



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y
TECNOLOGÍA AVANZADA
UNIDAD QUERÉTARO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA

**DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL PARA INSPECCIÓN DEL
INTERIOR DE TUBERÍAS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN TECNOLOGÍA AVANZADA**

**PRESENTA:
ING. ANA ROCÍO CÓRDOBA MALAVER**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDUARDO CASTILLO CASTAÑEDA**

Santiago de Querétaro, Querétaro. Agosto 2019



**CICATA-IPN
QUERÉTARO**



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS Y DESIGNACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

México, D.F. a 10 de junio del 2019

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Qro. en su sesión ordinaria No. 190607 celebrada el día 7 del mes de junio conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

Córdoba

Apellido paterno

Malaver

Apellido materno

Ana Rocío

Nombre (s)

Con registro:

B	1	7	1	1	9	4
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de: **Maestría en Tecnología Avanzada**

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:

Desarrollo de un robot móvil para inspección del interior de tuberías.

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

- Desarrollo de un robot móvil para inspección de tuberías
- Desarrollo de una maqueta de tubería
- Validación del funcionamiento del robot haciendo uso de la maqueta de tubería

2.- Se designa como Director de Tesis al Profesor:

Dr. Eduardo Castillo Castañeda

3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

El Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro.

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Director(a) de Tesis

Dr. Eduardo Castillo Castañeda

Aspirante

Ana Rocío Córdoba Malaver

Presidente del Colegio

Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro siendo las 18:00 horas del día 31 del mes de Mayo del 19 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de IPN-CICATA, Qro. para examinar la tesis titulada:

Desarrollo de un robot móvil para inspección del interior de tuberías.

Presentada por el alumno:

Córdoba	Malaver	Ana Rocío
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)

Con registro:

B	1	7	1	1	9	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

Dr. Eduardo Castillo Castañeda

Dra. Ise Cervantes Camacho

Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán

M. en C. Maximiano Francisco Ruiz Torres

Dra. Xochitl Yamile Sandoval Castro

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 31 de mayo del año 2019, la que suscribe **Ana Rocío Córdoba Malaver** alumna del programa de Maestría en Tecnología Avanzada, con número de registro B171194, adscrita al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y tecnología Avanzada Unidad Querétaro, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. **Eduardo Castillo Castañeda** y cede los derechos del trabajo titulado “**Desarrollo de un robot móvil para inspección del interior de tuberías**”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: ecastilloca@ipn.mx y anarcordobam@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Ana Rocío Córdoba Malaver

Dedicatorias

Con gran admiración, amor y respeto a mis padres Rosa Virginia Malaver y Gerardo Córdoba Vega, por su ayuda y apoyo incondicional en estos dos años de estudio en el exterior.

*A mi hijo José Alejandro Gutiérrez Córdoba, por ser mi motor de vida e inspiración, por comprenderme, esperarme y amarme todo este tiempo.
Esto es por nosotros hijo mío.*

A mi hermana Laura Patricia Córdoba Malaver, por su apoyo incondicional en los momentos en que más lo he necesitado.

Agradecimientos

A mi hijo por esperarme, comprenderme, amarme, ser tan cariñoso y especial conmigo. Por creer en mí y motivarme, por estar pendiente de mí cada uno de los días desde que iniciaste a ser parte de mi vida.

A mi madre por su enorme apoyo, amor, confianza y por creer en mí. Por estar siempre a mi lado, escucharme y darme fuerzas para alcanzar cada una de las metas que me he trazado en la vida. Por hacer las veces de madre para mi hijo en estos dos años. Por formarme y hacer de mí lo que soy ahora.

A mi padre que de una u otra forma me a apoyado para que siga adelante como profesional.

A mi hermana menor Laura, por ser mi cómplice y mano derecha en mis momentos de necesidad y sin esperar nada a cambio. Por hacer las veces de madre para mi hijo en estos dos años, sin usted no podría haberlo logrado.

A mis demás hermanos y tía Teresa Malaver, por sus consejos, apoyo y comprensión.

Al Dr. Eduardo Castillo Castañeda por creer en mí y darme la oportunidad de ser su estudiante y ser parte de este proyecto, por sus concejos y conocimientos impartidos, por ser parte de mi inspiración y persona a seguir en lo profesional.

A los miembros de mi comité tutorial por sus recomendaciones y aportaciones para el desarrollo de este proyecto.

Al M. en C. Maximiano Francisco Ruíz Torres por sus concejos y recomendaciones para el desarrollo de este proyecto y para mi vida, por su buen sentido del humor que me sacó de muchos momentos de tensión.

A los Ingenieros Wilson Gamboa Contreras, Sandra Johana Benítez Muñoz, Enrique Blanco Olarte y William Guerrero por permitirme realizar una estancia de movilidad académica en su grupo de investigación IDENTUS en San Gil/ Santander, Colombia; y motivarme a seguir en el campo de la investigación desde Unisangil.

Al Ing. Milton Javier Muñoz Sierra por creer en mí y motivarme a realizar este postgrado.

Al Instituto Politécnico Nacional y al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada - Unidad Querétaro, a sus directivos y administrativos por la oportunidad, orientación, facilidades y amistad brindada.

A los docentes que conocí y dirigieron los cursos tomados en el posgrado, por sus conocimientos compartidos y exigencia para ser cada vez mejor.

Al CONACYT por su apoyo económico durante estos dos años de formación.

A mis compañeros que compartieron parte de sus vidas y conocimientos conmigo: Ernesto, Araceli, Gilberto, Israel, Nicolás, Edgar, Darío, Lupita, Alonso. Por tantos momentos convertidos en buenos recuerdos y hacer de mi paso por México una época de querer repetir.

A todos ellos... ¡Muchas gracias!

Este documento presenta el desarrollo de un robot móvil para asistir a personal encargado de tareas de inspección interna de tubería, con capacidades de adaptación a tuberías en vacío con diámetros, inclinación y dirección variables, que permite la visualización del interior de la tubería y cuya manipulación es realizada desde una aplicación móvil bastante intuitiva. El robot fue validado experimentalmente en una maqueta de tubería. El diseño del robot fue elaborado haciendo uso de la metodología de Pugh por convergencia controlada, con base en los requerimientos de diseño previamente establecidos. Se generó cinco diseños de robot y se eligió uno con base en la evaluación de la pertinencia y función de cada diseño. Se presenta la construcción del prototipo haciendo uso de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y la fabricación de su estructura con impresión 3D. Para la validación del funcionamiento del robot se diseñó y construyó una maqueta de tubería basada en los requerimientos de diseño y por medio del sensor MPU 6050 se valida el posicionamiento del robot en su interior.

El diseño de robot seleccionado consta de una o más secciones, comprendidas por un cuerpo y cuatro extremidades cada una posicionadas equidistantemente entre sí. Cada extremidad cuenta con una rueda en su extremo distante al centro y dos de ellas cuentan con un motor que va unido del rotor al eje de la rueda. En la unión entre las extremidades y el cuerpo se incluyó un resorte de torsión como actuador, generador del movimiento tipo bisagra para cada extremidad. La unión entre secciones se da por medio de una articulación flexible que comprende un resorte de tensión y un sistema de sujeción. La primera sección en su parte delantera posee una cámara para captar la imagen en el interior de la tubería. Una caja de control se encuentra conectada al robot por red alámbrica. Desde allí se realiza la comunicación y envío de información tal como: video, control y datos de posicionamiento del sensor. Mediante el análisis estático del mecanismo se establecen las fuerzas que intervienen en él para garantizar el posicionamiento y desplazamiento en el interior de la tubería; para ello se halló de forma experimental el coeficiente de fricción entre los materiales de las superficies en contacto (caucho SBR-acrílico).

El robot móvil construido permite el desplazamiento en el interior de tuberías de diámetros variables entre 6" y 8" así como tuberías con inclinaciones entre 0° y 90° y cambios de dirección entre 0° y 90°. Se logró realizar la identificación de fracturas en la tubería en un ambiente controlado a su máxima velocidad de desplazamiento mediante el procesamiento de imágenes.

Palabras clave: Robot de servicio, robot de inspección, inspección interna de tubería, diseño mecatrónico, análisis estático.

Abstract

This document presents the development of a mobile robot to assist personnel in charge of tasks of internal inspection of pipe, with capacities of adaptation to empty pipelines with diameters, inclination and variable direction, which allows the visualization of the interior of the pipe and whose manipulation It is done from a very intuitive mobile application. The robot was experimentally validated in a pipe model. The design of the robot was elaborated using the methodology of Pugh by controlled Convergence, this based on the previously established design requirements. Five robot designs were generated and one was chosen based on the evaluation of the relevance and function of each design. The construction of the prototype is presented making use of Computer Aided Design (CAD) and the manufacture of its structure with 3D printing. For the validation of the robot's operation, a pipe model was designed and built based on the design requirements and by means of the MPU 6050 sensor, the positioning of the robot inside is validated.

The selected robot design consists of one or more sections, comprised by a body and four extremities each positioned equidistantly to each other. Each end has a wheel at its far end to the center and two of them have a motor that is attached from the rotor to the wheel axle. In the union between the extremities and the body a torsion spring was included as an actuator, generator of the hinge-like movement for each extremity. The connection between sections is given by means of a flexible joint comprising a tension spring and a fastening system. The first section in its front part has a camera to capture the image inside the pipe. A control box is connected to the robot by wired network. From there the communication and sending of information such as: video, control and positioning data of the sensor is carried out. Through the static analysis of the mechanism the forces that intervene in it are established to guarantee the positioning and displacement inside the pipeline; For this, the coefficient of friction between the materials of the surfaces in contact (SBR-acrylic rubber) was experimentally found.

The built-in mobile robot allows the displacement in the interior of pipes of variable diameters between 6 "and 8" as well as pipes with inclinations between 0 ° and 90 ° and changes of direction between 0 ° and 90 °. It was possible to make the identification of fractures in the pipeline in a controlled environment at its maximum speed of displacement through the processing of images.

Key words: Service robot, inspection robot, internal pipe inspection, mechatronic design, static analysis.

Índice general

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	4
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
ESTADO DEL ARTE	5
2.1 INSPECCIÓN DE TUBERÍA.....	5
3.1.1 <i>Termografía</i>	5
3.1.2 <i>Ultrasonido</i>	6
3.1.3 <i>Electromagnética</i>	6
3.1.4 <i>Rayos gamma</i>	6
3.1.5 <i>Cámaras de visión y láseres</i>	6
2.2 ROBOTS DE INSPECCIÓN INTERNA DE TUBERÍA	7
3.2.1 <i>Robots tipo oruga</i>	7
3.2.2 <i>Robots con ruedas</i>	9
3.2.3 <i>Robots con patas</i>	10
3.2.4 <i>Robots tipo serpiente o gusano</i>	11
MARCO TEÓRICO	13
3.1 ROBOTS DE SERVICIO.....	13
3.2 ROBOTS DE INSPECCIÓN	14
3.3 LOCOMOCIÓN EN ROBOTS DE INSPECCIÓN TERRESTRE.....	14
3.4 ROBOTS DE INSPECCIÓN CON RUEDAS	15
3.4.1 <i>Ruedas motrices o de tracción</i>	15
3.4.2 <i>Ruedas direccionales</i>	16
3.4.3 <i>Ruedas libres o auxiliares</i>	16
3.4.4 <i>Ruedas fijas</i>	17
3.4.5 <i>Ruedas omnidireccionales</i>	17
3.5 ROBOTS DE INSPECCIÓN MODULARES CON RUEDAS	17
3.6 CINEMÁTICA DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS	18
3.6.1 <i>Cinemática del monociclo</i>	18
3.6.2 <i>Cinemática de locomoción diferencial</i>	20
3.7 DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE.....	21
3.8 ESTRUCTURA DE RESORTES DE TORSIÓN	21
DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO	23
4.1 METODOLOGÍA O ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	23
4.2 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO Y DATOS DE PARTIDA	26
4.3 CONCEPTO DEL ROBOT.....	27

4.3.1	<i>Alternativas de concepto de robot</i>	27
4.3.2	<i>Definición de concepto del robot</i>	31
4.3.3	<i>Propuestas de diseño</i>	32
4.3.4	<i>Diseño CAD de elementos mecánicos del Robot</i>	35
4.4	DISEÑO MECÁNICO	40
4.4.1	<i>Análisis estático del robot</i>	42
4.4.2	<i>Cálculo de coeficiente de fricción entre acrílico y caucho.</i>	47
4.5	DISEÑO CAD DEL PROTOTIPO	51
	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	52
5.1	COMPONENTES MECÁNICOS.....	53
5.2	COMPONENTES ELECTRÓNICOS	55
5.3	CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL	56
5.3.1	<i>Componentes electrónicos</i>	56
5.3.2	<i>Construcción del módulo de control</i>	57
5.3.3	<i>Interfaz de usuario</i>	57
5.4	CONEXIÓN DIRECTA: CÁMARA-PC	58
5.5	OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE ROBOT.....	58
5.6	ESTRATEGIA DE LOCOMOCIÓN.....	61
5.6.1	<i>Desplazamiento en secciones rectas</i>	62
5.6.2	<i>Desplazamiento en el interior de campanas</i>	62
5.6.3	<i>Desplazamiento en el interior de codos</i>	62
5.7	APLICACIÓN MÓVIL PARA CONTROL DEL ROBOT	63
	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA DE TUBERÍA	66
6.1	DISEÑO DE LA MAQUETA DE TUBERÍA.....	66
6.2	CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA DE TUBERÍA.....	70
	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO	72
7.1	EVALUACIÓN DE POSICIONAMIENTO MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES	72
7.2	EVALUACIÓN DE POSICIONAMIENTO MEDIANTE SENSOR DE POSICIÓN Y ORIENTACIÓN	76
7.3	IDENTIFICACIÓN DE RUPTURAS EN LAS PAREDES DE LA TUBERÍA MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES.....	78
	CONCLUSIONES.....	80
	TRABAJO FUTURO.....	82
	OTROS PRODUCTOS.....	83
	REFERENCIAS	84
	ANEXOS	88
	ANEXO A.....	88
	ANEXO B.....	89
	ANEXO C.....	91
	ANEXO D.....	92
	ANEXO E.....	93

ANEXO F.....	94
ANEXO G.....	95
ANEXO H.....	96

Índice de figuras

Figura 1. Robots de inspección interna de tubería. a) Carro tractor RX-95 b) SewerVUE cuarta generación.	3
Figura 2. Pipeline inspection underwater ROV. VT100 Vertical Crawler. INUKTUN.	8
Figura 3. Robot PAROYS IL.	8
Figura 4. Patente No. US 9,482,681 B2.	8
Figura 5. Shenzhen Schroder.	9
Figura 6. Patente No. 3443 B.	9
Figura 7. Prototipo de robot para inspección de tubería	10
Figura 8. Robot arácnido Hex-piderix	11
Figura 9. Robot hexápodo bioinspirado en el insecto conocido como Tenebrio.	11
Figura 10. AIRO-2.1. BioInMech Lab.	12
Figura 11. Robot tipo serpiente en tubería vertical.	12
Figura 12. Medios de desplazamiento de robots terrestres (Lamas A., 2017)	15
Figura 13. Configuraciones cinemáticas de tracción por ruedas.	16
Figura 14. Ruedas direccionales	16
Figura 15. Ruedas Libres	16
Figura 16. Ruedas fijas	17
Figura 17. Ruedas omnidireccionales	17
Figura 18. Esquema de composición de robot inspector de tuberías. (Chen J. et al., 2011).....	18
Figura 19. Modelo básico del monociclo.	19
Figura 20. Diagrama equivalente del monociclo en variables de actuación.	20
Figura 21. Diagrama de locomoción diferencial.	20
Figura 22. Diagrama de cuerpo libre.	21

Figura 23. Resortes de torsión en posición sin carga.	22
Figura 24. Diagrama metodológico.	23
Figura 25. Diagrama de bloques: Concepto de robot de inspección interna de tubería.	32
Figura 26. Concepto 1.....	33
Figura 27. Concepto 2.....	33
Figura 28. Concepto 3.....	34
Figura 29. Concepto 4.....	34
Figura 30. Diseño CAD del robot. Posición extremidades extendidas. (Vista isométrica)	35
Figura 31. Diseño CAD del robot. (Vista lateral izquierda)	36
Figura 32. Diseño CAD del robot. Sección frontal I. (Vista isométrica).....	37
Figura 33. Vista sección transversal de sección frontal.	38
Figura 34. Diseño CAD del robot. Posición extremidades retraídas. (Vista isométrica).....	39
Figura 35. Diseño CAD del robot. Sección trasera II. (Vista isométrica).....	39
Figura 36. Diseño CAD del robot. En interior de tubería de diámetro variable.	40
Figura 37. Diagrama de distribución de fuerzas en cada sección del robot. (Vista frontal)	41
Figura 38. Diagrama de distribución de fuerzas del robot-superficie. (Vista lateral).....	41
Figura 39. Diagrama de fuerzas de una sección.....	42
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre para una extremidad.....	43
Figura 41. Diagrama de fuerzas en una extremidad.....	45
Figura 42. Peso para prueba.....	47
Figura 43. Ubicación del peso en el interior de la tubería.	47
Figura 44. Ejes y referencias en la prueba.	48
Figura 45. Prueba en curso.....	48
Figura 46. Diagrama de cuerpo libre del sistema masa-plano inclinado.	50

Figura 47. Diseño CAD de prototipo. Concepto 5.....	51
Figura 48. Prototipo final ensamblado.....	52
Figura 49. Ensamble de secciones.	53
Figura 50. Ensamble de extremidad pasiva.	53
Figura 51. Ensamble de extremidad motriz.	54
Figura 52. Componentes de conector flexible.....	54
Figura 53. Componentes de articulación pasiva tipo bisagra.....	54
Figura 54. Servomotor Dynamixel AX-12A.....	55
Figura 55. Cámara y conexión tetra híbrida.....	55
Figura 56. Cámara adaptada al robot.	55
Figura 57. Módulo de control y visualización.	56
Figura 58. Componentes electrónicos de la caja de control. a) Arduino UNO b) Módulo bluetooth c) banco de terminales eléctricos d) fuente de alimentación e) Monitor.	56
Figura 59. Construcción de caja de control.....	57
Figura 60. Aplicación para dispositivos móviles, tablets y PCs.	57
Figura 61. Sistema para almacenamiento de video. a) Adaptador de captura de audio y video b) Software SuperViewer.	58
Figura 62. Diseño CAD de la reconfiguración del robot. Concepto 6. Extremidades retraídas. a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista posterior d) Vista isométrica.....	59
Figura 63. Diseño CAD de la reconfiguración del robot. Concepto 6. Extremidades extendidas. a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista posterior d) Vista isométrica.....	60
Figura 64. Simulación de posicionamiento del robot en el interior de la tubería.	60
Figura 65. Reconfiguración del robot.	61
Figura 66. Posicionamiento del robot en el interior de la tubería. a) Tubería horizontal b) Tubería vertical.	61
Figura 67. Trayectoria de las ruedas en el interior de codos.....	63

Figura 68. Aplicación móvil para el control del robot.	64
Figura 69. Conexión Bluetooth.....	64
Figura 70. Botones de direccionamiento.....	65
Figura 71. Sistema de tubería hidráulica. Instituto mexicano de Tecnología del Agua. IMTA...	67
Figura 72. Concepto de maqueta.....	68
Figura 73. Diseño CAD de la maqueta. (Vistas: Superior, Frontal y Lateral Izquierda).	69
Figura 74. Diseño CAD de la maqueta con soporte. (Vistas isométricas: Posterior y Lateral Izquierda).....	69
Figura 75. Maqueta de tubería. (Vistas: Isométricas, Lateral Izquierda y Posterior).	70
Figura 76. Prueba de estabilidad estática en tubería horizontal.	72
Figura 77. Prueba de estabilidad estática en tubería vertical.	73
Figura 78. Prueba de desplazamiento en tubería horizontal.	73
Figura 79. Prueba de desplazamiento en tubería vertical.....	74
Figura 80. Adaptabilidad del prototipo en codos de 45° y 90°	75
Figura 81. Adaptabilidad del prototipo a diámetros cambiantes (de 6” a 8” y de 8” a 6”).	75
Figura 82. Diagrama de comunicación para validación por sensores.....	76
Figura 83. Graficas de calibración inicial del sensor.	77
Figura 84. Gráficas de posición del robot.	77
Figura 85. Fotograma extraído del video del interior de la tubería.....	78
Figura 86. Imagen con filtros: Mediana y Canny para identificación de marcas (rupturas) en las paredes de la tubería.....	79

Índice de tablas

Tabla 1. Métodos de evaluación y selección de concepto.	27
Tabla 2. Métodos de Pugh.	28
Tabla 3. Selección de medios de desplazamiento.	29
Tabla 4. Selección de mecanismo para adaptabilidad al diámetro.....	30
Tabla 5. Selección de medios de generación de movimiento (desplazamiento).	30
Tabla 6. Resultados de prueba de fricción estática.	49
Tabla 7. Especificaciones para tubería de agua potable.....	66
Tabla 8. Catálogo de Tubería PVC Hidráulico comercial. Diámetros elegidos.	67
Tabla 9. Coeficientes de fricción y resistencia a la tracción. Par tribológico con acero.	71

Índice de anexos

ANEXO A..... 88

ANEXO B..... 89

ANEXO C..... 91

ANEXO D..... 92

ANEXO E..... 93

ANEXO F..... 94

ANEXO G..... 95

ANEXO H..... 96

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En los últimos treinta años, se han desarrollado y mejorado una serie de herramientas y equipos que en conjunto han permitido la automatización de diversas tareas en la industria. Dichas labores de investigación y desarrollo son principalmente realizadas por fabricantes, universidades e institutos en todo el mundo, introduciendo a los robots en nuevos mercados, o consolidando su aplicabilidad en industrias como: agrícola, eléctrica, médica, entre otros. La robótica de inspección nace de la necesidad de realizar labores de inspección bajo técnicas no destructivas, que permitan ampliar aún más su campo de acción; así como de trabajos peligrosos, tediosos e inalcanzables para el ser humano. Las técnicas de inspección empleadas en estos robots pueden llegar a ser tan simplificadas o complejas como se requiera. Van desde la inspección visual por medio de una cámara, hasta trabajos de reparación y limpieza (Muñoz, Carnero y Artis, 2014).

Con el fin de realizar una contribución a este campo, se desarrolla el presente proyecto, en el cual se presenta el diseño y construcción de un robot móvil para inspección del interior de tuberías, cuyo medio de desplazamiento es de tipo ruedas y su diseño estructural permite adaptarse al diámetro y dirección de la tubería. Este documento se encuentra estructurado de la siguiente forma: en el Capítulo 1 se presenta la introducción, objetivos y justificación del proyecto. En los Capítulos 2 y 3 se presenta el estado del arte y marco teórico, información con la que se pone en contexto al lector para que posea los conocimientos básicos requeridos para la comprensión del desarrollo del proyecto. Posteriormente, se presenta el cuerpo del trabajo, que está comprendido por los Capítulo 4, Capítulo 5, Capítulo 6 y Capítulo 7, los cuales contienen información como: diseño y construcción del prototipo, descripción de la estrategia de locomoción, diseño y construcción de la maqueta de tubería y evaluación de desempeño del prototipo. El último capítulo presenta las conclusiones del proyecto.

1.1 Antecedentes

Los robots facilitan al ser humano la realización de trabajos en los cuales le es difícil al ser humano realizar una actividad, ya sea por la fuerza, la precisión, la velocidad, la repetitividad, entre otras, que se requiere; o por la ubicación o el espacio de trabajo en el que debe permanecer. Por ello, los robots están inspirados en movimientos y características tanto del ser humano como de otros seres vivos, que permiten la realización de los trabajos que se necesitan abordar.

Las tareas de inspección de tuberías han venido evolucionando con el paso del tiempo y consigo los equipos empleados en dicha actividad. Inicialmente esta labor parte de técnicas manuales con

herramientas básicas para inspección, como cámaras introducidas en la tubería mediante el empuje y arrastre de esta, o sensores posicionados manualmente en el exterior de la tubería para el debido monitoreo. Debido al espacio de trabajo tan reducido para inspeccionar redes de tubería y a las grandes distancias que éstas presentan, se vienen desarrollando, introduciendo al campo y mejorando equipos de inspección que faciliten y hagan más confiables los resultados obtenidos en las tareas de inspección.

En la actualidad, existen instrumentos que son empleados para inspeccionar redes de tubería de forma manual, tales como: cámaras termográficas, sensores ultrasónicos y/o electromagnéticos, equipos de visión con rayos gamma, cámaras de visión y láseres. Sin embargo, las tareas de inspección han requerido ser mejoradas mediante la portabilidad de estos instrumentos y pasar del recorrido manual a lo largo de la tubería, a el uso de equipos que los transporten ya sea de forma autónoma o semiautónoma y puedan desplazarse externamente o internamente sin mayores dificultades a lo largo de las redes.

La inspección manual de redes de tubería consiste en el desplazamiento de los instrumentos anteriormente mencionados -acción realizada por el personal técnico-, a lo largo de la tubería, de forma que se analice o escanee las paredes y su interior con las diferentes tecnologías que posee cada instrumento, con el fin de detectar fallas. Esta tarea es realizada generalmente por técnicos capacitados en la lectura e interpretación de los resultados que arrojan los instrumentos. Esta técnica es empleada principalmente para la detección de fallas desde el exterior de la tubería y requiere de por lo menos una persona en todo momento para ello. Sin embargo, las redes de tubería logran alcanzar grandes longitudes -hasta decenas de kilómetros de longitud-, convirtiendo este trabajo en algo desgastante para el personal, o pueden llegar a estar en lugares de difícil acceso para el ser humano, dificultando o imposibilitándolo para realizar su tarea.

Es así como surgen los equipos portadores de instrumentos para inspección, también llamados robots de inspección, ya que muchos en la actualidad realizan esta actividad de forma autónoma o semiautónoma, evitando el desgaste del personal y sin riesgos humanos. Dichos equipos presentan diferentes estructuras y medios de desplazamiento, como robots tipo: carro, modulares, con extremidades, entre otros; así como poseen configuraciones muy sencillas o muy complejas de acuerdo a las necesidades que se tengan, como el robot tractor RX-95 de la compañía Panatec (Ver Figura 1-a). Este robot tiene una arquitectura sencilla puesto que su configuración es de tipo carro con 6 ruedas de tracción independientes y una cámara robotizada para inspección visual del interior de la tubería; está diseñado para ser manipulado desde un control manual, que es dirigido por el técnico desde el punto de ingreso del robot a la tubería (Panatec, 2019).

O arquitecturas complejas como la del robot SewerVUE Surveyor en su cuarta generación (Ver Figura 1-b), es un robot tipo modular con extremidades adaptables al diámetro de la tubería, acondicionado con diferentes sensores como: LIDAR, Sonar y radar PPR, y un software de análisis de información. Esta tecnología permite: tener un modelo preciso de la superficie de la tubería, conocer las dimensiones de grietas o anomalías imprevistas en las paredes y conocer defectos

internos en las paredes de la tubería. Lo anterior implica la necesidad de contar con personal capacitado para el control y operación del robot de forma correcta (Sewervue, 2019).



Figura 1. Robots de inspección interna de tubería. a) Carro tractor RX-95 b) SewerVUE cuarta generación.

Pese a que estos robots son bastante avanzados y realizan tareas de forma semiautónoma o autónoma, son fabricados en países extranjeros, vendidos o rentados a altos costos, fabricados para dimensiones de tuberías diversas y estandarizados para actividades generales de inspección, reduciendo las posibilidades para las empresas mexicanas de tener acceso a ellos y realizar sus tareas de inspección eficientemente. Por ello se requiere del desarrollo de un robot móvil para inspección interna de tubería de estructura simple, con capacidad de adaptarse a diámetros variables y cambios de dirección, de bajo costo y de fácil manejo, que permita al personal que lo opere un control intuitivo de él y o requiera de capacitaciones complejas o conocimientos avanzados para ello.

