de ductos por alrededor de 40 a 60 años más. Debido a lo anterior es necesario la inspección y la rehabilitación de los ductos, para asegurar una operación continua, segura y confiable (López Carreto, 2006).

Desde el desarrollo del primer robot explorador de ductos (o también conocidos como diablos instrumentados), se ha preservado la innovación de diversos tipos de robots para distintas circunstancias y aplicaciones, tales como de inspección y limpieza de los ductos. Las partes fundamentales que constituyen a los robots de inspección son: módulo de sensores, sistema de odómetros, sistema de navegación inercial y módulo de tuberías. Para el presente desarrollo tecnológico se presentará un robot capaz de realizar inspección de ductos adaptándose a distintos escenarios durante el recorrido de la línea, en particular a las variaciones de diámetro para un rango de 13 a 16 pulgadas de diámetros.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los ductos son parte de un sistema de líneas que se encargan de conducir y distribuir la turbosina a sus diferentes destinos. Estos ductos deben de estar en un programa de mantenimiento (inspección, monitoreo de contaminación y desgaste), debido a que se presenta daños en el ducto con el paso del tiempo y la exposición a los hidrocarburos. Para dar solución a la problemática es requerido un sistema que permita evaluar el estado actual de los ductos mediante la técnica no destructiva de ultrasonido.

Por lo tanto la normatividad API (por sus siglas en ingles *American Petroleum Institute*) 570, 1104, 574 y 652 son para construcción, mantenimiento, operación e inspecciones de diversas de tuberías y las normas API-653, 650, 652 se refieren a la normatividad para ultrasonidos (ASA, 2014). Esto hace necesario disponer de una herramienta que permita la inspección de los ductos, para lo cual se propone un tipo de robot capaz de recorrer los ductos de 13 a 16 pulgadas de diámetro recolectando la información mediante la inspección.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Actualmente la inspección de líneas de ductos de turbosina se realiza mediante la contratación de compañías externas a costos elevados, por lo que el desarrollo de un robot para la inspección de las líneas de ductos, que integre diferentes sistemas para la exploración y sea capaz de analizar su estado interno, facilitará el correcto funcionamiento de los ductos, evitando riesgos, peligros futuros y ofreciendo una solución a los deterioros potenciales que las líneas de ductos presentan y disminuyendo con esto los costos de operación.

Dentro de las ventajas del proyecto está la exploración de los ductos con diámetros variables durante el recorrido que van desde los 13 y 16 pulgadas, como consecuencia se tendrá una inspección de monitoreo constante para tomar medidas de mantenimiento preventivo y correctivo.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Diseño mecánico preliminar de un robot para la inspección de ductos de turbosina que opere con diámetros desde 13 hasta 16 pulgadas.

1.4.1 Objetivos específicos

- Investigación sobre el estado del arte.
- Diseño mecánico del robot en CAD (Diseño Asistido por Computadora).
- Pruebas del diseño preliminar del robot mediante software *SolidWorks*.
- Escribir Tesina para obtener la especialidad en Tecnólogo en Mecatrónica.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ROBOT DE INSPECCIÓN (diablo instrumentado)

Dispositivo mecánico e instrumentado que es insertado en el ducto para realizar funciones operacionales que pueden ser para análisis de integridad, limpieza y mantenimiento. EL robot de inspección interna es llamado comúnmente como diablo instrumentado. Este fluye a través de una línea de tubería siendo impulsada por el producto transportado. Existen distintos tipos de actividades posibles en la evaluación y monitoreo a lo largo de la línea de ductos. Algunos de ellos incluyen inspecciones de protección catódica, programas de detección de fugas, grietas y pruebas hidrostáticas (Reyna, 2008).

Los robots para inspecciones internas contienen elementos fundamentales para su funcionamiento como lo son: los sensores, tarjetas electrónicas y sistemas de almacenamiento de datos. Debido a los componentes con los que se conforman los diversos robots de inspección existe una clasificación. Los cuales se dividen en:

- **Diablos Instrumentados:** Incluyen los diablos geómetras y los de mapeo inercial. Inspeccionan la superficie interna de la tubería o mapean su línea central.
- **Herramientas ILI (In-Line Inspection) o diablos inteligentes:** Inspeccionan el espesor de pared completo para la detección de corrosión, grietas u otros defectos. Utilizan técnicas de evaluación no destructivas, (Rubio, 2010).

En la Figura 1 se muestra el robot de inspección (diablo instrumentado).



Figura 1. Diablo instrumentado.

2.1.1 Análisis de sistemas de inspección interna de ductos

Los ductos requieren de inspección para defectos como la corrosión, grietas, entre otros. Estos defectos pueden ser determinados mediante la observación en la variación del espesor de la pared así como de sus propiedades físicas. A lo largo de los años se han empleado en los robots de inspección diversas técnicas no destructivas para la detección de los distintos tipos de defectos que un ducto usualmente presenta al desgaste (Wolfgang, 2005).

Estos sistemas se dividen de acuerdo a la herramienta utilizada, al principio físico o al defecto al cual está orientada la inspección.

Algunas de estas herramientas existentes en el mercado por “General Electric” son:

- *“MagneScan”*. Proporciona un registro de la pérdida de metal, hace uso de las herramientas MFL *“Magnetic Fluke Leakage”* teniendo como cualidades la alta resolución y versatilidad, el principio básico de trabajo de este diablo instrumentado es el de generar un campo magnético controlado al punto de saturación, el cual logra mantener un contacto con la superficie interna de la tubería, en la Figura 2 se muestra el diablo instrumentado *“MagneScan”*.
- *“UltraScan WM”*. Cuantifica directamente la pérdida de metal, laminaciones e inclusiones, haciendo uso de un preciso caudal ultrasónico.

- “UltraScan CD”. Una aplicación innovadora de ultrasonido para detectar fracturas provocadas por estrés o por corrosión.
- “Elastic Wave”. Herramienta ultrasónica para detectar fracturas longitudinales en líneas de gas y petróleo.

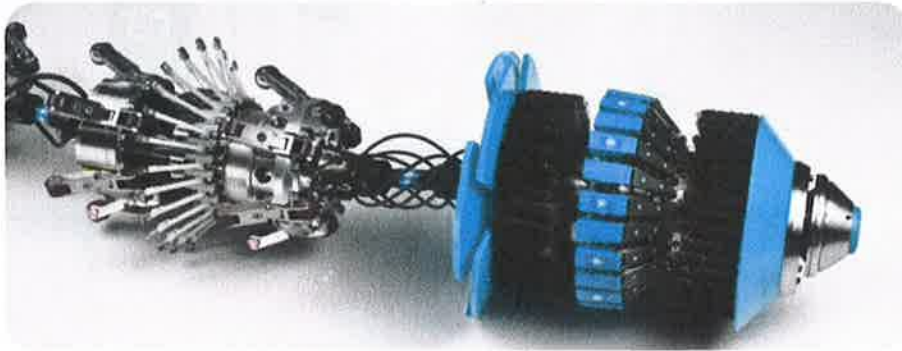


Figura 2. Robot “MagneScan”.

2.1.2 Análisis de sistemas de navegación inercial

Los sistemas de navegación inercial son parte fundamental en los robots de inspección interna, estos sistemas están compuestos por sensores de velocidad angular y aceleración lineal como son giroscopios y acelerómetros respectivamente distribuidos ortogonalmente en un plano formando un sistema cartesiano referido al cuerpo como se observa en la Figura 3. La función principal de estos sistemas es el de registrar y almacenar cualquier cambio de velocidad, aceleración o dirección en cualquiera de sus ejes.

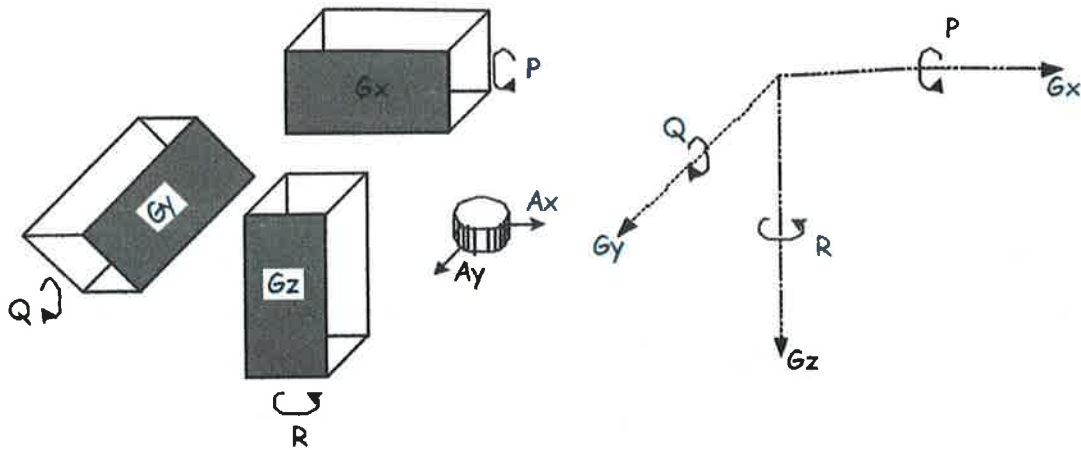


Figura 3. Plano coordenado de tres ejes referido al cuerpo.

