

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA

Diseño Mecánico de un Robot para la Inspección de Tuberías

Nathalia Catalina Marentes Carrillo

Trabajo de grado para obtener el título de ingeniera mecatrónica

Director

Pedro Pablo Díaz Jaimes

Ingeniero Mecánico

Codirector

Jhon Leonardo Quiroga

Ingeniero Electrónico



Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

2019

Agradecimientos

A lo largo de mi trabajo de grado he contado con el apoyo, la guía e influencia de personas que me han inspirado y colaborado para seguir adelante.

Por ello quiero manifestarles mis más sinceros agradecimientos a todos ellos.

A Samuel, por su paciencia, su amor, tiempo y apoyo en todo momento.

A mi madre Nancy por su amor incondicional y enorme apoyo a lo largo de toda mi carrera.

A mis tutores y profesores Jhon Quiroga y Pedro Díaz por todas las ideas, sugerencias, apoyo y orientación durante el desarrollo de la tesis, fueron de gran ayuda para mí y el proyecto.

Tabla de contenido

1. Introducción	10
2. Formulación del problema	13
3. Justificación	14
4. Objetivos	16
4.1 Objetivo General	16
4.2 Objetivo Específicos	16
5. Marco teórico	17
5.2 Metodología de Diseño	22
6. Proceso de Diseño	24
6.1 Diseño Conceptual	24
8. Diseño de Detalle	38
8.2 Diseño Final	44
9. Análisis estructural	46
10. Conclusiones	57
11. Trabajos futuros	58
12. Bibliografía	59

Lista de tablas

Tabla 1 Características de Diferentes Robots Utilizados para la Inspección de tuberías	17
Tabla 2 Comparativo de materiales	38

Lista de figuras

Figura 1 Robot circ-axis.....	17
Figura 2 Robot Alstom.....	17
Figura 3 Robot Weldstarr.....	18
Figura 4 Robot Slofec	18
Figura 5 Robot Altiscan	18
Figura 6 Robot pre-trenzado	21
Figura 7 Robot retov	22
Figura 8 Sistema de Ingeniería de Procesos. Modelo V.	23
Figura 9 Grafica de velocidades vs corriente del motor	26
Figura 10 Vista isométrica del ensamblaje de la rueda principal	30
Figura 11 Vista isométrica del ensamblaje de la rueda principal	31
Figura 12 Vista en Explosión del ensamblaje de la rueda Principal.....	31
Figura 13 Ensamblaje rueda omnidireccional.....	32
Figura 14 Ensamblaje del Sensor.....	33
Figura 15 Esqueleto del robot sin los ensamblajes delas rueda y sensor.....	33
Figura 16 Motor Utilizado para las Ruedas del Robot	35
Figura 17 Servo motor MG995 - sigma electrónica	36
Figura 18 Rueda direccional de 4cm de diámetro Exterior	37
Figura 19 Rueda Omnidireccional de 4cm de diámetro exterior.....	37
Figura 20 Expansión robot tuberías 6-9 in.....	41

Figura 21 Expansión robot para tubería de 12 in	41
Figura 22 Vista Isométrica del Robot sobre Tubería	42
Figura 23 Ensamblaje de la Rueda principal	43
Figura 24 Rueda omnidireccional común	44
Figura 25 Modelo CAD Robot De Inspección	45
Figura 26 Vista isométrica robot sobre tubería 6 in.....	45
Figura 27 Análisis Von Mises De la base De la rueda	48
Figura 28 Estudio estático ensamblaje sensor	49
Figura 29 Factor de seguridad.....	49
Figura 30 Estudio estático robot completo	51
Figura 31 Estudio estático (factor de seguridad)	52
Figura 32 Estudio estático (Von misess)	53
Figura 33 Estudio estático robot completo (desplazamiento).....	54
Figura 34 Características de la malla	54
Figura 35 Vista Isométrica del robot con malla visible	55
Figura 36 Estudio por fatiga (vida total).....	55
Figura 37 Tensión von Mises en el eje del motor	56

Lista de apéndices

Apéndice A Desarrollo matemático del Motor Utilizado para la elección del Robot	62
Apéndice B Desarrollo Matemático para el cálculo del resorte	65
Apéndice C Curva S-N de los materiales utilizados	70

Resumen

Los dispositivos de inspección tradicionales basados en la fuga de flujo magnético para la inspección de tuberías requieren el uso de varios núcleos ferromagnéticos para cubrir toda la circunferencia de la tubería. Estos núcleos están axialmente orientados sobre la tubería, permitiendo detectar grietas con componente circunferencial, pero no aquellas que solo tienen componente axial. Por otro lado, el número de núcleos utilizados hace que el dispositivo sea demasiado pesado. En este trabajo, se presenta un diseño de la estructura mecánica de un robot de inspección externo con un único núcleo ferromagnético. El robot se mueve en dirección circunferencial y axial desplazando el núcleo MFL a lo largo y ancho de toda la pared de la tubería para cubrir toda el área de inspección. En este mecanismo, el núcleo también gira 90° para detectar cualquier posible orientación de grieta. El robot tiene la capacidad de adaptarse a tuberías de entre 6 y 12 pulgadas de diámetro. Se presenta un modelado de las fuerzas que soportan la estructura.

Palabras clave: Simulación, ptfe, inspección, robot, tubería, mfl.

Abstract

Traditional inspection devices based on magnetic flux leakage for pipe inspection require the use of several yokes to cover the whole circumference of the pipe, where axially oriented cracks are usually left uninspected and the number of yokes used, makes the device too heavy. In this work, a design of the mechanical structure of an external inspection robot is presented. The robot moves in circumferential direction coupling a single MFL yoke in the pipe wall and move in the axial direction of the pipe to cover new inspection areas. In this mechanism, the yoke also rotates in order to detect any possible crack orientation. The robot has the ability to adapt to pipes between 6 and 12 inches diameter. A modeling of the forces that supports the structure is presented.

Keywords: Simulation, ptfe, inspection, robot, pipe, mfl.

1. Introducción

La integridad de las estructuras de tuberías es un tema importante que debe considerarse en la industria del petróleo y el gas, ya que las consecuencias del fracaso pueden resultar en daños ambientales, pérdidas económicas debido a la pérdida de productos y procesos industriales e incluso muertes humanas [1], [2], [3]. Por esta razón, la implementación de técnicas de inspección es una tarea necesaria, teniendo en cuenta que las redes de tuberías están en expansión en todo el mundo y la investigación aún está en desarrollo debido problemas aún existentes en los métodos actuales de inspección y monitorización.

Las técnicas de inspección de tuberías comprenden instrumentos que se pueden clasificar como “*in pipe*” instrumentos que inspecciona desde dentro de la tubería y “*out pipe*” instrumentos que inspeccionan desde fuera de la tubería, Uno de los principales dispositivos de inspección “*in pipe*” en tubería utilizados son los llamados PIG (*Pipe Inspection Gauge / Pipeline Intervention Gadget*), instrumentos de mantenimiento y/o inspección diseñados para trabajar dentro de la misma. El PIG se mueve a través de largas distancias dentro del tubo por medio del producto transportado y a menudo está equipado con sensores MFL (fugas de flujo magnético) y sensores ultrasónicos [4] para inspeccionar varios tipos de anomalías en la tubería [5] [6]. Los PIG tradicionales funcionan para las dimensiones de un solo ducto específico, pero se han realizado nuevos diseños mecánicos para adaptar un PIG único a un ducto multidiámetro [7], realizar inspección en los llamados ductos “*unpigable*” (no inspeccionables por PIGs). Otros diseños de robots mecánicos dentro de la tubería incluyen robots que imitan el movimiento de animales como gusanos u orugas. En [8] se presenta y

evalúa un diseño autoblocante de robot gusano. Este robot utiliza tres cuñas como apoyo entre su cuerpo y la pared de la tubería. Este tipo de mecanismo proporciona una mejor tracción que los robots “*in-pipe*” con ruedas. En [9] se presenta un robot que imita el movimiento de la oruga. Este robot tiene dos juegos de patas en cada extremo del cuerpo del robot y un sistema mecánico de alargamiento en el centro del cuerpo. Mientras un grupo de piernas o apoyos permanece en contacto con la pared de la tubería, el otro grupo de piernas se contrae mientras el cuerpo se alarga para dar un paso.

Por otro lado, los robots “*out pipe*” suelen ser robots con ruedas. En [10] se propone un robot de diseño mecánico para tuberías verticales. Este robot describe tres tipos diferentes de movimiento; Movimientos circunferenciales, axiales y helicoidales. También es capaz de evitar obstáculos con altura inferior a 8 mm. En [11] se propone un diseño mecánico multidíámetro para un robot escalador que puede cubrir tuberías rectas y dobladas. En lugar de una estructura que cubre casi toda la circunferencia de la tubería, en [12] un robot basado en MFL se presenta con una estructura similar a la de un automóvil de cuatro ruedas. Los sistemas MFL se utilizan no solo para detectar anomalías, sino también para conectar magnéticamente el robot a la pared de la tubería. Este robot debe estar siempre orientado axialmente.

Un tema importante a considerar en la implementación de herramientas de inspección de fugas de flujo magnético es la orientación de defectos de grietas en tuberías. Para detectar defectos orientados axialmente, se implementan herramientas de magnetización circunferencial [6], mientras que se detectan defectos orientados circunferencialmente para herramientas de magnetización axial [5]. La implementación de herramientas de magnetización axial en PIG requiere configurar el instrumento con varios yugos, imanes y

sensores de campo magnético alrededor de la circunferencia de la tubería para lograr la inspección de toda la pared. Varios yugos en un solo instrumento resultan en un instrumento pesado. Por otro lado, los robots externos a menudo utilizan otras técnicas de inspección como la ecografía, pero cuando se usa MFL para cubrir áreas completas de inspección implica equipo más pesado.

En este trabajo se presenta el diseño mecánico de un robot de inspección externa de tubería y representa uno de tres proyectos siendo trabajados en paralelo. El objetivo del robot es inspeccionar toda la pared de la tubería utilizando la técnica de fuga de flujo magnético por medio de un yugo único que se mueve alrededor de la pared de la tubería. El diseño del sistema de medición y el sistema de alimentación del robot forman el cuerpo de los otros dos proyectos incluidos en el proyecto macro que es el desarrollo de la herramienta para inspección.

2. Formulación del problema

El nivel de riesgo que se maneja en el transporte de fluidos como petróleo o gas en condiciones de operación normales es alto, ya que expone a posibles picos de deterioro difíciles de predecir en base a los modelos matemáticos de desgaste [13] [14] , teniendo en cuenta los factores mecánicos (fuerzas actuantes sobre la pieza o presiones externas o internas), termodinámicos (Fluctuación de temperaturas que generen dilatación de estructuras o piezas), químicos (corrosión generada por componentes atmosféricos o fluidos agresivos), entre otros, envueltos. La automatización del proceso de inspección para evaluar la condición de integridad de activos estáticos en tiempo real o en ventanas de tiempo determinadas por medio de tecnologías de inspección no destructivas es una tendencia con creciente interés para esta industria.

Dado la presente tendencia de producción de crudo promedio anual en Colombia, la cual se encuentra en caída en los últimos 5 años [15], se vuelve vital conservar y aprovechar el producto ya extraído, para lo cual es fundamental el constante mejoramiento de las tecnologías envueltas en su transporte. Este concepto es promovido por el Ministerio de Minas y Energía [16] en su listado de buenas prácticas.

Los equipos especializados para la detección de grietas y pérdidas de masa de las tuberías son costosos, teniendo en cuenta que los dispositivos de inspección deben ser adaptados para acoplarse a un transportador robótico, que pueda llevar a cabo las tareas de inspección, sin intervención humana.

Algunos de los instrumentos de medición del mercado poseen dimensiones robustas, que difícilmente pueden ser adaptadas a un vehículo o medio de transporte robótico que

realice la inspección. Sin embargo, los instrumentos de inspección deben ser diseñados de acuerdo a criterios definidos como:

- Sus dimensiones deben ser adecuadas para desplazarse a través de las tuberías en las cuales deben trabajar, teniendo en cuenta el peso de las mismas.
- Debe estar diseñado en función del instrumento de inspección.
- Debe tener en cuenta que porcentaje de la superficie de la tubería será inspeccionada.
- La resistencia del material a factores externos a los cuales podría estar siendo sometido.

Como base en esto es necesaria una apropiación de la tecnología ya existente, con el fin de poder dimensionar un sistema acorde al diseño planteado por el equipo de electrónica e instrumentación.

3. Justificación

Para el mantenimiento industrial es muy importante la prevención de accidentes, así como la confiabilidad y disponibilidad de los equipos e instalaciones utilizados por industrias de petróleo y gas entre otros. Una falla podría causar enormes repercusiones a nivel de personal, económico, social y medio ambiental. De esta manera, las industrias en este sector requieren realizar inspecciones preventivas y correctivas en sus redes de tubería utilizando técnicas de análisis de integridad con el fin de evitar daños causados por diferentes factores. Estas inspecciones suelen llevarse a cabo por personal especializado el cual verifica posibles agrietamientos o pérdida de material en la pared de la tubería.