1.2 Justificación

Existe gran variedad en el diseño y desempeño de los equipos de inspección disponibles tanto a nivel comercial como invenciones patentadas o desarrollos tecnológicos en diversas instituciones, que se ajustan a la necesidad del usuario en específico; sin embargo, no todas son aptas para las diversas labores de inspección y su desempeño varía de acuerdo al medio al que vaya ser sometido, lo que implica poseer más de un equipo de inspección de acuerdo a la situación o, contratar una empresa que tenga a disposición del cliente equipos diversos de inspección de tubería. Por ello, el diseño de nuevos y multifuncionales dispositivos continúa generándose de modo que su desempeño y adaptabilidad sea cada vez mayor.

El presente proyecto nació de la necesidad que tienen las empresas encargadas del servicio de acueducto y alcantarillado en México y demás países, de verificar el estado de las tuberías e identificar rupturas o defectos, taponamiento total o parcial, entre otras; en paredes o uniones en

toda la sección interna del tubo. De modo, que se evite el rompimiento y excavación innecesaria en las vías públicas, por ende, reducir tanto el tiempo en la suspensión del servicio en hogares, empresas e industrias del sector, como los costos de dicha intervención.

Para ello, se incursiona en la robótica de servicio, con el diseño y elaboración de un innovador dispositivo electro-mecánico flexible, que facilite el acceso al interior de las tuberías de forma controlada, con una articulación flexible en su parte media que le permita adaptarse de manera natural a la forma de la tubería, ajustable al diámetro del tubo, semiautónomo, ligero, de fácil manejo y accesibilidad, que permita visualizar el interior de la tubería; dispositivo con el cual se mejora el desempeño en inspección de tubería vertical y pueda ser adquirido a un menor costo comparado con aquellos que actualmente se pueden adquirir en el mercado, cuyos precios oscilan entre los 9000 MXN (cámara de inspección por empuje) y los 134000 MXN (Carro de inspección móvil) (Shangai Kingstronic, 2019); por otra parte si se piensa en la prestación del servicios de inspección de tubería por parte de empresas privadas, los costos por servicio son bastante elevados.

Las empresas encargadas del mantenimiento de las redes de acueducto, no pueden contratar permanentemente con empresas externas y requieren de dispositivos que puedan realizar estas funciones, que sean adquiridos a un costo más asequible, que permitan realizar inspección tanto en secciones de tubería (de diámetros nominales para redes de acueducto) horizontal como vertical y de fácil manejo para el personal de planta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un dispositivo semiautónomo para inspección del interior de tuberías que permita la detección de fallas o defectos en uniones o paredes de éstas, adaptable al diámetro de la tubería, actuado por motores de corriente directa con electrónica embarcada.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir un robot móvil para inspección del interior de tuberías.
- Definir e implementar un algoritmo de desplazamiento para la movilidad del robot.
- Definir e implementar un sistema de detección de fallas o defectos en el interior de la tubería.
- Evaluar el desempeño del robot haciendo uso de una maqueta de tubería considerando cambios en el diámetro y dirección de ésta.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se revisa la evolución y estado actual de la técnica de los dispositivos y robots de inspección de tubería. Campo en el cual existe gran cantidad de equipos y configuraciones mecánicas y electrónicas para robots de inspección. De acuerdo con esto, se parte de los inicios de las labores de inspección de tuberías, las cuales estaban basadas en cámaras que se introducían en la cavidad, otras basadas en sensores y radares, pero con el paso del tiempo fueron evolucionando y desarrollándose equipos y robots para este trabajo.

Dado que la inspección consiste en el hallazgo de características físicas significativas para determinar cuáles de ellas son normales y cuáles no, el proceso recae principalmente en las características que se pueden obtener de la observación a través de la vista. En el caso de la inspección de tuberías se basa en encontrar imperfecciones relevantes o no en la superficie externa e interna de las tuberías, por lo tanto, es una prueba no destructiva para detectar y determinar comúnmente fallas en el material que está construida la tubería.

2.1 Inspección de tubería

En el campo de la inspección existen diversos dispositivos y técnicas que han sido y otras siguen siendo usadas para dicha labor; algunas realizan la inspección desde el exterior de la tubería y otras internamente. Las técnicas más comúnmente usadas en la inspección se describen a continuación.

3.1.1. Termografía

Técnica que está basada en el análisis de los cambios de temperatura que presenta un material sobre su superficie. Cuando un objetivo específico se enfría desde un enfriador externo, la difusión térmica se altera en la superficie del objetivo dependiendo de la existencia de defectos dentro del objetivo. En este caso, el efecto de aislamiento por defectos dentro del objetivo induce diferencias de temperatura en la superficie objetivo.

La termografía se utiliza para medir la temperatura de la superficie del objetivo y convertir los resultados de la medición en una imagen en tiempo real. Basado en una imagen en tiempo real obtenida usando una cámara IR, es posible medir la forma y ubicación de los defectos dentro del objetivo (Hyum J. et al., 2013).

3.1.2. Ultrasonido

Técnica que se basa en la determinación del grosor de la pared de la tubería a inspeccionar, por medio del lanzamiento de un rayo de energía ultrasónica dirigida al centro de la tubería de forma perpendicular a la superficie, el cual atraviesa la pared y retorna información de dos clases: cantidad de energía transmitida al material o energía reflejada desde las discontinuidades del material.

La inspección ultrasónica es uno de los métodos de prueba no destructivos comúnmente utilizados en la actualidad, con el fin de identificar los defectos en el material o en su superficie con ondas de sonido de alta frecuencia -superior a 20000 Hz-. Mientras que las ondas ultrasónicas se mueven en el material, pierden energía y se reflejan en las superficies. El sonido reflejado se analiza para determinar la presencia y la ubicación de la discontinuidad o el defecto. Las grietas, lagunas, poros u otras discontinuidades pueden determinarse fácilmente mediante inspección ultrasónica porque forman una superficie reactiva (Coramik M. y Ege Y. 2017)

3.1.3. Electromagnética

Técnica en la que se magnetiza la tubería y haciendo uso de detectores o sensores se recorre la tubería en busca de fugas del campo magnético. Esta técnica no puede ser usada en materiales a los cuales no se les pueda aplicar magnetismo.

3.1.4. Rayos gamma

Técnica basada en la radioactividad, que consiste en la emisión de rayos gamma para medir el espesor de la pared de la tubería. Esta técnica es bastante similar a la de ultrasonido.

3.1.5. Cámaras de visión y láseres

Técnica que consiste en hacer pasar sobre la superficie de la tubería -ya sea interna o externa- cámaras o láseres o combinación de ellos, que permiten visualizar o realizar la reconstrucción de la tubería e identificar imperfecciones en su superficie como rugosidades, grietas, obstrucciones, entre otras; por medio del análisis de imágenes.

Finalmente, el campo de la robótica le apunta a la creación de robots que faciliten esta actividad, sirvan como medio de desplazamiento de los dispositivos que se requieren para aplicar las técnicas de inspección ya mencionadas y logren explorar las tuberías hasta lugares que no se habían podido inspeccionar sin ser invasivos en el proceso -evitando el rompimiento de estructuras o superficies para ello-. Este tipo de robots puede ser clasificado según su campo de inspección a la hora de realizar esta labor; clasificándose como: robots de inspección interna y robots de inspección externa a la tubería. Cuando los robots son utilizados para inspección interna de la tubería pueden operar de dos formas diferentes: desplazándose en medio de un fluido y aquellos que se desplazan por tuberías sin fluidos.

Los robots de inspección han venido evolucionando con el paso del tiempo, y sus diseños son cada vez más sofisticados, empleando diferentes técnicas bio-inspiradas, y siendo ajustados a las características de la superficie de desplazamiento y a las tareas a realizar. Existen prototipos desarrollados para realizar trabajos en superficies horizontales, otros en superficies verticales y otros combinan estas dos formas de desplazamiento aumentando su campo de acción. Por ello se presenta a continuación prototipos existentes en la actualidad tanto comerciales como desarrollados en proyectos institucionales y diseños patentados; referentes a la temática del presente proyecto, con el fin de dar a conocer las características de dichos dispositivos.

2.2 Robots de inspección interna de tubería

Este apartado centrará su desarrollo en los robots de inspección interna de tuberías drenadas. Campo de acción del cual se desprende una clasificación más de estos dispositivos, como lo es su forma de desplazarse, así: tipo oruga, robots con ruedas, robots con patas y tipo gusano. Para ello a continuación se presentan los dispositivos más relevantes y de los cuales se han tomado referencia para el desarrollo del presente.

3.2.1. Robots tipo oruga.

Son robots cuyo medio de desplazamiento consta de bandas comúnmente dentadas (o sistemas oruga) para facilitar el desplazamiento en pro de la disminución de los deslizamientos que este tipo de sistema presenta. Por otra parte, los centros de rotación instantáneos de las orugas son variables y no coinciden con los centros de las orugas, debido al deslizamiento lateral. Sin embargo, para el diseño de esta clase de robots, se debe tener en cuenta respecto a su locomoción: el deslizamiento longitudinal, lateral, las fuerzas de tracción, hundimiento, entre otras variables (González R, 2015). Características dentro de las cuales se destaca el deslizamiento, puesto que es un factor fundamental relacionado con la controlabilidad de este, siendo una de las desventajas de este sistema de locomoción. Sin embargo, en la actualidad se trabaja en ello para eliminar este factor.

En la Figura 2, se presenta un dispositivo comercial diseñado para inspección interna de tuberías. Este dispositivo pertenece a la compañía japonesa Inuktun y posee características como: capaz de desplazarse tanto verticalmente como horizontalmente, así mismo, posee un sistema de adaptación al diámetro de la tubería (30 cm de diámetro interno mínimo), lo que le facilita su desplazamiento vertical; puede desplazarse tanto en vacío como en fluidos (agua) y adherirse a superficies metálicas, modificando su configuración estructural (cambiando partes del dispositivo); viaja a una velocidad de 9 metros por minuto; tiene un alcance de 30m y posee un sistema PanTilt en su parte delantera en donde se encuentran ubicadas tres cámaras y múltiples sensores para la inspección de la tubería.



Figura 2. Pipeline inspection underwater ROV. VT100 Vertical Crawler. INUKTUN.

Entre los proyectos desarrollados con esta clase de robots de inspección se destaca el robot desarrollado por Park et al. (2011). Cuyo sistema de tracción está compuesto por tres orugas como se puede observar en la Figura 3. Cuenta también con un sistema de adaptación a varios diámetros de tubería, el cual se encuentra compuesto por: una pista, un módulo central y un pantógrafo que le permite adaptarse a la tubería manteniendo el contacto con ella. La separación entre sus orugas es de 120° entre ellas.

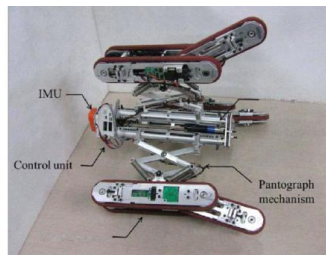


Figura 3. Robot PAROYS IL.

En cuanto a patentes relacionadas, se encuentra la patente No. US 9,482,681 B2. La cual comprende el diseño de un dispositivo de inspección interna de tubería y el método de uso. Dicho dispositivo se observa en la Figura 4 y consta de un sistema tipo oruga para su desplazamiento, y un sistema móvil de sensado que comprende: un conjunto de sensores y antenas para enviar y recibir información desde el exterior de la tubería, una cámara para realizar inspección insitu. Este último sistema permite contrarrestar los cambios en el centro de gravedad del dispositivo permitiendo que su centro de giro y el centro de gravedad siempre se encuentren de forma vertical.

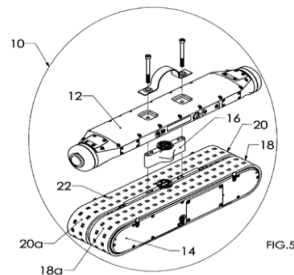


Figura 4. Patente No. US 9,482,681 B2

3.2.2. Robots con ruedas.

Son robots cuyo medio de desplazamiento son ruedas con diversas texturas en su superficie de contacto, que facilitan el agarre y desplazamiento del robot. Dichas ruedas suelen estar conectadas a motores ya sea de forma individual o por grupos. Este sistema de desplazamiento permite a los robots generar velocidades mucho más altas que otras formas de desplazamiento.

Uno de los robots comerciales -que poseen este tipo de medio de desplazamiento- más destacados en la actualidad, es el presentado en la Figura 5. Éste es un dispositivo diseñado por la empresa China, Shenzhen Schroder; el cual permite realizar inspección en tuberías horizontales hasta con una pendiente de 30° de forma ágil, posee un módulo de monitoreo incorporado, un sistema PanTilt en su parte delantera que le permite rotaciones de la cámara de 360° y 180° respectivamente. También cuenta con un módulo de elevación de su cuerpo por medio del cual logra equilibrar su centro de masa en los desplazamientos.



Figura 5. Shenzhen Schroder.

Una de las patentes recientes mexicanas dedicadas a este sector de la robótica es la patente No. 3443 B, concedida en 2014, con el diseño del robot de inspección de tubería que se muestra en la Figura 6. Emplea un mecanismo robótico que capta imágenes de cualquier parte de la tubería a través de cámaras que se posicionan en diferentes ángulos para dicha labor. Cuenta con: una unidad de procesamiento externa y un módulo GPS para identificar su posicionamiento en el campo de trabajo y emplea como medio de desplazamiento pares de ruedas accionadas por motores y transmisiones por cadena.

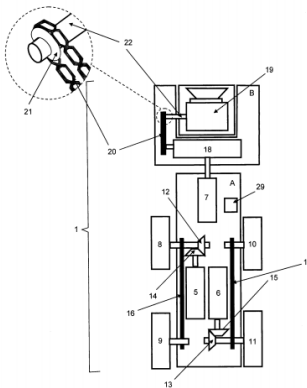


Figura 6. Patente No. 3443 B

Así mismo, Dongwoo Lee et al. (2012) desarrollaron un robot para inspección de tubería que se adapta a varios tipos de tubería y consta de un solo módulo como se observa en la Figura 7. Este robot cuenta con ramificaciones que se abren y cierran de forma independiente por medio de resortes de tensión, los pares de ruedas que posee pueden cambiar de orientación -haciendo uso de un motor por cada par- para así realizar giros en el recorrido de la inspección y lograr trayectorias diversas en el interior de la tubería. Cuenta con 5 actuadores y tiene un peso de 3.6 Kg; alcanza una velocidad máxima de 380 cm/min y los diámetros de tubería que logra inspeccionar están comprendidos entre los 25.9 cm y 30.5 cm.

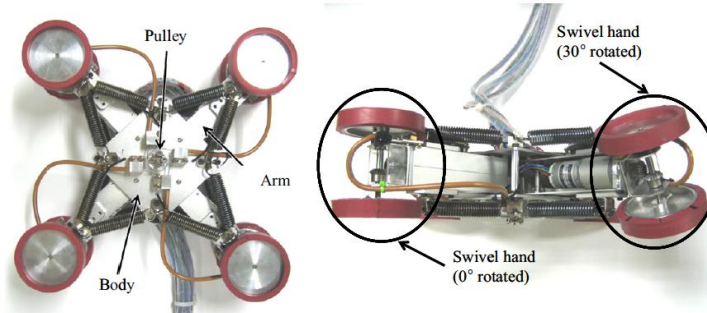


Figura 7. Prototipo de robot para inspección de tubería

3.2.3. Robots con patas.

Son robots cuyo medio de desplazamiento son patas o extremidades con las cuales el robot puede lograr fácilmente adaptarse al lugar en donde se desplaza y esquivar obstáculos, sin embargo, es uno de los sistemas en donde se logran más bajas velocidades de desplazamiento. Otro de los inconvenientes que tiene este tipo de robots es que, en algunos casos pueden llegar a tener plataformas grandes, sistemas de navegación complejas o problemas en el equilibrio estático, entre otros.

En 2012 en México, se desarrolló el robot arácnido Hex-piderix (Sandoval-Castro et al., 2012) de 6 extremidades con visión estereoscópica, capaz de detectar grietas en superficies verticales. El robot cuenta con un sistema de succión en cada extremidad, compuesta por una ventosa tipo fuelle, un generador de vacío y una electroválvula, elementos con los cuales se logra adherir a la superficie y llevar a cabo su forma de locomoción. También cuenta con una cámara tipo estéreo (3D) que le permite visualizar en una computadora central el tamaño y la forma de la fisura durante el recorrido, en tiempo real, mediante un software creado específicamente para este fin. Su diseño puede visualizarse en la Figura 8.

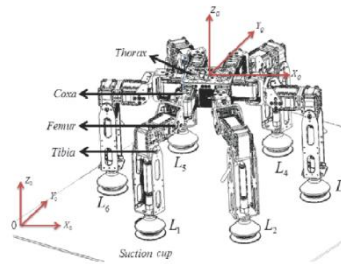


Figura 8. Robot arácnido Hex-piderix

En el año 2015, en Colombia, se diseñó el robot bioinspirado en el insecto conocido como Tenebrio, el cual posee omnidireccionalidad y estabilidad debido a la formación del trípode de apoyo, el cual se crea en sus patas al dar un paso. Su diseño se presenta en la Figura 9. El prototipo cuenta con seis extremidades y en cada una de ellas con 3 servomotores, también posee una tarjeta especializada para el control general del robot. Elementos con los cuales se logra emular la caminata del insecto (Rodríguez J., 2015). Este prototipo fácilmente puede ser equipado con un sistema de monitores para aplicaciones de inspección.

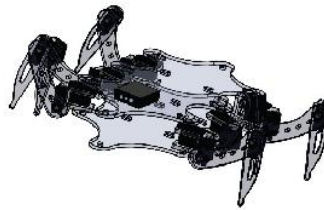


Figura 9. Robot hexápodo bioinspirado en el insecto conocido como Tenebrio.

3.2.4. Robots tipo serpiente o gusano.

Este tipo de robots hacen parte de la robótica bio-inspirada junto con los robots con patas y poseen ventajas en cuanto a adaptabilidad al espacio de trabajo como su tamaño y forma, y también a obstáculos presentes. Esta clase de robots presentaba desplazamientos puramente horizontales debido a que su locomoción se realizaba por arrastre, pero han venido evolucionando de modo que cuentan con elementos móviles que les han permitido mejorar su movilidad a tal punto de ser capaces de realizar trayectorias ascendentes por tuberías. Este es el caso de los robots tipo serpiente con ruedas.

El AIRO-2.1 es un robot comercial de inspección de tubería desarrollado en Japón en 2017 y posee un diseño bastante sofisticado, como se observa en la Figura 10, el dispositivo cuenta con 3 pares de ruedas que le permiten realizar desplazamientos de avance y retroceso y 2 ruedas para cambiar su posicionamiento o generar cambios de orientación del robot. Internamente cuenta con actuadores que le permite estirarse y encogerse de modo que logre adaptarse a diversos tamaños de tubería. También posee un módulo de cámara y sensores con los cuales se puede conocer su posicionamiento y visualizar el conducto por donde se desplaza.



Figura 10. AIRO-2.1. BioInMech Lab.

En Estados Unidos en 2007 se diseñó un robot modular tipo serpiente que posee la característica de deslizarse por una tubería vertical haciendo uso de la fricción que se tiene con la superficie en contacto como se observa en la Figura 11, y logran por medio de modelos de la interacción de contacto de fricción (análisis de fuerzas normales y tangenciales presentes en el desplazamiento) hacer que este robot ascienda por la tubería.



Figura 11. Robot tipo serpiente en tubería vertical.

Sin embargo, como lo expresan Roslin et al. (2012) en su artículo Review: Hybrid Locomotion of In-pipe Inspection Robot. “desde las últimas dos décadas, se han inventado y probado muchos tipos de sistemas de locomoción únicos. Sin embargo, a medida que la tecnología cambia, este tipo de locomoción proporciona algunas limitaciones para las situaciones actuales. Este artículo de revisión discute sobre el desarrollo actual del robot en tubería. Los investigadores han hibridizado el tipo común de sistemas de locomoción de robots en tubería para un mejor rendimiento.

Los resultados obtenidos por los experimentos muestran que, al emplear un sistema híbrido, la mayoría del robot puede superar el problema de la singularidad del movimiento, especialmente cuando navega por las ramas y las tuberías curvas. Además de eso, el sistema híbrido logra aumentar la flexibilidad del robot en términos de capacidad de maniobra y captura de imágenes. Con el tipo híbrido, es posible diseñar un robot con múltiples tipos de movimiento”. Conclusión que da fundamento al presente proyecto para diseñar un robot híbrido que cumpla con características de diseño propuestas en el Capítulo 4.

En este capítulo se encuentran los fundamentos teóricos en los cuales se basó el presente proyecto para ser desarrollado, temas como: locomoción de robots de inspección terrestre, robots de inspección con ruedas, tipos de ruedas, cinemática de robots móviles con ruedas y estructura de un resorte de torsión.

3.1 Robots de servicio.

Para la Federación Internacional de Robótica, los robots de servicio son aquellos “robots que operan de manera automática o semiautomática para realizar servicios útiles al bienestar de los humanos o a su equipamiento, excluyendo las operaciones de fabricación”. De acuerdo con Pineda et al. (2017) los robots de servicio son diferentes a los robots industriales, ya que su objetivo es simplificar el trabajo de los humanos ya sea en labores del hogar, oficina, hospitales y demás actividades de la vida diaria, actividades para las cuales los robots deben moverse evitando obstáculos, hacer reconocimiento de personas, comunicarse con el ser humano, ver, llevar, entregar objetos, en fin, hacer muchas de las conductas intencionales que suelen realizar los humanos.

Aracil et al., (2008) afirman que el nombre de robots de servicio surge por la inquietud de la comunidad científica de realizar desarrollos destinados a estar al servicio de la sociedad, tratando de que ésta reconozca y apoye sus resultados. Estos robots pueden apoyar en diversas tareas a sectores como: agricultura, construcción, minería, energía, espacio, seguridad y defensa, sanidad, alimenticio, entre otros (United Nations EC for Europe, 2006).

En su aspecto y características físicas, los robots de servicio contemplan estructuras complejas que portan otros dispositivos, poseen medios de desplazamiento, diversidad de sensores, altas capacidades de carga, velocidades muy altas o muy bajas, dimensiones muy pequeñas o bastante robustas, entre otras propiedades (Molfino et al., 2005; Ferre et al., 2005; González de Santos et al., 2006). Características que dependen de la actividad a realizar y el entorno en el cual se vaya a desenvolver facilitando o permitiendo en muchas ocasiones realizar tareas que el ser humano no puede realizar o en las que pondría en riesgo su integridad.

3.2 Robots de inspección.

Los robots de inspección suelen desarrollarse para realizar trabajos en los cuales el ser humano no puede actuar o es de gran riesgo para su integridad física. Estos pueden desplazarse en el o los medios para los cuales se hayan diseñado: aéreo, terrestre y/o acuático. Las labores de inspección en las cuales se pueden desenvolver son muy variadas, algunas de ellas pueden ser: inspección de tanques, de tubería, de conductos, cultivos, terrenos, urbanizaciones, espacios confinados, etc. De estas actividades también se derivan otras aún más específicas como: limpieza, reparación, excavaciones, manipuladores de objetos o herramientas, entre otros.

Los robots que se desenvuelven en el medio aéreo suelen conocerse como: UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Vehículos Aéreos no Tripulados, estos pueden ser de ala fija o de hélices y de acuerdo con su modo de controlar o su aplicación, puede variar su nombre. Aquellos que están diseñados para desplazarse en medios acuáticos se les llama: AUV (Autonomous Underwater Vehicle) Vehículo Submarino Autónomo; sin embargo, al igual que los vehículos aéreos, estos también pueden variar su nombre de acuerdo con la forma de ser controlados o de su uso. Así mismo, en el medio acuático, existen los robots tipo bote o barco que se desplazan sobre la superficie del líquido.

Por último, se encuentran los robots que se desplazan en el medio terrestre y pueden ser clasificados en dos grandes grupos, aquellos que se desplazan en terrenos abiertos y los que se desplazan en lugares cerrados. Sin embargo, estas dos clases de robots tienen algo en común, el tipo de locomoción que emplean para desplazarse. Esto los hace más o menos aptos a los diferentes terrenos o condiciones del medio a que se deben enfrentar.

3.3 Locomoción en robots de inspección terrestre.

La locomoción en los robots terrestres hace referencia al movimiento generado por el robot para poder desplazarse sobre una superficie, junto con los medios de desplazamiento que emplea para ello, la velocidad que alcanza y otros mecanismos que puede llegar a poseer para su sujeción a la superficie. La locomoción es una de las características que tienen todos los robots móviles y para que esto ocurra, deben contar con algún método de propulsión proveniente de alguna de las energías existentes (eléctrica, lumínica, mecánica, eólica, térmica, solar, nuclear, cinética, magnética, etc). Los robots de inspección terrestre poseen diferentes medios de desplazamiento y por ende diversas formas de locomoción. Como se observa en la Figura 12 los hay con los siguientes medios o formas de desplazamiento: ruedas (a), bandas o tipo oruga (b), patas (c), tipo gusano (d), tipo serpiente (e), tipo tornillo (f), superficies deslizantes (g) o híbridos.

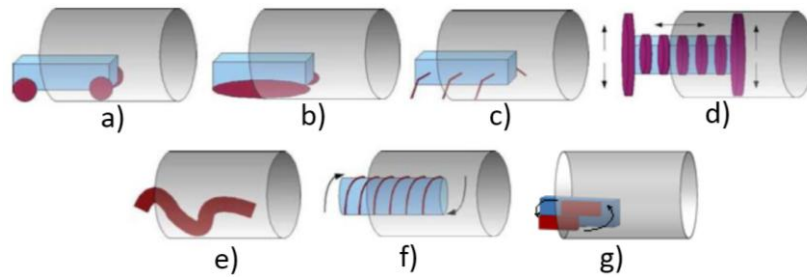


Figura 12. Medios de desplazamiento de robots terrestres (Lamas A., 2017)

El medio de desplazamiento más usado en los robots terrestres es el realizado con ruedas, gracias a que son sencillos de crear y económicos, además de soportar grandes cargas comparándolos con la mayoría de los medios de locomoción mencionados, además pueden alcanzar mayores velocidades. Sin embargo, una de las limitantes que posee es que la superficie por donde se desplaza debe ser bastante regular y dura.

Dependiendo del medio de desplazamiento que se emplee y la configuración que se realice, se pueden generar un sin número de trayectorias de desplazamiento, esto de acuerdo a las necesidades del campo de acción.

3.4 Robots de inspección con ruedas.

Los robots de inspección con ruedas son usualmente los más usados pese a sus limitaciones. Una de las características o propiedades que han tenido los robots de inspección con ruedas es la inclusión de la modularidad en sus diseños, permitiéndoles ser portadores de diversas herramientas o elementos que facilitan la labor a desempeñarse; así como la hibridación en su locomoción.

La locomoción por ruedas puede ser: por ruedas motrices o de tracción, ruedas direccionales, ruedas libres o auxiliares, ruedas fijas, ruedas omnidireccionales; conformando diferentes clases de sistemas de ruedas para la locomoción: sistema motriz diferencial, sistema Ackerman, sistema dual, sistema síncrono y sistema triciclo.

3.4.1 Ruedas motrices o de tracción

Consiste en dos ruedas que están montadas sobre un mismo eje. Cada una de las ruedas es controlada de forma independiente permitiendo realizar desplazamientos en línea recta, circulares o sobre su propio eje de contacto de rodamiento, según como se programe la velocidad de las ruedas o su posición, así como se observa en la Figura 13. Para un funcionamiento estable y balanceo del montaje, requiere de por lo menos una rueda más.