2.1.3 Sistemas de medición de distancias

Dado que el sistema de navegación inercial sólo registra los cambios de velocidad o aceleración respecto a sus ejes y solo se tiene como base el tiempo transcurrido entre muestras y aún más no se conoce la velocidad a la cual viajará el sistema de reconocimiento, es necesario referirlo a un sistema de medición de distancias de la trayectoria recorrida con el fin de que los cambios registrados tengan otro punto de referencia que nos permita realizar la planimetría.

Generalmente los sistemas de navegación inercial son usados para aplicaciones aeronáuticas y los sistemas de corrección o medición de distancias se realizan por medio de radar, pero dado que el sistema viajara a través de la tubería este sistema es obsoleto y se tiene que hacer uso de algún otro tipo de sistemas.

2.1.3.1 El odómetro

Los odómetros son utilizados como elementos para realizar la medición de la distancia recorrida. En la Figura 4 se muestra el funcionamiento del odómetro, básicamente podemos observar que éste elemento es una rueda de acero de un diámetro fijo y con un número determinado de imanes distribuidos equidistantemente a lo largo de la periferia de la rueda, los cuales al pasar por un sensor magnético generan una señal de impulsos eléctricos, el periodo o frecuencia de la señal generada es proporcional a la velocidad a la velocidad con la que la rueda gire, en la Figura 5 se puede observar el tipo de señal producida.

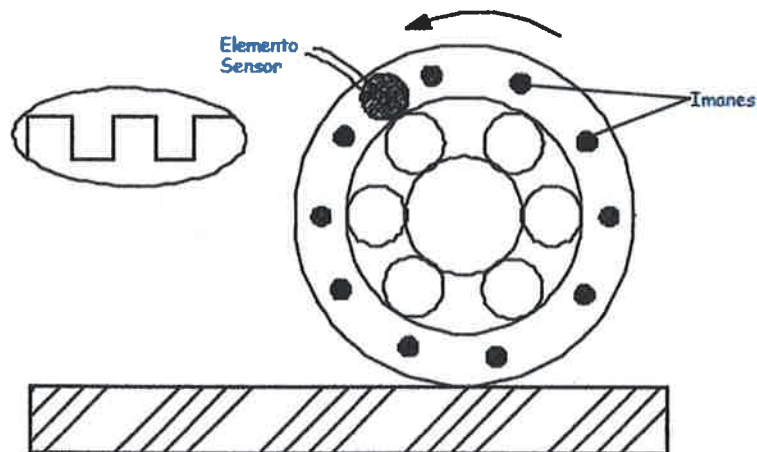


Figura 4. El odómetro y su funcionamiento.

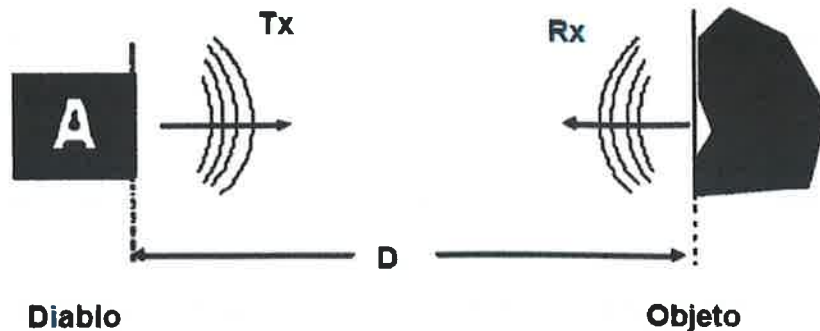


Figura 5. Medición de distancia utilizando efecto Doppler.

Se pueden clasificar los sensores magnéticos en función a su principio de operación, estos son:

- Reluctancia variable
- Efecto Hall

Reluctancia variable se basa en la deformación del campo magnético de un imán debido al paso de un objeto de alta reluctancia, el cambio induce un voltaje en una bobina que rodea al imán, la magnitud de este voltaje depende de la velocidad con la que pase el objeto frente al campo magnético.

Efecto Hall se basa en fluir una corriente a lo largo del eje de un conductor, con lo cual se genera un campo magnético se aplica perpendicular al plano de la corriente y al flujo de voltaje.

2.1.4 Motor Brushless

Una característica principal del robot de inspección al momento de estar en contacto con hidrocarburos, como es la turbosina es, el que sus componentes eléctricos y electrónicos no generen alguna chispa y con ellos algún riesgo durante la inspección. Para ello este tipo de motor, tiene la ventaja de que la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator o carcasa, por lo tanto aquí no son necesarias ni las escobillas ni el colector, esta corriente eléctrica genera un campo

electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y por lo tanto al eje del motor. Al no tener escobillas, ni colector y tampoco se tienen delgas; el elemento que controlará que el rotor gire sea cual sea su posición será el variador electrónico; que lo que hace básicamente es ver en qué posición se encuentra el rotor en cada momento, para hacer que la corriente que le llegue sea la adecuada para provocar el movimiento de rotación que le corresponde. Cuando hablamos de motores Brushless, hay un parámetro importante que debemos considerar, que es factor "kV". Normalmente aparece junto al número de vueltas de bobinado del motor, y lo que nos indica es el número de revoluciones por minuto a las que es capaz de girar el motor por cada voltio de electricidad que se le aplica. Es decir, que si tenemos por ejemplo un motor Brushless de 3000kV, y se aplica a sus bornes 10 volts, la velocidad será de 30000rpm. A mayores valores para el kV, mayores valores de velocidad, pero menores valores de par y viceversa. Por lo tanto se trata de encontrar una solución de compromiso entre velocidad y par teniendo en cuenta las características de nuestro modelo.

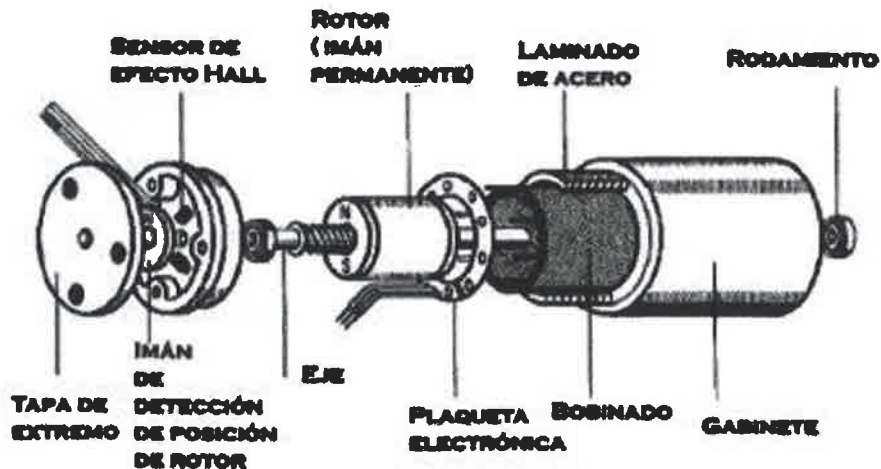


Figura 6. Partes de motor Brushless.

2.2 DUCTOS DE TRANSPORTACIÓN

2.2.1 Trampas de envío y recibo

El arreglo de tuberías, conexiones y accesorios de un ducto se requieren para el transporte de hidrocarburos y es el medio por el cual se desplaza el robot de inspección, para poder introducir el equipo instrumentado al sistema de ductos que se inspeccionará es necesario contar con las trampas de diablos, estas son consideradas como obras especiales debido a que hay una interrupción en la secuencia de una línea, es necesario tomar medidas adecuadas para evitar accidentes, en la Figura 7 se muestra la trampa de recibo del robot de inspección.