Dada la naturaleza de la inspección, la cual debe ser realizada en largos tramos de tubería (algunos de ellos de difícil acceso para el inspector) de forma mecánica, se presenta la posibilidad de aplicar una solución automatizada. Se plantea de esta manera el desarrollo de un robot de inspección que pueda agilizar y facilitar el proceso, garantizando mayor seguridad para el personal y disminución de errores humanos, así como apropiación de las tecnologías ya existentes

El presente trabajo de grado enmarca la investigación y posterior diseño mecánico de una herramienta móvil robotizada, la cual puede ser adaptada como instrumento de inspección exterior de fallas en tuberías en el sector petrolero. Este proyecto se desarrolla en paralelo con proyectos de investigación y diseño en las áreas de electrónica e instrumentación.

Se propone el diseño para una herramienta de inspección no destructiva, robotizada que pueda ser usada a nivel regional/nacional para inspeccionar líneas de acero carbono. Este proyecto presenta una nueva metodología para la aplicación de un dispositivo de inspección MFL para la detección de grietas en cualquier orientación.

Dicho diseño permitirá, como un proyecto posterior a la fase de diseño, evaluar la viabilidad técnico-económica de la construcción de la herramienta y de la prestación del servicio de inspección a las empresas interesadas (o la construcción de la herramienta como un producto conjunto universidad-empresa). [15]

La herramienta a diseñar se basa en tecnologías existentes, analizando los tipos de locomoción más utilizados, sus ventajas y debilidades, proponiendo un diseño propio el cual será el transporte para las herramientas de inspección utilizadas por el equipo de investigación de electrónica.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Diseñar la estructura mecánica de una herramienta robotizada para la inspección de discontinuidades en la superficie externa de tuberías metálicas.

4.2 Objetivo Específicos

1. Definir los criterios y restricciones del modelo final a partir de las especificaciones del proyecto macro, de la revisión bibliográfica y referencias en revistas indexadas.
2. Desarrollar el diseño conceptual de un modelo de la herramienta robotizada para la selección del que mejor se ajuste a las condiciones del proyecto.
3. Diseñar la estructura mecánica para el equipamiento del sistema de censado basado en el modelo seleccionado.
4. Diseñar el sistema de locomoción y apoyo de un robot escalador, para diferentes grados de inclinación, en tuberías entre 6 y 12 pulgadas de diámetro, basado en el modelo seleccionado.
5. Validar por medio de un programa CAD SolidWorks el diseño mecánico detallado del robot.

5. Marco teórico

5.1 Estado de Arte

La siguiente tabla informativa, acoge algunos modelos de robots más utilizados, sus ventajas, y desventajas más relevantes, así como las técnicas utilizadas, posibles limitaciones e información adicional que pueda ser de interés para el lector y como referencia base para el desarrollo del diseño.

Tabla 1 *Características de Diferentes Robots Utilizados para la Inspección de tuberías*

NOMBRE	FOTOGRAFIA	TECNOLOGIA DE INPECCION	FABRICANTE	CARACTERISTICAS
CIRC – AXUS [17]		EMAT	SEN	Consiste en dos herramientas motorizadas. Circ permite la detección de defectos en forma circunferencial, mientras AXUS permite la detección de defectos axiales. No requiere acoplante para la medición y se pueden realizar mediciones sin retirar el recubrimiento.
Mobile Robotic Scanners [18]			ALSTOM Inspection Robotics	Conformado por varias herramientas que se movilizan sobre la tubería en forma autónoma, haciendo mediciones con diversas tecnologías de sensores como UT, phased array, corrientes de Eddy, laser, termografía, espectroscopía o rayos x.

Figura 1 Robot circ-
axis

Figura 2 Robot Alstom

Weldstarr [18]		General Electric	Inspección de juntas soldadas Sistema integrado con GPS que permite referenciar geográficamente todas las juntas inspeccionadas
-------------------	---	---------------------	--

Figura 3 Robot Weldstarr

Tabla 1 Características de Diferentes Robots Utilizados para la Inspección de tuberías

SLOFEC Reformer Pipe Inspection [19]		Corrientes pulsadas de Eddy	Innospection	Usa el principio de las Corrientes de Eddy en combinación con un campo magnético, haciendo que las corrientes de Eddy penetren más en el material ferromagnético.
--	--	--------------------------------------	--------------	---

Figura 4 Robot Slofec

ALTISCAN [18]		ULTRASONID O	ROBOPLANE T	Se basa en un rastreador escalador magnético de grado militar, resistente a lluvias, viento y superficies degradadas. Un robot utilizado para la inspección de tanques almacenamiento, barcos y grandes superficies de acero.
------------------	---	-----------------	----------------	--

Figura 5 Robot Altiscan

5.1.1 Descripción De Características de Algunos Robots en la Industria

A continuación, se menciona la descripción de algunos robots existentes en la industria, los cuales fueron tomados como base para el desarrollo del diseño de la herramienta que encabeza este trabajo de grado.

5.1.1.1 Altiscan

El Altiscan (Ver Figura 5) es una herramienta diseñada para la medición de espesores de tanques de almacenamiento con el objetivo de reducir los tiempos de inspección en amplias superficies de acero.

Su sistema de adherencia magnética patentado, en conjunto con sus tres ruedas, dos para tracción y control de la dirección y una tercera para agregar estabilidad, le permiten escalar paredes verticales, a una velocidad de 15 m/min y girar en todas direcciones. Dado que su locomoción es alimentada por medio de un sistema hidráulico, su electrónica está diseñada para ser resistente al agua, Esto en combinación con su geometría, lo hace muy resistente a eventos climáticos como la lluvia y los fuertes vientos.

El robot puede ser controlado desde el suelo, en una estación compacta y móvil por un único operador. La estación incluye un computador para establecer la rutina de trabajo y monitorear los resultados, una bomba y un tanque para la transmisión de potencia y una consola para permitir control manual. A pesar de su robusto diseño mecánico, el ensamble pesa solo 7 kg. [18]

5.1.1.2 *Circ-Axus*

Los robots de Rosen están contruidos con métodos de inspección complementarios. El Circ (ver Figura 1) es un robot tipo carro, equipado con un chasis curvo y cuatro ruedas magnetizadas para facilitar tu acoplamiento a la tubería. Gracias a esto funciona en tramos horizontales e inclinados, además de ser efectivo en superficies desiguales. Este modelo también es alimentado por medio de un cordón umbilical, con fuente de alimentación por baterías, para su fácil transporte. Su tarea es hacer un sondeo a lo largo de la tubería, en busca de irregularidades en la consistencia de la pared.

Axus, por otro lado, es usado para inspección más a fondo de los tramos de interés identificados por Circ. También está diseñado con cuatro ruedas magnéticas, sin embargo, su recorrido es sobre la circunferencia de la tubería, recolectando información más detallada del estado de la pared en sus 360°.

Circ es especialmente de interés para el presente proyecto, ya que su funcionamiento se asemeja más a la aplicación deseada. Su geometría es particularmente sencilla pero adaptable, permitiendo la inspección de tuberías de un rango considerable de diámetros. [17]

5.1.1.3 *Robot trepador*

Este tipo de robot quien utiliza la plataforma G-S. Su estructura mecánica es bastante simple y de fácil aplicación, la cual consiste en dos anillos o plataformas unidas por medio de seis actuadores lineales a través de juntas universales, prismáticas y esféricas. Este tipo de mecanismo garantiza que la estructura alcance altas velocidades, mayor resistencia, fuerza y un bajo peso, además de los bajos costos de producción y mantenimiento. Este robot tiene la

ventaja además de haber sido estudiado con anterioridad por una generosa cantidad de autores, quienes han propuesto diferentes modelos cinemáticos, fallas y posibles mejoras, además como aplicaciones para la misma estructura y variaciones.

Entre sus variantes se encuentra el robot trepador con garras entre sus anillos, utilizado para mejores adhesiones en terrenos con protuberancia. [20]

5.1.1.4 Estructura Robótica Pre-Tensada para Robot en Tuberías Petroleras

Este tipo de robot se basa en un mecanismo de estructura pre tensada, se caracteriza por su bajo peso y adaptabilidad a diferentes diámetros de tuberías gracias a un diseño modular el cual permite la adición o sustracción de módulos para acoplarse a los diámetros de tubería deseada.

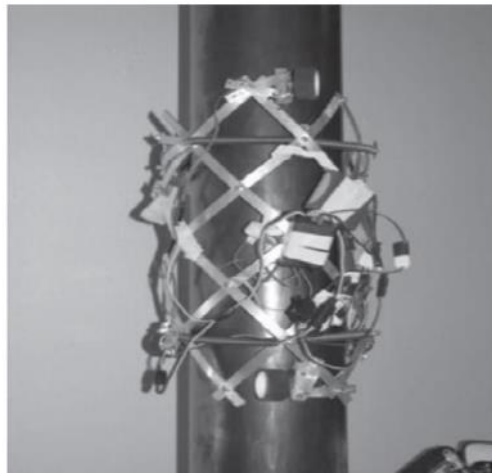


Figura 6 Robot pre-trenzado

5.1.1.4 Robot Retov



Figura 7 Robot retov

Un prototipo desarrollado, denominado Robot en Tuberías de Operación Vertical, RETOV. Este robot puede operar en dos grados de libertad, movimiento lineal y rotacional; y su desplazamiento lo ejecuta mediante ruedas ubicadas perimetralmente a 120° sobre la estructura y alrededor de la tubería. Es un robot con gran capacidad para adaptarse fácilmente a tuberías de diferentes diámetros agregando módulos en serie. También su desplazamiento mediante ruedas le permite los movimientos de ascenso y descenso verticalmente o realizar movimientos helicoidales debido al sistema rotacional de ruedas. Ver Figura7.

El prototipo experimentado en una tubería petrolera estándar, de 13,4 cm de alto y capacidad de diámetros en 140 y 210 mm, pesa 1 kg aproximadamente. Se apoya en una interfaz gráfica para el control de los accionamientos mediante el software de LabView. [21]

5.2 Metodología de Diseño

Para el diseño de la herramienta se adoptó la primera fase del método en V como se muestra en la Figura 8 [22].

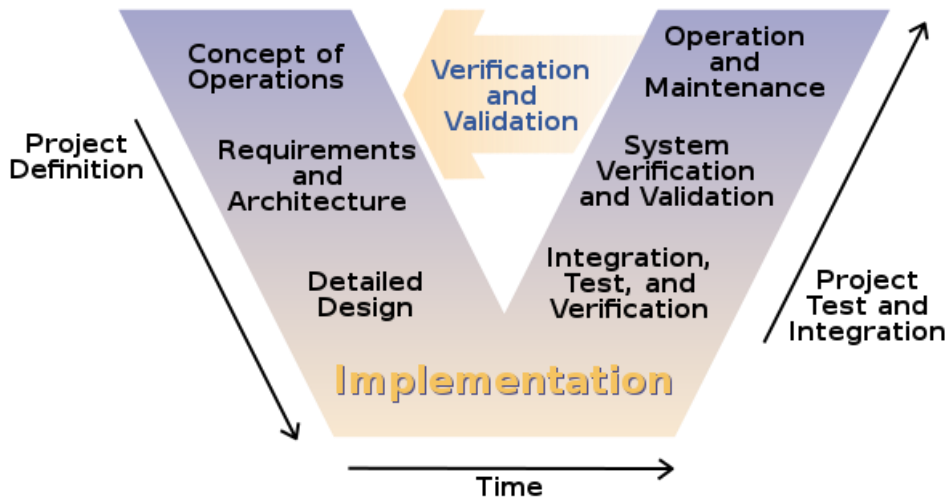


Figura 8 Sistema de Ingeniería de Procesos. Modelo V.

En primera instancia se evaluaron los requisitos de la aplicación y se investigó la documentación de robots de inspección presentes en la industria y sus características. Estos se usaron como marco de referencia para el levantamiento de los requisitos autoimpuestos en adición a los requerimientos propuestos por los otros dos proyectos paralelos del proyecto macro.

A continuación, se realizó el diseño de detalle de la herramienta mecánica basada en la documentación presentada en la fase de investigación. En esta etapa se establecieron varias propuestas de diseño incluyendo permutaciones de material, dimensiones y sistemas de locomoción. Descrito en el trabajo se encuentra solamente el diseño final.

Durante todo el proceso se mantuvo comunicación constante con los equipos de instrumentación y eléctrica, dada la influencia que estos tienen en la geometría del robot, así como su capacidad de carga necesaria. Finalmente, se presentó el diseño del prototipo de la herramienta por medio de un software CAD, para modelado mecánico en 2D y 3D.

6. Proceso de Diseño

En el siguiente capítulo se desarrolló el proceso del diseño siguiendo los pasos descritos en la metodología del diseño en V.