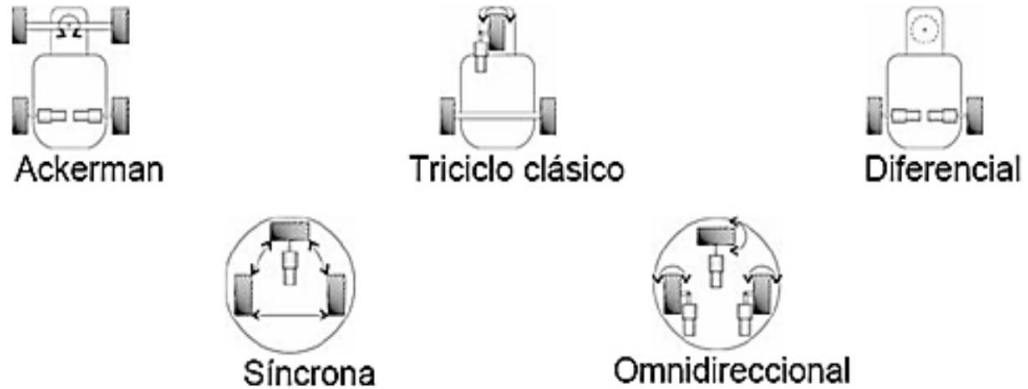


Figura 13. Configuraciones cinemáticas de tracción por ruedas.

3.4.2 Ruedas direccionales

Son ruedas que permiten realizar desplazamientos en todas direcciones. Usualmente son empleadas como ruedas auxiliares para evitar el arrastre de algún extremo de un equipo. Tal y como se observa en la Figura 14, poseen ruedas más pequeñas alrededor de la circunferencia de la rueda o esfera más grande para permitir rodar en la dirección en que estas se encuentren.



Figura 14. Ruedas direccionales

3.4.3 Ruedas libres o auxiliares

Las ruedas libres son dispositivos similares a un rodamiento de bolas que permite la rotación de la pista externa respecto a la pista interna en un solo sentido. Como se observa en la Figura 15 la rueda está constituida por escalones inclinados por los cuales suben y bajan las bolas en función del sentido de rotación de las pistas.

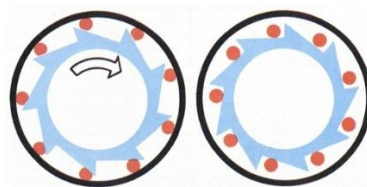


Figura 15. Ruedas Libres

3.4.4 Ruedas fijas

Son ruedas que están posicionadas en un lugar permanentemente y pueden estar ubicadas de forma centrada o descentrada respecto a su eje de rotación como se evidencia en la Figura 16.

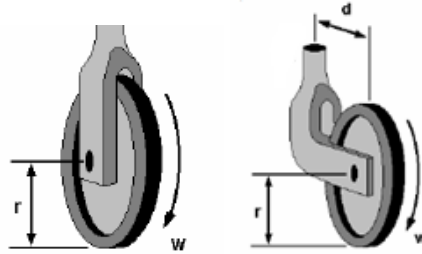


Figura 16. Ruedas fijas

3.4.5 Ruedas omnidireccionales

Son ruedas que poseen además de la rotación adelante-atrás, rotaciones en los rodillos que posee en su exterior permitiendo realizar movimientos en todas direcciones (Ver Figura 17) al igual que las ruedas direccionales.



Figura 17. Ruedas omnidireccionales

3.5 Robots de inspección modulares con ruedas

Los robots modulares con ruedas son aquellos que poseen uno o más módulos que pueden ser o no intercambiables de acuerdo con la necesidad que se requiere abordar, y poseen comúnmente extremidades con una o más ruedas para generar el desplazamiento, así como se logra observar en la Figura 18. “La modularidad está definida como la característica de estar construido a partir de unos componentes estandarizados que se pueden intercambiar” (Mejía A., 2015).

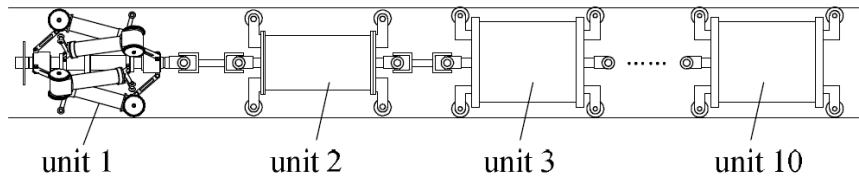


Figura 18. Esquema de composición de robot inspector de tuberías. (Chen J. et al., 2011)

Desarrollos como los de Chen J. et al, (2011), Nayak A. y Pradhan S., (2014), Gmitterko et al., (2015) demuestran que la modularidad en los robots de inspección es una excelente solución para los requerimientos que se tienen en las labores de inspección en tuberías, debido a que su conformación por módulos facilita la portabilidades de sensores y herramientas para esta tarea, así como su movilidad en el interior. Al poder repartir los diversos elementos electrónicos entre sus módulos, estos suelen ser de menor tamaño si se compara con un robot uni-modular portador de todas las herramientas requeridas para tal fin. Esta cualidad permite a los robots modulares ser aptos para circular por tuberías que poseen complicaciones como codos y tees.

3.6 Cinemática de robots móviles con ruedas

La cinemática de un robot móvil con ruedas describe el movimiento y orientación de éste en función de las variables de actuación. Con base en las siguientes hipótesis se desarrolla el modelo matemático:

- El robot se desplaza sobre una superficie plana.
- Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.
- Existe rodadura pura, es decir no hay deslizamiento.
- Se toma al robot como un sólido rígido, es decir no hay presencia de flexión en sus componentes.
- Se aproximan las trayectorias como arcos de circunferencia entre dos periodos de muestreo consecutivos.

3.6.1 Cinemática del monociclo

Bajo las anteriores consideraciones el modelo básico del monociclo resulta del análisis de la Figura 19 (García L., 2005).

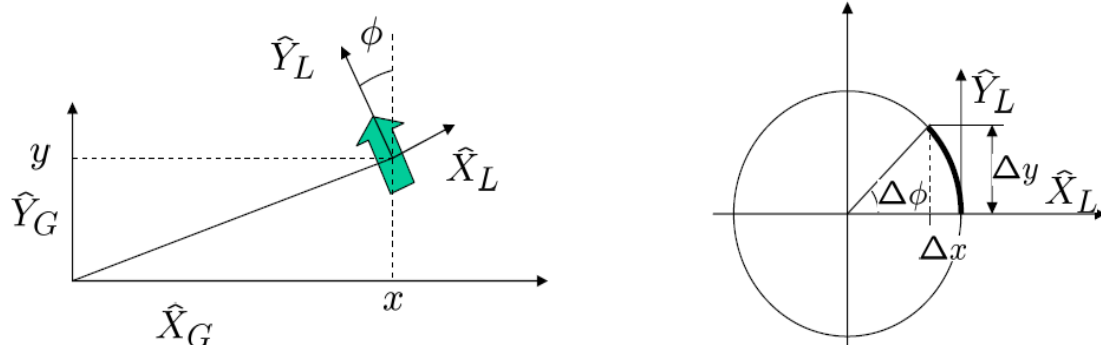


Figura 19. Modelo básico del monocycolo.

Siendo:

\hat{X}_L : Componente X del vector posición

\hat{Y}_L : Componente Y del vector posición

Δx : Diferencial de posición en X

Δy : Diferencial de posición en Y

$\Delta\phi$: Diferencial del ángulo para el desplazamiento

En donde la velocidad lineal del vehículo es:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Donde: $\Delta s = \frac{\Delta y}{\Delta x}$

Por lo tanto, la velocidad angular del vehículo es:

$$\omega = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Y en coordenadas locales queda expresado como:

$$L_{(\Delta x)} = -(R - R\cos\Delta\phi) \quad (3.3)$$

$$L_{(\Delta y)} = R\sin\Delta\phi \quad (3.4)$$

El cambio de posición en coordenadas globales se obtendrá aplicando una rotación pura ϕ .

$$\Delta x = R(1 - R\cos\Delta\phi)\cos\phi - R\sin\Delta\phi\sin\phi \quad (3.5)$$

$$\Delta y = R(1 - R\cos\Delta\phi)\sin\phi - R\sin\Delta\phi\cos\phi \quad (3.6)$$

Suponiendo que:

$$\Delta\phi \ll 1 \Rightarrow \cos\Delta\phi \cong 1, \quad \sin\Delta\phi \cong \Delta\phi$$

$$\Delta x = -R\Delta\phi\sin\phi \quad (3.7)$$

$$\Delta y = R\Delta\phi\cos\phi \quad (3.8)$$

Lo cual es equivalente a:

$$\Delta x = -\Delta_s\sin\phi \quad (3.9)$$

$$\Delta y = \Delta_s \cos \phi \quad (3.10)$$

Así, se obtiene la posición y orientación del monociclo en función de su velocidad lineal y angular (variables de actuación) obtenido de la Figura 20.

$$\dot{x} = -v \sin \phi \quad (3.11)$$

$$\dot{y} = v \cos \phi \quad (3.12)$$

$$\dot{\phi} = \omega \quad (3.13)$$

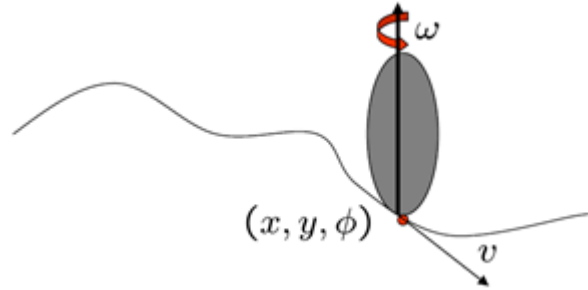


Figura 20. Diagrama equivalente del monociclo en variables de actuación.

3.6.2 Cinemática de locomoción diferencial

Con base en el modelo del monociclo, el modelo de locomoción diferencial queda representado en las siguientes ecuaciones, partiendo de la gráfica de la Figura 21.

$$v = \frac{v_L + v_R}{2} = \frac{R(\omega_L + \omega_R)}{2} \quad (3.14)$$

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{L} = \frac{R(\omega_L - \omega_R)}{L} \quad (3.15)$$

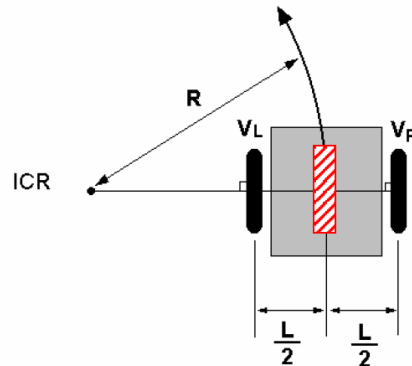


Figura 21. Diagrama de locomoción diferencial.

3.7 Diagrama de cuerpo libre

Las fuerzas actuantes sobre un cuerpo rígido pueden analizarse de forma simplificada cambiando las estructuras complejas por su representación como partícula y excluyendo todas las fuerzas que no estén dadas sobre éste; así se logran conservar las condiciones de equilibrio (F.P. Beer, R. Johnston, et al., 2010).

Inicialmente se asume a la estructura como bidimensional al seleccionar a los ejes X y Y en el plano de la estructura (ver Figura 22), teniendo que:

$$F_z = 0, \quad M_x = M_y = 0, \quad M_z = M_o$$

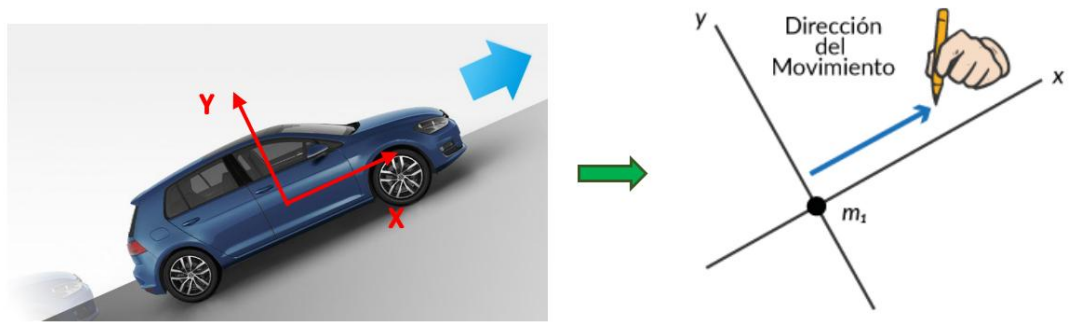


Figura 22. Diagrama de cuerpo libre.

Por lo tanto, el análisis de fuerzas se reduce a las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_z = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum M_o = 0$$

Del cual se puede obtener un sistema con máximo tres incógnitas el cual se pueda resolver.

3.8 Estructura de resortes de torsión

Los resortes de torsión están diseñados para transmitir momento torsionante, es decir, son resortes helicoidales que ejercen torque o fuerza rotativa. Estos actúan cuando los extremos o terminales del resorte están unidos a otros componentes que rotan alrededor del centro del resorte de torsión y éste intenta volver a su posición original. Los resortes de torsión están sujetos a un esfuerzo de flexión. Pueden almacenar y liberar energía angular o mantener estático un mecanismo en su posición reflexionando las terminales al eje central del cuerpo (Lee spring resortes, 2019).

Su estructura es la presentada en la Figura 23, donde se muestra los datos importantes para la selección de un resorte de torsión, datos como: la fuerza generada por las terminales (F), el

diámetro del alambre, la longitud de las terminales, el ángulo de movilidad de las terminales y el diámetro del mandril; así como las configuraciones más comunes en resortes de torsión: 90°, 180°, 270° y 360°.

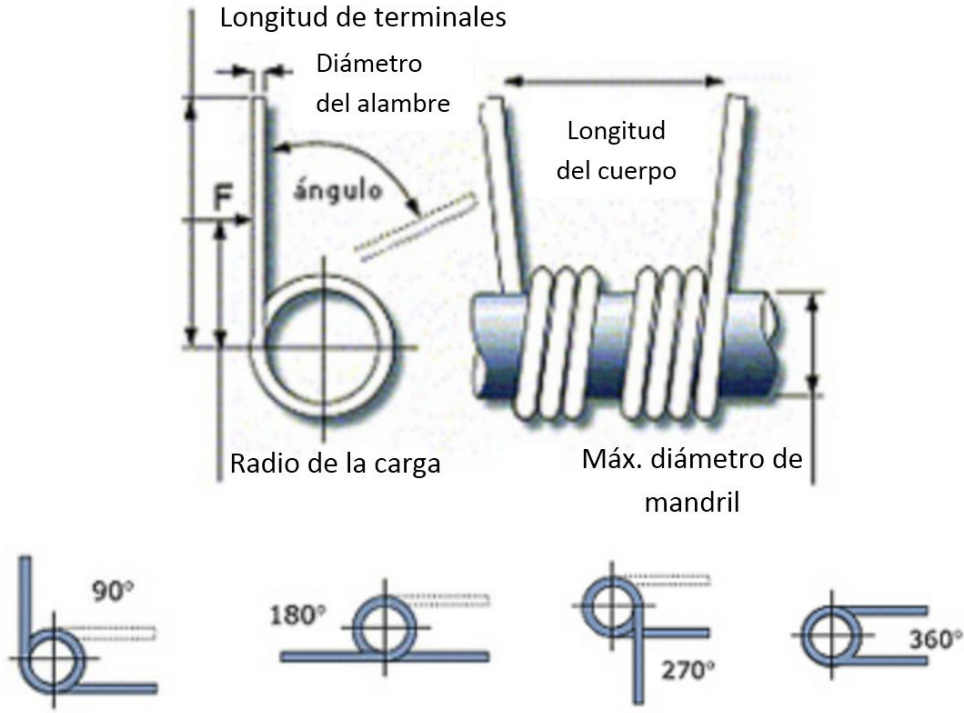


Figura 23. Resortes de torsión en posición sin carga.

Capítulo 4

DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO

En este capítulo se presentan las diferentes etapas que se siguieron para lograr el diseño definitivo del robot de inspección, procedimiento con el cual se logran cumplir los requerimientos que se plantearon para la creación de éste.

4.1 Metodología o estrategia experimental

Para el desarrollo de esta metodología o estrategia experimental propuesta, se trazó el diagrama de flujo de la metodología (ver Figura 24) como esquema general y un cronograma de actividades dispuesto a dos años, los cuales se siguieron a cabalidad.



Figura 24. Diagrama metodológico.

El robot móvil, flexible, semi-autónomo a desarrollar, debe cumplir con ciertas características especiales como: desplazarse en el interior de tuberías PVC en vacío, adaptable al diámetro de la tubería (diámetros entre 6" y 8"), que permita realizar la inspección interna de la tubería tanto en uniones como en paredes; permita la visualización de la tubería durante todo el trayecto en tiempo real y su posicionamiento; posea la suficiente fuerza, torque y adaptabilidad tanto para sobrepasar obstáculos (deformaciones en la tubería o basuras) en el recorrido como para recorrer tuberías

verticales; permita realizar giros hasta de 90° para los cambios de dirección en tuberías; con fuente de energía en el control de mando; y con el menor costo posible.

De acuerdo con esto, se plantean cinco etapas las cuales poseen una o más fases cada una, para lograr el desarrollo total del proyecto.

Etapa 1. Estudio

1. Identificación del problema: Recolección de documentación y encuentro con especialistas de la Comisión Estatal de Aguas (CEA) que se enfrentan al problema de inspección de tubería, quienes son los que conocen las dificultades que existen, cómo las resuelven actualmente, qué tipo de equipo de inspección necesitan actualmente.
2. Revisión de conceptos existentes: se realizó la búsqueda y revisión de información referente a dispositivos que posean características similares a lo que se pretende realizar con el fin de visualizar sus diseños y alcances, que sirvan como base para el diseño propio y así poder plasmar las ideas en bocetos para elegir el que se adapte mejor a lo propuesto. En esta etapa se consideran: las limitaciones respecto a espacio físico; las cargas dinámicas y estáticas; identificación de posibles partes, dispositivos mecánicos, electrónicos, actuadores y elementos disponibles en el mercado e inclusive probables fuentes de energía; elementos que se requiere realizar un diseño con detalle para su fabricación; y, la representación y establecimiento de la lógica de los movimientos y sus posibles controles por medio de diagramas de flujo.

Etapa 2. Diseño

1. Definición del concepto y análisis estático: se identifican los requerimientos de diseño del robot y con base en ello se aplica la metodología de selección y evaluación de concepto de Pugh. Se realiza el análisis estático del mecanismo y se hallan las fuerzas presentes en el sistema en equilibrio.
2. Diseño CAD: Esta fase está dividida en dos, una para el diseño de la maqueta experimental en donde se analizará el funcionamiento del equipo y otra para el diseño del dispositivo a crear.
 - Diseño de sub-ensamble (Partes mecánicas y estructura): elaboración de diseño CAD partes mecánicas, estructura del dispositivo y dispositivo en general; visualizando los grados de libertad que requiere el mismo para un desempeño adecuado.
 - Diseño de sub-ensamble (Partes electrónicas y de monitoreo): identificación de posibles partes electrónicas, su interconexión y modo de monitoreo; además de su ubicación en el equipo.
 - Diseño de ensamble (maqueta): elaboración de diseño CAD para la maqueta, en donde se tendrá en cuenta los grados de dificultad que debe sortear el equipo en una tubería, tales

como: cambios de diámetro en el tubo, obstáculos en diferentes secciones de la tubería, roturas, giros derecha o izquierda (0° - 90°), inclinaciones variadas de tubería (0° - 90°), extensión de la maqueta y el material a emplear.

3. Selección de materiales y dispositivos: se identifican los materiales y elementos eléctricos, electrónicos, mecánicos y demás, a adquirir; se envían diseños de partes no comerciales a elaborar y se establece el presupuesto para el proyecto.

Etapa 3. Construcción

1. Interconexión tarjeta de control-dispositivos: se realiza el enlace entre la tarjeta de control y los diferentes dispositivos a implementar (Motores, sensores, actuadores, cámara, otros), observando su funcionamiento y control.
2. Implementación: se realiza la integración de partes, dispositivos y elementos obteniendo un ensamble inicialmente experimental para evaluar el desempeño del equipo. Esta fase se divide en dos:
 - Implementación (dispositivo): ensamble de las partes, dispositivos, tarjetas, y demás elementos que se contempla hacen parte de la construcción del equipo de inspección de tuberías.
 - Implementación (maqueta): ensamble de los diferentes materiales de la maqueta de modo que cumpla con las propuestas de diseño anteriormente mencionadas, basados en el estado de tuberías reales.
3. Adaptación y diseño de software: implementación de un sistema (software) de marcha, censado, visualización y detección de fallas.

Etapa 4. Validación del funcionamiento del robot

1. Comprobación y evaluación del funcionamiento del dispositivo: se pondrá a prueba los elementos entregables de modo que cumplan con los objetivos planteados y a su vez, se definirá y desarrollará el control de mando. Las pruebas a realizar son: posicionamiento del robot en el interior de la tubería, velocidades que alcanza en tuberías horizontal y vertical, adaptabilidad al cambio de diámetro y dirección de la tubería, identificación de rupturas en paredes de la tubería y adquisición, visualización y almacenamiento de imágenes del interior de la tubería.
2. Análisis de funcionamiento (Mejoras): se realizan ajustes o adecuaciones tanto a diseño de software como de hardware de acuerdo con el desempeño que el dispositivo haya mostrado; en pro de mejorar su funcionamiento.

Etapa 5. Conclusiones

Se muestran los resultados obtenidos y el desempeño que logró el dispositivo, además se verifica que éstos hayan sido acordes a lo propuesto en el proyecto, de lo contrario se fundamenta el por qué no lo fue.

4.2 Especificaciones de diseño y datos de partida

En la actualidad existen diversas clases de robots que recorren internamente tramos de tubería, pero en su mayoría no cuentan con características ya sea mecánicas, electrónicas o físicas que les permita realizar giros y ascensos por la tubería. Por lo tanto, a pesar de la gran variedad de prototipos existentes no se ha logrado enfocar sus desarrollos en equipos que sean capaces de abordar todos o la mayoría de los obstáculos o adversidades que pueda presentarse en dicho medio.

Para el diseño del robot se han preestablecido unas especificaciones o características que éste debe cumplir y ser capaz de afrontar, las cuales son:

- Desplazarse con agilidad en tuberías vacías (velocidad de desplazamiento superior a 14 cm/s en secciones rectas).
- Realizar giros de 45° y 90° (giros presentes en codos de tubería).
- Desplazarse horizontal y verticalmente (ascender y descender) por tuberías (acrílico y PVC) en vacío (Distancia máxima que podrá recorrer superior a 10m).
- Ajustarse o adaptarse a diámetros variables entre 6" y 8" (diámetros de tubería comercial).
- Ser ligero para facilitar su transporte y movilidad dentro de la tubería (peso máximo de 1.5 Kg).
- De fácil extracción en caso de atascamiento o fallos del sistema.
- De replicación sencilla y alimentación principal por cable.

Existen también datos de entrada para el diseño del robot los cuales tienen que ver con las características del medio en el que va a realizar su desplazamiento, en este caso, será puesto a prueba en una maqueta de tubería compuesta por tramos en tubo PVC y tramos en tubería de Acrílico. Estos materiales poseen especificaciones que deben ser tenidas en cuenta en el diseño del prototipo para su adecuado funcionamiento (véase Capítulo 6). En cuanto al material con el cual fue construido el robot, se eligió PLA bajo la técnica de impresión 3D, por su fácil y rápida fabricación y repetitividad, además del bajo costo que éste implica.

4.3 Concepto del Robot

Para definir el diseño más adecuado para la aplicación en la que se desea desempeñe el robot, se realiza una comparación entre las diversas estructuras, medios de desplazamiento, formas de locomoción y demás aspectos que se requieren para la conformación del robot de inspección.

4.3.1 Alternativas de concepto de robot

La selección de la alternativa adecuada para el concepto del robot se recomienda ser realizada por medio de alguno de los métodos de selección que consta como mínimo de cuatro pasos fundamentales, que son: listar los conceptos a evaluar, elegir los criterios de selección valorar el grado de cumplimiento de cada concepto respecto de cada criterio de selección y determinar el mejor concepto. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la mayoría de los métodos se basan en la intuición y experiencia del diseñador del producto.

De acuerdo con el estudio realizado por Justel D. et al. (2007), en su tabla comparativa de métodos de selección de conceptos (ver Tabla 1), clasifican los métodos estudiados en tres: métodos de baja, media y alta complejidad.

Tabla 1. Métodos de evaluación y selección de concepto.

MÉTODOS		MÉTODOS DE PUGH			AHP-Saaty (1978)	Pahl & Beitz (1984)	MÉTODOS DE QFD		Método de Fuzzy-Thurston & Carnahan (1992)	
		Raing/weigthing (1976)	Convergencia controlada (1981)	Modificados Takai & Ishi (2004)			Harr et al. (1993)	Justel et al. (2006)		
PASOS	1)	Diseños conceptuales	X	X	X	X	X	X	X	
		Grado de novedad de los diseños							X	
		Correlación diseños conceptuales						X		
2)	Criterios de evaluación	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Grado de importancia de los criterios (pesos)	X		X	X	X	X	X	X	
	Criterio del coste mayor importancia			X						
	Definición de objetivos			X					X	
	Parámetros de medida del criterio y unidades					X				

	El método obtiene los pesos de los criterios				X				
3)	Interrelación diseños Vs criterios	X	X	X	X	X	X	X	X
	Evaluación en referencia a objetos								
	Evaluación en parejas de concepto		X	X	X				
	Evaluación en referencia a funciones de valoración					X			
4)	Selección de concepto	X	X	X	X	X	X	X	X
	VARIABLES DE INFLUENCIA							X	
	Optimización de concepto		X				X		
DIFICULTAD DE USO		BAJA	BAJA	BAJA/MEDIA	BAJA	MEDIA	BAJA	MEDIA	ALTA

La selección del concepto de robot se ha realizado por medio de uno de los métodos de baja complejidad, como lo es el Método de Pugh de la Tabla 2 que consiste en realizar una comparativa entre las diferentes opciones de diseños que se tienen en la actualidad para cada aspecto por definir, frente a criterios de evaluación definidos. Por medio de cuadros comparativos se asigna valores ponderados a cada solución y al final se obtiene la solución más viable para esta aplicación realizando sumatorias para cada opción de diseño.

Tabla 2. Métodos de Pugh.

PASOS		MÉTODOS DE PUGH		
		Raiting/weighting method (1976)	Convergencia controlada (1981)	Métodos modificados, Takai & Ishii (2004)
1)	Diseños conceptuales	x	x	x
2)	Criterios de evaluación	x	x	x
	Importancia criterios (W_i)	Escala de 1 a 5		Escala de 0 a 1 ($\sum W_i=1$)
	Coste tiene mayor importancia			x
	Definir objetivos			x
3)	Grado de cumplimiento diseños Vs criterios	Escala de 0 a 5	“+”, “-” y “S”	Escala de 1 a 5 y de 0 a 5
	Evaluación en referencia a objetivos			
	Evaluación en parejas de concepto		x	x
4)	Algoritmo de selección	x	x	x

Algoritmo	$\sum_{j=1}^J W_i * r_{ij}$	$\Sigma+$ $\Sigma-$ ΣS	1. Puntuación performance 2. Puntuación Coste 3. Puntuación Total = Punt Per/Punt Coste
Optimización del concepto		x	

Para el diseño del robot de inspección se tuvo en cuenta tres conceptos: medio de desplazamiento -Tabla 3-, mecanismo para adaptabilidad al diámetro -Tabla 4-, generación de movimiento (desplazamiento) -Tabla 5-. Generando una tabla para cada uno de ellos empleando el Método de selección de conceptos de Pugh.