Los principales accesorios de la trapa de envío y recibo del robot de inspección son los siguientes:

- Válvula de flujo
- Válvula de barrilete
- Válvula de desfogue
- Charnela o tapa del barrilete
- Indicadores de presión (manómetros)
- Válvula y línea de *By-pass*

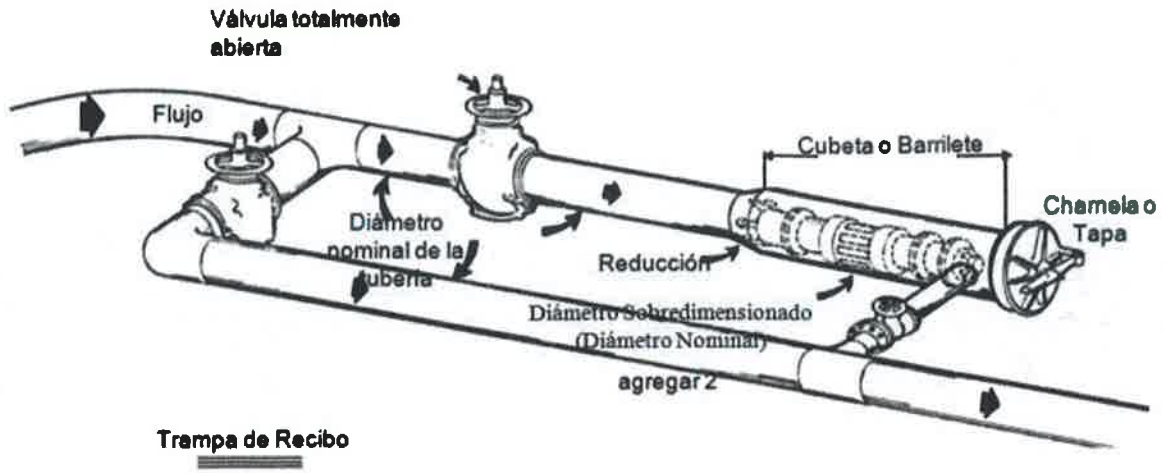


Figura 7. Trampa de recibo del robot de inspección.

2.2.2 Características de trampas

Uno de los aspectos a considerar en el diseño del robot de inspección son las características de las trampas, como lo son las reducciones de los ductos, el cual proporcionara la distancia mínima y máxima a la cual estará el cuerpo del robot de inspección de las paredes internas de la tubería, éste dato permitirá conocer el grado de presión que se tendrá entre el odómetro y la pared del ducto. Los radios mínimos de curvaturas por donde pasa el robot de inspección pueden variar entre los $1.5 \cdot D$ y $3 \cdot D$ según el diámetro (D) del ducto, siendo generalmente para diámetros menores a 30". En la Figura 8 se observa una topología básica de trampas a la cual se somete comúnmente los robots de inspección.

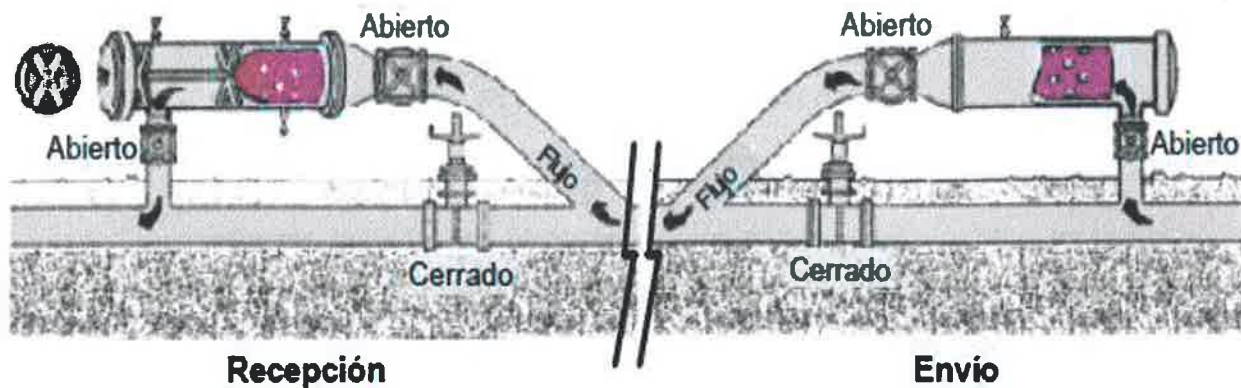


Figura 8. Topología básica de trampas para robots de inspección.

CAPÍTULO 3: CÁLCULOS PARA EL DISEÑO MECÁNICO

3.1 CÁLCULOS DE FUERZA EN LAS RUEDAS

Se realizaron los cálculos necesarios para poder tener una idea de la fuerza necesaria que tiene que desarrollar el robot de inspección para poder desplazarse en el ducto, los cálculos se realizan tomando varias consideraciones teóricas, así mismo se realizaron los cálculo considerando inclinaciones diferentes para poder observar la fuerza necesaria cuando el robot de inspección este desplazándose en esos escenarios, sirviendo como una factor de seguridad para el diseño.

Se toman algunos datos propuestos y consideraciones en el robot de inspección para poder comenzar con los cálculos, de tal forma que estos cálculos están sujetos a cambios, ya que hay factores sensibles que pueden variar durante el recorrido y son de gran impacto para los resultados obtenidos, como el diámetro de las ruedas, el coeficiente de resistencia entre la llanta y la superficie interior del ducto, el peso del robot de inspección, etc.

Datos:

masa del robot de inspección $m_{RI} = 100\%$ de la masa a transportar

*peso_x (w_x) = $m_x * g$ Ec. (1.1)*

Donde:

El subíndice «x» puede tomar los valores para referirse a cálculos del robot de inspección.

velocidad (v) = $0.5 \text{ Km/h} = 0.138 \text{ m/s}$

aceleración (a) = 0.0138 m/s^2

Para los cálculos de la aceleración fueron calculando tomando la consideración de que se requiere que el robot de inspección obtenga una velocidad en un lapso de 0 a 10 segundos.

A continuación se muestran las dimensiones preliminares de los dos módulos que conforman al robot de inspección.

Dimensiones Módulo 1	Dimensiones Módulo 2
Largo = 14.50" = 36.83 cm	Largo = 13" = 33.02 cm
Ancho = 8" = 20.32 cm	Ancho = 7" = 17.78
Alto = 8" = 20.32 cm	Alto = 7" = 17.78 cm
Masa = 28.37 kg.	Masa = 22.41 kg.

Ruedas

- Diámetro (D) = 2.50" = 6.35 cm = 0.0635 m
- Radio (R) = 1.25" = 3.175 cm = 0.03175 m
- Ancho = 0.66" = 1.67 cm = 0.0167 m

A continuación se muestran las formulas generales a utilizar, basadas en la segunda ley de Newton.

Formulas generales:

$F = m * a$ Ec. (1.2)

$F_{rr} = F * C_{rr}$ Ec. (1.3)

$Torque = F_{rr} * R$ Ec. (1.4)

Donde:

- F es la fuerza a desarrollar (N)
- m es la masa (Kg)
- a es una aceleración (m/s^2)
- F_{rr} es la fuerza efecto del coeficiente de resistencia a la rodadura
- R es el radio de la rueda (m)

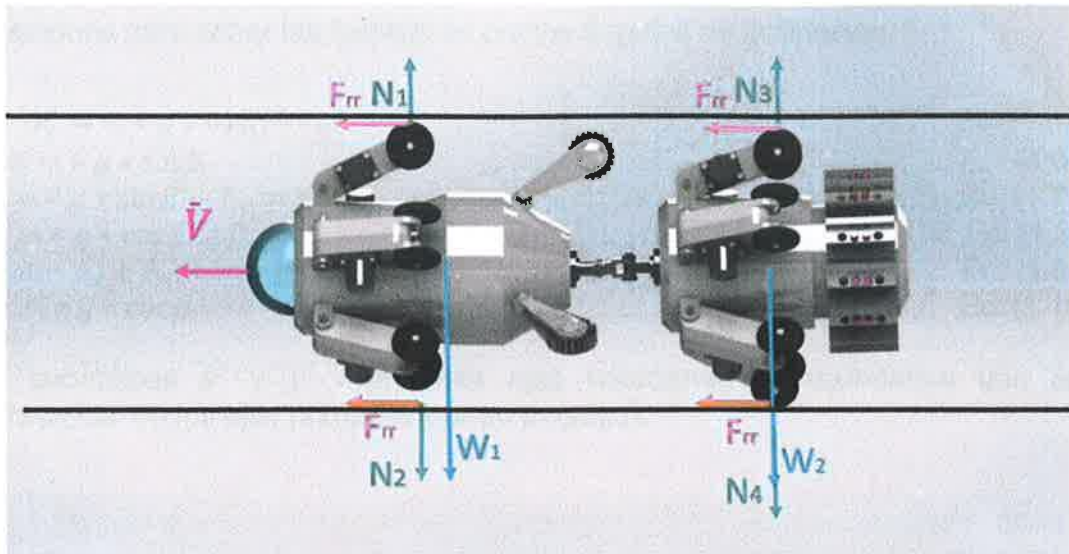


Figura 9.- Esquema general de las fuerzas que actúan con el robot de inspección.