6.1 Diseño Conceptual

Para el diseño del robot de inspección de tuberías se tuvieron en cuenta las siguientes listas de requisitos subdivididas en las categorías propuestas por partes interesadas en la adquisición de una herramienta de este tipo, así como de expertos en el campo y demás participantes del proyecto macro y referentes comerciales.

6.1.1 Requisitos y especificaciones del cliente

Entre las especificaciones más relevantes que se obtuvieron del cliente y/o personas con un alto grado de interés en la adquisición de un equipo como este o experiencias con los mismos se destacan:

6.1.1.1 *Requerimientos de uso*

- El robot debe ser liviano
- Material con resistencia a altas temperaturas (menores de 200 °C)
- Material inerte con resistencia a agentes químicos y ambientales.
- Herramienta de fácil mantenimiento

- Fácil transporte

6.1.2.1 *Requerimientos de función*

- La herramienta debe ser ajustable para tuberías entre 6 a 12 pulgadas de diámetro.
- El robot debe ser adaptable para el sensor de técnica MFL desarrollada por el equipo de electrónica e instrumentación del proyecto macro.
- El robot debe contar con una plataforma que ubique el sensor en un ángulo de 45 y - 45 grados con respecto al eje de la tubería.
- El sensor debe estar a no más de 5cm de distancia de la superficie de la tubería para su adecuada medición, sin tocarla.
- El robot debe desplazarse en tramos con cualquier tipo de inclinación que presente la tubería.
- El robot debe abarcar en su totalidad el perímetro de la tubería.

6.1.2.2 *Requerimientos estructurales*

- La estructura debe ser preferiblemente modular
- La herramienta debe ser de fácil ensamble y desensamble.
- El Diseño debe ser preferiblemente simétrico con respecto al eje de la tubería.
- El diseño debe tener geometrías sencillas.

6.1.2.3 *Requerimientos técnico-productivos*

- El diseño debe implementar materiales comerciales.
- Elementos como tuercas, tornillos y arandelas deben ser estandarizados.
- Se debe dar preferencia al uso de piezas comerciales cuando el diseño lo permita.

6.1.2.4 *Requerimientos formales*

- El robot debe ser económico
- La herramienta debe ser estéticamente agradable, ligera y balanceada.
- Se debe validar la confianza y posible desempeño de la herramienta por medio de un programa CAD.

6.1.2.5 *Requerimiento de función (velocidad de la herramienta)*

Las curvas de corriente y velocidad son aproximadamente lineales, la curva de potencia de salida naranja es el producto de la velocidad y el par, lo que da como resultado una parábola invertida con su pico al 50% del par de parada.

La curva de eficiencia verde es la potencia de salida dividida por la potencia de entrada, donde la potencia de entrada es la corriente por el voltaje. El voltaje es constante, por lo que se puede dividir la curva de potencia de salida por la línea de corriente para obtener la forma general de la curva de eficiencia, que a su vez le permite identificar el par, la velocidad y la corriente que corresponden a la eficiencia máxima.

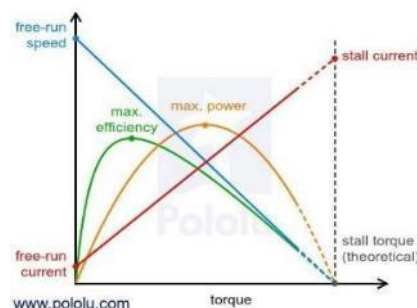


Figura 9 Grafica de velocidades vs corriente del motor

En estudios realizados en otras publicaciones [23], [24], se demuestra que tanto la velocidad como la variación de la velocidad durante la medición por medio de la herramienta MFL, no tienen efectos negativos en el reconocimiento de imperfecciones. Aunque la aceleración puede alterar el resultado numérico de la medición, esta se puede corregir utilizando un esquema de compensación relativamente simple. Por este motivo, la velocidad de la herramienta termina siendo una consecuencia de la selección del motor, que a su vez fue escogido teniendo en cuenta el peso del robot y otros factores. Las especificaciones del motor y su velocidad se pueden encontrar en la sección 7.1.

La velocidad a la cual ira la herramienta se puede obtener con un sistema de ecuaciones sencillas.

$$\tau = fr \times \text{radio de la rueda}$$

$$\tau = 6.72 \text{ kg} \times \text{cm}$$

Como el motor tiene un torque máximo libre de 16 kg x cm entonces el porcentaje máximo del torque del motor estaría en el 42%, en teoría el robot como mínimo estaría avanzando a una velocidad de 58% de su velocidad máxima, es decir 58 Rpm (0.1670 m/s).

6.2 Análisis funcional (fase funcional)

- Peso:

Se propone un límite máximo del robot no superior a 10 kg.

- Estructura:

Se propone un diseño con tres lados unidos por travesaños formando un hexágono, de tal manera que el robot se ajuste al perímetro de la tubería.

Con motivo de garantizar el ajuste del robot para diferentes diámetros de tuberías entre 6 a 12 pulgadas, la estructura cuenta con dos etapas de ensamblado en conjunto con un mecanismo de desenganche rápido o *Quick Release*, para facilitar un montaje y desmontaje.

La etapa I permite el ensamblaje en tuberías de 6 y 9 pulgadas y la etapa II en tuberías de 9 a 12 pulgadas. El ajuste del robot para ambas etapas se realizará por medio de resortes encamisando los soportes corredizos que unen la estructura con las placas de las ruedas. Los resortes serán diseñados de alambre musical de terminación cuadrada.

- Movimiento:

Para el sistema de locomoción del robot se propone utilizar 2 ruedas omnidireccionales y una sencilla montada sobre la segunda plataforma giratoria. Al variar la posición de la rueda sencilla entre paralela y perpendicular a la tubería, se permite realizar el movimiento rotacional y lineal del robot.

Cada rueda viene con un motor propio para que el movimiento sea el producto de fuerzas aplicadas uniformemente.

- Manipulación del sensor:

El robot cuenta con una plataforma giratoria controlada por servomotor la cual permite ubicar el sensor en los ángulos necesarios de 45° y -45° . Esta contará con soportes deslizantes, los cuales se gradúan para diámetros diferentes por medio de pasadores, de manera que el sensor mantenga siempre una distancia de 3 cm con la superficie de la tubería.

6.3 Arquitectura del sistema (fase diseño)

Para la fase de diseño se tomaron en cuenta cada uno de los requerimientos que se plantearon anteriormente, de esta manera fue más sencillo planear en el diseño las secciones elementales o fundamentales que debería tener la herramienta a diseñar, y a partir de ello revisar y replantear cada aspecto, con el fin de lograr un diseño acorde a lo establecido.

Como se mencionó anteriormente, y como se puede ver en los objetivos planteados en este documento, se requiere que el diseño del robot sea ligero (en comparación a otras herramientas que se encuentren ya en el mercado), de fácil manipulación, que pueda abarcar en su totalidad el diámetro de la tubería a inspeccionar, que pueda acomodarse a tuberías de 6 a 12 pulgadas de diámetro y que pueda desplazarse por superficies de tubo con inclinaciones, entre otros.

El robot por su diseño e implementación de resortes es capaz de conservar la concentricidad en tramos de tubería por donde se desplaza. Su forma es simétrica, y se trata de un diseño modular completamente desmontable, en el cual algunas de sus partes pueden ser reemplazadas con facilidad por piezas comerciales. Además de esto, su forma es sencilla y puede ser fabricada de cualquier material, dependiendo de las condiciones de trabajo.

6.4 Descripción de las partes

El robot se encuentra constituido por 6 levas de conexión (3), 6 barras con dos puntos de anclaje (1), 3 bases estáticas donde se encuentran ensambladas las ruedas (4)(2)(6), y una base removible para el sensor (7). El diseño cuenta con posibilidad para agregar 2 bases removibles más (5), esto con el propósito de mantener un espacio destinado para la fuente de alimentación que requerirá el robot, cableados o lo que se considere necesario añadir.

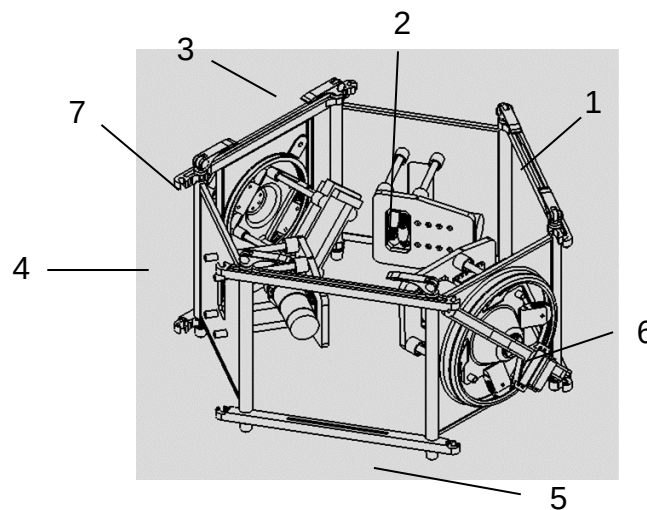


Figura 10 Vista isométrica del ensamblaje de la rueda principal

El ensamblaje de la rueda principal, se diseñó de tal manera que el robot tuviese un buen ajuste sobre la tubería, ayudado también por los resortes y permitiendo un cambio de dirección en la trayectoria que sigue, esto es a lo largo de la tubería y alrededor de la misma.

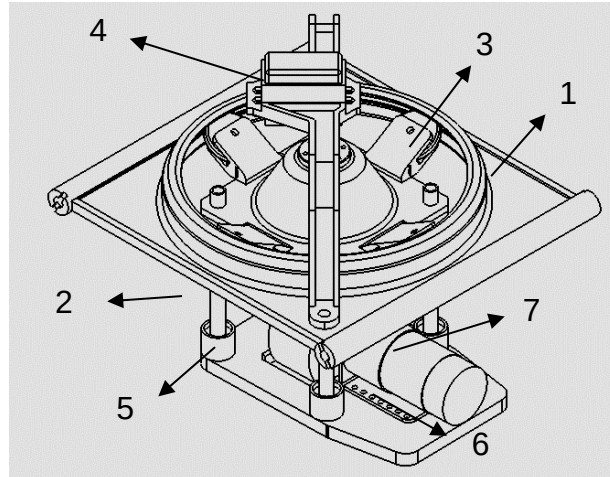


Figura 11 Vista isométrica del ensamblaje de la rueda principal

La Figura 10. Está compuesto por una ranura estática rectangular (1), 4 varillas deslizantes (2), una abertura circular central que funciona como guía de movimiento en donde los rodillos siguen el trayecto (3), cuenta además con una barra soporte (4) para el servomotor encargado del movimiento de la base giratoria, base para la rueda (5), *bracket* del motor (6) y el motor de la rueda principal (7).

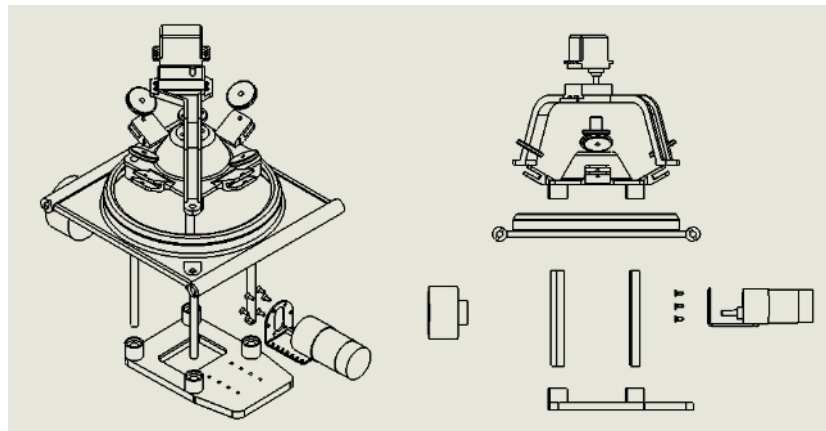


Figura 12 Vista en Explosión del ensamblaje de la rueda Principal

La vista en explosión de la Figura 11 da una idea más clara de los elementos que componen el ensamblaje total de la rueda principal, así como los detalles de las tuercas que ajustan el *bracket* a la base de la rueda y al motor.

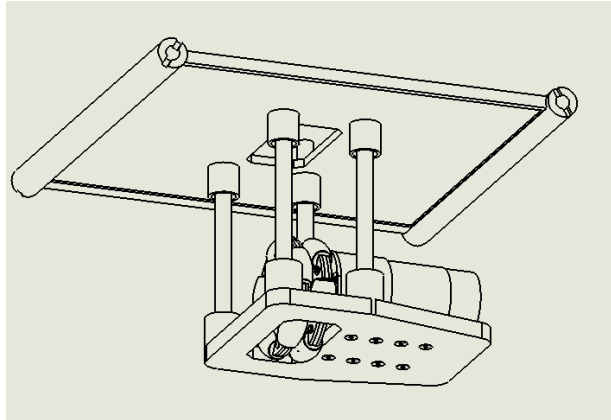


Figura 13 Ensamblaje rueda omnidireccional

Para garantizar que el robot pueda desplazarse tanto a lo largo como alrededor de la tubería a inspeccionar fue necesario incluir dentro del diseño dos ruedas tipo omnidireccional, que reducen la fricción para los cambios de dirección y ayudan con el apoyo sobre la tubería para mantener una concéntrica y disminuya la posibilidad de fallo en la medición debido a distancias no constantes entre el sensor y la tubería.