Tabla 3. Selección de medios de desplazamiento.

Concepto	Orugas	Ruedas	Tipo Gusano	Superficie Deslizante	Serpiente	Caminador
Maniobrabilidad Horizontal	R	+	-	-	-	-
Maniobrabilidad Vertical	E	S	+	-	-	-
Paso de dobleces del tubo	F	+	-	-	+	+
Tracción	E	-	+	-	-	-
Costo de fabricación	R	+	+	-	-	S
Facilidad de Ensamblaje	E	+	-	-	-	-
Complejidad en Diseño	N	+	-	-	-	-
Número de Partes	C	+	-	-	-	-
Peso	I	+	-	-	-	-
$\Sigma+$	A	8	3	0	1	1
$\Sigma-$		1	7	10	9	8
ΣS		1	0	0	0	1

Teniendo como base los resultados de la Tabla 3, se definió cuál sería el medio que mejor se adaptara a la necesidad del proyecto, obteniendo como resultado que el medio de desplazamiento debe ser por medio de ruedas. Se definió también la forma de lograr contacto entre el/los medios de desplazamiento y la tubería, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Selección de mecanismo para adaptabilidad al diámetro.

Concepto	Hidráulica	Muelles	Amortiguadores	Neumática	Suspensión Ajustable	Husillo	Piñón Cremallera	Pasadores en Posición
Control	R	-	-	S	S	+	S	-
Costo de Fabricación	E	+	-	S	-	+	+	+
Facilidad de Fabricación	F	+	+	S	+	+	+	+
Facilidad montaje	E	+	+	S	S	+	+	+
Complejidad en Diseño	R	+	S	S	-	+	+	+
Número de Partes	E	+	S	S	S	+	+	+
Peso	N	+	S	S	-	+	+	+
Tamaño	C	+	S	S	S	+	-	+
Facilidad Mantenimiento	I	+	S	S	S	+	+	+
Fuerza Normal Disponible	A	-	-	S	-	S	S	S
Rapidez al cambio de posición		+	S	+	+	-	-	+
$\Sigma+$		9	2	1	2	9	7	9
$\Sigma-$		2	3	0	4	1	2	1
ΣS		0	6	10	5	1	2	1

Se concluyó que las dos mejores opciones que se tenían para lograr el contacto entre las ruedas ya definidas y la tubería son: el husillo, que permite regular progresivamente la separación de las ruedas con la sección, sin embargo, no realizaría movimientos rápidos para la adaptabilidad del robot y sería un sistema bastante pesado; la otra opción es por amortiguador el cual sí permite una rápida adaptabilidad al diámetro de la tubería y es menos pesado. Por lo tanto, se optó por emplear amortiguadores. Se definió también el tipo de amortiguador, que en esta tesis de acá en adelante se hará referencia a éste como resorte, en donde se propuso dos clases: resortes de tensión y resortes de torsión. De donde se consideró que la mejor opción era el resorte de torsión por la facilidad de su montaje, puesto que solo requiere de un pasador o eje en la articulación para que ejerza su función deseada.

Tabla 5. Selección de medios de generación de movimiento (desplazamiento).

Concepto	3x3 w	1x3 w	3x3 b	1x3 b	4x4 w	2x4 w	4x4 b	2x4 b
Maniobrabilidad	R	-	S	-	S	+	S	-
Coste	E	+	S	+	S	+	S	S
Facilidad montaje	F	+	-	-	-	+	-	-
Complejidad en diseño	E	+	-	-	-	+	-	-
Número de partes	R	+	S	+	S	+	S	+
Peso	E	+	S	+	S	+	S	+

Tamaño	N C I A	+	S	+	S	+	S	+
Facilidad mantenimiento		+	-	+	-	+	-	+
Paso por doblez y curvas		-	S	-	S	+	S	-
Uso de energía		+	S	+	S	+	S	+
$\Sigma+$		8	0	6	0	10	0	6
$\Sigma-$		2	3	4	3	0	3	4
ΣS		0	7	0	7	0	7	0

Para este caso, se definió generar el movimiento por medio de motores y las opciones que se tuvieron en cuenta son las mostradas en la Tabla 5. Decisión que consistía en concretar cuántos motores se emplearían y su ubicación en el robot, ya fuese directamente en el eje de la rueda o sobre el cuerpo del robot o en partes intermedias entre estos dos últimos.

Tomando como opción final implementar dos motores acoplados en su rotor directamente al eje de cada rueda para facilitar la construcción del robot y la generación del movimiento. Dichos motores se localizarán en extremidades opuestas para evitar efectos giratorios al desplazarse.

4.3.2 Definición de concepto del robot

Para el Robot de inspección interna de tubería se definió un concepto basado en las ventajas y desventajas que tienen los dispositivos actuales. El concepto está dado de la siguiente forma (Ver Figura 25): un dispositivo compuesto por dos secciones sobre las cuales está montado de forma independiente un sistema de adaptación al diámetro de la tubería. Cada sistema de adaptación cuenta con un sistema de desplazamiento tipo ruedas.

Sobre una de las secciones, se encuentra instalado un sistema de inspección dotado de cámara y sensores especializados para dicha labor y en cuanto a la otra sección estará conectada a una línea de vida con un sistema de control externo. Las dos secciones están unidas por un sistema de adaptación a la dirección de la tubería lo que le permite ser guiado en cualquier dirección. Finalmente, una de las secciones está dotada de por lo menos un par motor con el cual se genere el desplazamiento del dispositivo.

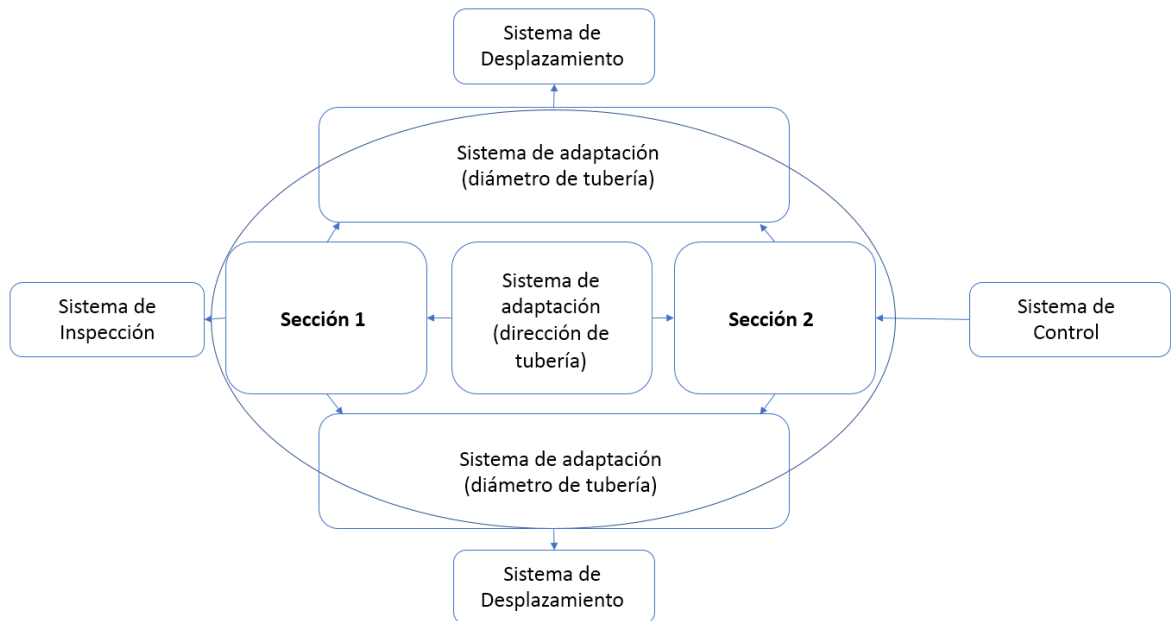


Figura 25. Diagrama de bloques: Concepto de robot de inspección interna de tubería.

4.3.3 *Propuestas de diseño*

A partir de las diversas propuestas de diseño analizadas con el Método de Pugh, se realizaron diferentes alternativas de diseño como solución al problema planteado. Se generaron conceptos que luego fueron revisados e identificadas sus ventajas y desventajas para finalmente, elegir el que más se adecuara a los requerimientos que se plantean inicialmente.

El primer concepto de robot que se generó se visualiza en la Figura 26, el cual consta de dos secciones en donde cada sección posee dos extremidades, en donde cada una está constituida por dos cilindros de diferente diámetro que se desplazan uno dentro del otro simulando el funcionamiento de un pistón por medio de un resorte de tensión que va dentro del cilindro de mayor diámetro y permite a la extremidad ajustarse al diámetro de la cavidad en que se encuentre. Dos de las extremidades cuentan con un motor que genera el movimiento de las ruedas, las cuales van conectadas directamente al eje del motor. La unión entre las dos extremidades es una articulación de tipo esférica con la cual permitiría al robot desplazarse en tuberías con cambios de dirección de 1° a 90° .

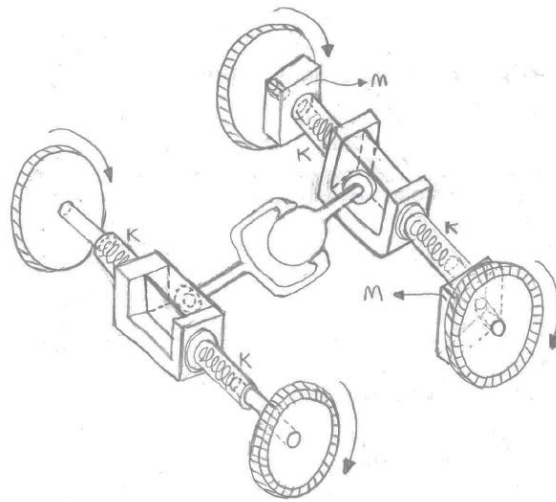


Figura 26. Concepto 1.

El segundo concepto de robot es el que se observa en la Figura 27. Al igual que el anterior concepto, consta de dos secciones que están unidas por una articulación, que en este caso es de tipo universal. Cada sección está conformada por dos extremidades con un sistema de adaptación al diámetro de la tubería por medio de resortes de torsión, que se encuentran ubicados en la unión de la extremidad con el cuerpo de la sección. El resorte genera una fuerza para un movimiento de palanca sobre la extremidad, de modo que mantiene la extremidad unida disco giratorio que se encuentra en el cuerpo de la sección. El disco giratorio es accionado por un motor el cual posiciona al disco en diferentes ángulos haciendo que la extremidad se fije a alturas diferentes y logre adaptarse a tres diámetros diferentes de la tubería.

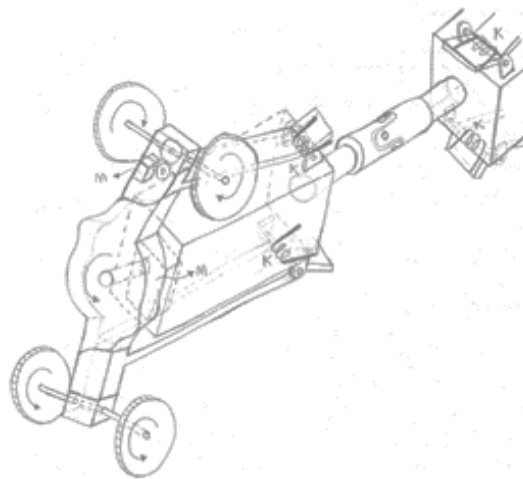


Figura 27. Concepto 2.

El tercer concepto de robot generado es el que se muestra en la Figura 28, es un robot que consta de dos secciones, cada una está comprendida por cuatro extremidades y cada extremidad posee un

par de ruedas. Dos de las extremidades cuentan con un motor cada una, el cual genera en movimiento de desplazamiento del robot. Dichos motores están sujetos a la extremidad y por medio de una caja de engranes transmiten el movimiento de rotación al par de ruedas correspondiente. Las secciones se encuentran unidas por una articulación universal. Cada extremidad en su punto de unión con la sección, cuenta con un resorte de torsión que genera una fuerza de apertura de las extremidades, conformando así una articulación pasiva con movimiento de tipo bisagra.

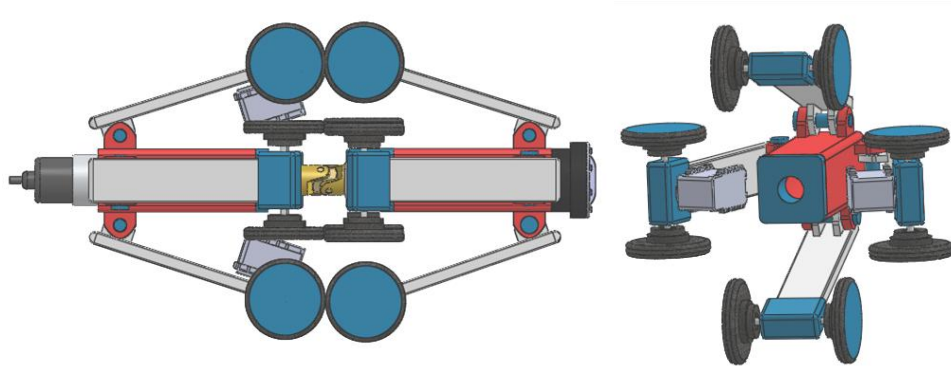


Figura 28. Concepto 3.

El cuarto concepto al igual que los anteriores consta de dos secciones. Las secciones están unidas entre sí por una articulación pasiva que comprende un resorte de tensión y una cuerda. Cada sección cuenta con cuatro extremidades; la unión entre la extremidad y el cuerpo de la sección posee un pasador sobre el cual va montado un resorte de torsión formando una articulación pasiva con movimiento tipo bisagra. Todas las extremidades poseen una rueda, seis de ellas pasivas y dos motrices. Las ruedas motrices están unidas al eje de un motor cada una, el motor genera la rotación de cada rueda tal y como se observa en la Figura 29.

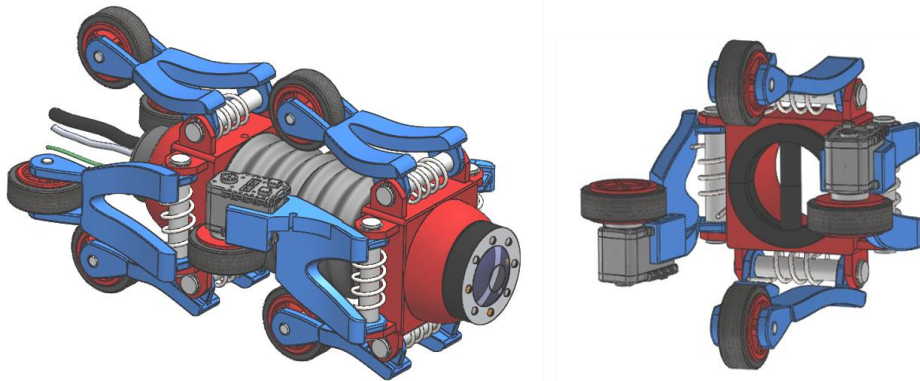


Figura 29. Concepto 4.

Este último concepto fue identificado como el que más se ajustaba a los requerimientos expuestos anteriormente. Sin embargo, fue modificado en algunos de sus componentes mecánicos (las

extremidades) para hacerlo aún más ligero, flexible y de fácil repetitividad. Dejando finalmente como diseño del robot a implementar el que se muestra en la Figura 62 y Figura 63. A partir de este diseño se elaboró la solicitud de patente para su protección, la cual a grandes rasgos se describe a continuación.

4.3.4 Diseño CAD de elementos mecánicos del Robot.

Basados en los requerimientos de diseño del robot y en las decisiones tomadas para su cumplimiento, se creó el diseño CAD del robot que se observa desde la Figura 30 hasta la Figura 36; del cual la mayoría de sus partes mecánicas fueron fabricadas en impresión 3D con filamento PLA, bajo un diseño adaptado al diámetro de la tubería a explorar como se indica anteriormente. Los demás componentes fueron adquiridos de forma comercial.

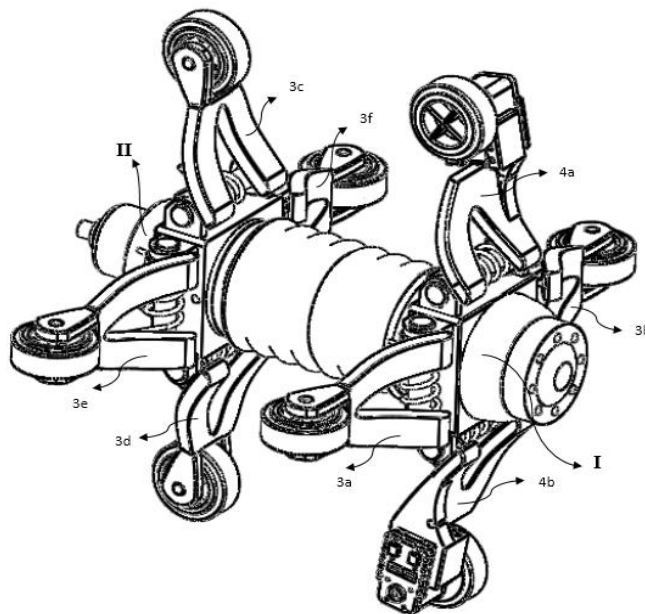


Figura 30. Diseño CAD del robot. Posición extremidades extendidas. (Vista isométrica)

El robot móvil para inspección del interior de tuberías está compuesto por dos secciones, una sección frontal (I) y una sección trasera (II). Las secciones están unidas por medio de un conector flexible.

La sección frontal (I) como se observa en la Figura 30, está compuesta por cuatro extremidades (4a, 4b, 3a, 3b). Dos de estas extremidades (4a, 4b) poseen cada una en un extremo, una rueda motriz (2a, 2b). Las ruedas motrices se encargan de generar el desplazamiento del dispositivo al estar en contacto con la superficie. Las otras dos extremidades (3a, 3b) poseen cada una en un extremo, una rueda pasiva (8a, 8b). Todas las ruedas de la sección frontal (I) estarán en contacto con la superficie del medio a inspeccionar, permitiendo el desplazamiento tanto vertical como horizontal del dispositivo en el interior de la cavidad.

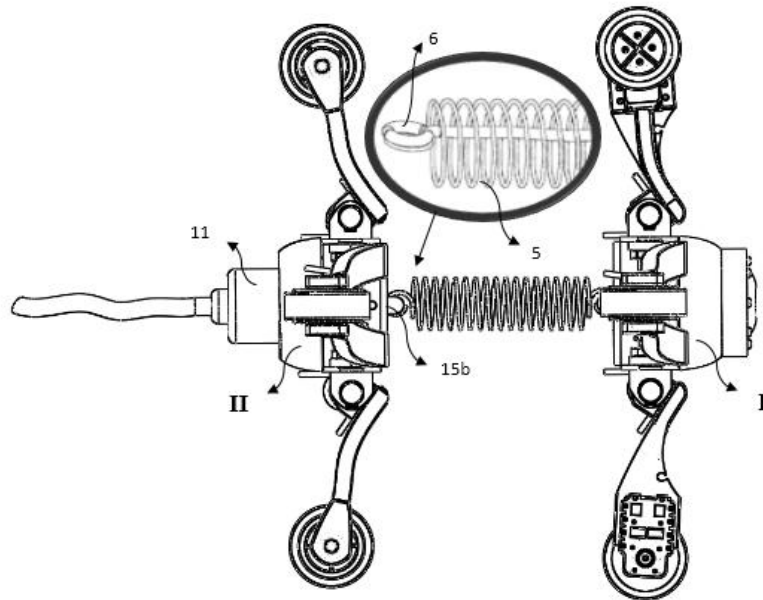


Figura 31. Diseño CAD del robot. (Vista lateral izquierda)

La sección trasera (II) está compuesta por cuatro extremidades (3c, 3d, 3e, 3f) como se evidencia en la Figura 33. Cada extremidad posee en un extremo, una rueda pasiva (8c, 8d, 8e, 8f). Las ruedas pasivas estarán en contacto con la superficie del medio a inspeccionar, permitiendo el desplazamiento de la sección trasera (II).

El conector flexible que se observa en la Figura 31, está compuesto por un resorte de tensión (5) que mantiene acoplada la sección frontal (I) a la sección trasera (II). El resorte en su interior posee una cuerda (6), que impide la elongación del resorte. El conector flexible permite adaptarse y recorrer cavidades cambiantes o no en dirección y ajustarse a dicho cambio de dirección.

Como se observa en la Figura 32 cada rueda motriz (2a, 2b) se encuentra preferentemente acoplada de forma directa a un actuador rotacional o motor (1a, 1b). Cada motor transmite el movimiento a la rueda que se encuentra conectada.

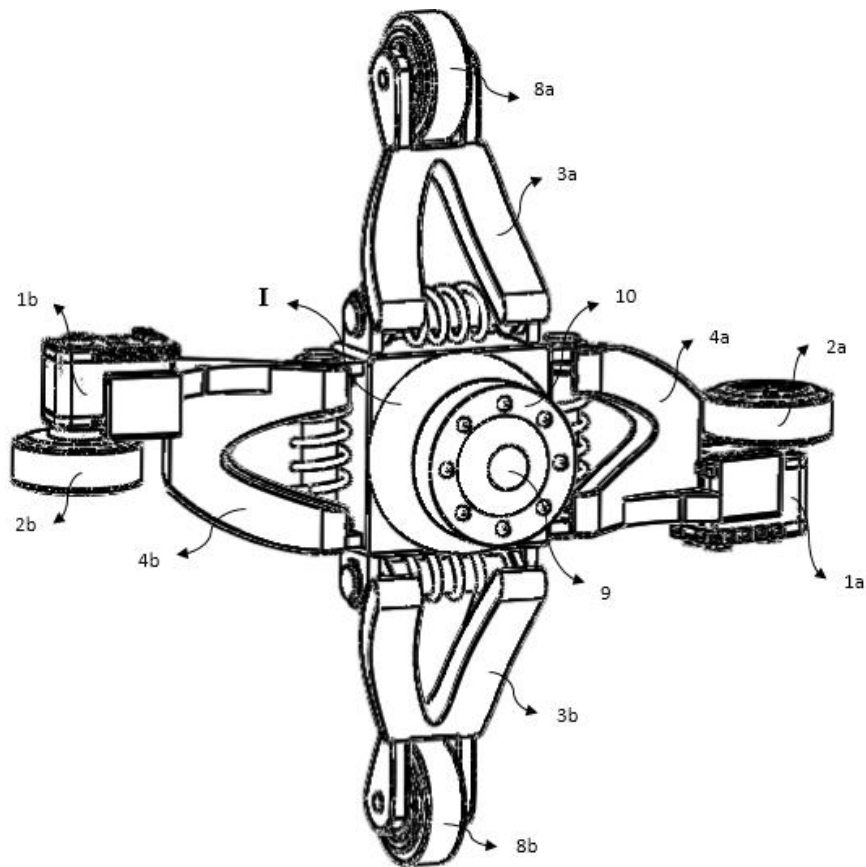


Figura 32. Diseño CAD del robot. Sección frontal I. (Vista isométrica)

Tanto las cuatro extremidades (4a, 4b, 3a, 3b) que se encuentran sujetas a la sección frontal (I) como las cuatro extremidades (3c, 3d, 3e, 3f) que se encuentran sujetas a la sección trasera (II), están unidas a su respectiva sección por medio de una articulación rotacional pasiva en forma de bisagra. Cada articulación rotacional pasiva comprende un resorte de torsión (16a, 16b, 16c, 16d, 16e, 16f, 16g, 16h) como se visualiza en la Figura 33 y Figura 35.

Los resortes de torsión permiten extender o retraer las extremidades de forma independiente permitiendo que el dispositivo se adapte al diámetro de la cavidad, tal y como se muestra en la Figura 36; y se encuentran ubicados como se observa en las Figuras 33 y 35, permitiendo de manera autónoma a cada extremidad tomar posiciones variables de ángulos menores a 90° entre su posición retraída de la Figura 34 y su posición extendida de la Figura 30, ejerciendo una fuerza sobre cada extremidad de forma que éstas se ajusten al diámetro de la cavidad, y las ruedas entren en contacto con la superficie.

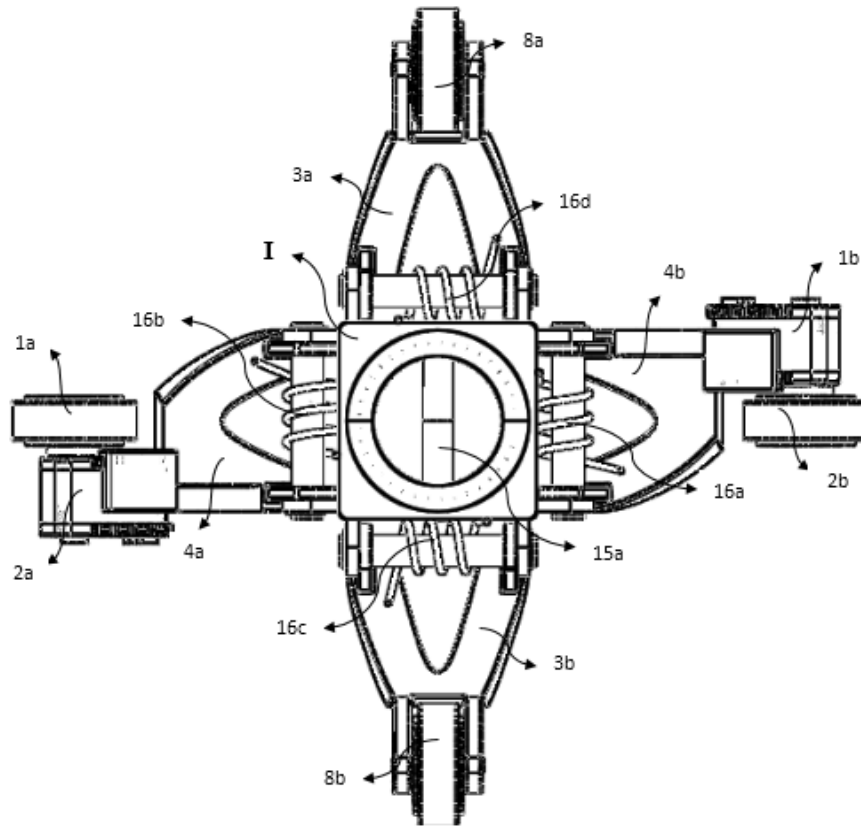


Figura 33. Vista sección trasversal de sección frontal.

La sección frontal (I) como se observa en la Figura 32 cuenta con una cámara (9) para tomar imágenes y detectar con ella defectos en las cavidades a inspeccionar, cuya señal es enviada a una unidad de control y visualización externa. La cámara cuenta con iluminación en forma de anillo centralizado (10).

En la Figura 31 se visualiza en la vista de sección transversal, el soporte de unión (15a) al cual se enlaza un extremo del conector flexible. La sección trasera (II) al igual que la sección frontal (I) tiene un soporte de unión (15b) al cual se enlaza el otro extremo del conector flexible. Con el fin de transmitir la información digital, energizar los componentes eléctricos del dispositivo y jalar el dispositivo en caso de bloqueo, a la sección trasera (II) se acopla un soporte de anclaje (11). Al soporte de anclaje se conecta un cable de vida que une la sección trasera (II) a la unidad de procesamiento, control y energía externa al dispositivo de inspección.