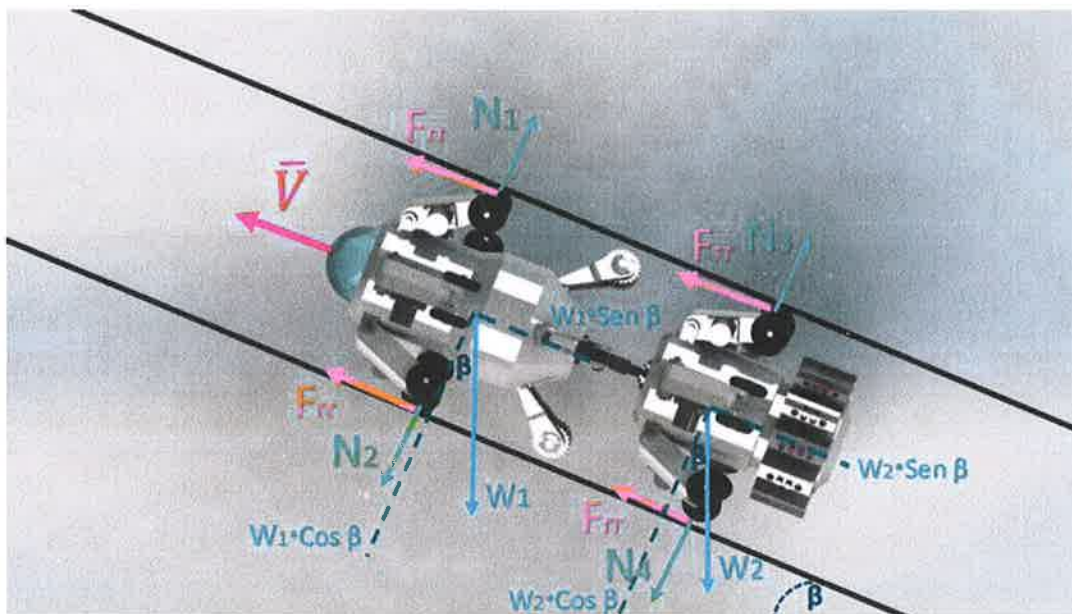


Figura 10.- Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan con el robot de inspección.

De acuerdo a los diagramas de cuerpo libre mostrados en la Figura 9 y 10 consideraremos lo siguiente con la fuerza de fricción.

$$F_{rr} = F_{rr1} = F_{rr2} = F_{rr3} = F_{rr4} = \dots = F_{rr10}$$

Estas son las fuerzas de fricción de los 10 pares de llantas del robot de inspección

Ecuaciones para saber las fuerzas en ciertos ángulos de inclinación.

$N = W'_y = m * g * \cos(\beta)$	.....	Ec. (1.5)
$W'_x = m * g * \sin \beta$	.....	Ec. (1.6)
$F - m * g * \sin \beta - F_{rr} = m * a_x$	.....	Ec. (1.7)
$N - m * g * \cos \beta = 0$	.....	Ec. (1.8)
$F = m * a_x + F_{rr} + m * g * \sin \beta$	.....	Ec. (1.9)
$N = m * g * \cos \beta$	.....	Ec. (1.10)

Los subíndices x' y y' representa ejes coordenados secundarios que están desfasados de los ejes primarios por un ángulo β .

3.2 CENTRO DE MASA Y CENTROIDE

El centro de gravedad es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones materiales de un cuerpo, de tal forma que el momento respecto a cualquier punto de esta resultante aplicada en el centro de gravedad es el mismo que el producido por los pesos de todas las masas materiales que constituyen dicho cuerpo. El centro de gravedad de un cuerpo no corresponde necesariamente a un punto material del cuerpo. Así, el centro de gravedad de una esfera hueca está situado en el centro de la esfera que, no pertenece al cuerpo.

En física, además del centro de gravedad aparecen los conceptos de centro de masa y de centro geométrico o centroide que, aunque pueden coincidir con el centro de gravedad, son conceptualmente diferentes. Centro de masa y centro de gravedad: El centro de masas coincide con el centro de gravedad sólo si el campo gravitatorio es uniforme; es decir, viene dado en todos los puntos del campo gravitatorio por un vector de magnitud y dirección constante. Centro geométrico (Centroide) y centro de masa: El centro geométrico de un cuerpo material coincide con el centro de masa si el objeto es homogéneo (densidad uniforme) o cuando la distribución de materia en el sistema es simétrico (J. Albornoz, Estática-Ingeniería).

3.2.1 Propiedades de masa del robot de inspección

Analizando algunos tipos de aluminio por sus propiedades mecánicas, se opta por usar el Aluminio Aleación 2024, ya que cuenta con buenas propiedades mecánicas, buen módulo de elasticidad, y el material permite el maquinado del mismo, Figura 11.

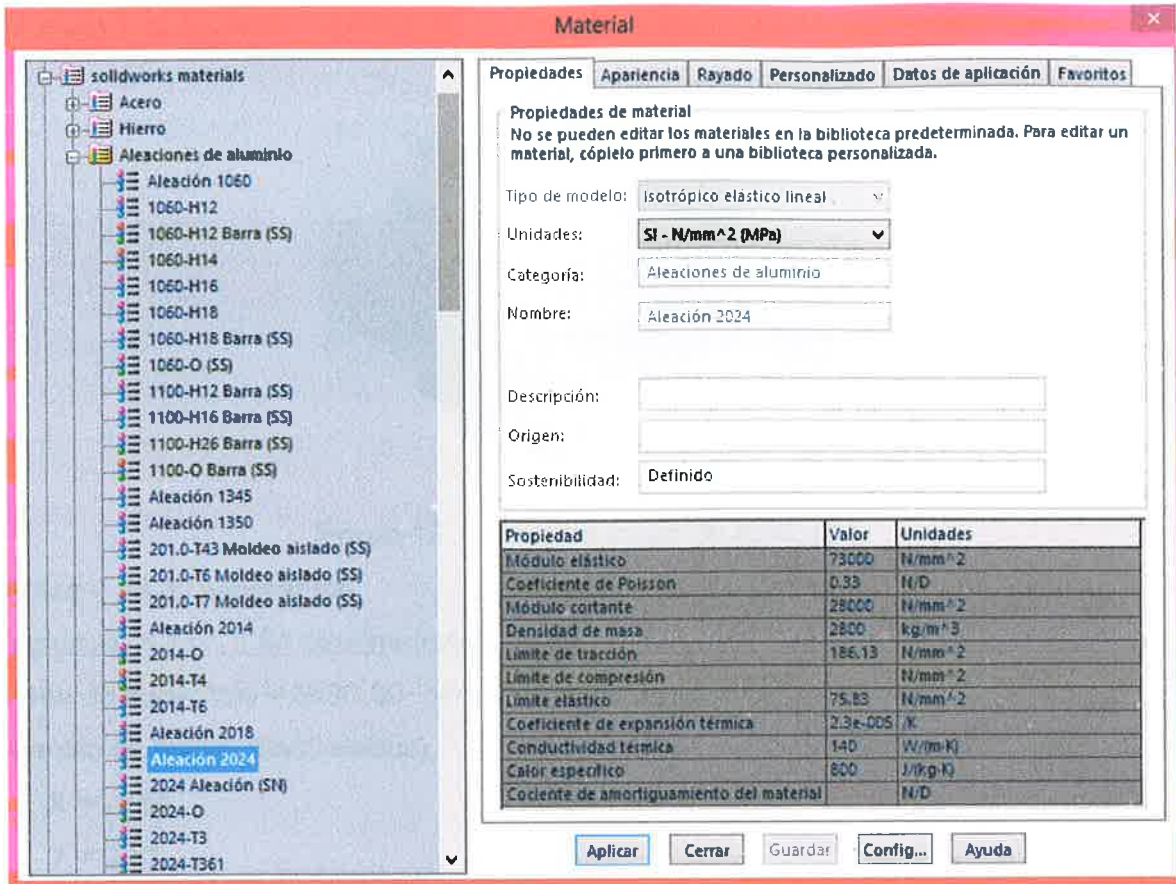


Figura 11. Propiedades mecánicas del Aluminio 2024 obtenidas de la base de datos de materiales de SolidWorks.