El ensamble de esta rueda es sencillo, cuenta con una plataforma estática en donde a dos lados se encontrará el *quick reléase*, 4 tubos de soporte y desplazamiento, base para la rueda, motor, rueda omnidireccional y *bracket* del motor.

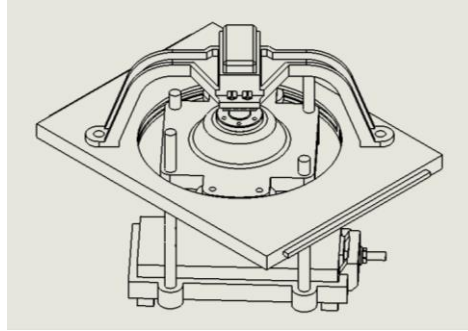


Figura 14 Ensamblaje del Sensor

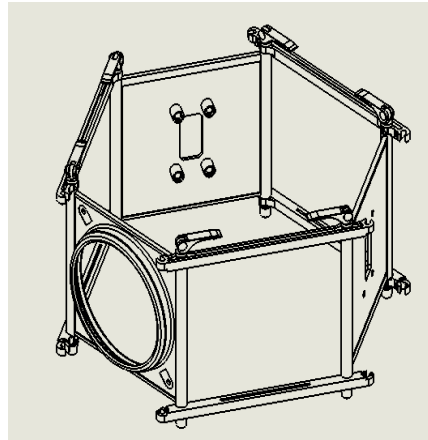


Figura 15 Esqueleto del robot sin los ensamblajes de la rueda y sensor

El ensamblaje del sensor se compone por una placa desmontable, y conserva similitud con el mecanismo utilizado por la rueda principal, esto con el fin de que el sensor pueda cambiar su posición a un ángulo de 45 a -45 grados desde su origen, este cambio se realizaría una vez por cada vuelta alrededor de la tubería, aumentando la probabilidad para detectar fallas ocultas en la toma de muestreos por parte del sensor.

7. Implementación (Desarrollo)

En esta sección se describirán los componentes, materiales y partes comerciales utilizados en el diseño CAD del robot, así como características físicas de la herramienta.

Para poder realizar una selección de los motores a utilizar, así como el tamaño, material y peso de las ruedas se tuvo en cuenta un peso global del robot estimado con un factor de seguridad generoso. Una vez escogidos una segunda iteración del modelo fue desarrollada para determinar sus dimensiones y su peso final. Cada uno de los segmentos del robot fue analizado por medio de un estudio de esfuerzos en SolidWorks con el objetivo de validar la estabilidad mecánica de la construcción y corroborar las suposiciones iniciales consideradas durante el diseño conceptual de la herramienta robótica. Durante este análisis se excluyeron los travesaños que unen los segmentos, ya que fueron considerados piezas no críticas.

7.1 Selección del Actuador

Para la selección de los motores, se tuvieron en cuenta las dimensiones del mismo, su costo, tamaño y potencia.

Se establecieron 3 ruedas en el robot, por lo que fue necesario encontrar un motor adecuado la distribución del torque. El motor seleccionado para las ruedas es un motor de corriente continua Pololu que cuenta con un encoder de cuadratura integrado que proporciona una resolución de 64 rpm del eje del motor, que corresponde a 1200 rpm del eje de salida de la caja de cambios. (Ver Figura 17)

Las dimensiones de este motor se pensaron para las características que se necesitaban, tiene un peso de no más de 230 g y un torque de 16 Kg-cm.



Figura 16 Motor Utilizado para las Ruedas del Robot

La ecuación correspondiente para el torque del motor está dada por:

$$\tau = \frac{m \times g \times r}{n}$$

Ecuación 1

Donde:

τ : Torque requerido para cada uno de los motores en Nm

m: es la masa total del robot en kg

g: Gravedad 9.81 m/s

r: Radio de la rueda

n: número de motores (que en este caso son 2)

Por tanto, se tiene:

$$\tau = 1.123 \text{ N} \times m = 11,452 \text{ kg} \times \text{cm}$$

Este valor se tuvo en cuenta para una sobredimensión del 1.2

Servo Motor MG995

Servomotor TowerPro MG995 con alto Torque, hasta 15Kg-cm. Robusto, alto rendimiento, compacto, con engranes de Metal y un peso de 55gr.

Este servo será utilizado para realizar el cambio de posición de la llanta principal, que define la dirección del robot.

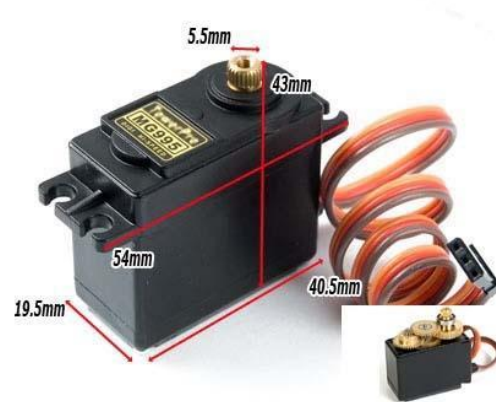


Figura 17 Servo motor MG995 - sigma electrónica

La ecuación correspondiente al torque del servo motor está dada por:

$$\tau = N \times \mu_s \times \frac{h}{2}$$

Donde:

μ_s : Es el coheficiente de friccion

τ : Torque

W : Peso

h : Grosor de la rueda principal

N : Fuerza normal

$$\tau = 0.51 N \times m = 5.2 kg \times cm$$

7.2 Selección de las ruedas

Se propuso el uso de 2 ruedas omnidireccionales (Ver Figura 17) y una rueda normal (Ver Figura 16). El diámetro de estas fue establecido inicialmente para el cálculo de los motores, por lo que su elección se basó en la designación del motor, es decir, que cumpliera con el diámetro utilizado en la Ecuación 1. El diámetro que se especificó para el cálculo de las ruedas es de 4 cm de diámetro.

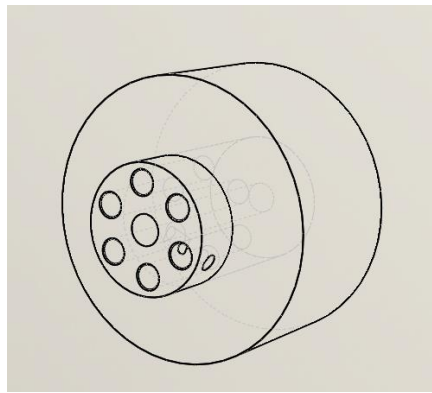


Figura 18 Rueda direccional de 4cm de diámetro Exterior

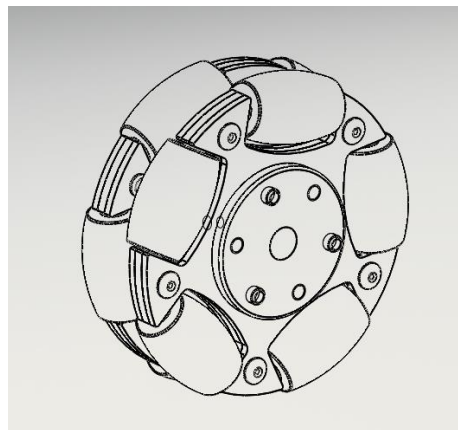


Figura 19 Rueda Omnidireccional de 4cm de diámetro exterior

8. Diseño de Detalle

8.1 Material

Como se mencionó anteriormente, el material de la estructura debe ser altamente resistente, puesto será sometido a largas horas de trabajo al aire libre y bajo el efecto de altas temperaturas, agentes corrosivos y humedad, entre otros. Adicionalmente se deben tener en cuenta su precio y densidad, puesto que el producto final ha de ser en lo posible de bajo costo y ligero. A continuación, se presenta una tabla comparativa de los materiales estudiados:

Tabla 2 *Comparativo de materiales*

Material	ABS	ALUMINIO	PTFE	PVC
Densidad de la masa	1020 Kg/m ³	2700 kg/m ³	2320 Kg/m ³	1290 Kg/m ³
Límite de tracción	305.915 kg/cm ²	2345.35- 5812.38 kg/cm ²	77.29 kg/cn ²	550 kg/cm ²
Coeficiente de fricción con el acero	0.5	0.47	0.04 - 0.15	
Temperatura máxima antes de la deformación	90°C		260°C	75°C
Precio por kilogramo	1.26 USD	1.84 USD	1 USD	0.25 USD
Coeficiente de deformación térmica	6,5- 9,3x10 ⁻⁵ °C	2,4·10 ⁻⁵ °C ⁻¹	0.000125°C	0.00011°C

Dado su bajo precio, facilidad para la manufactura y alta resistencia mecánica, el ABS ofrece una plataforma muy asequible y sólida, la cual debería funcionar correctamente en ambientes poco exigentes. Sin embargo, dada la necesidad del robot de ser capaz de operar

a temperaturas de máximo 200°C, el ABS queda descartado, puesto que al superar una temperatura igual o mayor a 90°C el material comienza a perder rigidez, su estructura se vuelve más blanda y comienza a deformarse el material. Por este motivo se recomienda su uso solamente durante la fase de prototipado del robot.

El PTFE por otro lado brinda una estructura mucho más resistente a los ambientes hostiles. El material es inerte al contacto con hidrocarburos y no recibe daño alguno de la radiación solar. Su peso, es mayor al del ABS y algunos otros metales considerados, sin embargo, teniendo en cuenta el balance entre sus fortalezas, precio y facilidad para la manufactura, el PTFE se presenta como una alternativa altamente preferible y se recomienda su uso para el futuro desarrollo de la herramienta real.

Finalmente se podría poner en consideración la aplicación de una mezcla de ABS con PTFE. La combinación de ambos materiales es posible y podría, en las proporciones adecuadas, reforzar la resistencia del ABS en los elementos y disminuir el peso total de la herramienta de campo. Esta posibilidad no será desarrollada en este documento.

8.1.2 Geometría

La geometría de la herramienta fue basada en los robots investigados y documentados en el capítulo 5.1.

Inicialmente se planteó el uso de un cuadrilátero, idea que posteriormente fue descartada puesto que carecía del espacio necesario para adaptar simultáneamente el mecanismo expansión, las ruedas y el sensor con su respectivo sistema de rotación.

A continuación, se propuso un diseño circular u ovalada en tándem con un concepto modular para su expansión. Sin embargo, dado que la estructura estaría prefabricada con una curvatura inicial, la adición de módulos distorsiona la figura. Esto hace que la graduación de la estructura resulte en muchas construcciones diferentes, lo cual añade complejidad innecesariamente.

Teniendo en cuenta el problema dimensional, las proporciones y la necesidad de obtener una estructura que fuese concéntrica a pesar de expansión, se optó por utilizar una geometría hexagonal. La ventaja de esta figura es la conservación de la forma, permitiendo mantener la herramienta concéntrica a la tubería a cada momento, fácil instalación, rapidez en el montaje y desmontaje.

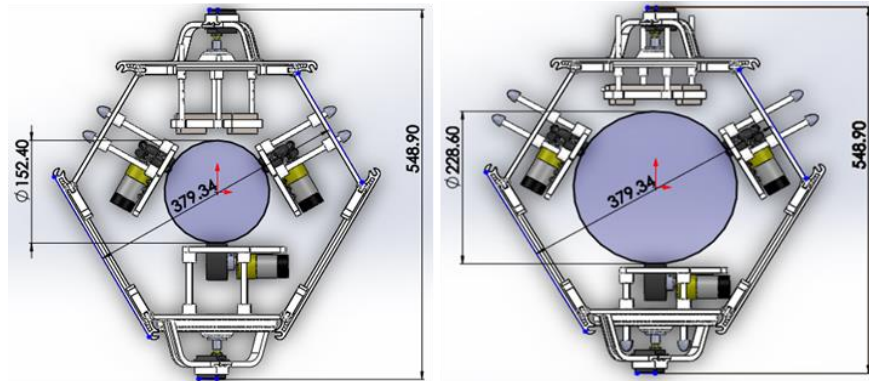


Figura 20 Expansión robot tuberías 6-9 in

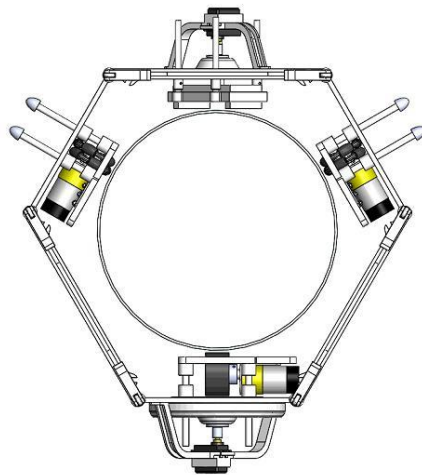


Figura 21 Expansión robot para tubería de 12 in

El problema de adaptabilidad a diferentes diámetros fue atacado por medios pasivos para evitar el uso de un sistema motorizado extra. Con este fin, los resortes fueron implementados en los soportes de las ruedas, las cuales proveen ajuste en un rango de 3". En paralelo se propuso el uso de dos etapas de ensamble, calculadas para posibilitar el ajuste de la herramienta en tuberías de 6" a 9" (Etapa I) y de 9" a 12" (Etapa II).