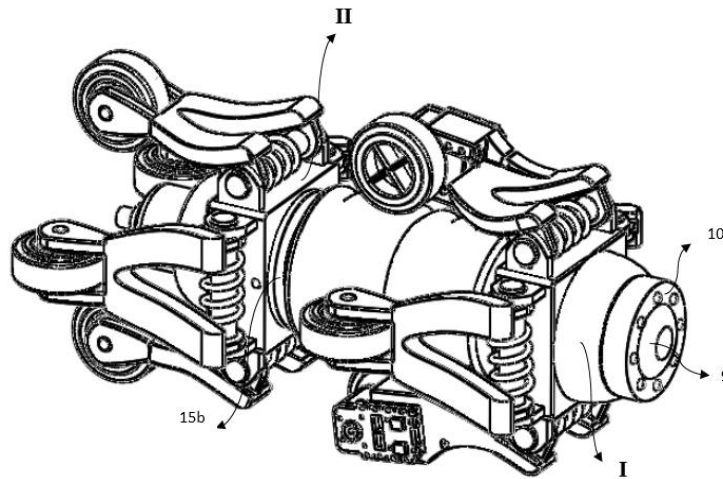


Figura 34. Diseño CAD del robot. Posición extremidades retraídas. (Vista isométrica)

Los cables de energía eléctrica y los cables de información digital y de control de los motores y de cualquier otro dispositivo eléctrico-electrónico, atraviesan al soporte de anclaje (11) y transmiten las imágenes y/o señales, a la unidad de procesamiento y control externa al dispositivo y a la cavidad a inspeccionar. La unidad de procesamiento incluye la fuente de suministro de energía para el dispositivo de inspección.

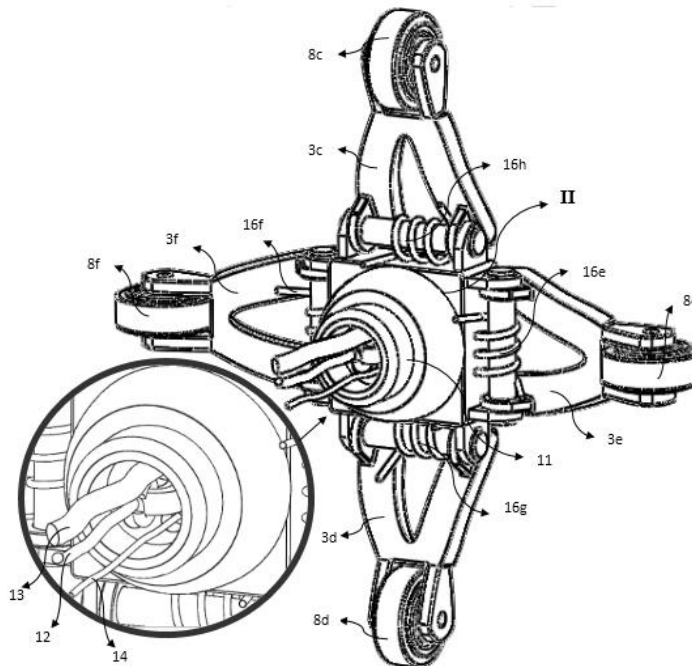


Figura 35. Diseño CAD del robot. Sección trasera II. (Vista isométrica)

El dispositivo en perspectiva se muestra en las Figura 30 y Figura 34, en donde la cantidad de extremidades estará limitada por la forma de la sección transversal tanto de la sección frontal (I), como de la sección trasera (II), y del ancho de cada extremidad. La orientación de la sección

frontal (I) respecto a la sección trasera (II) podrá variar de 0 grados a un ángulo inferior a 180 grados, comprendidos entre 0° y 360° en la rotación relativa respecto al eje de desplazamiento, por medio del conector flexible (7) que se observa en la Figura 31.

El robot para inspección se adapta a diámetros cambiantes – diámetro pequeño (17a) y diámetro grande (17b)- de la cavidad, extendiendo y contrayendo las extremidades que están en contacto con la superficie de la cavidad. El diámetro de la cavidad definirá el nivel de extensión de las extremidades simultáneamente, en especial si la cavidad a inspeccionar es vertical, como se puede observar en la Figura 36. En cuanto a la inspección de cavidades horizontales, el robot no tiene un límite máximo en cuanto al diámetro de la cavidad.

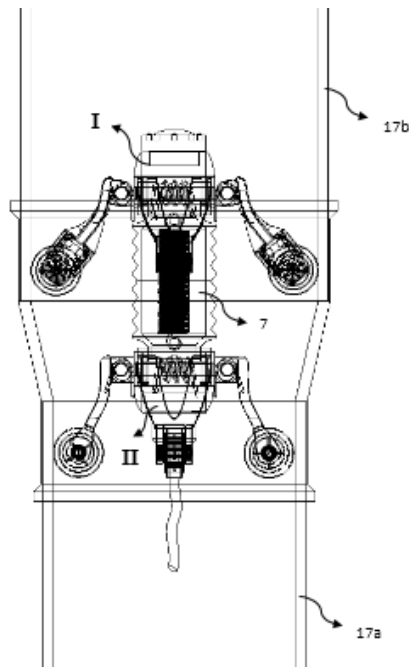


Figura 36. Diseño CAD del robot. En interior de tubería de diámetro variable.

El mínimo diámetro de la cavidad que podrá inspeccionar el dispositivo está dado por el diámetro alcanzado al ubicar las extremidades del robot en su posición totalmente retraídas, como se visualiza en la Figura 34. Por tanto, este dispositivo inspecciona cavidades de diámetros variables.

4.4 Diseño mecánico

Se realizó el análisis estático del robot para definir algunas características del mecanismo que lo compone, como fuerzas requeridas sobre cada extremidad (F), fuerza de rozamiento requerida en

cada rueda (F_r) y ángulo de apertura de las extremidades para mantenerse estático en tuberías verticales (θ).

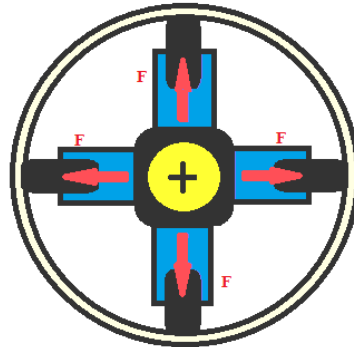


Figura 37. Diagrama de distribución de fuerzas en cada sección del robot. (Vista frontal)

Debido a el diseño del robot, las fuerzas se presentan equidistantes entre sí, como se observa en la Figura 37, lo que facilita el análisis para hallarlas puesto que para este caso su magnitud es igual y sus direcciones son opuestas en pares de fuerzas.

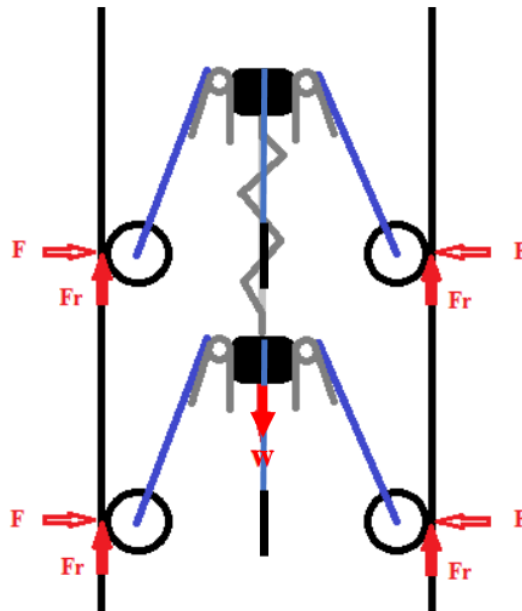


Figura 38. Diagrama de distribución de fuerzas del robot-superficie. (Vista lateral)

El diagrama general de fuerzas en el robot se muestra en la Figura 38, en donde se evidencia que en las dos secciones se presentan las mismas fuerzas. Por lo tanto, el análisis de fuerzas se reduce a una sola sección, con fuerzas equidistantes y opuestas en pares de fuerzas, que a su vez deben vencer la fuerza generada por el peso del dispositivo debida a la fuerza de la gravedad (W); fuerza que para los cálculos matemáticos estará distribuidas en magnitudes iguales para las 8 ruedas del robot.

4.4.1 Análisis estático del robot

En cuanto al análisis estático, de acuerdo con el diseño elegido, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Cada sección está conformada por 4 extremidades las cuales cada una posee en su extremo -distante al cuerpo del robot- una rueda que estará en contacto permanente con la superficie. Las dos secciones se encuentran una seguida a la otra de forma que la posición de las extremidades de ambas coincida entre sí.
- La fuerza de fricción estática total para que el robot esté en equilibrio estático en una tubería vertical, estará distribuida en partes iguales para cada punto de contacto con la superficie, es decir, la fuerza de fricción en cada rueda (F_r^i) será igual a un octavo de la fuerza de fricción total requerida (F_r).
- La fuerza perpendicular a la superficie en cada punto de contacto (F) será proporcional ($1/8$) a la fuerza total requerida para mantener el robot en equilibrio estático en una tubería vertical.
- La suma de la longitud de dos extremidades (L) y el diámetro del cuerpo de la sección (D) debe ser superior al diámetro máximo de la tubería a inspeccionar (6" a 8") (Véase Figura 39).
- El diámetro del cuerpo de cada sección (D) no puede ser superior al diámetro mínimo de la tubería a inspeccionar.
- El diagrama de cuerpo libre para el robot se reduce al análisis de una extremidad en contacto con la superficie debido a la simetría existente en todas sus extremidades, donde W es el peso total del robot.

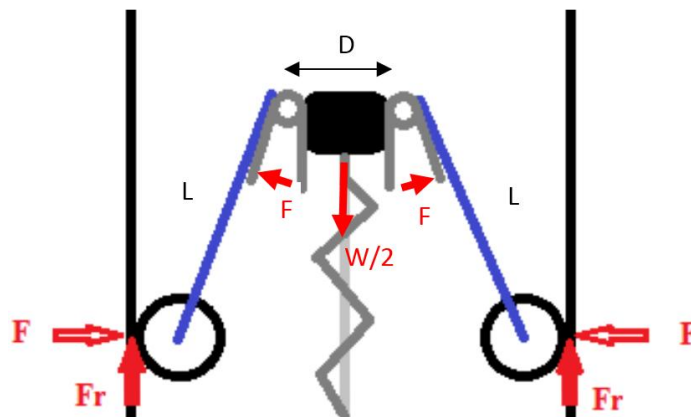


Figura 39. Diagrama de fuerzas de una sección.

Como se observa en la Figura 39, el robot cuenta en cada extremidad con un resorte de torsión, mecanismo del cual se debe conocer su funcionamiento mecánico, pues éste tiene incidencia en el análisis estático del robot, debido a que es el elemento que va a propiciar la fuerza necesaria para mantener en equilibrio al robot.

De acuerdo con lo anteriormente definido, se presenta el análisis estático requerido para lograr un adecuado diseño y funcionamiento del robot, en donde se analizará el equilibrio de fuerzas en la extremidad. En la Figura 40 se muestra el diagrama de cuerpo libre empleado para esto.

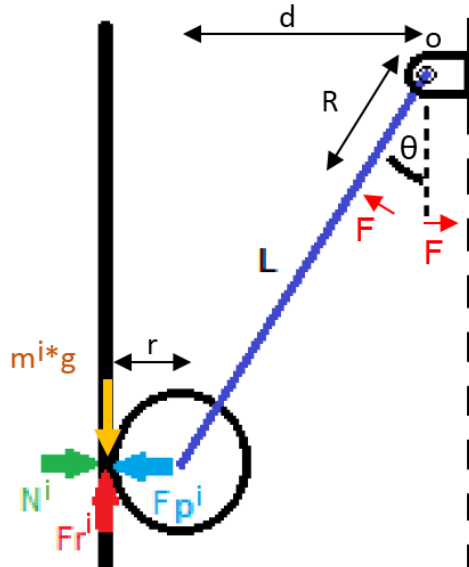


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre para una extremidad.

Para que el robot esté en equilibrio o en estado estático se realiza el cálculo de las fuerzas presentes en el mecanismo aplicando el análisis de Diagrama de cuerpo libre, de acuerdo con los datos conocidos, además para este análisis se asume que el peso se reparte en partes iguales para cada extremidad en contacto con la superficie.

De esta forma se tiene que la masa en cada extremidad (m^i) es 1/8 de la masa total (M).

$$\Sigma Fy = 0 \quad (4.1)$$

$$Fr = M * g \quad (4.2)$$

De donde, por definición se tiene:

$$Fr = \mu * N \quad (4.3)$$

Siendo μ , el coeficiente de rozamiento estático entre caucho SBR y acrílico, y N la fuerza normal en el punto de contacto entre las superficies.

Por lo tanto:

$$\mu * N = M * g \quad (4.4)$$

Siendo g, la fuerza de la gravedad actuante en el robot.

$$N = \frac{M * g}{\mu} \quad (4.5)$$

Ahora:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$F_p = N \quad (4.6)$$

Donde F_p , es la fuerza de presión que debe propiciar la rueda sobre la superficie en contacto de la tubería para que las ruedas del robot se mantengan siempre en contacto y el robot pueda ascender por la tubería.

Reemplazando (4.5) en (4.6), se tiene:

$$F_p = \frac{M * g}{\mu} \quad (4.7)$$

La fuerza de presión que debe ejercer cada rueda sobre la pared de la tubería (F_p^i) es proporcional a la fuerza total hallada F_p , según la cantidad de ruedas que el robot tenga. Para este caso, el robot cuenta con 8 ruedas, una en cada extremidad, por lo tanto, la fuerza de presión individual es:

$$F_p^i = \frac{M * g}{8 * \mu} \quad (4.8)$$

Donde:

$$g = 981 \text{ cm/s}^2$$

$$M = 1 \text{ Kg}$$

$$\mu = 0.71$$

Reemplazando los datos en la ecuación 4.8, se tiene:

$$F_p^i = \frac{1 \text{ kg} * 981 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}}{8 * 0.71}$$

$$F_p^i = 172.71 \frac{\text{kg} * \text{cm}}{\text{s}^2}$$

Una vez teniendo la fuerza que se requiere aplique cada rueda sobre la pared de la tubería, se obtienen los valores de los demás requerimientos.

$$L= 13 \text{ cm}, r= 2.7 \text{ cm}, d= 4.25 \text{ cm}, \theta= 6.85^\circ$$

Siendo:

r: Radio de la rueda.

d: Distancia en el eje X desde el contorno del cuerpo de la sección al centro de la rueda.

θ : Ángulo de apertura de la extremidad.

Finalmente se halla la fuerza que el resorte debe ejercer sobre la extremidad (F) para lograr el equilibrio estático del robot en una tubería vertical y a su vez la posición de dicha fuerza, haciendo uso de la Segunda Ley de Newton aplicada a pares (Ver figura 41).

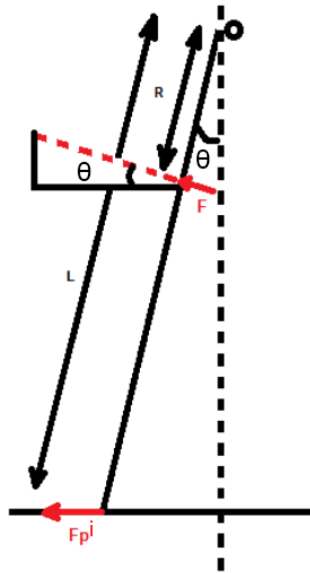


Figura 41. Diagrama de fuerzas en una extremidad.

$$\Sigma \tau_o = 0$$

$$-F_p^i * L * \cos\theta - F * R = 0 \quad (4.9)$$

Donde R, es la distancia existente entre el centro de la articulación y el punto sobre la extremidad en donde ejerce la fuerza el resorte.

Despejando la fuerza que debe aplicar el resorte de la expresión anterior, se tiene:

$$F = \frac{F_p^i * L * \cos\theta}{R} \quad (4.10)$$

$$F = \frac{172.71 \frac{kg * cm}{s^2} * 13cm * \cos 6.85^\circ}{R}$$

$$F = \frac{2229.2 \frac{kg * cm^2}{s^2}}{R}$$

Con la ecuación 4.10, se identificó el resorte que cumpliera con la relación de dicha expresión. Eligiendo un resorte con valores:

$$T = 790.913 N - mm, R = 2.54 cm$$

Donde T, es el par ejercido por el resorte sobre la extremidad.

Obteniendo de la ecuación 4.10 una fuerza mínima requerida de:

$$F = 8.77 N$$

Para una fuerza máxima aplicada por el resorte seleccionado de:

$$F_{resorte} = 31.14 N$$

Las fuerzas que estarán presentes en la unión de cada articulación, por medio de análisis estático de fuerzas.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_x + F * \cos\theta + F_p^i = 0 \quad (4.11)$$

$$R_{x_o} = -F_p^i - F * \cos\theta \quad (4.12)$$

$$R_{x_o} = -6.98 N$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y + F * \sin\theta = 0 \quad (4.13)$$

$$R_{y_o} = -F * \sin\theta \quad (4.14)$$

$$R_{y_o} = -1.05 N$$

Donde R_x , es la componente en el eje X de la fuerza existente en cada articulación y R_y , es la componente en el eje Y de la fuerza existente en cada articulación.

Basados en los anteriores resultados, se halla el par requerido por los motores para que el mecanismo logre ascender por la tubería. Sabiendo que la fuerza de rozamiento estática presente en cada punto de contacto con la superficie por parte de las extremidades es:

$$F_r^i = 122.2624 \frac{kg * cm}{s^2} = 1.2226 N$$

Teniendo en cuenta que el robot posee sólo dos motores por cada sección, la fuerza de rozamiento que deberá superar cada motor en el punto de contacto de las respectivas ruedas motrices será:

$$F_r^m = 2.4525 N$$

Por lo tanto, el par motor mínimo requerido por cada actuador es de:

$$T_m = 0.0613 N - m$$

Para lo cual se eligió el servomotor Dynamixel AX-12A, el cual tiene un par motor de 1.5 N-m.

4.4.2 Cálculo de coeficiente de fricción entre acrílico y caucho.

Para hallar la fuerza que se requiere ejerza el resorte de torsión sobre la extremidad, para lograr un equilibrio estático de éste en el interior de la tubería en posición vertical, es necesario conocer el coeficiente de fricción entre los dos materiales en contacto. Por lo tanto, se halló de forma experimental esta constante debido a que no se logró encontrar dicho valor en la literatura existente.

La actividad consistió en ubicar un peso (Ver Figura 42) en uno de los extremos de la tubería -en su interior como se muestra en la Figura 43- e ir elevando este extremo.

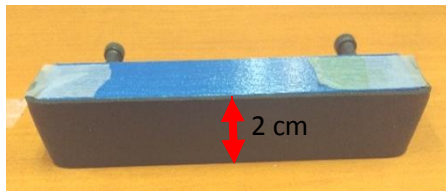


Figura 42. Peso para prueba.



Figura 43. Ubicación del peso en el interior de la tubería.

El otro extremo de la tubería siempre se encuentra sobre una superficie de referencia horizontal como se muestra en la Figura 44, sobre la cual se hace deslizar.

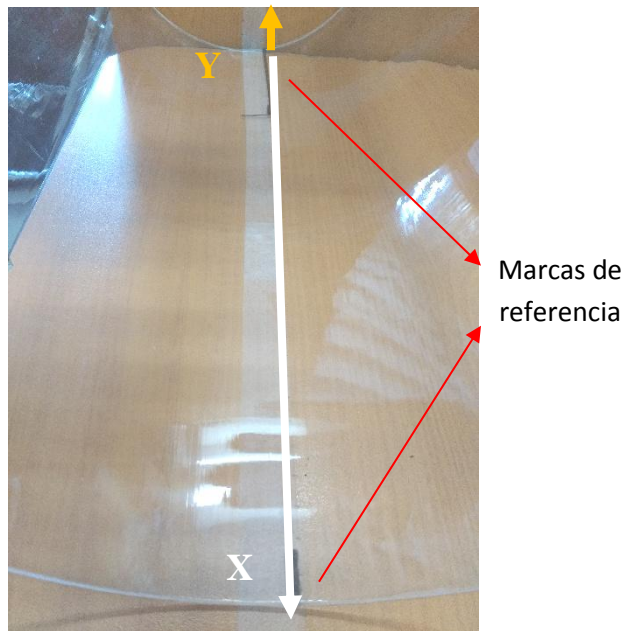


Figura 44. Ejes y referencias en la prueba.

Al interior de la tubería se marcaron líneas de referencia para controlar que el movimiento de esta fuese en un plano vertical (Ver Figura 45) tomando como plano para dicho movimiento el formado por los ejes métricos puestos como X e Y.

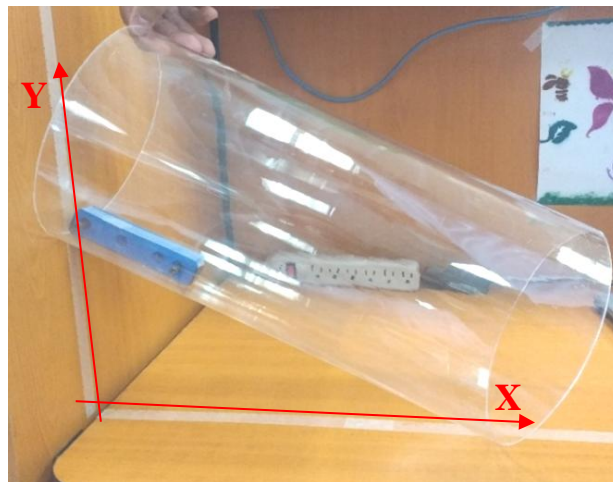


Figura 45. Prueba en curso.

Con esta prueba experimental se obtuvo los datos que se pueden detallar en la Tabla 6. La prueba se realizó para tres diferentes anchos de caucho, eligiéndose un ancho de la rueda de 2cm, de acuerdo con resultados de esta prueba.

Tabla 6. Resultados de prueba de fricción estática.

Ancho	Masa Caucho [g]	Masa Total [g]	Peso [N]
0.8cm	m1	3.3111	39.3364
2cm	m2	7.8645	43.8898
2.5cm	m3	10.045	46.0703
Masa Objeto [g]		36.0253	

Largo de Rampa	Fuerza de Gravedad
49 cm	981 cm/s ²

Altura [cm]			Ángulo de Inclinación [°]			Coeficiente Fricción		
m1	m2	m3	Theta 1	Theta 2	Theta 3	μ1	μ2	μ3
27.5	28.4	29	34.14	35.42	36.29	0.678	0.7111	0.7343
27.3	28.3	29.1	33.86	35.28	36.43	0.671	0.7075	0.7381
27.4	28.5	28.9	34	35.56	36.14	0.674	0.7148	0.7302
27.3	28.4	29	33.86	35.42	36.29	0.671	0.7111	0.7343
27.4	28.4	28.9	34	35.42	36.14	0.674	0.7111	0.7302
27.5	28.5	29.1	34.14	35.56	36.43	0.678	0.7148	0.7381
27.3	28.4	28.9	33.86	35.42	36.14	0.671	0.7111	0.7302
27.4	28.4	29	34	35.42	36.29	0.674	0.7111	0.7343
27.3	28.3	28.9	33.86	35.28	36.14	0.671	0.7075	0.7302
27.3	28.5	29	33.86	35.56	36.29	0.671	0.7148	0.7343
27.3700	28.4100	28.9800	33.9580	35.4340	36.2580	0.6733	0.7115	0.7334
PROMEDIO								

De los que cabe nombrar para fines de la obtención del coeficiente de rozamiento estático, los siguientes:

Masa del objeto: 43.89 g

Altura promedio (eje Y): 28.42 cm

Longitud del tubo: 49 cm

Con esta información se obtiene el ángulo de inclinación del tubo θ , así:

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{28.42}{49}\right) = 35.45^\circ$$

Ángulo promedio de inclinación del tubo: 35.43°

Fuerza de gravedad (g): 981 cm/s²

Con estos datos, se realiza el diagrama de cuerpo libre -Figura 46- para un objeto deslizando en un plano inclinado, pudiéndose hallar de esta forma el valor del coeficiente de fricción estático de forma experimental-teórica.

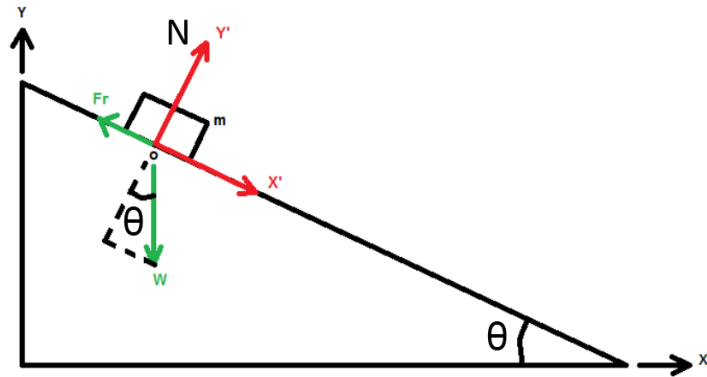


Figura 46. Diagrama de cuerpo libre del sistema masa-plano inclinado.

$$\Sigma F_{x'} = 0, \text{ entonces: } W * \text{sen}\theta - Fr = 0 \quad (4.15)$$

$$Fr = W * \text{sen}\theta \quad (4.16)$$

Donde:

W= Peso del objeto

Fr= Fuerza de rozamiento entre las superficies en contacto

θ = Ángulo de inclinación del plano respecto a la horizontal

Por definición se tiene que:

$$Fr = \mu * N \quad (4.17)$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción estático entre superficies en contacto

N= Fuerza normal a la superficie, punto o plano en contacto con el objeto

Reemplazando la ecuación 4.17 en la ecuación 4.16 y despejando μ , se tiene:

$$\mu = \frac{W * \text{sen}\theta}{N} \quad (4.18)$$

Ahora,

$$\Sigma F_{y'} = 0, \text{ entonces: } N - W * \text{cos}\theta = 0 \quad (4.19)$$

$$N = W * \text{cos}\theta \quad (4.20)$$

Reemplazando la ecuación 4.20 en la ecuación 4.17, se obtiene el valor de μ .

$$\mu = \frac{W * \text{sen}\theta}{W * \text{cos}\theta} = \text{tan}\theta \quad (4.21)$$

$$\mu = 0.71$$

Con este resultado, se estima que el coeficiente de rozamiento entre el caucho y el PVC, será superior o igual a este valor.

4.5 Diseño CAD del prototipo

Luego de realizar la evaluación de la pertinencia respecto a los requerimientos propuestos y a la función de los diseños propuestos (ver Anexo A) se opta por la construcción del diseño de la Figura 47. Para esta fase del proyecto se requería plasmar las decisiones tomadas en un diseño CAD 3D que permitiera visualizar el prototipo y su funcionalidad, para ello por medio de Software de diseño se logró tener idea de cómo sería éste en la realidad. A su vez, como el diseño fue a escala 1:1, se realizó la impresión de las piezas en 3D una vez evaluada la pertinencia del diseño respecto a los requerimientos establecidos y su función.

Una vez definido el concepto del robot se realizó el modelo CAD a escala del conjunto de componentes mecánicos que conforman el robot (ver Anexo B), para luego ser impresos en PLA con impresora 3D. Con esto se visualiza la forma de ensamble y movimientos que podrá lograr el prototipo una vez ensamblado. Este diseño previo para la impresión se visualiza en la Figura 47.