A continuación se muestra las propiedades de masa de cada módulo del robot de inspección haciendo consideraciones con el tipo el material seleccionado y aspectos propuestos durante el diseño del robot de inspección, haciendo uso del software SolidWorks se generan los siguientes cálculos y resultados.

Módulo 1:

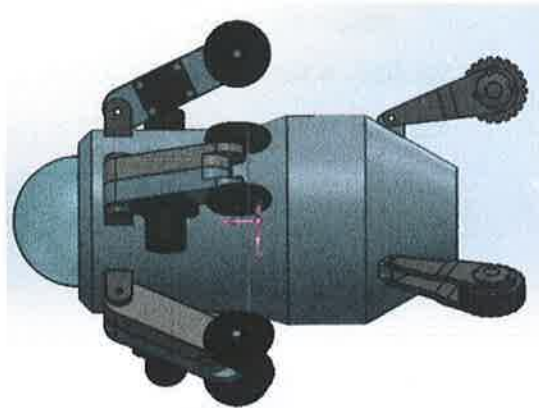


Figura 12. Centro de masa de módulo 1.

Masa = 28.37 kilogramos

Volumen = 11772.61 centímetros cúbicos

Área de superficie = 8430.30 centímetros cuadrados

Centro de masa: (centímetros)

X = -1.55

Y = 0.61

Z = 20.65

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

lx = (0.00, 0.00, 1.00)

Px = 1493.21

ly = (0.51, -0.86, 0.00)

Py = 3678.71

lz = (0.86, 0.51, 0.00)

Pz = 3687.20

Momentos de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

Lxx = 3684.96

Lxy = -3.74

Lxz = 4.54

Lyx = -3.74

Lyy = 3680.94

Lyz = 0.19

$$L_{zx} = 4.54$$

$$L_{zy} = 0.19$$

$$L_{zz} = 1493.22$$

Momentos de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I_{xx} = 15792.46$$

$$I_{xy} = -30.37$$

$$I_{xz} = -902.67$$

$$I_{yx} = -30.37$$

$$I_{yy} = 15846.05$$

$$I_{yz} = 355.29$$

$$I_{zx} = -902.67$$

$$I_{zy} = 355.29$$

$$I_{zz} = 1571.68$$

Módulo 2:

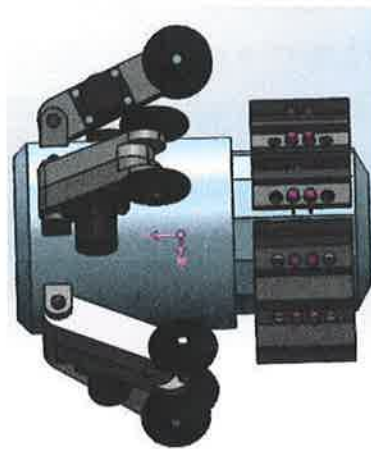


Figura 13. Centro de masa de módulo 2.

Masa = 22.41 kilogramos

Volumen = 9662.43 centímetros cúbicos

Área de superficie = 10138.33 centímetros cuadrados

Centro de masa: (centímetros)

$$X = -5.85$$

$$Y = 0.45$$

$$Z = -8.86$$

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

$$I_x = (0.01, -0.02, 1.00)$$

$$P_x = 1132.31$$

$$I_y = (0.71, 0.70, 0.01)$$

$$P_y = 2388.40$$

$$I_z = (-0.70, 0.71, 0.02)$$

$$P_z = 2421.11$$

Momentos de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$$L_{xx} = 2404.52 \quad L_{xy} = 16.20 \quad L_{xz} = 7.94$$

$$L_{yx} = 16.20 \quad L_{yy} = 2404.42 \quad L_{yz} = -25.74$$

$$L_{zx} = 7.94 \quad L_{zy} = -25.74 \quad L_{zz} = 1132.88$$

Momentos de inercia: (kilogramos * centímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$$I_{xx} = 4166.32 \quad I_{xy} = -42.50 \quad I_{xz} = 1169.21$$

$$I_{yx} = -42.50 \quad I_{yy} = 4929.11 \quad I_{yz} = -114.55$$

$$I_{zx} = 1169.21 \quad I_{zy} = -114.55 \quad I_{zz} = 1904.75$$

CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO PRELIMINAR

4.1 Objetivos del diseño

El presente capítulo contiene información respecto a los criterios tomados para la realización del diseño mecánico del robot de inspección de tuberías. Para poder presentar una propuesta de diseño del robot, se resuelve cada etapa presentada en el planteamiento del problema, el primer objetivo es construir un diseño capaz de adaptarse a diámetros variables durante su desplazamiento, manteniendo permanentemente el contacto con la superficie, posteriormente el siguiente objetivo será simular las trayectorias en que se desplazara el robot incluyendo los distintos escenarios de las líneas de ductos, en particular a variaciones de diámetros, codos y uniones tipo "T". Y finalmente se verifica si el diseño mecánico del robot de inspección es funcional bajo condiciones variables durante la trayectoria del ducto.

4.2 Metodología

Las etapas de la metodología a seguir son:

Etapas 1.- Se refiere al análisis del estado de la técnica, en esta etapa, se estudia lo relacionado al tema de investigación, y se introduce a lo más importante a considerar en el diseño mecánico, estudios de patentes, desarrollos tecnológicos y analizar tendencias futuras de los robots de inspección.

Etapas 2.- Se analizan y estudian las normas nacionales e internacionales para la inspección interna de ductos que transportan hidrocarburos, se analizará los requerimientos del proyecto, cómo característica del ducto, la variación de diámetros, y distintos escenarios como codos y uniones tipo "T", y se decidirá cómo se estructurara el trabajo.

Etapa 3.- Comprende del diseño mecánico del robot, incluyendo el diseño de los mecanismos de brazo, ruedas, motores y juntas mecánicas las cuales permitirán la unión entre los módulos.

Etapa 4.- Simulación y análisis del estudio de la estructura del robot a través de escenarios variables mediante software especializado CAE (Ingeniería Asistida por Computadora). Como se muestra en la Figura 14.

Etapa 5.- Comprende de las pruebas y los resultados obtenidos.

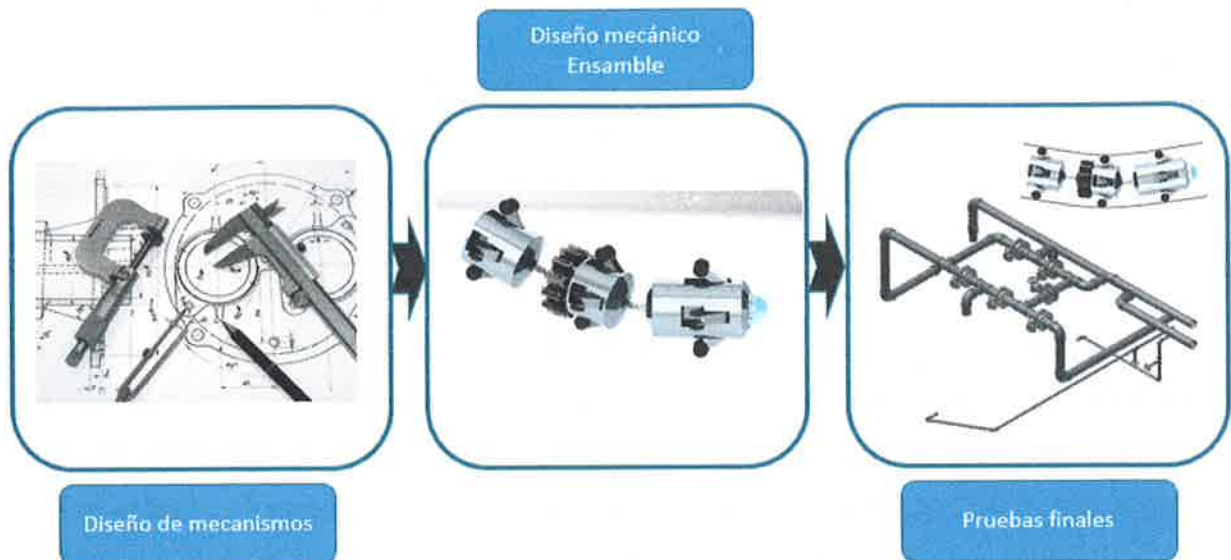


Figura 14. Metodología del diseño mecánico

4.2.1 Análisis del estado del arte

A través del análisis del estado de la técnica se obtuvo información sobre los desarrollos tecnológicos que se han llevado a cabo para la solución a la problemática de la inspección de ductos, uno de ellos y del que tomaremos mayor importancia es el robot de inspección inteligente o como anteriormente se menciona es conocido como diablo instrumentado. Se conocen algunos diseños mecánicos que han servido para la solución de la problemática analizando los ductos, estos llevando consigo más de un módulo de análisis, cada robot de inspección es diseñado para cumplir con

ciertas trayectorias y trampas que presenta el ducto, partiendo de esta idea se buscó en el diseño mecánico para el robot de inspección que se adaptara a la variación de diámetros y topologías del ducto, al no encontrar un diseño mecánico que cumpliera con las especificaciones se determina diseñar el robot de inspección partiendo de modelar las piezas mecánicas y simular para este caso en el software *Solidworks*.