8.1.3 Sistema de locomoción

De acuerdo con la rutina de inspección, el sistema de locomoción del robot debe cumplir con tres funciones:

- Movimiento a lo largo de la dirección axial de la tubería
- Movimiento de rotación a lo largo de la circunferencia de la tubería
- Rotación angular del soporte del sensor

8.1.3.1 *Movimiento a lo largo de la dirección axial de la tubería:*

Similar a varios de los robots analizados anteriormente, el primer movimiento en la lista debe originarse en todos los puntos de contacto con la tubería. Dado que se plantea el uso de 3 ruedas, cada rueda debe contar con un motor independiente. En caso de tener una rueda sin motor, implicaría que dicha rueda no genere una fuerza de avance, provocando un desbalance, de modo que el movimiento del robot no sería limpio.

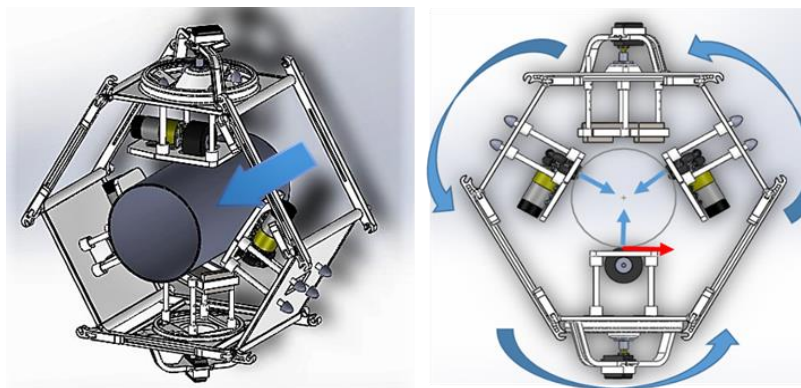


Figura 22 Vista Isométrica del Robot sobre Tubería

8.1.3.2 *Movimiento de rotación a lo largo de la circunferencia de la tubería:*

El segundo movimiento se realizará mediante el uso de una rueda equipada con un motor paso a paso adicional, la cual le permite a esta pivotar sobre la superficie de la tubería. Al girar en un ángulo de 90° , el movimiento propiciado por la rueda hace al robot girar alrededor de la tubería como es requerido. En herramientas similares, este sistema es usado en las tres ruedas. Sin embargo, esto requiere el uso de dos motores más, mayor número de piezas y mayor complejidad.

En este proyecto se propone en cambio, el uso de dos ruedas omnidireccionales. Estas permiten el movimiento rotacional del robot de forma pasiva, ahorrando en componentes y simplificando la herramienta. De este modo, durante el movimiento axial, los motores de las tres ruedas trabajan conjuntamente. Al momento de realizar un protocolo de inspección, los motores de las ruedas omnidireccionales se detienen y generan solamente el torque necesario para mantener al robot aferrado a la tubería, mientras la rueda principal pivota 90° y hace a la herramienta entera girar.

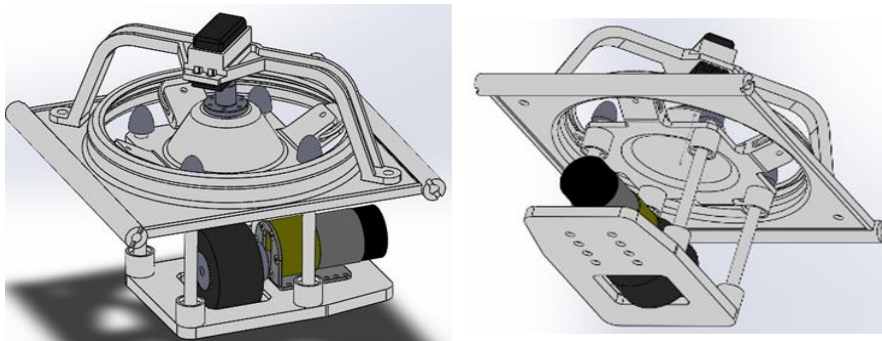


Figura 23 Ensamblaje de la Rueda principal

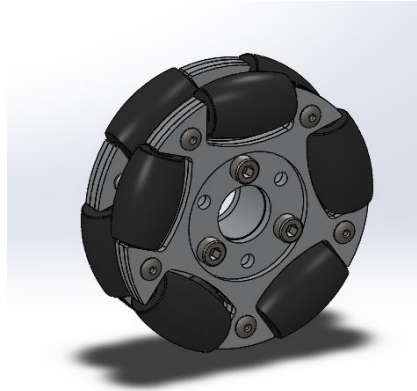


Figura 24 Rueda omnidireccional común

8.1.3.3 Rotación angular del soporte del sensor

Finalmente, el movimiento para posicionar el sensor será facilitado por una construcción similar a la de la rueda principal, dotada con un motor paso a paso propio. Esta se compone de una herramienta para su sujeción, construida como parte de un plato rotacional.

8.2 Diseño Final

El resultado final del proyecto da un prototipo mecánico, realizado en SolidWorks, el cual podría ser utilizado como una base para un proyecto futuro, en donde, con las sugerencias que se plantean en capítulos anteriores, puede ser construida la herramienta de inspección, y ser utilizado en la industria en sectores petroleros, para los cuales se pensó. Los planos en la totalidad se encuentran en el Anexo 1

En La siguiente figura se puede observar el modelo final de la herramienta de inspección.

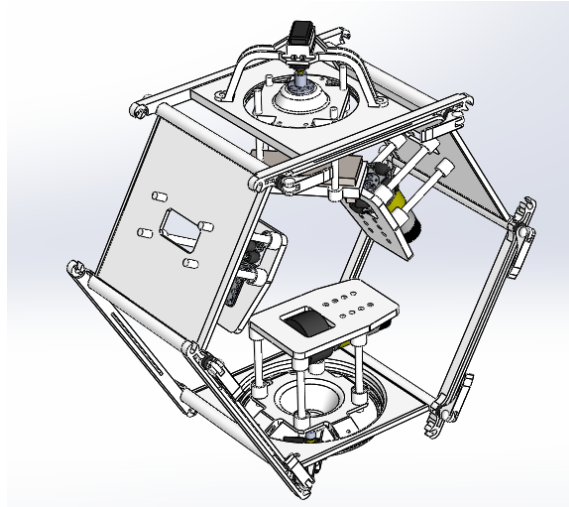


Figura 25 Modelo CAD Robot De Inspección

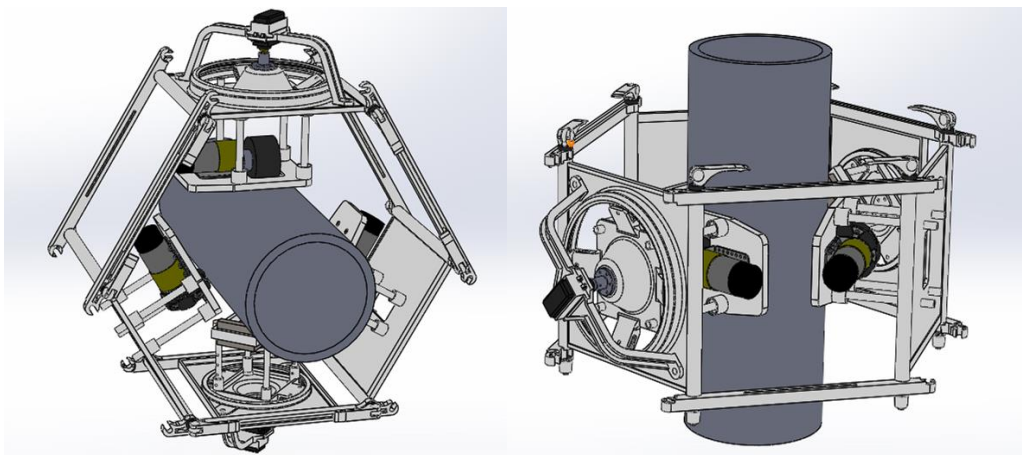


Figura 26 Vista isométrica robot sobre tubería 6 in

El robot cumple con todos los requisitos impuestos y descritos en secciones anteriores, su modelo es sencillo y versátil, puede ser modificado de tal manera que pueda ser utilizado para otros tamaños de tubería de ser requerido.

La herramienta es capaz de desplazarse tanto vertical como horizontal a lo largo de la tubería, no es problema para el robot realizar su trayectoria sobre un tramo con inclinaciones. La estructura abraza la tubería sobre la que trabaja para mayor seguridad y ajuste, además de poder recorrer el diámetro durante la toma de muestras.

9. Análisis estructural

Una estimación del comportamiento estructural bajo cargas estáticas del robot para el diseño establecido, se obtiene mediante una simulación de elementos finitos utilizando SolidWorks en un entorno CAD-CAE. Por medio de esta herramienta, se identifican los componentes críticos del diseño del robot, las tensiones generadas por la acción de las cargas y el factor de seguridad mínimo.

Como el robot se ve afectado por tres tipos de carga: el peso del robot, el peso del sistema de detección y la fuerza normal del robot a la tubería por medio de los resortes, se realiza un análisis de la estructura de soporte de los motores, ruedas y herramienta de detección.

Los criterios considerados en el software de simulación SolidWorks son los siguientes:

- Malla: se establece una malla mixta (malla fina), con geometría formada por tetraedros, distribuida a lo largo de cada modelo.
- Material: El material seleccionado es PTFE para la estructura del robot. Aluminio para ruedas y caucho de silicona para ruedas (densidad 2700 kg/m^3).
- Tipos de contacto: para las uniones de las placas superiores que se conectan a la estructura principal, se consideran los accesorios fijos. Para simular el peso de la estructura (3.3 kgf o 32.373 N) y el peso de la herramienta de detección (0.85 kgf o 8.338 N) se consideran las cargas externas; Las uniones atornilladas se utilizan para las otras uniones de pasador que sirven de guía para los resortes y que sostienen las placas que sirven de soporte para los motores y las ruedas.

Como criterio de evaluación de diseño, se considera el factor de seguridad obtenido del análisis de estrés. Esto representa la relación entre el diseño de tensión y la tensión de

rendimiento máxima del material. Si el factor de seguridad dado por la simulación en SolidWorks es menor que uno (<1), significa que la estructura fallará, si es igual a uno (≤ 1), es un estado inminente con altas probabilidades de falla y si es mayor que uno (>1), no falla.

9.1 Análisis de la estructura de soporte del motor y la rueda

La simulación de la capacidad de carga en el soporte del motor se realiza considerando un conjunto de condiciones. El peso total del robot influye en el soporte del motor. El motor es un elemento rígido. Los resortes de compresión tienen un módulo de rigidez de 234.1 N / m , precarga de 17.5 N / m^2 y una fuerza máxima de 70 N (7.14 kgf), cuando los resortes se comprimen 1.5 pulgadas (0.0381 m). Este enfoque proporciona un par de 1.57 Nm aplicado al eje del motor (ver Figura 20).

En las características de la malla, el tamaño de los elementos es de 5.6 mm , tolerancia de 0.28 mm , malla fina, número de nodos del modelo 49600 y el número de elementos finitos es de 25943 .

De la distribución de tensiones se observa que el área de mayor influencia es el soporte del motor (Ver Figura 20). Esto se debe al par aplicado en el eje del motor con un valor promedio de 20 N / mm^2 (según los criterios de análisis de Von Mises), sin exceder la resistencia máxima a la tracción del material, que es de 30 N / mm^2 .

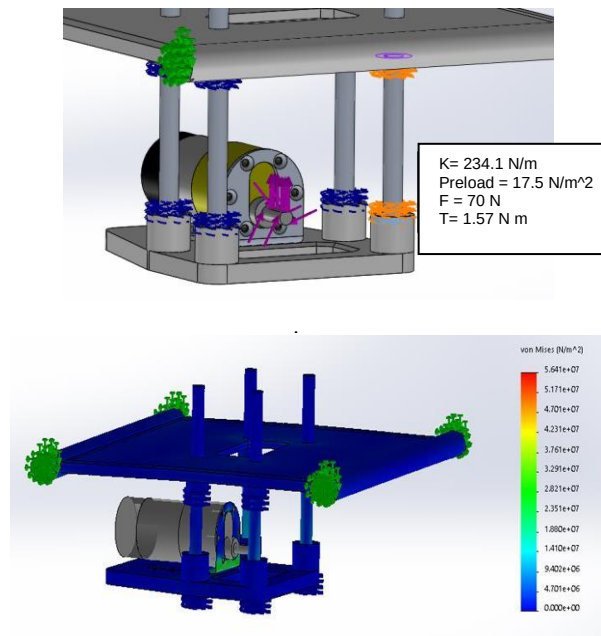


Figura 27 Análisis Von Mises De la base De la rueda

El análisis del factor de seguridad del mecanismo de soporte del motor muestra que el valor mínimo es 5.9 en el soporte del motor y en las guías de resorte. Este es un resultado satisfactorio de esta parte del diseño.