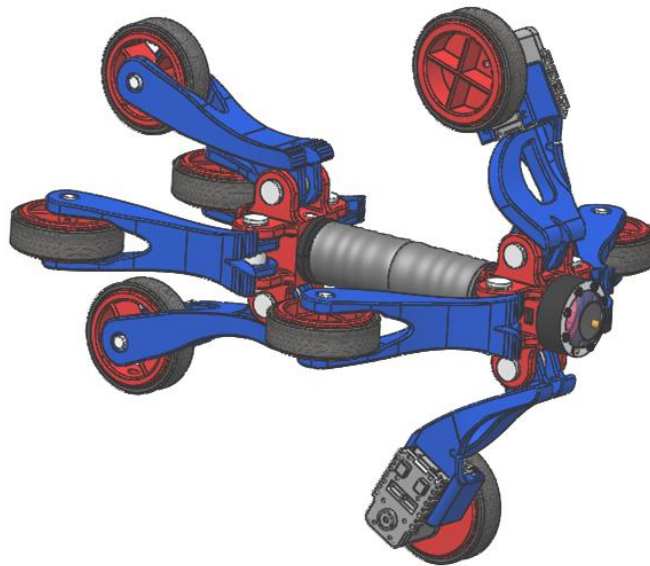


Figura 47. Diseño CAD de prototipo. Concepto 5.

Capítulo 5

CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Teniendo impresas en 3D todas las piezas mecánicas del prototipo, se realiza el ensamble de éstas junto con los demás elementos que lo conforman como lo son: pasadores, rodamientos, resortes, etc., de modo que se obtiene como resultado el prototipo de la Figura 48.



Figura 48. Prototipo final ensamblado.

Como se observa en la Figura 48, el diseño CAD mostrado en la Figura 47 coincide con el prototipo final ensamblado y sus componentes mecánicos y electrónicos se describen a continuación.

5.1 Componentes mecánicos

Los componentes mecánicos están distribuidos en dos secciones. Cada sección cuenta con cuatro extremidades y a su vez cada extremidad posee una rueda, ya sea motriz o pasiva. El ensamble de las secciones se visualiza en la Figura 49.



Figura 49. Ensamble de secciones.

De acuerdo con el montaje de las secciones, en la Figura 50 se presentan los componentes que contiene cada extremidad pasiva como: una extremidad, 2 rodamientos un pasador y una rueda.



Figura 50. Ensamble de extremidad pasiva.

En cuanto a la extremidad motriz, se visualizan todos sus componentes en la Figura 51, dichos componentes son: una extremidad, un motor, una rueda.

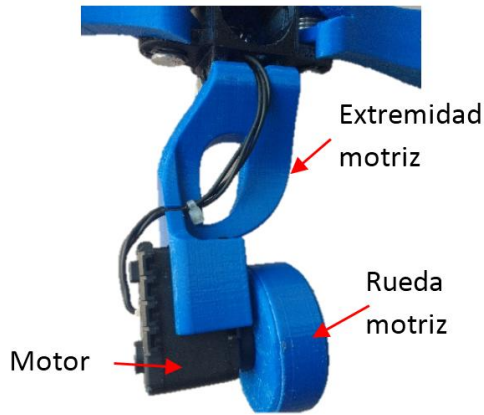


Figura 51. Ensamble de extremidad motriz.

Las secciones se encuentran conectadas entre sí, por medio de un conector flexible, cuyos elementos que lo componen se muestran en la Figura 52 -a) resorte de tensión, b) cuerda y c) recubrimiento plástico-.

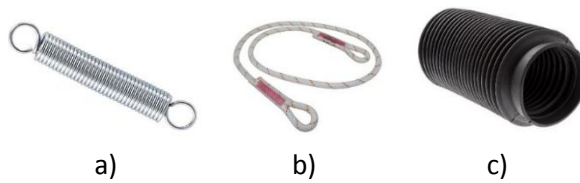


Figura 52. Componentes de conector flexible.

Dentro de los componentes mecánicos del robot, se encuentran los resortes y pasadores que dan soporte y firmeza a las extremidades de cada sección en las articulaciones pasivas tipo bisagra, existentes entre cada extremidad y el cuerpo de cada sección. Para el presente diseño, los resortes son de torsión y los pasadores poseen cerca de sus extremos pequeñas gargantas donde se fijan anillos de retención para que éstos no se deslicen longitudinalmente. Dichos elementos se presentan en la Figura 53-resorte de torsión, pasador, anillo de retención-.

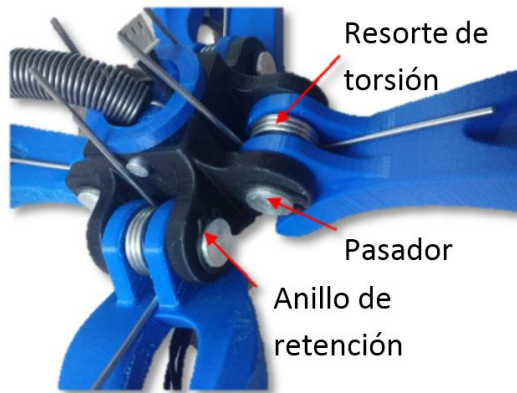


Figura 53. Componentes de articulación pasiva tipo bisagra.

5.2 Componentes electrónicos

El robot posee dos servomotores Dynamixel AX-12A, los cuales están conectados directamente de su eje al eje de las ruedas motrices (Ver Figura 54) y poseen un par torsor de 1.5 N.m con velocidad máxima sin carga de 59 rpm. Para el control de los servomotores se emplea una tarjeta Arduino UNO. Con la cual también se adquiere información que proporcionan los servomotores, como: temperatura, distancia recorrida, entre otras.



Figura 54. Servomotor **Dynamixel AX-12A**

También cuenta con una cámara de visión nocturna CCTV-1020 en su sección delantera con sistema de iluminación led tipo anillo (infrarrojo), con resolución de video de hasta 1080p, resolución de captura de Full HD, y con cable de conexión tetra híbrida de longitud máxima 100m. Dichos componentes se muestran en la Figura 55.



Figura 55. Cámara y conexión tetra híbrida.

La cámara fue adaptada al robot tal y como se muestra en la Figura 56, con su respectiva carcasa y tapa de protección para el lente.



Figura 56. Cámara adaptada al robot.

5.3 Construcción del módulo de control

Para el control del robot se construyó una caja de control de mando y visualización de imagen como se observa en la Figura 57, desde la cual se suministra energía a los componentes electrónicos del robot -cámara y motores- y a los incluidos en la caja -pantalla, tarjeta Arduino UNO, módulo bluetooth-, sistema que está conectado con el robot por medio de un cable UTP de 10 m de longitud.



Figura 57. Módulo de control y visualización.

A continuación, se presentan los elementos que componen el sistema de control:

5.3.1 Componentes electrónicos

La caja de control cuenta con una tarjeta Arduino Uno, una fuente de suministro de voltaje de 12V a 3.5 A, un módulo bluetooth HC-05, un banco de terminales eléctricos y una pantalla de visualización de video con entrada RCA. Todos estos elementos se pueden visualizar en la Figura 58.

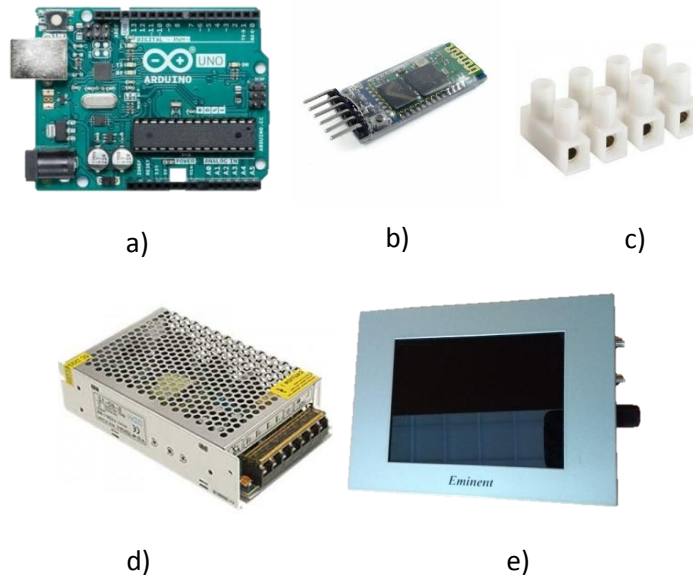


Figura 58. Componentes electrónicos de la caja de control. a) Arduino UNO b) Módulo bluetooth c) banco de terminales eléctricos d) fuente de alimentación e) Monitor.

5.3.2 Construcción del módulo de control

Para la construcción del módulo de control se emplea un gabinete plástico junto con los componentes electrónicos ya mencionados y algunos conectores y cables para las respectivas conexiones entre elementos, como se observa en la Figura 59.



Figura 59. Construcción de caja de control.

5.3.3 Interfaz de usuario

Se diseñó en la plataforma App Inventor una aplicación para dispositivos móviles, tabletas o equipos de cómputo, con la cual se envía por conexión bluetooth la orden a los motores para su funcionamiento y así tener el control del movimiento del robot. La imagen de visualización de la aplicación se muestra en la Figura 60 y se explica su funcionamiento en la sección 5.7.



Figura 60. Aplicación para dispositivos móviles, tabletas y PCs.

5.4 Conexión directa: cámara-PC

Debido a que la caja de control no cuenta con un sistema de almacenamiento de video o imagen - solo visualización- se ha seleccionado un dispositivo con el cual se puede realizar la conexión entre la cámara CCTV y el PC para realizar el almacenamiento de video o imagen de la trayectoria realizada para su post procesamiento. El adaptador de captura de audio y video DVR USB de 4 canales que se muestra en la Figura 61 llamado Easycap 4CH video capture, cuenta con un software para su control, visualización, almacenamiento de video y captura de imágenes - SuperViewer – y puede tener conectado hasta cuatro cámaras simultáneamente.

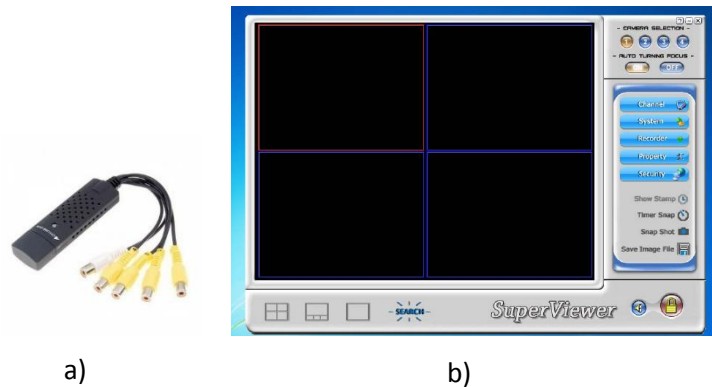


Figura 61. Sistema para almacenamiento de video. a) Adaptador de captura de audio y video b) Software SuperViewer.

5.5 Optimización del diseño de robot

Se realizaron pruebas de movilidad en el interior de la tubería observando inestabilidad entre las secciones del robot, lo que conlleva a un rediseño y optimización del diseño de forma que se logre la estabilidad requerida para su adecuada movilidad conservando las características obtenidas del proceso de selección del concepto.

El rediseño consistió en disponer de sólo una de las secciones del robot -sección delantera- cambiando la dirección de dos de sus extremidades, es decir dos extremidades en la parte delantera -extremidades pasivas- y las otras dos hacia atrás -extremidades motrices-. Esto en configuración de pares de extremidades con posiciones opuestas; tal y como se observa en la Figura 62, el diseño CAD de éste con sus diferentes vistas y extremidades totalmente cerradas; esta posición de las extremidades define el menor diámetro de tubería al cual puede ingresar en prototipo.

En la Figura 63 se visualiza el rediseño en CAD del robot con sus diferentes vistas y extremidades totalmente extendidas. Posición que define el diámetro máximo de la tubería en la cual el robot podrá movilizarse por su interior. Para este caso, el diámetro máximo predefinido como se mencionó anteriormente es de 8”.

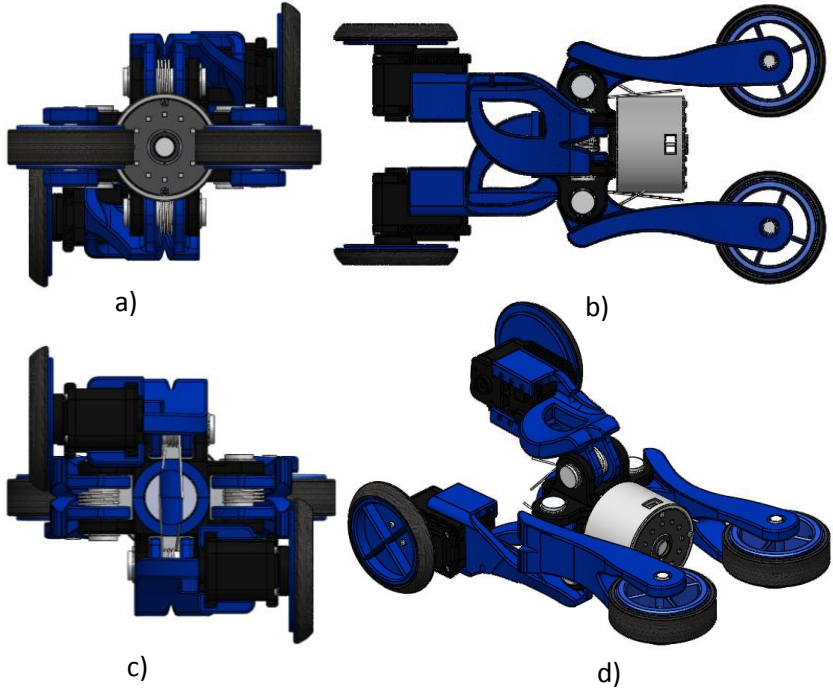


Figura 62. Diseño CAD de la reconfiguración del robot. Concepto 6. Extremidades retraídas. a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista posterior d) Vista isométrica.

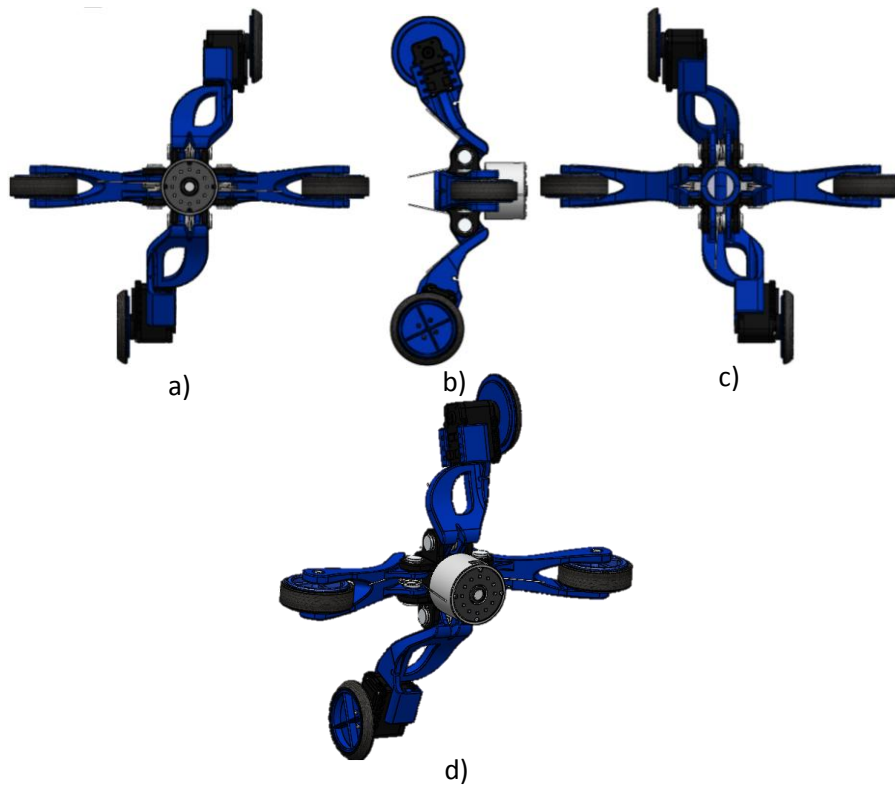


Figura 63. Diseño CAD de la reconfiguración del robot. Concepto 6. Extremidades extendidas. a) Vista frontal b) Vista lateral c) Vista posterior d) Vista isométrica.

Para conocer previamente el posicionamiento del robot en el interior de la tubería, se simula esto en SolidWorks tanto para el robot compuesto por una sola sección, como para con dos secciones; evidenciándose que, para los dos casos el diseño del robot permite la adaptabilidad a cambios de diámetro y cambios de dirección hasta de 90° (ver Figura 64).

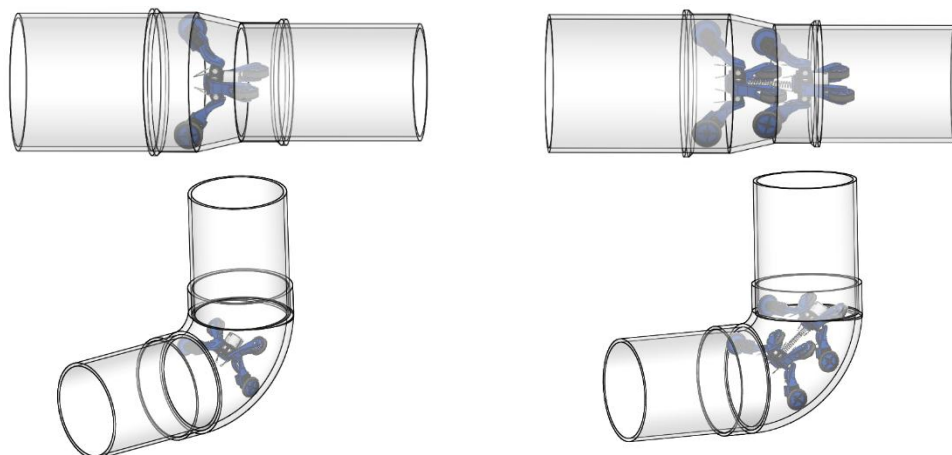


Figura 64. Simulación de posicionamiento del robot en el interior de la tubería.

Con esta configuración, se logra dar estabilidad al robot tanto en reposo como en movimiento, y se procede a modificar el robot ya construido a su nueva configuración como se presenta en la Figura 65 y Figura 66. En esta última, el robot se encuentra en el interior de la tubería tanto en posición vertical como horizontal.



Figura 65. Reconfiguración del robot.

Como se observa en la Figura 65, la nueva configuración en las extremidades del robot ha permitido tanto la adaptabilidad en el interior, como la estabilidad del cuerpo de este haciéndolo permanecer en el centro de la tubería mientras hace sus desplazamientos. Esta posición se observa en la Figura 66.

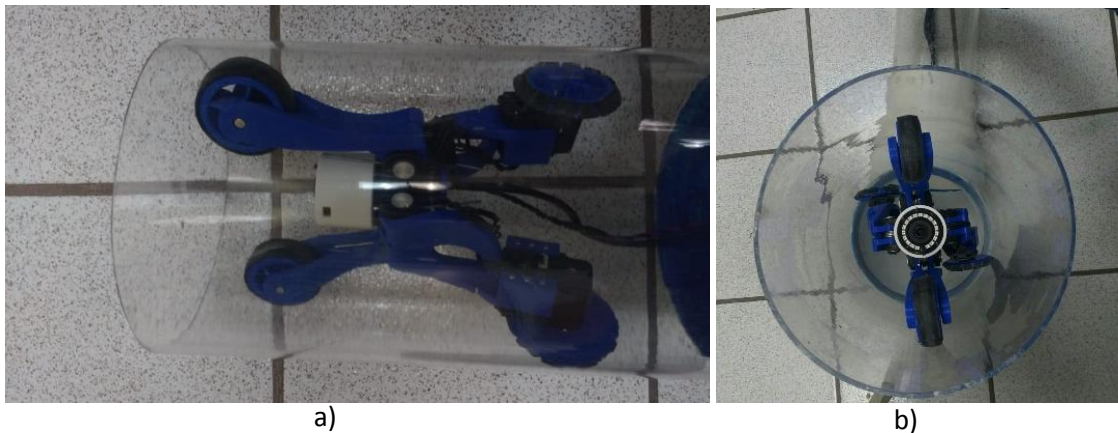


Figura 66. Posicionamiento del robot en el interior de la tubería. a) Tubería horizontal b) Tubería vertical.

5.6 Estrategia de locomoción

De acuerdo con la configuración final del prototipo, que conserva la distribución de fuerzas por cada par de extremidades, se define el desplazamiento de éste basado en el control de los dos motores que posee. Los motores son controlados desde una tarjeta Arduino UNO de forma

independiente, permitiendo hacer cambio en la dirección de giro de cada rueda o tener diferentes velocidades en cada una (ver Anexo C).

5.6.1 Desplazamiento en secciones rectas

El prototipo puede desplazarse en secciones rectas aumentando y disminuyendo la velocidad de rotación de los motores, tal como desee el operador. Así como se cuenta con la rotación de estos tanto en sentido horario como antihorario, de modo que el prototipo puede avanzar o retroceder según se requiera. De acuerdo con la programación hecha para el control de los motores, la velocidad de éstos puede aumentar y disminuir progresivamente en variaciones de velocidad de 1.75 cm/s. El desplazamiento del prototipo se produce gracias a que las ruedas motrices se encuentran en contacto directo con la superficie de la tubería bajo fuerzas de presión, fricción y rotación; independientemente de la dirección de la tubería (horizontal o vertical). El giro de las ruedas activas se genera por el movimiento de rotación transmitido por los motores al activarse, los cuales se encuentran conectados de su rotor al eje central de cada rueda.

5.6.2 Desplazamiento en el interior de campanas

En el interior de las campanas o reducciones existentes en la tubería, el prototipo maneja el mismo control de velocidad como si se desplazara en una sección recta de la tubería. La diferencia con estas últimas radica en el par que requieren los motores para que el prototipo logre cerrar o abrir sus extremidades por medio de los resortes de torsión que tiene en el punto de unión entre el centro del prototipo y las extremidades, éstos se abrirán o cerrarán según sea el cambio de diámetros en la tubería, de 6" a 8" o de 8" a 6".

Tanto para secciones rectas como para el paso por el interior de las reducciones, los motores deben estar girando en el mismo sentido y a velocidades iguales para tener un desplazamiento longitudinal en el interior de la tubería, ya sea de avance o de retroceso. Para cambios de diámetro en la tubería de menor a mayor diámetro, los motores requieren un menor torque para lograr el desplazamiento. Mientras que, para cambios de diámetro en la tubería de mayor a menor diámetro, los motores requieren un mayor torque para lograr el desplazamiento.

5.6.3 Desplazamiento en el interior de codos

Para el caso del desplazamiento del prototipo en el interior de los codos, existe una diferencia entre las velocidades de cada motor. Esto debido a que cada rueda requerirá recorrer una distancia diferente en un mismo tiempo, tal y como se muestra en la Figura 67. Mientras una rueda recorre la distancia interior de la tubería -Línea roja- la otra rueda debe recorrer la distancia exterior de la tubería -Línea amarilla-.

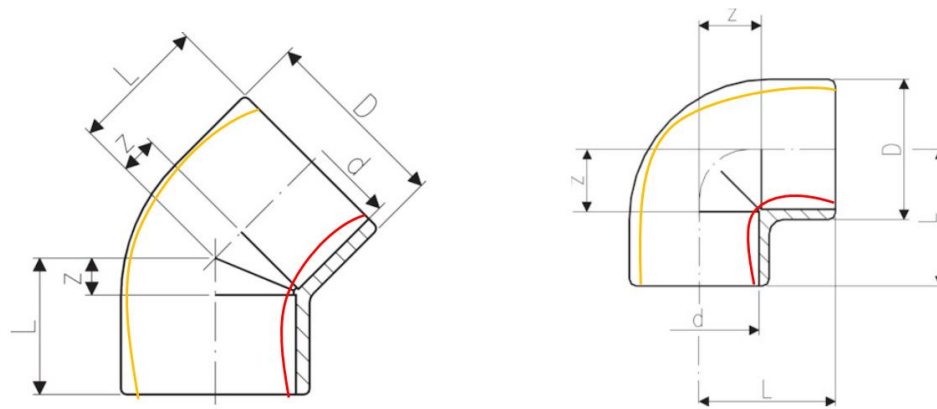


Figura 67. Trayectoria de las ruedas en el interior de codos.

Esta diferencia entre distancias recorridas por cada una de las ruedas obedece la relación de 3.5:2 y 5:2 dependiendo del codo por el cual esté pasando. Por lo tanto, la velocidad que debe llevar cada una de las ruedas motrices para realizar el desplazamiento en el interior de codos también obedece esta relación. En cuanto a las ruedas pasivas, llevan la velocidad que por contacto con la superficie se les es transmitida. Esta velocidad corresponde aproximadamente al promedio de las velocidades de los dos motores, debido a que las extremidades pasivas se encuentran en una posición intermedia entre las extremidades activas. Finalmente, el usuario determinará la velocidad de cada uno de los motores haciendo uso de la aplicación diseñada en la plataforma App Inventor para el manejo del robot.

5.7 Aplicación móvil para control del robot

Para el control y puesta en marcha del robot se diseñó una aplicación que cumpliera con los requerimientos para la manipulación y manejo de este. El operador tiene control tanto en la dirección de giro de las ruedas, como de su velocidad. Así mismo, la aplicación da a conocer su estado de conectividad con la caja de control. La App fue diseñada en la plataforma de libre acceso App Inventor y puede ser descargada e instalada en cualquier dispositivo móvil, tableta o Pc. Desde allí se manipula el robot haciendo conexión con el módulo Bluetooth integrado en la caja de control. El diseño de la aplicación móvil se muestra en la Figura 68. El código de programación de la plataforma App inventor es de alto nivel, más conocido como programación por bloques, lo que hace que la elaboración de este tipo de aplicaciones sea sencillo, rápido y bastante intuitivo (ver Anexo D).



Figura 68. Aplicación móvil para el control del robot.

Tal como se muestra en la Figura 69, la aplicación contiene dos botones para establecer la conexión (a) o desconexión (b) con el bluetooth de la caja de control (ver Figura 70) y en su parte superior por medio de un texto se indica el estado de la conexión.



Figura 69. Conexión Bluetooth.

Un botón para detener el movimiento de los motores, dos botones para dar la dirección de giro (adelante-atrás), cuatro botones para el control de la velocidad de los motores de acuerdo a la dirección de desplazamiento que vaya a tomar el robot (derecha adelante, izquierda adelante,

derecha atrás, izquierda atrás) y cuatro botones para disminuir la velocidad de cada motor de forma independiente ya sea que se encuentren girando hacia adelante o hacia atrás (ver Figura 70).



Figura 70. Botones de direccionamiento.

A medida que se oprimen los botones de direccionamiento de la aplicación, en su parte superior se muestra un texto donde se indica la acción que se ha enviado a la caja de control para su ejecución.

Capítulo 6

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA DE TUBERÍA

Para la realización del diseño de la maqueta requerida que permitirá evaluar el desempeño del robot móvil de inspección de tuberías hidráulicas en vacío, se tuvo en cuenta la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-CONAGUA-2011: Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-hermeticidad-especificaciones y métodos de prueba; para establecer la normatividad existente en cuanto a sistemas de acueducto se refiere y los tipos de materiales utilizados para tal fin.

6.1 Diseño de la maqueta de tubería

De donde para este proyecto se toman las especificaciones de la siguiente tabla:

Tabla 7. Especificaciones para tubería de agua potable.