4.2.2 Análisis y segmentación del proyecto

De acuerdo a los requerimientos del proyecto y debido a que se requiere que el robot de inspección supere la trayectoria del ducto con diámetros variables y distintos escenarios de los que está compuesto un ducto como codos, uniones tipo "T", válvulas, dispositivos de seguridad o alivio a lo largo del recorrido, así como su análisis mediante sensores ultrasónicos, se analizan y estudian las normas nacionales e internacionales para la inspección de ductos que transportan hidrocarburos, como lo son las normas API (*American Petroleum Institute*) y ASTM (*American Society for Testing Materials*), la norma API-570, 574, 1104 hablan de inspecciones de tuberías, sobre el tema de normatividad de ultrasonido las normas ASTM E-114, E-164, E-317 hablan del método de inspección ultrasónica en la examinación de los ductos.

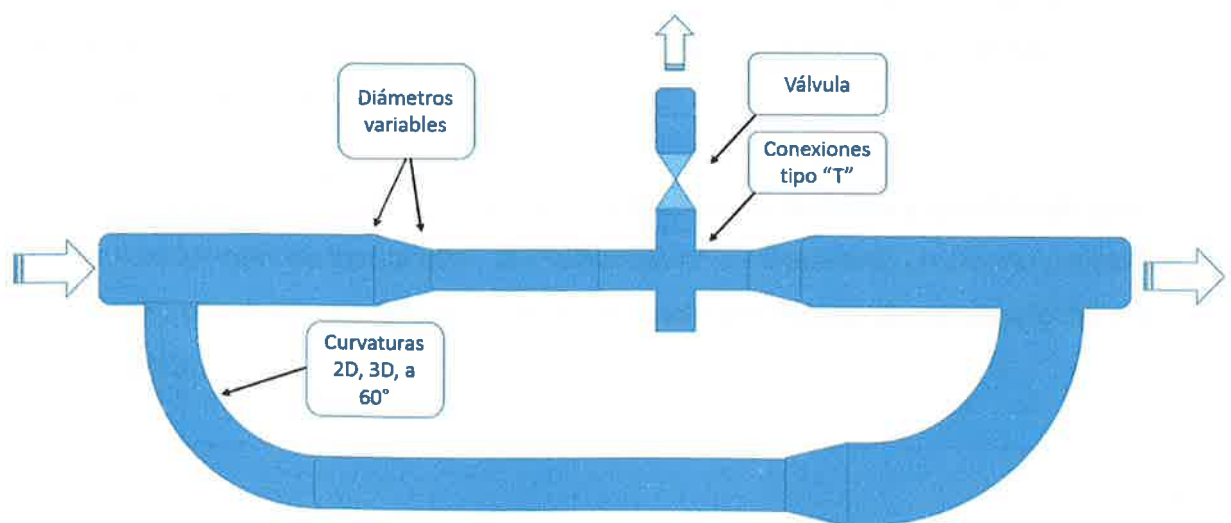


Figura 15. Conexión básica del ducto

En la Figura 15 se observa una conexión básica del ducto donde el robot de inspección se trasladara, principalmente tendrá que detectar los cambios en la posición de la línea. Esto puede ser utilizado en situaciones donde la tubería sujeta a cambios de posición o diámetros. Para las curvaturas es importante saber que radio se puede presentar como mínimo (2D,3D), para que el robot de inspección se pueda adecuar a la curvatura hasta 60° manteniendo contacto permanente sobre el ducto. La norma de referencia (NRF-001-PEMEX-2013), establece los requisitos que deben cumplir los Tubos de acero al carbono y microaleados para sistemas de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos y sus derivados.

4.2.3 Diseño mecánico del robot de inspección

En esta etapa del proyecto se realiza el diseño del prototipo que se llevara a pruebas finales para dar una idea clara de si el funcionamiento es correcto bajo las condiciones variables del ducto. Como innovación se buscan opciones para mejorar la movilidad del robot de inspección durante el trayecto y mejorar de forma precisa el contacto permanente en los diámetros variables tanto de los brazos del robot como de los sensores ultrasónicos. Cabe mencionar que el presente proyecto es del desarrollo del diseño mecánico dejando a un lado los requerimientos eléctricos y electrónicos una etapa paralela al proyecto.

El diseño mecánico consiste en realizar la propuesta en la forma y tamaño en que se desarrollará el robot de inspección, al mismo tiempo se desarrolló un diseño preliminar en el software *SolidWorks*, en la Figura 16 se muestra el diseño final a detalle del robot de inspección.

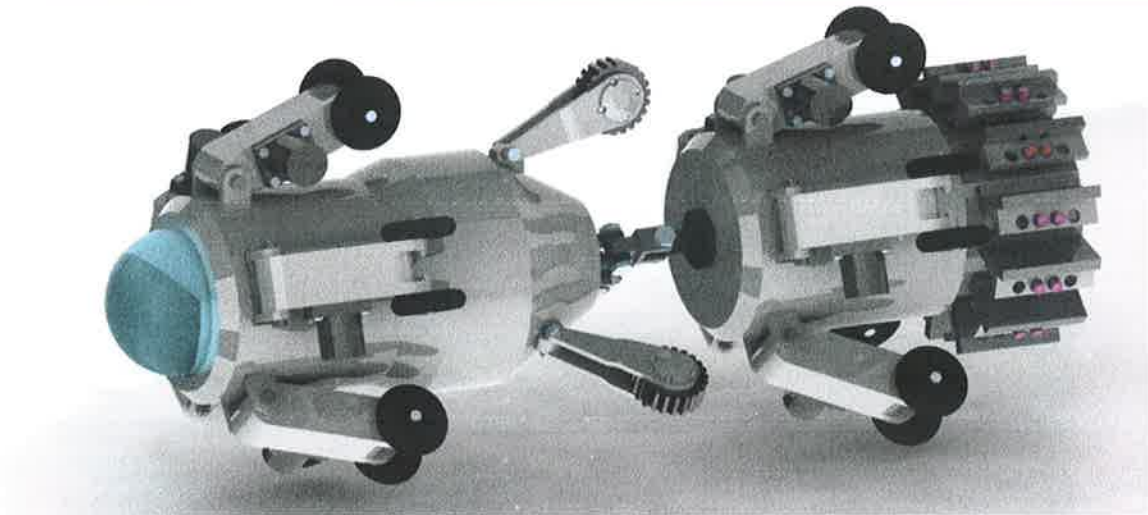


Figura 16. Diseño a detalle del robot de inspección.

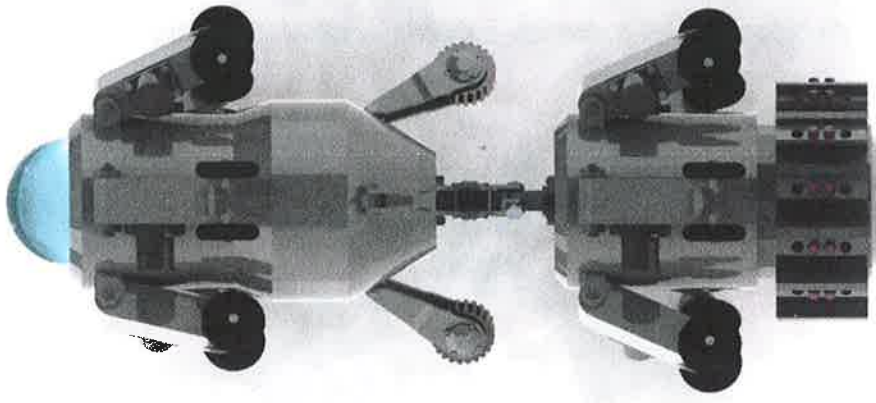


Figura 17. Vista superior del robot de inspección.