9.2 Análisis de la estructura de soporte de la herramienta de detección.

Para la simulación se consideró la herramienta de detección como un elemento rígido, el peso de la herramienta de detección y el peso total de toda la estructura y cuatro conexiones de pernos que simulan la fuerza en las guías de resorte.

En las características de la malla, el tamaño de los elementos es 4.007 mm, tolerancia 0.2 mm, malla fina, el número de nodos del modelo 49371 y el número de elementos finitos es 40140.

La distribución de esfuerzos del mecanismo de soporte de la herramienta de detección muestra que el área de mayor influencia se encuentra en la parte superior, en el sistema de

rotación angular y en las guías de resorte. Se debe a las cargas aplicadas al mecanismo, con un valor promedio de 4 N/mm^2 (según los criterios de tensión de Von Mises), sin exceder la resistencia máxima a la tracción del material que es de 30 N/mm^2 .

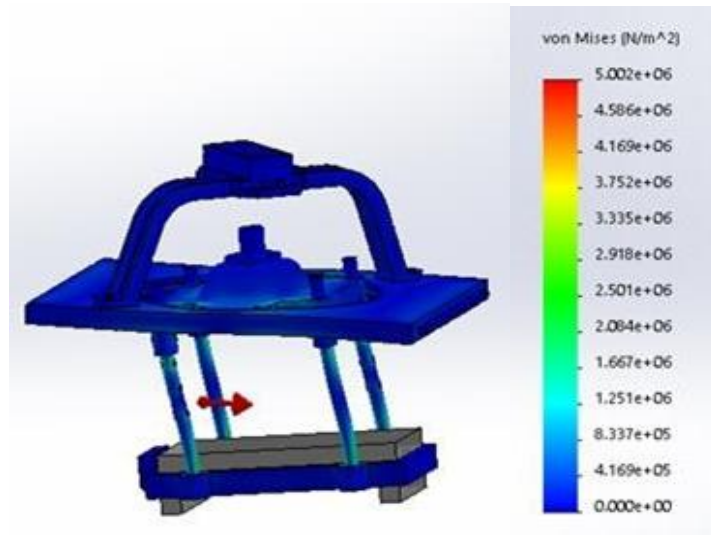


Figura 28 Estudio estático ensamblaje sensor

El análisis del factor de seguridad del mecanismo de soporte de la herramienta de detección muestra que el valor mínimo es 10 en la parte superior del sistema de rotación angular.

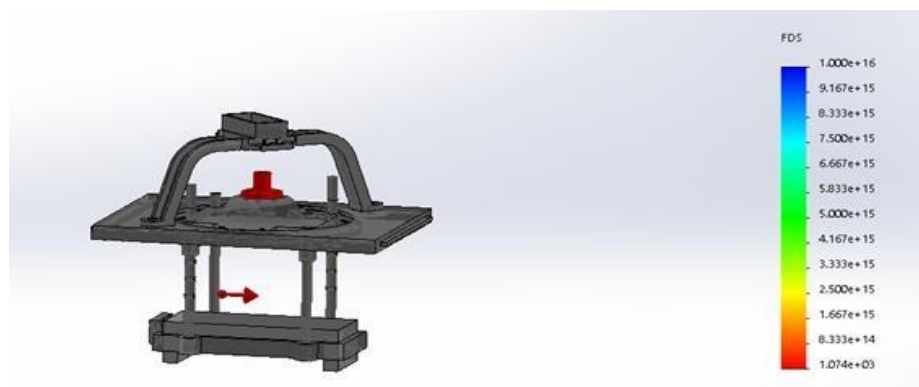


Figura 29 Factor de seguridad

9.3 Análisis del ensamblaje completo simplificado

A modo de ahorrar recursos computacionales, se realizó un modelo simplificado del robot, algunos redondeos y vaciados fueron anulados, para obtener piezas menos complejas y poder así, analizar la estructura en su totalidad.

Los resultados obtenidos en este nuevo estudio continúan siendo positivos, y esto también resaltando que el material utilizado esta vez es PTFE, el cual es el material recomendado para las condiciones en las que sería sometido la herramienta.

Para este nuevo análisis se tuvo que diseñar un nuevo resorte, y los datos del mismo se encuentran en el **anexo 4**, en donde su rigidez normal es de 185.5 N/m y su pre-carga es de 19.93 N, esta es la fuerza que se genera cuando el resorte está totalmente retraído.

Se realizaron dos tipos de análisis, uno estático y otro por fatiga.

9.3.1 Análisis estático de la estructura simplificada

En este análisis se tuvieron encuentra 3 tipos de resultados, se evaluó por esfuerzo de von mises, desplazamiento (desplazamiento resultante) y deformación (equivalente).

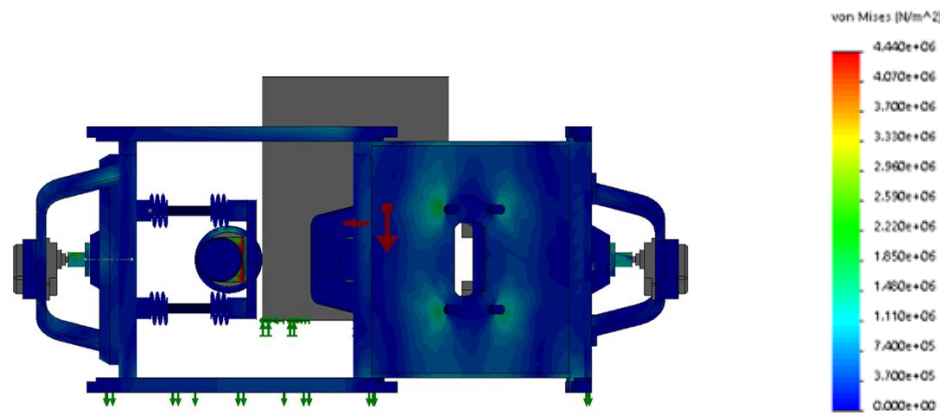


Figura 30 Estudio estático robot completo

El rango de colores para la figura 27 es de 0 a 4.4×10^6 N/m² de azul a rojo respectivamente.

El factor de seguridad calculado para el ensamble, mostrado en la figura 28 es una medida adimensional, ya que es una relación del esfuerzo máximo de Von mises con respecto al esfuerzo limite elástico del material.

El rango de colores para la figura 28 es de 0 a 1×10^1 N/m² de rojo a azul respectivamente, en donde el valor critico es el que más este cerca de 1.

Todos los elementos están por encima de 9, por lo que se puede concluir que la herramienta no falla, sin embargo, no se recomienda hacer la herramienta más delgada, puesto que desde el punto de vista de las deformaciones se podría estar colocando en riesgo el agarre con la tubería, además entre más delgadas las piezas más se expandirían los resortes.

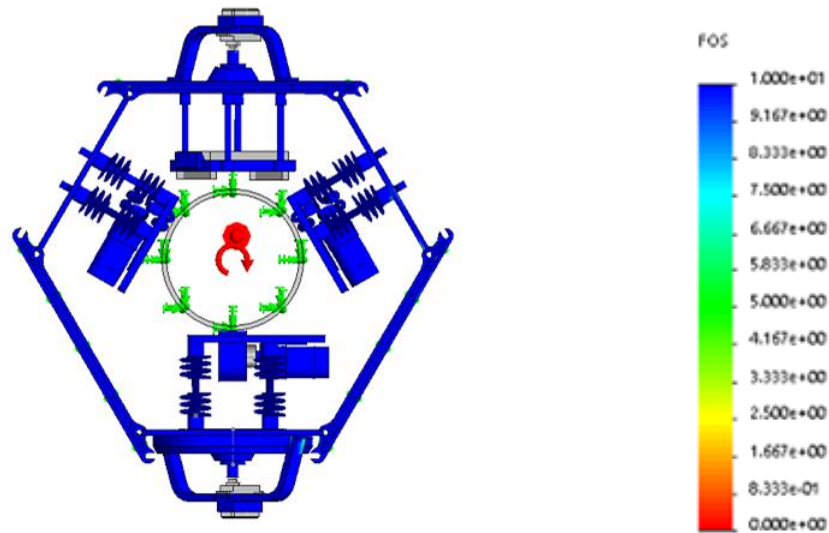


Figura 31 Estudio estático (factor de seguridad)

Un detalle a tener en cuenta del análisis realizado por von mises de la herramienta simplificada al análisis realizado en la figura 24 es que el elemento más crítico nuevamente es el soporte del motor, sin embargo, para la simulación se asumió que el soporte del motor estaría fabricado en aluminio 2.014-T6, en donde el esfuerzo ultimo de este material en 100 millones de ciclos es de 124105680 N/m^2 para poder definir el punto crítico en el soporte, fue necesario aumentar la escala antes establecida.

La nueva escala utilizada va de 0 a $20 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ y se encontró el nodo más crítico el cual fue de un valor de $1.61 \times 10^7 \text{ N/m}^2$. esto puede observarse en la figura 29.

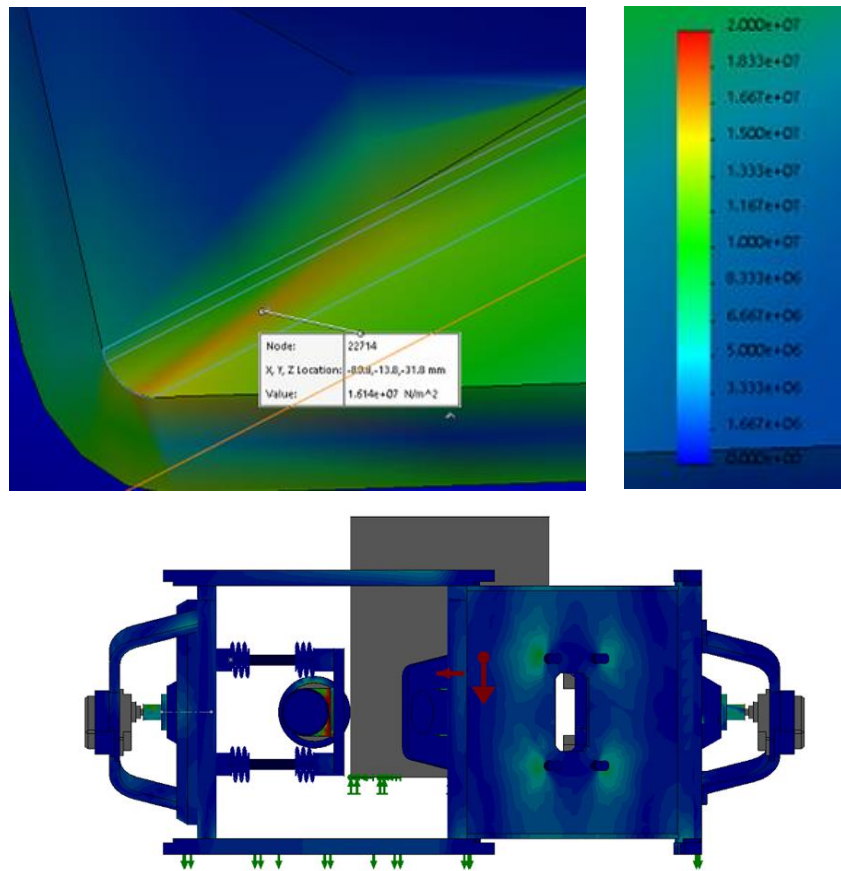


Figura 32 Estudio estático (Von misess)

El otro resultado significativo en el análisis estático fue el desplazamiento.