TUBERÍA DE AGUA POTABLE	
CARACTERÍSTICA	NORMA
Material	Plástico (PVC)
Tubos de pared lisa serie métrica	NMX-E-143/1-SCFI-2002, Industria del plástico-Tubos de poli (cloruro de vinilo) (PVC) sin plastificante para el abastecimiento de agua a presión-Serie métrica-Especificaciones.
Tubos de pared lisa, serie inglesa.	NMX-E-224-CNCP-2006, Industria del plástico-Tubos de poli (cloruro de vinilo) (PVC) sin plastificante de cédulas 40, 80 y 120 para el abastecimiento de agua a presión y uso industrial-Serie inglesa-Especificaciones
	NMX-E-145/1-SCFI-2002, Industria del plástico-Tubos de poli (cloruro de vinilo) (PVC) sin plastificante para el abastecimiento de agua a presión-Serie inglesa Especificaciones.
Conexión	NMX-E-231-SCFI-1999, Industria del plástico- Tubos y conexiones- Conexiones de Poli (cloruro de vinilo)-(PVC) sin plastificante para el abastecimiento de agua a presión con unión espiga-campana-Serie métrica-Especificaciones.
Conexiones serie inglesa.	NMX-E-223-1999-SCFI, Industria del plástico- Tubos y conexiones- Conexiones hidráulicas de Poli (cloruro de vinilo)-(PVC) sin plastificante con unión espiga-Campana-Serie inglesa- Especificaciones.

De acuerdo con esto, se eligió diámetros nominales comerciales de Querétaro, los cuales son 6'' y 8'' de diámetro; así mismo se tuvo en cuenta el espacio con que se dispone en el Centro de investigación en donde estará ubicada la maqueta, y las posibles dimensiones del dispositivo de inspección. En la Tabla 7 se muestran las características y normas que rigen los componentes de

una tubería de agua potable, en la Tabla 8 se observan las dimensiones que posee la tubería PVC de acuerdo con el catálogo comercial de la empresa distribuidora de tubería: Tubos Monterrey. Datos que se han tenido en cuenta para el diseño de la maqueta.

Tabla 8. Catálogo de Tubería PVC Hidráulico comercial. Diámetros elegidos.

Diámetro Nominal	Diámetro Exterior		Cédula	Diámetro Interior		Espesor		Presión Trabajo 23° Centígrados		Peso	
	pulg.	mm.		pulg.	mm.	pulg.	mm.	PSI	kg/cm ²	Lbs/Pie	Kg/Mt
6"	6.625	168.30	40	6.031	153.20	0.280	7.10	180	12.60	3.520	5.230
	6.625	168.30	80	5.709	145.00	0.432	11.00	280	19.70	5.947	8.840
8"	8.625	219.10	40	7.942	201.70	0.322	8.20	160	11.20	5.390	8.010
	8.625	219.10	80	7.565	192.20	0.500	12.70	250	17.60	8.849	13.500

Fuente. Catálogo de Tubería PVC Hidráulico comercial. Tubos Monterrey.

También, se obtuvo imágenes de conexiones hidráulicas existentes (ver Figura 71) para identificar la forma como éstas están actualmente construidas y así poder tener en cuenta en el diseño de la maqueta, los grados de dificultad que el dispositivo de inspección debe superar en su campo de acción.



Figura 71. Sistema de tubería hidráulica. Instituto mexicano de Tecnología del Agua. IMTA.

El direccionamiento de la tubería en sistemas hidráulicos cambia constantemente por medio de codos o uniones en ella, su inclinación va tanto en sentido horizontal como vertical y así mismo presenta cambios de inclinación inferiores a 90° (45°). También se observan ramificaciones en el plano horizontal que hacen cambiar el sentido de la tubería a izquierda o derecha, con ángulos de giro de 45° o 90°. Además, se evidencia cambios en los diámetros de la tubería en algunos tramos, independientemente del sentido o inclinación de ésta.

En cuanto al diámetro de los tubos, éstos conservan su diámetro en toda su sección longitudinal; por ello, para los cambios de diámetro de tubería en sistemas hidráulicos se emplean elementos de

unión que están clasificados dependiendo del sentido, dirección y diámetro que se le quiera dar a la tubería, los más comúnmente usados en acueducto en Querétaro son: codos 90°, codos 45° y reducciones.

Para efectos de diseño y elaboración de la maqueta que pueda emular una tubería hidráulica real, se emplean codos de 90°, codos de 45°, reducciones o campanas; de modo que posea las características de un sistema hidráulico. De esta forma y retomando cada uno de los aspectos que debe tener la maqueta para la validación del dispositivo a implementar, en la Figura 72 se presenta un primer concepto de cómo debería ser el direccionamiento de ésta.

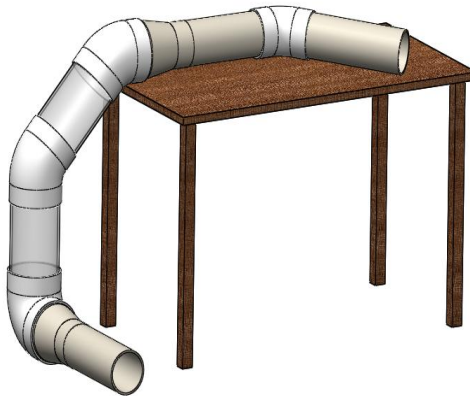


Figura 72. Concepto de maqueta.

A partir de este primer concepto, se identifica los elementos a utilizar en el diseño y su búsqueda a nivel comercial, para así poder llevar este esquema a un diseño CAD ajustado a lo que se desea implementar; diseño que se presenta a continuación en la Figura 73, en donde se puede visualizar tres vistas diferentes del diseño de la maqueta.

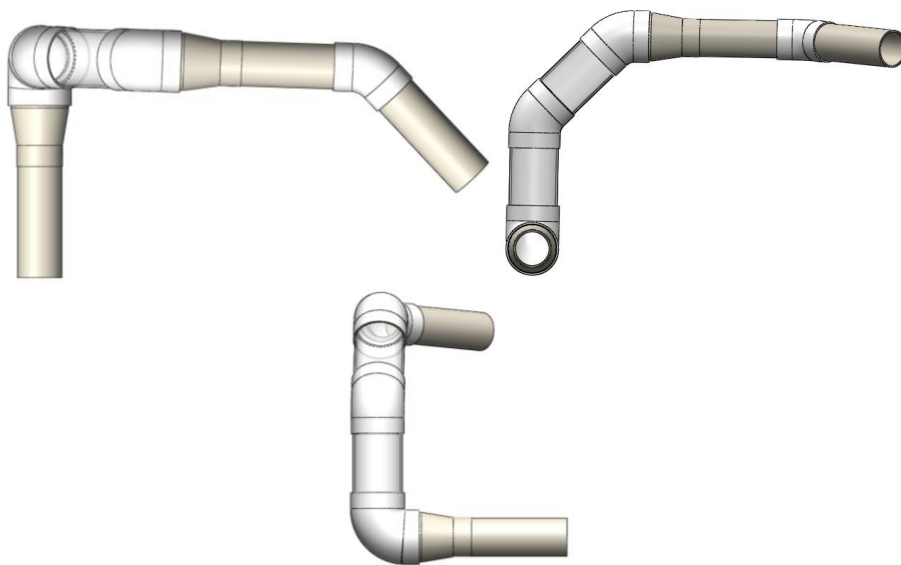


Figura 73. Diseño CAD de la maqueta. (Vistas: Superior, Frontal y Lateral Izquierda).

El diseño presentado cuenta con los siguientes grados de dificultad que el dispositivo de inspección debe manejar: posee cambios de diámetro en la tubería que son de 6'' a 8'' y viceversa, giros de 90° y 45° tanto en el plano horizontal como en el vertical.

El diseño que se presenta de la tubería implica la elaboración de una estructura soporte -mesa-, debido a la fragilidad del material de ésta, y para mejorar su estabilidad. De modo que en la Figura 74, se presenta el diseño definitivo de la tubería con su respectivo soporte, de acuerdo con la disposición de materiales comercialmente existentes y algunos con los que ya se contaba en el laboratorio.

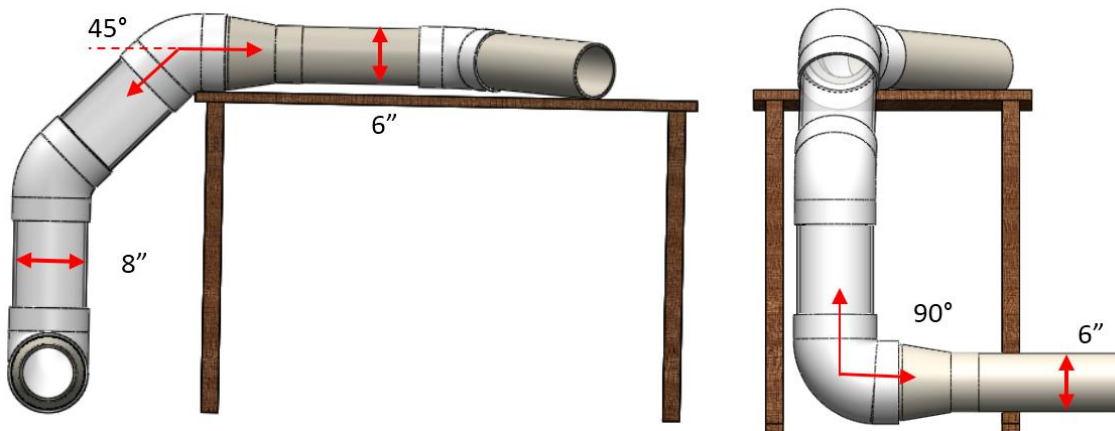


Figura 74. Diseño CAD de la maqueta con soporte. (Vistas isométricas: Posterior y Lateral Izquierda)

6.2 Construcción de la maqueta de tubería

Para efectos de diseño se ha elegido dos tipos de materiales para la tubería, secciones de PVC y secciones en Acrílico transparente; por lo tanto, se requiere tener en cuenta los coeficientes de fricción de cada material empleado, por ello se adjunta la Tabla 9 con dicha información. Pese a que los pares tribológicos que se observan en la Tabla 9 no son con base en su interacción con el caucho, sirven para conocer la relación que hay entre ellos al interactuar con otro material, que para ese caso es el acero. De esta forma, realizar pruebas experimentales con el par tribológico de menor coeficiente de fricción.

Finalmente, se presenta en la Figura 75 la construcción de la maqueta de tubería que corresponde al diseño CAD presentado anteriormente en las Figuras 72, 73 y 74.

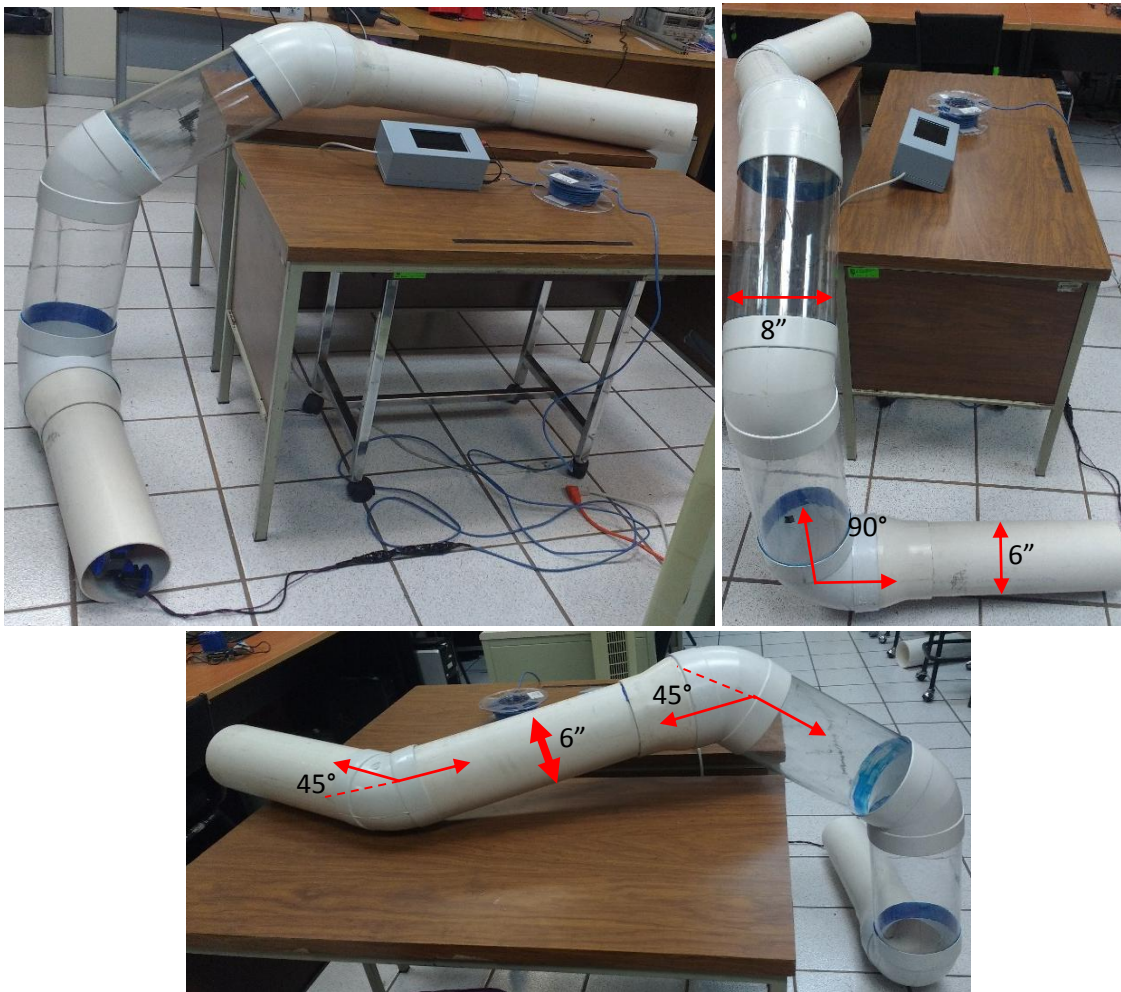


Figura 75. Maqueta de tubería. (Vistas: Isométricas, Lateral Izquierda y Posterior).

Tabla 9. Coeficientes de fricción y resistencia a la tracción. Par tribológico con acero.

Material	Coefficiente de fricción	Resistencia a la tracción [Mpa]
PVC	0,60	55
PC	0,38	65
PP	0,30	33
PET	0,25	81

Fuente: Gehr. http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_estabilidad_dimensional.html

Esta maqueta, es el medio que se utilizará para evaluar el desempeño del dispositivo al recorrer su interior y sobrepasar cada una de las dificultades que posee (cambios de diámetro, cambios de dirección, recorridos horizontales, verticales e inclinados).

Capítulo 7

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO

Este capítulo contiene la formulación teórica para el comportamiento del prototipo en cuanto a su desplazamiento en el interior de la tubería y, el procedimiento y resultados de la evaluación experimental del desempeño del prototipo en la tubería y su comparación con los resultados teóricos.

7.1 Evaluación de posicionamiento mediante análisis de imágenes

Para la comprobación y evaluación de desempeño del prototipo se realizó varias pruebas entre las cuales están:

- Prueba de estabilidad estática en tubería horizontal.

Se ubicó el prototipo en el interior de la tubería horizontal a una distancia de 20cm del extremo del tubo y se registró la posición que el prototipo toma en el interior, así mismo se evidenció que permanece en la posición inicial sin presentar movimiento en la apertura de sus extremidades debida a su propio peso, tal y como se observa en la Figura 76.

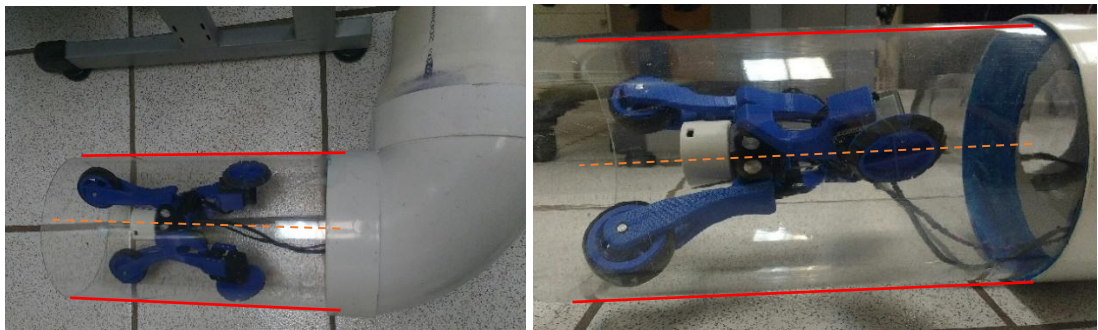


Figura 76. Prueba de estabilidad estática en tubería horizontal.

- Prueba de estabilidad estática en tubería vertical.

Se ubicó el prototipo en el interior de la tubería vertical a una distancia de 30cm del extremo inferior del tubo y se registró la posición que el prototipo toma en el interior, así mismo se evidenció que permanece en la posición inicial sin presentar deslizamiento. Dicha posición de visualiza en la Figura 77.

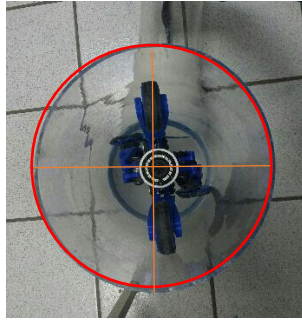


Figura 77. Prueba de estabilidad estática en tubería vertical.

- Prueba de desplazamiento en tubería horizontal.

De acuerdo con las características que tienen los diferentes componentes del prototipo, éste tiene una velocidad de desplazamiento sin carga de 17.9 cm/s, para una velocidad nominal sin carga -de los motores- de 59 rpm y con radio de las ruedas de 2.9 cm. Sin embargo, la programación de los motores se realizó para una velocidad máxima de 51.8 rpm -esto con el fin de no esforzar los motores haciéndolos trabajar en su límite máximo- lo que representa una velocidad de desplazamiento sin carga de 15.7 cm/s.

En la Figura 78 se observan las imágenes de la prueba, que consistió en hacer recorrer al robot por el interior de un tramo de tubería recto de 1 metro de longitud, a su máxima velocidad e identificar el tiempo que tardó en recorrerla, para finalmente hallar la velocidad con la cual recorrió dicho tramo. De forma que se obtuvo una velocidad máxima de desplazamiento de 14.3 cm/s.



Figura 78. Prueba de desplazamiento en tubería horizontal.

- Prueba de desplazamiento en tubería vertical.

Una vez hecha la prueba de estabilidad estática en tubería vertical, se puso el robot en uno de los extremos de la tubería, siendo esta de una longitud de 1 metro y, se hizo el recorrido a su máxima velocidad. Obteniendo una velocidad de desplazamiento de 15 cm/s en su desplazamiento en sentido vertical (Ver Figura 79).



Figura 79. Prueba de desplazamiento en tubería vertical.

- Adaptabilidad del prototipo en codos de 45° y 90°.

Esta prueba se realizó haciendo pasar el prototipo por diferentes trayectorias construidas como se observa en la Figura 80, las cuales contenían codos tanto de 45° como de 90°, observando que éste lograba pasar por los trayectos propuestos, independientemente de la dirección de la salida de los codos (derecha, izquierda, arriba, abajo o diagonales). Esta prueba se realizó tanto con el robot avanzando como retrocediendo.

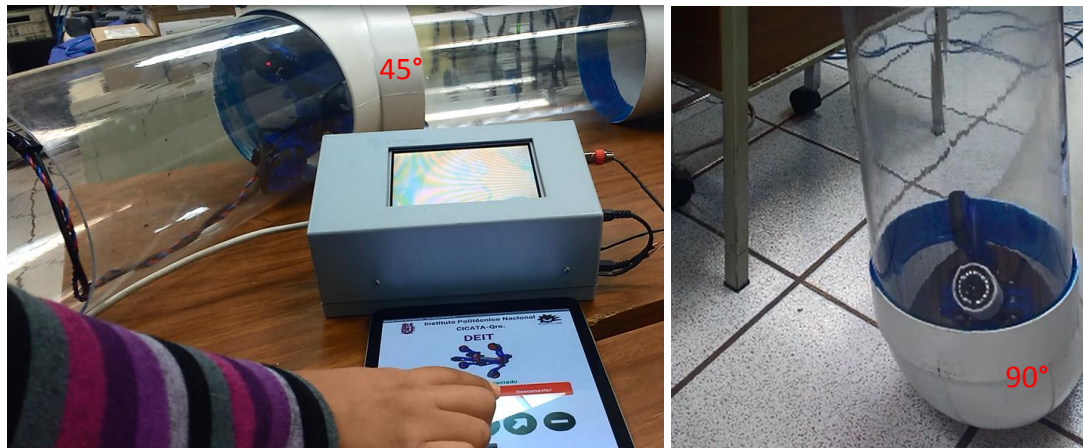


Figura 80. Adaptabilidad del prototipo en codos de 45° y 90°.

- Adaptabilidad del prototipo a diámetros cambiantes (de 6" a 8" y de 8" a 6").

Se comprobó que el robot se adaptara a los diámetros propuestos ubicándolo en el interior de la tubería y haciéndolo pasar por diferentes trayectorias construidas, las cuales contenían cambios de diámetro de los tubos en diferentes trayectorias, observando que éste lograba pasar por los trayectos propuestos, independientemente del cambio de diámetro a que fuese sometido, es decir de 6" a 8" o de 8" a 6", ya sea en avance o retroceso del robot. Esto se puede visualizar en la Figura 81.

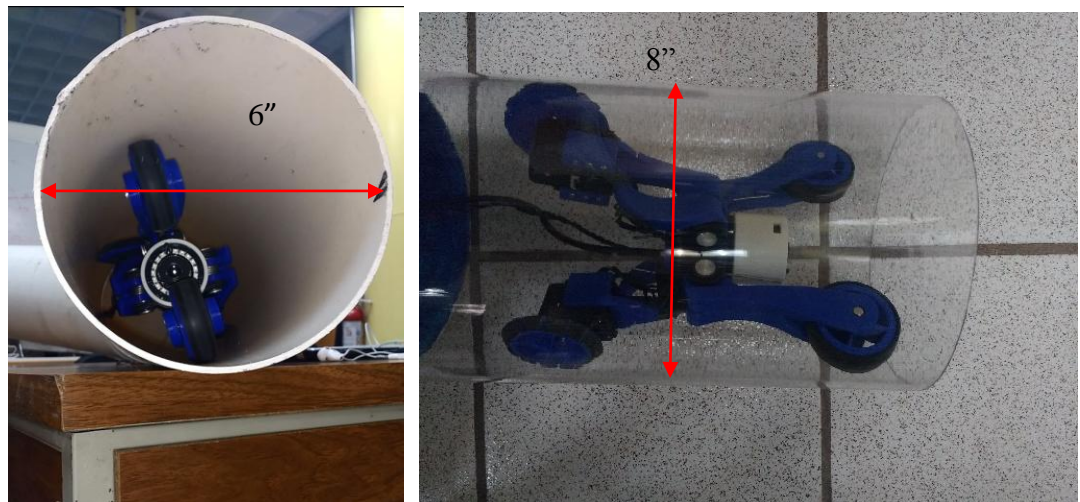


Figura 81. Adaptabilidad del prototipo a diámetros cambiantes (de 6" a 8" y de 8" a 6").

7.2 Evaluación de posicionamiento mediante sensor de posición y orientación

Una vez evaluado el funcionamiento del prototipo de forma visual por medio de videos y fotografías, se emplea el sensor MPU6050 para validar su funcionamiento en el interior de la tubería. Este sensor otorga las coordenadas X, Y, Z de donde se encuentre y su orientación en el espacio (ángulos de Euler). El sensor ha sido ubicado en la parte central del robot y a partir de su ubicación será calibrado para iniciar con el proceso de validación del funcionamiento. El sensor es conectado por el puerto serial con la tarjeta Arduino, la cual lee la información referente a la ubicación y se genera la gráfica de los datos ya sea en tiempo real o se almacenan para luego ser tratados y graficados para su análisis, como se observa en la Figura 82.



Figura 82. Diagrama de comunicación para validación por sensores.

Realizado el montaje de la Figura 82 y haciendo uso de software GNU para Arduino y sensor MPU6050 se realiza la calibración del sensor, de donde se extraen las posiciones X, Y, Z iniciales del sensor y la orientación en Z, y con base en ellas se realizan las demás mediciones para la validación del funcionamiento del prototipo (Ver Anexo E). La gráfica del proceso de calibración del sensor y estabilización de los datos de la posición inicial se muestran en la Figura 83. Las líneas azul y rojo corresponden a la posición del sensor respecto al eje X, siendo la de color azul la obtenida por los valores reales del acelerómetro y la roja luego de aplicarle el filtro Kalman; y las de color naranja y verde es la posición respecto al eje Y, siendo la de color verde la obtenida por los valores reales del acelerómetro y la amarilla luego de aplicarle el filtro Kalman; observándose que estas tienden a ser cero, es decir, toman los valores de la posición inicial del sensor.

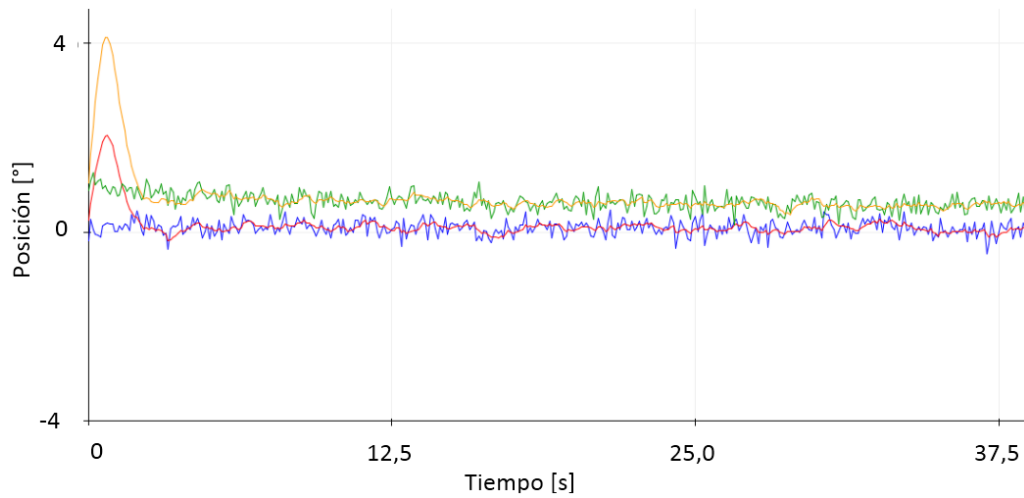


Figura 83. Gráficas de calibración inicial del sensor.

Haciendo uso de código en la plataforma Arduino, se extraen constantemente las posiciones del sensor anclado al centro del mecanismo mientras se pone en funcionamiento el prototipo. Con los datos de estas seis variables medidas, se grafica de la información obtenida (ver Figura 83) para su análisis. Cada línea graficada en la Figura 84 representa los valores medidos de la posición (X, Y, Z), es decir, las rotaciones que presentó el robot al ponerlo en funcionamiento en el interior de la tubería en el tramo de 1m de longitud.

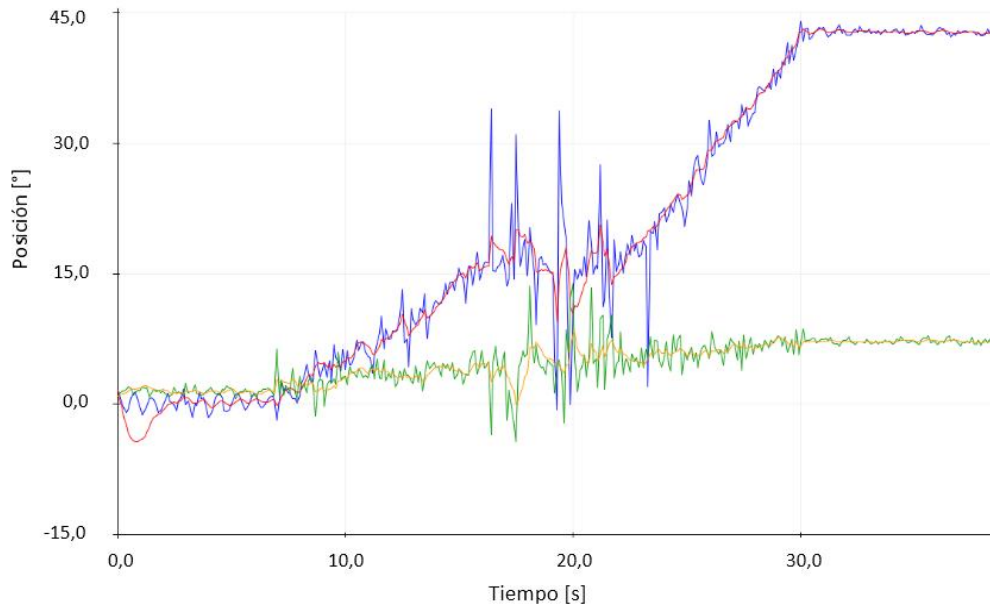


Figura 84. Gráficas de posición del robot.