En las Figura 16 y 17 podemos observar la colocación uniforme de los brazos que estarán posicionando al robot de inspección en contacto con el ducto de manera permanente.

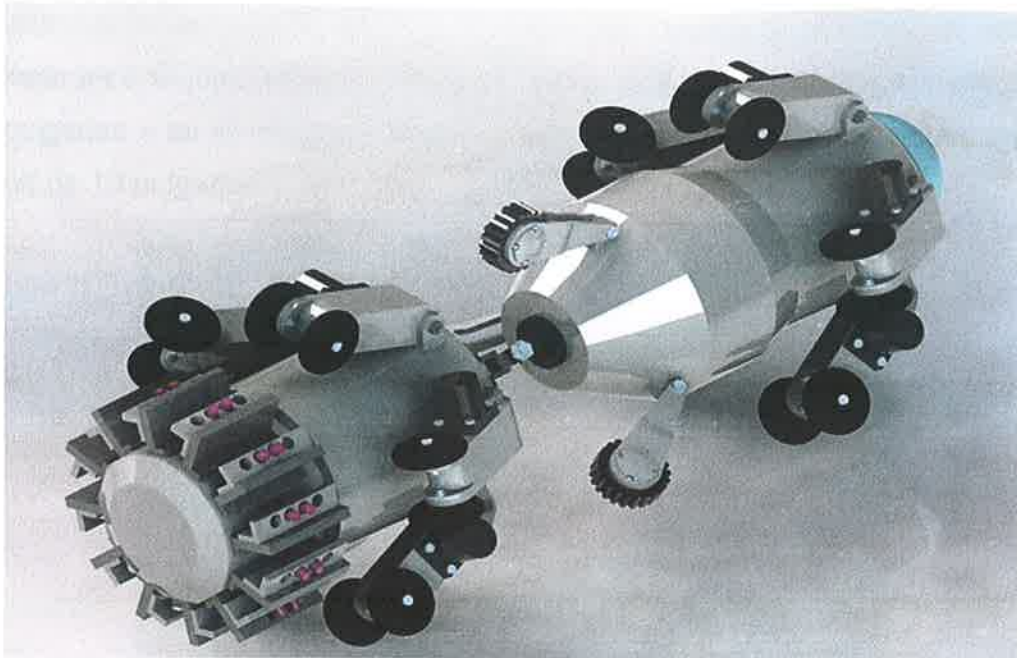


Figura 18. Vista isométrica del robot de inspección.



Figura 19. Vista trasera del robot de inspección.

En la Figura 19 se observa la configuración de los sensores los cuales estarán configurándose para mantener señal con la superficie del ducto.

Para el diseño del robot de inspección se tomó en cuenta las dimensiones variables del ducto las cuales van de las 13 a 16 pulgadas durante el recorrido. El diámetro propuesto para el diseño del módulo principal es de 8 pulgadas, con una longitud de 14.5 pulgadas y en el módulo secundario con un diámetro de 7 pulgadas, con una longitud de 13 pulgadas.

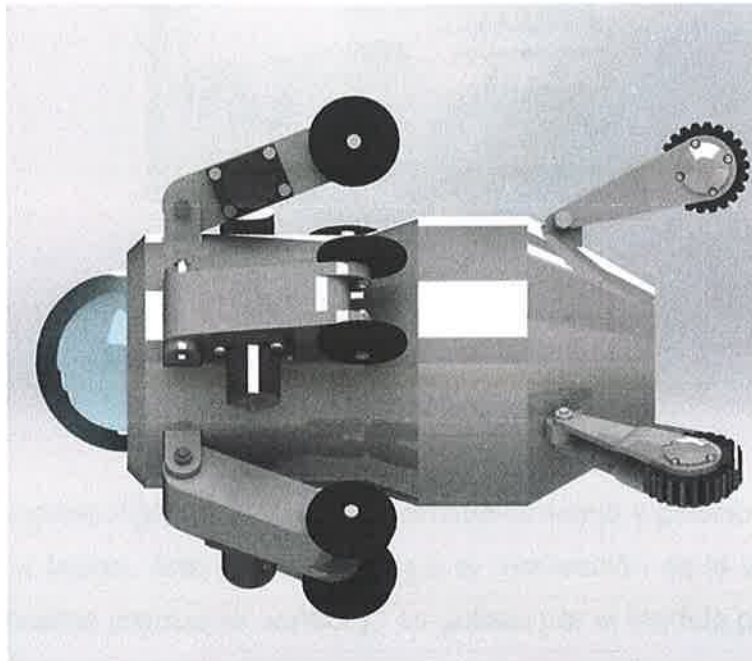


Figura 20. Módulo principal.

El modulo principal Figura 20 permite el almacenamiento de la parte de visión en la parte frontal, con la cual se podrá visualizar el interior del ducto durante el recorrido, la distribución de los brazos permitirá un correcto posicionamiento del robot de inspección, superando depresiones y perturbaciones que lleguen a presentarse, sumado también a su longitud de 14.5 pulgadas y el diámetro que con ayuda de los brazos del robot de inspección pueden alcanzar hasta 16 pulgadas ayudando a la estabilización del módulo durante el trayecto del ducto, los odómetros se integran en la parte final de modulo esto para tener una información de la distancia que se ha recorrido durante el trayecto.

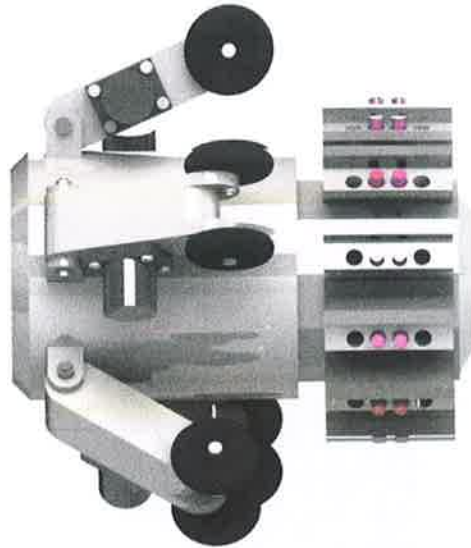


Figura 21. Módulo secundario

El módulo secundario Figura 21 permite el almacenamiento y posicionamiento de los sensores en sus bases, este módulo ayuda a la recolección de la información y es impulsado por brazos propios sin embargo es guiado por el modulo principal a través del ducto.



Figura 22. Brazo del robot de inspección.

El brazo propuesto para el robot de inspección cuenta con una longitud de 5.85 pulgadas y de ancho 2 pulgadas lo que ayuda en su interior al mecanismo el cual es controlado por el motor y esto ocasiona el movimiento de las dos ruedas que conforman el brazo, como se muestra en la Figura 22.

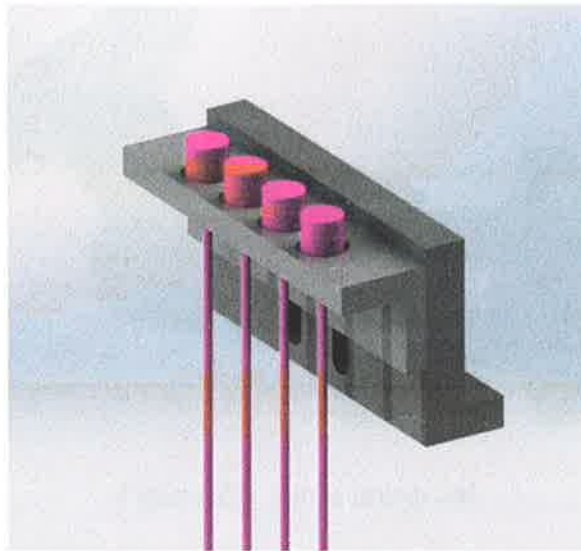


Figura 23. Porta sensores.

En la Figura 23 se muestra la porta sensores que serán capaz de adaptarse a las variaciones del diámetro gracias a su configuración que permitirá mantener contacto permanente con el ducto.