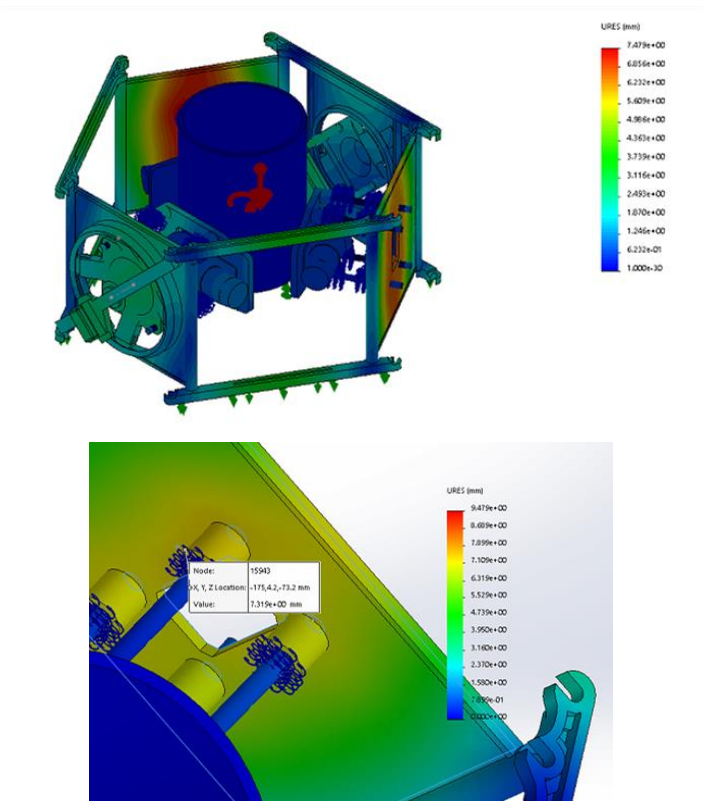


Figura 33 Estudio estático robot completo (desplazamiento)

El elemento finito más crítico se encontró en las placas del ensamblaje de las ruedas omnidireccionales. El valor del nodo encontrado es de 7.3mm, sin embargo, el resorte para ese desplazamiento continuara ejerciendo la fuerza suficiente para garantizar el agarre con la tubería.

Study name	Statisch 6 (-Standard-)
Mesh type	Mixed Mesh
Meshes Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Jacobian check for shell	On
Mesh Control	Defined
Element size	14.5197 mm
Tolerance	0.382715 mm
Mesh quality	High
Total nodes	185681
Total elements	92926
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:01:44
Computer name	

Figura 34 Características de la malla

El total de nodos de la malla es de 185681, total de elementos finitos es de 92926, tipo de malla mixta, el tamaño de los elementos es de 14.52mm y la calidad de la malla es alta.

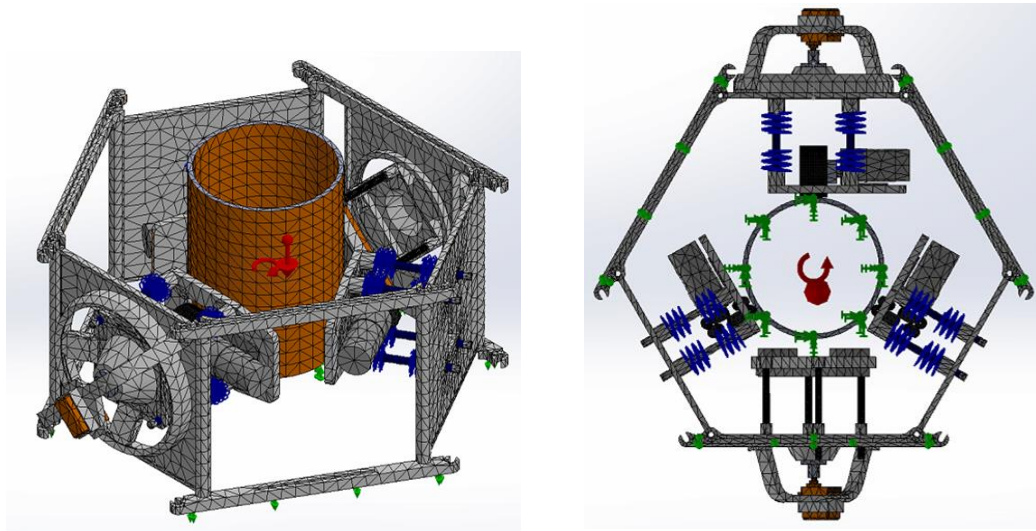


Figura 35 Vista Isométrica del robot con malla visible

9.3.2 Análisis por fatiga de la estructura simplificada

Se asumió que el esfuerzo es totalmente reversible para la simulación, esto quiere decir que la herramienta se evaluó de manera exagerada a lo que se espera que experimente el robot en la realidad.

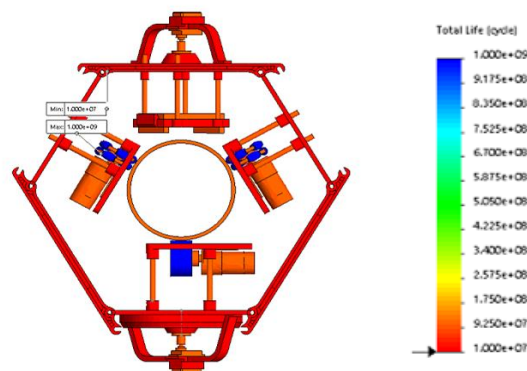


Figura 36 Estudio por fatiga (vida total)

Para este resultado el valor de importancia lo tiene el valor mínimo, puesto que es el más desfavorable.

El valor mínimo es de 1×10^7 ciclos el cual es un resultado sumamente favorable, incluso más de lo que se esperaba.

El resultado advertido por el programa indica que todos los esfuerzos están por debajo de la curva S-N definidas. Las gráficas de los materiales se pueden encontrar en los anexos.

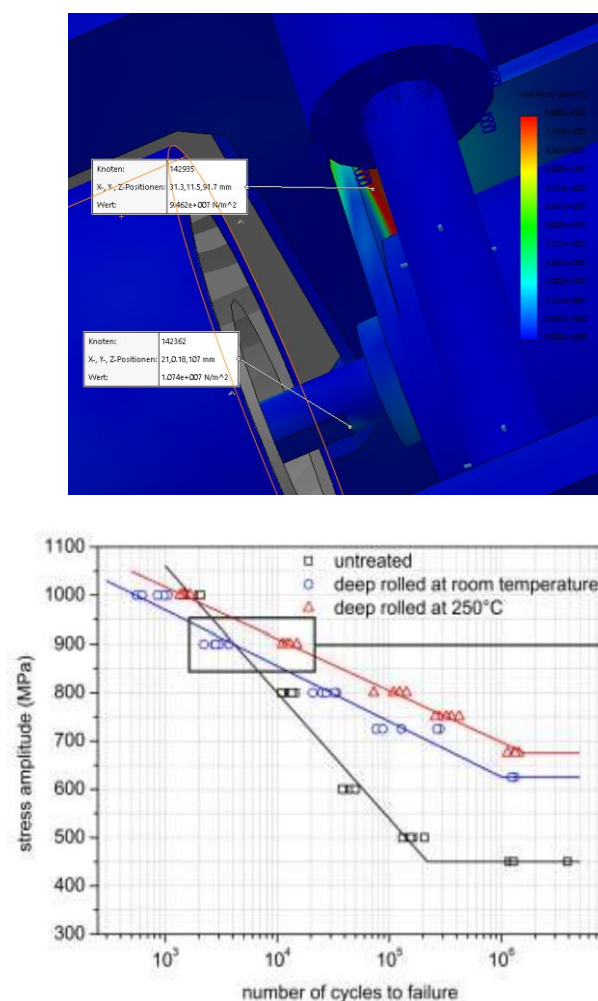


Figura 37 Tensión von Mises en el eje del motor

La suposición de que los esfuerzos son totalmente reversibles es errada. Esto es una exageración que sin embargo ayuda a ilustrar lo resistente que es la estructura en realidad.

La mayoría de las piezas no soportan el esfuerzo de forma 100% reversible, siendo una excepción, los ejes de los motores de corriente continua.

Esto puede corroborarse comparando el resultado de los nodos críticos del eje del motor y el nodo crítico del soporte del motor, con la gráfica del número de ciclos versus el esfuerzo de amplitud del material.

Por tanto, se concluye que el eje es suficientemente resistente para las condiciones a las cuales se mantendrá expuesto.

10. Conclusiones

- El robot tiene un soporte de mecanismo donde se encuentra la herramienta de detección. Esto es controlado por un servomotor que gira angularmente entre 45 y -45 grados mientras se mueve dos veces alrededor de la pared de la tubería para inspeccionar un área de sección en la pared de la tubería, luego el robot se mueve axialmente, cumpliendo la condición de inspeccionar toda la pared con- dejando grietas sin ser detectadas.
- La adaptación del robot se logra para diferentes diámetros de tubería de 6 a 12 pulgadas, por medio de un sistema de expansión con dos configuraciones de ensamblaje, un accionamiento por resorte de compresión y un mecanismo de liberación rápida, para facilitar el ensamblaje y el desmontaje.
- La rueda principal, las dos ruedas auxiliares y los resortes de compresión, proporcionan el mecanismo necesario para fijar el robot a la tubería, permitiendo movimientos circunferenciales y axiales a lo largo de la tubería.

- El presente trabajo precede a la ingeniería básica y la ingeniería de detalle para la construcción del prototipo, sin embargo, la simulación por Elementos Finitos utilizando la simulación de SolidWorks en un entorno CAD - CAE, permite obtener para cada elemento del robot analizado, una estimación de la distribución de estrés. Validar la viabilidad del diseño final.

11. Trabajos futuros

Dicho diseño permitirá, como un proyecto posterior a la fase de diseño, evaluar la viabilidad técnico-económica de la construcción de la herramienta y de la prestación del servicio de inspección a las empresas interesadas (o la construcción de la herramienta como un producto conjunto universidad-empresa).

Adicionalmente se puede dar idea de un proyecto de investigación sobre la mezcla del PTFE con el ABS, el cual podría ayudar a potenciar las características de la herramienta robotizada permitiendo diseñar la herramienta con paredes más delgadas, conservar su peso o incluso disminuirlo y hacerla más resistente a otros factores que se podrían presentar, extendiendo así la vida útil de la herramienta.

Como se ha venido mencionando en capítulos anteriores, el PTFE o teflón, es un material excepcionalmente estable tanto en aire como en atmósferas inertes sin degradación ni descomposición hasta 440°C. Por ello se puede utilizar de forma continua hasta los 260 °C reteniendo sus propiedades mecánicas hasta un 50% tras 20 000 horas.

Posee la mayor resistencia química de todos los polímeros conocidos, es resistente a los ácidos inorgánicos conocidos como el ácido nítrico, ácido sulfúrico y el agua regia. Es atacado por algunos metales alcalinos fundidos como el sodio y por el flúor en condiciones extremas de temperatura y presión. Es insoluble en todos los solventes conocidos del teflón característicos.

12. Bibliografía

- [1] Y. D. & A. B. J. . Jo, A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas, (2005).
- [2] S. B. da Cunha, de *A review of quantitative risk assessment of onshore pipelines.*, 2016, p. 282–298.
- [3] Z. Y. & W. W. G. Han, de *Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network.*, 2011, pp. 509-518.
- [4] A. A. I. F. B. K. W. & S. K. S. M. Mazraeh, «Development of Ultrasonic Crack Detection System on Multi-diameter PIG Robots.,» de *Procedia Comput. Sci.*, 2017.
- [5] Y. A. M Coramik, A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection, Elsevier, 2018.
- [6] L.-y. H. H. Z. Y. C. H. F. Bin Liu, de *The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method*, vol. 134, Elsevier Science, 2017, pp. 275-282.

- [7] F. B. A. Ali Ahmadian Mazraeh, de *Multi-Diameter Pipeline Inspection Gauge for Long Distance Industrial Application.*, International Journal of Scientific & Engineering Research, 2015, p. 646–651.
- [8] J. S. Jinwei Qiao, «Application of axiomatic design method in in-pipe robot design,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, nº 4, pp. 9-14, 2013.
- [9] D. V. S. & B. F. Chablat, de *Mechanical Design Optimization of a Piping Inspection Robot.*, Procedia CIRP, 2018, pp. 307-312.
- [10] M. A. G. C. C. E. P. R. G. E. R. G. S. P. R. J. & A. S. R. Urdaneta Lima, de *Development of a Novel Autonomous Robot for Navigation and Inspection in Oil Wells*, Control Eng. Appl, 2012, pp. 9-14.
- [11] S. H. Lee, de *Design of the out-pipe type pipe climbing robot*, Int. J. Precis. Eng, 2013, pp. 1559-1563.
- [12] J. W. X. K. Y. & H. C. Yuan, de *Development of an inspection robot for long-distance transmission pipeline on-site overhaul.*, Ind. Robot, 2009, pp. 546-550.
- [13] A. M. S. GÓMEZ, TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO, Bogota, 2017.
- [14] F. B. Robles, Errores típicos en la interpretación de la curva P-F, Industria Química, 2016.
- [15] Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, «anh.gov.co,» Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, 22 12 2017. [En línea]. Available: <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>. [Último acceso: 29 01 2018].

- [16] Ministerio de Minas y Energia, «Minminas.gov.co,» [En línea]. Available: <https://www.minminas.gov.co/formalizacion-minera1>. [Último acceso: 29 01 2018].
- [17] Z. H. G. L. a. H. T. Yingni Duan, de *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1221-1224.
- [18] Roboplanet, «Roboplanet,» [En línea]. Available: <http://www.roboplanet.fr/technologies/scanner-motorise-altiscan/>. [Último acceso: 2018].
- [19] Kontroll Technik, «Kontroll Technik,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.kontrolltechnik.com/>. [Último acceso: 2018].
- [20] A. S. & B. Saltaren, Robot TREPA, 2004.
- [21] M. A. U. Lima, Diseño y Desarrollo de un Robot de Inspeccion de Tuberias, Madrid: Universidad Politecnica de Madrid, 2012.
- [22] J. B. R. H. M. (. Z. P. P. S. C. Leon Osborne, Clarus Concept of Operations, 2005. [En línea].
- [23] Z.-. C. M.-P. L. Usarek, «Journal of Nondestructive Evaluation,» *Springer US*, 2019.
- [24] P. W. -. Y. G. -. G. T. -. H. Wang, «Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed,» *NDT&E International* , p. 6, 2014.