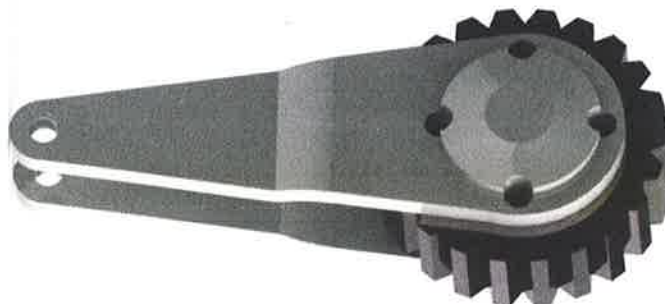


Figura 24. Odómetro

El odómetro mostrado en la Figura 24, permitirá recaudar información de la distancia que ha recorrido el robot de inspección y de esta manera localizar las posibles fallas presentadas en el ducto.

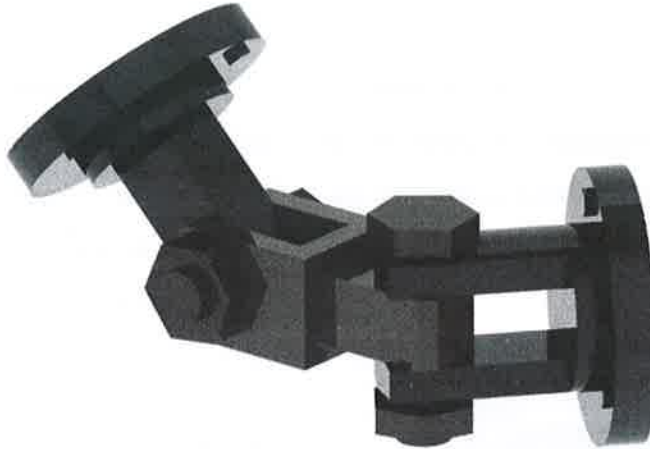


Figura 25. Junta universal.

De los sistemas de corrección y/o correlación de un sistema de navegación inercial es la junta universal o cardan, este sistema se muestra en la Figura 25. Básicamente la junta universal es la unión de los dos módulos, con lo cual se alcanzan dobleces de hasta 60°, ésta es utilizada para libertad de movimiento independientes y transmisión del giro de los módulos.

CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y RESULTADOS.

5.1 Pruebas y resultados

Para analizar el recorrido del robot de inspección de tubería, se realizan pruebas utilizando el software SolidWorks con el fin de mostrar el funcionamiento y adaptación del robot de inspección, la Figura 26 muestra gráficamente el posicionamiento físico de los brazos de robot al diámetro variable del ducto, manteniendo un contacto permanente y una inspección constante.

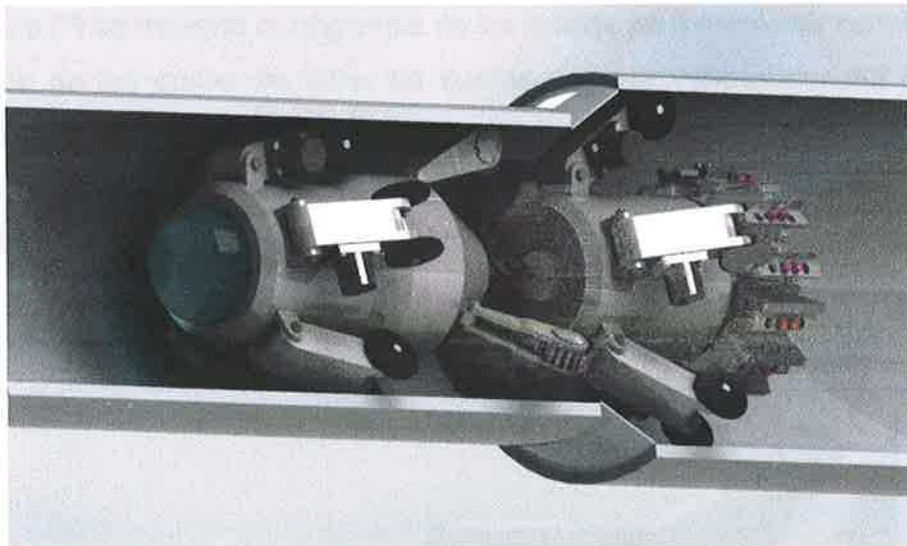


Figura 26. Disposición física del robot de inspección en el ducto.

Haciendo uso de las herramientas de SolidWorks, se muestra el funcionamiento de la junta universal al pasar por curvaturas. La Figura 27 muestra gráficamente la disposición de la junta universal a las trayectorias del ducto.



Figura 27. Disposición física del funcionamiento de la junta universal.

En la Figura 28 se muestra la respuesta de los brazos para mantener contacto con el ducto. Una de las cosas en tener en cuenta son las variaciones del ducto que presentan cambios bruscos de diámetro, de tal manera que el robot de inspección no tendrá un movimiento apropiado en sus brazos para mantener un contacto constante con la pared del ducto.

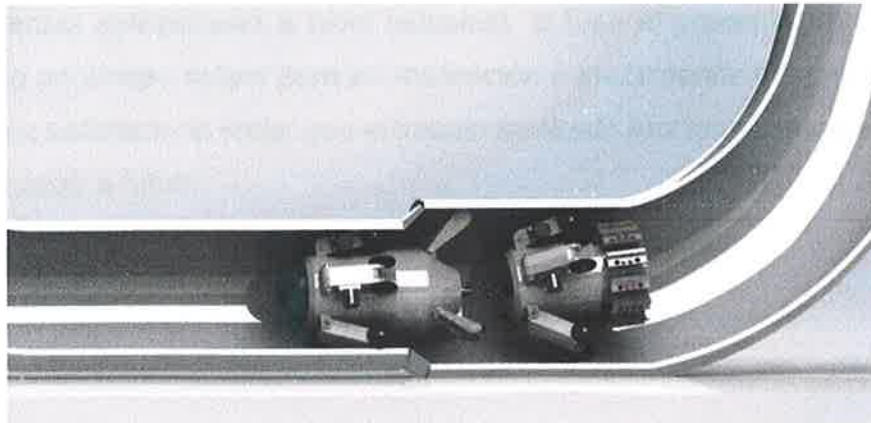


Figura 28. Adaptación a la superficie interna del ducto.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó el diseño mecánico preliminar para un robot de inspección de ductos en el software *SolidWorks*, donde se comenzó realizando la idea del diseño del robot a partir del estudio del arte y las necesidades requeridas la cual una de las principales es que el robot de inspección pueda ajustarse a ductos de diámetros variables, actualmente se encuentran un gran número de configuraciones de robots de inspección dependiendo de la aplicación, pero son pocos robots que pueden adaptarse a diámetros variables dentro del ducto. En el desarrollo del diseño mecánico implementado en *SolidWorks*, se involucraron conceptos de dinámica, fuerzas y aceleraciones a las que el robot de inspección puede estar sometidas, también el diseño se desarrolló al tipo de ducto por el cual se pretende realice la operación de trabajo donde se determinará las características físicas del ducto.

De manera profesional, puedo comentar que el trabajo realizado me ha brindado de experiencia y conocimiento para involucrarme en temas relacionados como la robótica y sus diferentes aplicaciones a nivel industrial, si bien el presente trabajo se tiene considerado un tiempo mayor para su realización e implementación en la inspección de ductos, es satisfactorio saber que el trabajo realizado funciona como parte principal de este proyecto a futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] López Carreto Juan Manuel, 2006. Investigación y desarrollo de un sistema autónomo de planimetría en el reconocimiento y exploración de ductos. Tesis de Doctorado. Instituto Politécnico Nacional.
- [2] ASA 2014, Fondo sectorial de investigación para el desarrollo aeroportuario y la navegación aérea. Ciudad de México Página 4.
- [3] Rubio González C. and Monterrubio López J. 2010. Diseño mecánico de diablo ultrasónico para la medición de espesores. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.
- [4] Reyna Cruz Jesús Alberto, 2008. Métodos de rehabilitación de defectos en ductos de transporte detectados mediante herramientas para limpieza o inspección interior de ductos". Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.
- [5] Wolfgang, K. K. 2005. Method and device for inspecting pipelines. U. S. Patents US6848313 B2.
- [6] Cortes Carrión Cindy Monserrat, 2011. Análisis de integridad de ductos. Tesis de Ingeniería Mecánica Electricista, Universidad Veracruzana.
- [7] José Luis Albornoz Salazar. Centro de gravedad, centro de masa y centroide, Estática.
- [8] Ramón de la Hoz Martínez 2009, Inspección de ductos con equipo instrumentado de segunda generación, en el XIV Congreso de Ingeniería, C.D. Mendoza, Ver. México, Del 23 al 27 de Noviembre.
- [9] Diseño, construcción, inspección, y mantenimientos de ductos terrestres, para transporte y recolección de hidrocarburos, NFR-030PEMEX-2006.