Apéndice A Desarrollo matemático del Motor Utilizado para la elección del Robot

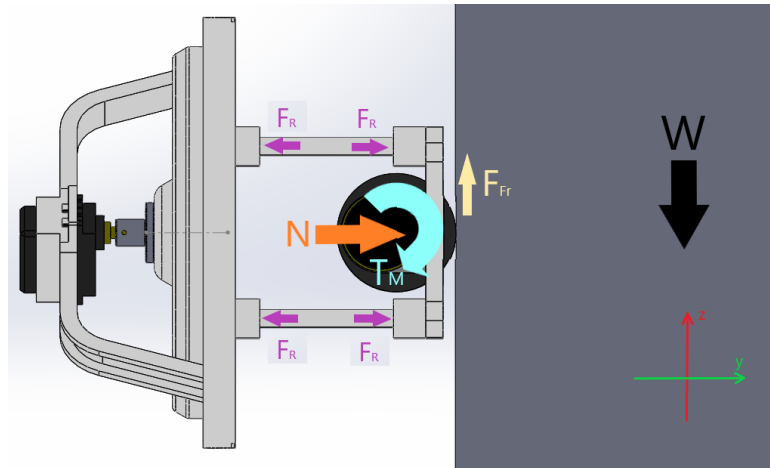


Diagrama de cuerpo libre de la rueda principal sobre la tubería

$$\sum F = 0$$

$$3 \times F_{Fr} - W = 0$$

$$F_{Fr} = \frac{W}{3}$$

Se asume que la fuerza de fricción es igual para las 3 ruedas

$$\sum \tau = 0$$

$$\tau - F_f \times r = 0$$

$$\tau = \frac{W}{3} \times r$$

$$\tau = \frac{m \times g \times r}{3}$$

Para una sobre dimensión de 1.2

$$\tau = \frac{m \times g \times r}{3} \times 1.2$$

$$\tau = \frac{5.2 \times 9.81 \times 0.055}{3} \times 1.2$$

$$\tau = 1.123 \text{ N} \times \text{m} = 11,452 \text{ kg} \times \text{cm}$$

Donde:

τ : Torque

W : Peso

N : Fuerza normal

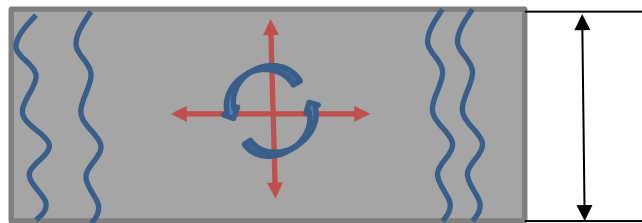
g : Fuerza de gravedad

m : masa

r : radio de la rueda

F_f : Fuerza de fricción

Desarrollo Matemático Para el Torque del Servo



$$\tau = N \times \mu_s \times \frac{h}{2}$$

$$N \times \mu_s = \frac{W}{3}$$

$$\tau = \frac{W}{3} \times \frac{h}{2}$$

$$\tau = \frac{W \times h}{6}$$

$$\tau = \frac{5.2 \times 9.81 \times 0.060}{6}$$

$$\tau = 0.51 \, N \times m$$

$$\tau = 5.2 \, kg \times cm$$

Donde:

μ_s : *Es el coeficiente de fricción*

τ : *Torque*

W : *Peso*

h : *Grosor de la rueda principal*

N : *Fuerza normal*

Apéndice B Desarrollo Matemático para el cálculo del resorte

Constantes para el cálculo del resorte basado en alambre para música

$$A = 2211 \times 10^6 \text{ Pa} \times \text{mm}^m$$

$$m = 0.145$$

$$E = 203.4 \times 10^9$$

Módulo de elasticidad en Pa

$$G = 82.7 \times 10^9$$

Módulo de cizalladura en Pa

$$N_a = N_t - 2$$

Numero de vueltas útiles

$$N_t = 34.5$$

Numero de vueltas totales

$$d_r = 0.008 + d_a + 0.0015$$

Diámetro del resorte

$$c = \frac{d_r}{d_a}$$

Índice del resorte (entre 6 a 12 in)

$$L_a = 0.09$$

Longitud después del ensamblaje

$$L_m = L_a - 0.038$$

Longitud mínima

$$L_c = N_t \times d_a$$

Longitud del resorte chocado

Calculo de la Fuerza mínima

$$W = 6.3 \text{ kg}$$

Peso del Robot en kilogramos

$$W_n = W \times 9.81$$

$$W_n = 61.803 \text{ N}$$

$$F_{fr} = N_{min} \times f$$

$$f = 0.4$$

coeficiente de fricción

$$W_n = F_{fr} \times 3$$

Fuerzas de Fricción

$$F_{min} = \frac{N_{min}}{4}$$

$$F_{max} = \frac{N_{max}}{4}$$

$$F_{min} = k \times (L_f - L_a)$$

$$F_{max} = k \times (L_f - L_m)$$

Esfuerzos

$$S_{ut} = \frac{A}{(d_a \times 1000)^m}$$

$$S_{ys} = 0.45 \times S_{ut}$$

$$K_b = \frac{(4 \times c + 2)}{(4 \times c - 3)}$$

Factor de corrección por cizalladura

$$\tau_{max} = \frac{K_b \times (8 \times F_{max} \times d_r)}{\pi \times d_a^3}$$

Esfuerzo torzor experimentado por el resorte

$$\tau_{min} = \frac{K_b \times (8 \times F_{min} \times d_r)}{\pi \times d_a^3}$$

Esfuerzo torzor experimentado por el resorte

Resultado

$$k = \frac{d_a^4 \times G}{8 \times d_r^3 \times N_a}$$

Constante del resorte

$$N_s = \frac{S_{ys}}{\tau_{max}}$$

Factor de seguridad para el peso asumido. Se mantiene

mayor o igual ($\geq$) a 1.2

Geometría o Material

$d_a = 0.0009$ Diámetro de la varilla

Constantes para el diámetro de s_{ut} Basado en alambre para música

$$A = 2211 \times 10^6 \text{ Pa} \times \text{mm}^m$$

$$m = 0.145$$

$E = 203.4 \times 10^9$ Módulo de elasticidad en Pa

$G = 82.7 \times 10^9$ Módulo de cizalladura en Pa

$N_a = N_t - 2$ Numero de vueltas útiles

$N_t = 34.5$ Numero de vueltas totales a elegir

$d_r = 0.008 + d_a + 0.0019$ Diámetro del resorte

$c = \frac{d_r}{d_a}$ Índice del resorte, mantener entre 6 y 12 in

$L_a = 0.09$ Longitud después del ensamblaje

$L_m = L_a - 0.038$ Longitud mínimo

$L_c = N_t \times d_a$ Longitud del resorte chocado

Calculo de la fuerza mínima

$W_{Kg} = 6.3$ Peso del robot en kilogramos

$$W_n = W_{Kg} \times 9.81$$

$$F_{fric} = N_{min} \times f$$

$f = 0.4$ Coeficiente de fricción

$$W_N = F_{fric} \times 3$$

Fuerzas de trabajo

$$F_{min} = \frac{N_{min}}{4}$$

donde Nmin es la normal mínima que se debe generar

$$F_{max} = \frac{N_{max}}{4}$$

$$F_{min} = k \times (L_f - L_a)$$

$$F_{max} = k \times (L_f - L_m)$$

Esfuerzos

$$S_{ut} = \frac{A}{(d_a \times 1000)^m}$$

$$S_{ys} = 0.45 \times S_{ut}$$

$$K_b = \frac{4 \times c + 2}{4 \times c - 3}$$

Factor de corrección por cizalladura

$$\tau_{max} = K_b \times \frac{8 \times F_{max} \times d_r}{\pi \times d_a^3}$$

Esfuerzo torzor experimentado por el resorte

$$\tau_{min} = K_b \times \frac{8 \times F_{min} \times d_r}{\pi \times d_a^3}$$

Resultado

$$k = \frac{d_a^4 \times G}{8 \times d_r^3 \times N_a}$$

Constante del resorte

$$n_{seguridad} = \frac{S_{ys}}{\tau_{max}}$$

Factor de seguridad para el peso asumido. Se mantiene

mayor o igual a 1.2 ($\Rightarrow 1.2$)

$$F_s = k \times (L_f - L_c)$$

Fuerza de cerrado

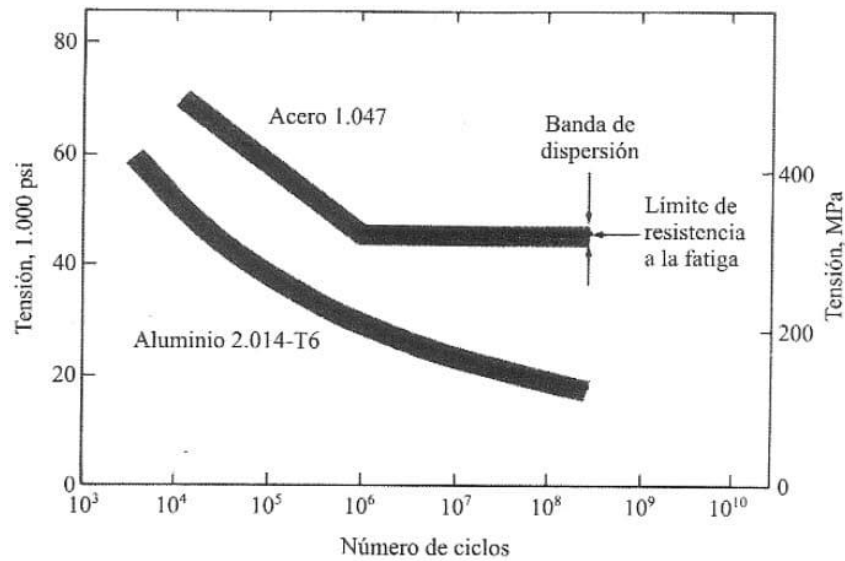
$$\frac{F_s}{F_{max}} = 1 + \varepsilon$$

Sobrepaso fraccional del resorte. Mantener $\Rightarrow 0.15$

Datos finales

$A=2.211 \times 10^9$	$c=11.56$	$da=0.0009$
$d_r = 0.0104$	$E = 2.034 \times 10^{11}$	$\varepsilon = 0.1951$
$f = 0.4$	$F_{fric} = 20.6$	$F_{max} = 19.93$
$F_{min} = 12.88$	$F_s = 23.81$	$G = 8270 \times 10^{10}$
$k = 185.5$	$K_b = 1.116$	$L_a = 0.09$
$L_c = 0.03105$	$L_f = 0.1594$	$L_m = 0.052$
$m = 0.145$	$N_a = 32.5$	$N_{max} = 79.7$
$N_{min} = 51.5$	$n_{seguridad} = 1.251$	$N_t = 34.5$
$S_{ut} = 2.245 \times 10^9$	$S_{ys} = 1.010 \times 10^9$	$\tau_{max} = 8.076 \times 10^8$
$\tau_{min} = 5.21 \times 10^8$	$W_{kg} = 6.3$	$W_N = 61.8$

Apéndice C Curva S-N de los materiales utilizados



Curva S-N Acero/Aluminio

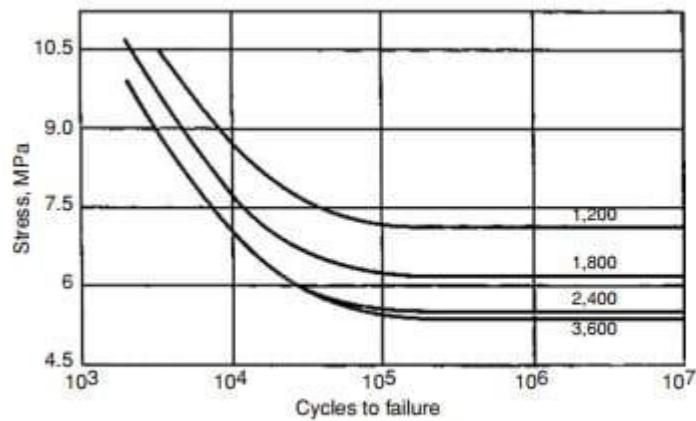


Figure 17.28. Effect of frequency on the S-N curves of Teflon (PTFE). Increased frequency lowers the S-N curve because of more heating of the specimen. From *Engineered Materials Handbook, Engineering Plastics*, vol. II, ASM International (1998).

Curva S-N PTFE