En las gráficas de la Figura 84 se evidencia la rotación que presenta el robot al desplazarse por el interior de la tubería, generando una trayectoria en espiral, la cual tiene una rotación de la posición inicial de $42,39^\circ$ respecto al eje X y de $13,29^\circ$ respecto al eje Y, por cada 100cm de recorrido.

7.3 Identificación de rupturas en las paredes de la tubería mediante análisis de imágenes.

Por medio del almacenamiento de video con el DVR, de la imagen captada en el recorrido del robot por la tubería y haciendo uso del software Matlab, se hace el procesamiento de imágenes del video. Inicialmente, se cambia el formato de video almacenado a *.mpg, se extraen del video los fotogramas que lo componen a un periodo de extracción establecido conociéndose que la composición del video está dada por 25 fotogramas/s (ver Figura 85) y a cada fotograma se le aplica filtros para identificación de contornos y suavizado de la imagen como: Canny, Sobel, Prewitt, Roberts, LoG, Zerocross, Gaussiano, Mediana, Media; los cuales son filtros muy estudiados y establecidos en el software empleado.

El formato de video almacenado es de 720x576, fue captado a la velocidad máxima de funcionamiento del robot (16 cm/s) y se realizó el análisis de imágenes del video correspondiente a un tramo de 300cm de la tubería; lo que correspondió a un tiempo de video aproximado de 18.75s.



Figura 85. Fotograma extraído del video del interior de la tubería.

De acuerdo con la calidad del video almacenado y la combinación de los diferentes filtros puestos a prueba para lograr la identificación de las rupturas, se observa que el procesamiento de las

imágenes mediante la aplicación de los filtros: Mediana y Canny (en conjunto), permiten la identificación de las líneas marcadas como rupturas en las imágenes (ver Figura 86).



Figura 86. Imagen con filtros: Mediana y Canny para identificación de marcas (rupturas) en las paredes de la tubería.

CONCLUSIONES

- Se logró identificar las especificaciones de diseño que requiere un robot para tareas de inspección interna en tuberías en vacío de acueducto y alcantarillado.
- Se realizó la selección del concepto del robot con base en los requerimientos de diseño y se diseñó, construyó, controló y validó la primera versión del robot móvil con las capacidades esperadas para la labor de inspección interna de tubería en vacío.
- El robot móvil construido permite realizar una inspección visual de la tubería de longitudes entre 0m y 10m sin percances, pudiéndose ver e identificar en los videos almacenados o visualizados, fallas como obstrucciones o rupturas en la tubería a velocidades de desplazamiento entre 0,27 – 16 cm/s.
- El diseño de adaptabilidad activa en las extremidades por medio de resortes de torsión es viable para tuberías de un solo diámetro o de diámetros variables, bajo cualquier ángulo de inclinación de la tubería puesto que la fuerza que ejercen sobre las extremidades permite que las ruedas del robot estén siempre en contacto con la superficie; sin embargo, no se recomienda para sistemas de tubería con bifurcaciones ya que no se tiene el control de la apertura de las extremidades.
- Se logró un adecuado posicionamiento del cuerpo del robot en el interior de la tubería (posición centrada) y estabilidad gracias a las cuatro extremidades en configuración por pares de extremidades (dos adelante, dos atrás).
- El sistema modular y los conectores con los cuales fue diseñado el robot móvil, permiten el paso del robot por codos o uniones de tubería entre 0° y 90°, así como la portabilidad de instrumentos de medición, revisión, limpieza o elementos que se requieran adaptar.
- La generación del movimiento del robot se logra por medio de un par de ruedas actuadas posicionadas equidistantemente entre sí, asemejando este tipo de tracción a la configuración de tracción diferencial, la cual permite orientar el movimiento del robot sin requerir traslaciones; siendo dos, la mínima cantidad de motores que requiere el robot para su funcionamiento.
- Mediante la validación del posicionamiento del robot en el interior de la tubería se logra estimar la trayectoria que sigue a lo largo de un tramo de tubería recto, comprobándose que su trayectoria es una espiral que rota al robot en 42,39° respecto al eje X y 13.29° respecto al eje Y, cada 100cm de recorrido.

- Las tareas que realiza el robot móvil son simples y fáciles de manejar por el operador, requiriéndose para ello tan sólo de un dispositivo móvil con la aplicación (App) instalada y conexión bluetooth, para ponerlo en funcionamiento y controlar el desplazamiento del robot.
- El diseño de la App permite que su uso sea intuitivo, por lo que no requiere de capacitación para el manejo. El robot no requiere de programación de rutas para su desplazamiento, por lo tanto, se desplaza por diversidad de trayectorias en tubería.
- Por medio de prueba experimental se logra calcular el coeficiente de fricción estático entre acrílico y caucho SBR, obteniéndose como coeficiente de fricción estático $\mu=0.71$.

Para un trabajo futuro de realizan las siguientes consideraciones:

- Realizar el análisis dinámico del robot considerando pesos adicionales y superficies en contacto con agua o tierra que puedan asemejarse a las condiciones reales en una tubería.
- Implementar un sistema tipo Pan-Tilt para el posicionamiento de la cámara de inspección que permita tener registro 360° de la tubería eliminando los puntos ciegos que presenta el diseño actual.
- Desarrollar un sistema de visualización y control que establezca la relación entre el posicionamiento del robot en la tubería y la identificación de fallas.
- Para establecer el control de la apertura de las extremidades, se propone incluir algún tipo de sensor en las uniones de las extremidades que retroalimente el posicionamiento de los motores.
- Se recomienda realizar el reposicionamiento de los motores de modo que las ruedas a las que van unidos, queden ubicadas en el centro del ancho de la extremidad y de esta forma se corrija el desplazamiento en espiral que presenta actualmente el robot.
- Para lograr la autonomía del robot se puede desarrollar un control PID por medio de la retroalimentación desde el sensor de posición para el funcionamiento autónomo de los motores.
- Con el fin de comercializar el robot, se plantea su futura construcción con materiales y protocolos resistentes al agua y al polvo (tipo industrial).
- Siendo este trabajo el desarrollo de un primer prototipo para inspección de tubería, con fines de verificación del funcionamiento de su diseño estructural, se recomienda realizar la comunicación entre sistema de control, fuente de alimentación y el robot, con protocolos de comunicación como RS-485 y materiales más robustos para aumentar el alcance del desplazamiento para inspección a distancias de 100m-300m.

- Artículo “Diseño de mecanismo adaptable para robot de inspección interna de tubería”, presentado en el IV Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura – AMDM 2018 en Manizales, Colombia. Y publicado en las memorias del congreso (ver Anexo F).
- Artículo “Diseño de mecanismo adaptable para robot de inspección interna de tubería”, presentado en el 3er Congreso Nacional de Mecatrónica y Robótica en Querétaro, México; y publicado como capítulo del libro Sinergia Mecatrónica 2019, ISBN 978-607-9394-17-2. Derivado de una estancia académica en la Fundación Universitaria de San Gil-Santander, Colombia como parte del grupo de investigación IDENTUS de la institución en mención. (ver Anexo G).
- Registro de solicitud de patente de la invención denominada “Dispositivo móvil para inspección remota de cavidades adaptable a dimensiones irregulares”, ante el Instituto Mexicano de la propiedad industrial (IMPI) en Febrero de 2019 (ver Anexo H).

REFERENCIAS

- [1] Abdul M. et al., (2016). Design and Development of Robotic System for Visual Inspection of Boiler Tube Inner Surface. Malasia.
- [2] Aracil et al. (2008). Robots de servicio. Revista Iberoamericana de automédica e informática industrial. Vol. 5, Núm. 2, Abril 2008, pp. 6-13
- [3] Asyraf R. et al., (2012). Development of a Low Cost Small Sized In-pipe Robot. International Symposium on Robotics an Intelligent Sensors -IRIS 2012. Pp. 1469-1475.
- [4] Chablat D. et al., (2018). Mechanical Design Optimization of a Piping Inspection Robot. 28th CIRP Design Conference. Francia. Pp. 307-312.
- [5] Coramik M. y Ege Y., (2017). Discontinuity inspection in pipelines: A comparison review. Measurement. Turquía. Pp. 359-373.
- [6] Deepak B. et al., (2016). Development of in-pipe robots for inspection and cleaning task. Survey, classification and comparison. International Journal of Intelligent Unmanned Systems. Vol. 4, pp. 182-210.
- [7] Dongwoo Lee et al., (2012). Novel mechanisms and simple locomotion strategies for an in-pipe robot that can inspect various pipe types. Mechanism and Machine Theory 56. Pp 52-68.
- [8] Ferre, M., Aracil, R., Navas, M. (2005). Stereoscopic video images for telerobotic applications, Journal of Robotic Systems, 22, 3, 131-146.
- [9] F.P. Beer. R. Johnston, et al. (2010). “Mecánica vectorial para ingenieros Estática”, 9na edición, Mc graw Hill, México. Disponible en: https://www.academia.edu/36625286/Mec%C3%A1nica_Vectorial_Para_Ingenieros_Estática_Beer_Johnston_9na_ed
- [10] Franco J., (2015). Diseño e implementación de un algoritmo para la locomoción en superficie vertical de un robot Hexápodo. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, CICATA – Querétaro, México.
- [11] García L. (2005), “Modelado cinemático y control de robots móviles con ruedas”, Tesis doctoral. Universidad politécnica de valencia, Departamento de ingeniería de sistemas y automática. Valencia, España. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1840/tesisUPV2519.pdf>

- [12] Gmiterko A. et al., (2015). Machines for In-Pipe Inspection. Journal of Automation and Control. Vol 3 No. 3, pp. 79-82
- [13] González de Santos, P., Garcia, E., Estremera, J. (2006). Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-Legged Robots, Springer, London.
- [14] González-Palacios M.A., (2011). Procedimientos de diseño en Mecatrónica. Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XII, Num. I, 209-222. UNAM.
- [15] González R. et al., (2015). Robots Móviles con Orugas historia, modelado, localización y control. Universidad de Almería. España.
- [16] Hyum J. et al., (2013). On-power detection of pipe wall-thinned defects using ir thermography in npps. Korea. Gwangju, Pp. 501-759.
- [17] Ibrahimov B., (2016). Development of a Decision Making Guide for Locomotion Design for In-pipe Inspection Robots - One Step towards Open Innovation in Robotics. Vienna University of Technology. Viena, Austria.
- [18] Jeon W. et al, (2013). Design and control method for a high-mobility in-pipe robot with flexible links. Industrial Robot: An International Journal, Vol. 40 Issue: 3, pp.261-274
- [19] Jun C. y Tao C., (2011). Design method of Modular Units for Articulated in-Pipe Robot Inspecting System. Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation.
- [20] Justel D. et al., (2007). Estudio de métodos de selección de conceptos. XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. Lugo.
- [21] Kim J. et al., (2010). RAMP System for Proactive Pipeline Monitoring. USA.
- [22] Lamas A., (2017). Robot inspeccionador de tuberías. Tesis de Maestría. Universidad de Oviedo, Centro Internacional de Postgrado. España.
- [23] Lee spring resortes, (2019). Resortes de torsión. México. Disponible en: https://mx.leespring.com/mx_int_learn_torsion.asp
- [24] Liu Z. et al. (2012). Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe. NDT&E International 47. Canadá. Pp. 105-115.
- [25] Mejía A., (2015). Dispositivo móvil para el interior de tuberías. Tesis. Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria en ingeniería y tecnología avanzada. México.

- [26] Molfino, et al., (2005). Roboclimber the 3 ton spider, *Industrial Robot: An International Journal*, 32, 2, pp. 163-170.
- [27] Muñoz, Carnero y Artis, (2014). Aplicación de robótica para inspección y evaluación de componentes en una central eléctrica. *Boletín IIE, Tendencia tecnológica. México*. Disponible en: <https://www.ineel.mx/boletin042014/tenden1.pdf>
- [28] Nayak A. y Pradhan S., (2014). Design of a New In-Pipe Inspection Robot. 12th Global Congress on Manufacturing and Management, GCMM 2014, India. Pp 2081.2091
- [29] Othman K. et al. (2016), Mechanical Structure Optimization of Pipe Inspection Robot for Domestic Water Pipe Line. *SCIREA Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 1, Issuel.
- [30] Panatec, (2019). Robot de inspección visual. Carro tractor RX-95. Disponible en: <http://www.panatec-agua.com/robot-inspeccion-ipek.php>
- [31] Perez M. et al., (2014). Aplicación de la Termografía en la inspección y el diagnóstico de paredes de generadores de vapor bkz-340-140/29m. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 23, No. 4, pp. 69-75.
- [32] Pineda et al., (2017). La Computación en México por Especialidades en México. Academia mexicana de computación. Disponible en: <http://amexcomp.mx/files/libro/Cap%204.pdf>
- [33] Rodríguez J., (2015). Simulación de un Robot Hexápodo Bioinspirado en el Tenebrio, *Lámpsakos*, N°. 14, pp. 33-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.21501/21454086.1636>. ISSN: 2145-4086. Medellín, Colombia.
- [34] Sandoval-Castro et al., (2013). Kinematics of Hex-Piderix – A six-Legged Robot – Using Screw Theory. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Vol. 10, 19:2013 DOI: 10.5772/53796.
- [35] Sewervue, (2019). SewerVUE Surveyor cuarta generación. Disponible en: <https://sewervue.com/long-range-pipe-inspection-tracked-robot-surveyor.html>
- [36] Shahida N. et al., (2012). A Review: Hybrid Locomotion of In-pipe Inspeccion Robot. *International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*. Malasia. Pp. 1456-1462.
- [37] Tatar O. et al., (2010). The Design of Adaptable Indoor Pipeline Inspection Robots. *Mechanica* Vol. 68, No. 6, Pp. 60-64. Rumania.
- [38] Urdaneta M., (2012). Diseño y desarrollo de un robot de inspección de Tuberías. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Madrid.

- [39] Zhang Y. y Yan Guozheng, (2007). In pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting. Mechanism and Machine Theory. Pp 1618-1631.

ANEXO A.

Evaluación de la pertinencia de diseños de concepto.

No Concepto	Características	Ventajas	Desventajas
1	Eje de ruedas de longitud variable Articulación esférica central 4 actuadores 4 ruedas 4 resortes de tensión	Facilidad de construcción Cambio de dirección de desplazamiento 360° Requiere mínimo de 1 sección	Pierde estabilidad Posible atascamiento en cambios de diámetro Poco control
2	Transmisión por engranajes al eje de la rueda Articulación universal central 4 actuadores 8 ruedas 4 resortes de torsión	Control de los movimientos	Se adapta a sólo 2 diámetros Mayor complejidad en la construcción Pierde estabilidad Cambio de dirección de desplazamiento cada 90° Requiere mínimo de 2 secciones
3	Transmisión por engranajes al eje de la rueda Articulación universal central 2 actuadores 16 ruedas 8 resortes de torsión	Mayor tracción	Mayor complejidad en la construcción Pierde estabilidad Cambio de dirección de desplazamiento cada 90° Poco control Requiere mínimo de 2 secciones
4	Articulación flexible 2 actuadores 8 ruedas 8 resortes de torsión	Cambio de dirección de desplazamiento 360° Gran adaptabilidad a diámetros diferentes	Pierde estabilidad Sobrepasa el peso máx. estimado Poco control Requiere mínimo de 2 secciones
5	Articulación flexible 2 actuadores 8 ruedas 8 resortes de torsión	Cambio de dirección de desplazamiento 360° Gran adaptabilidad a diámetros diferentes	Pierde estabilidad Poco control Requiere mínimo de 2 secciones
6	Articulación flexible 2/4 actuadores 4/8 ruedas 4/8 resortes de torsión	Cambio de dirección de desplazamiento 360° Gran adaptabilidad a diámetros diferentes Requiere mínimo de 1 sección	Poco control

ANEXO B.

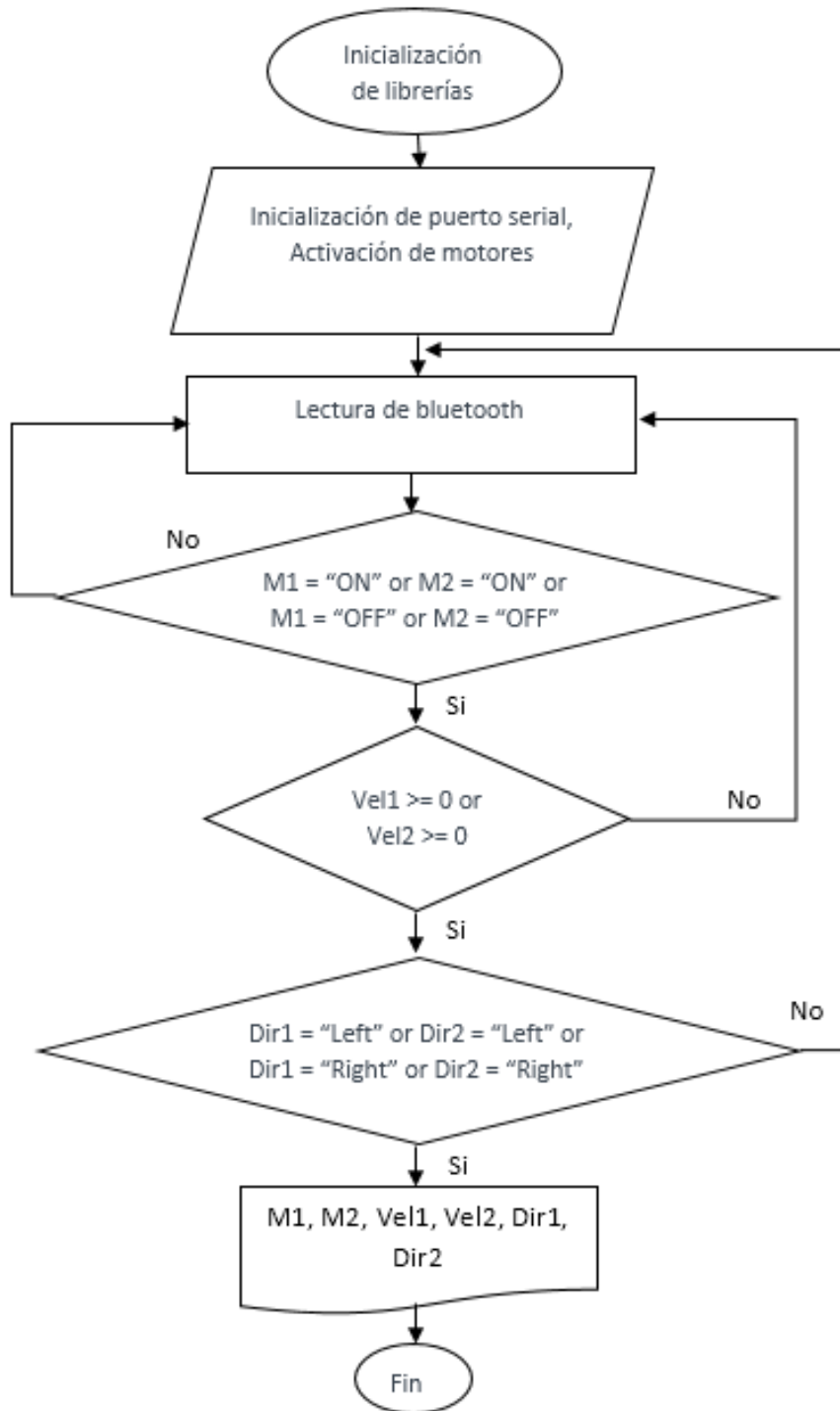
Planos de piezas estructurales del robot. Unidades en [mm].

Extremidad motriz		
Lateral Izquierda	Lateral Derecha	Posterior
Extremidad pasiva		
Inferior	Lateral Derecha	Frontal
Centro		
Frontal	Superior	Lateral Derecha

Rueda pasiva		
Frontal	Lateral Derecha	
<p>Technical drawing showing the frontal view of a passive wheel. The wheel features a central hub with a diameter of $\Phi 6$ and a central bore with a diameter of $\Phi 52$. The wheel has eight spokes and a rim with a radius of $R20$. The distance between the center of the hub and the center of a spoke is $R5$. The thickness of the spokes is $1.5.02$.</p>	<p>Technical drawing showing the lateral view of the wheel. The width of the wheel is 16 and the height is 20.</p>	

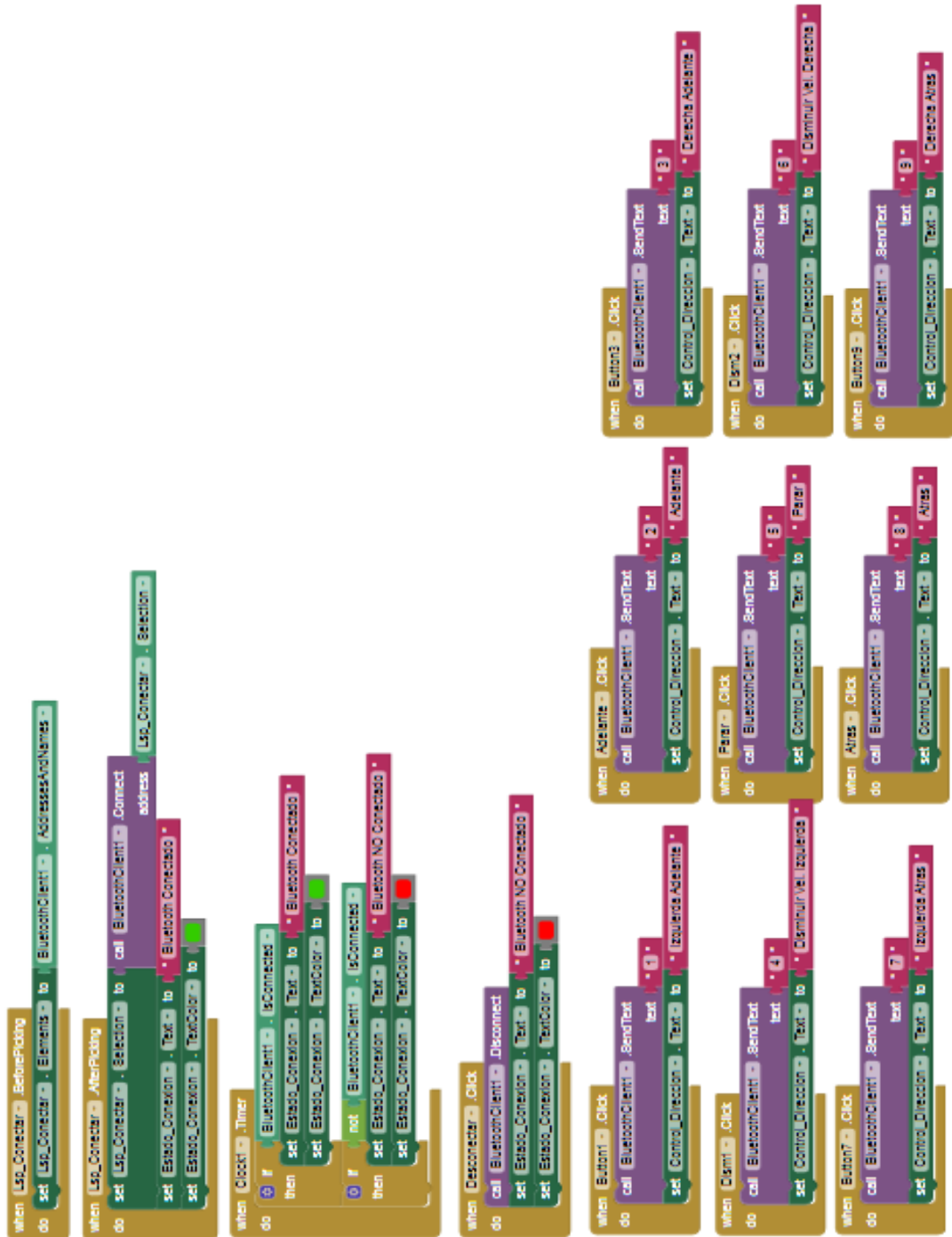
ANEXO C.

Diagrama de flujo general de estrategia de locomoción.



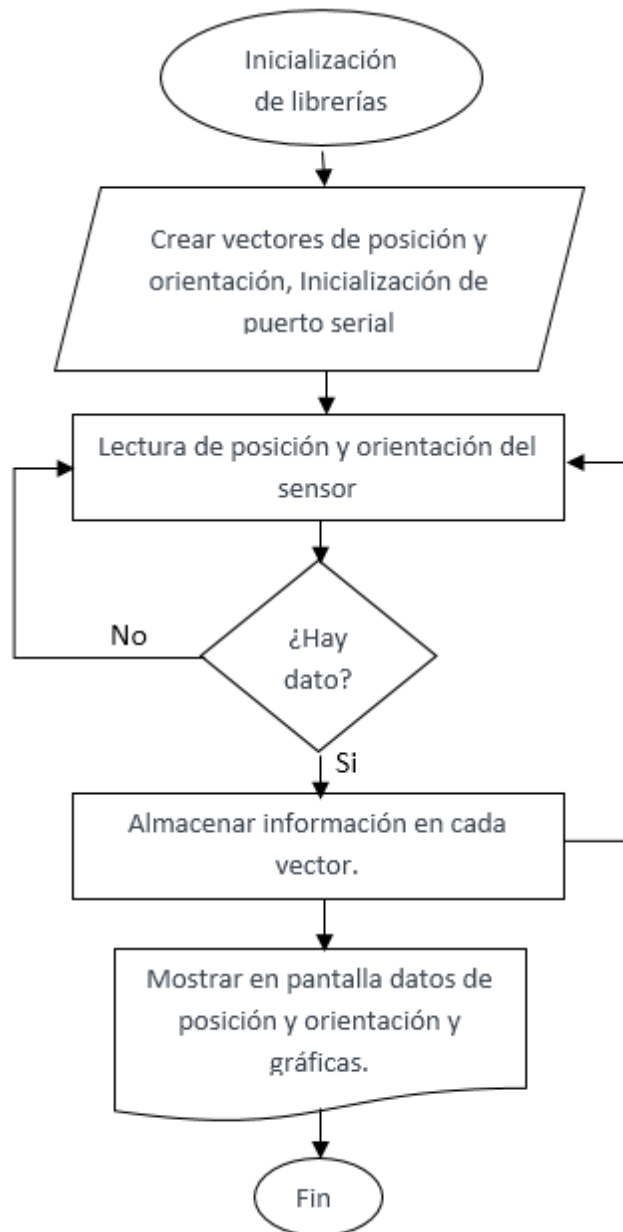
ANEXO D.

Bloques de programación de la aplicación móvil en App Inventor.



ANEXO E.

Diagrama de flujo general de calibración del sensor MPU6050.



ANEXO F.

Resumen del artículo presentado en el Cuarto congreso internacional sobre tecnologías avanzadas de mecatrónica, diseño y manufactura – AMDM 2018 en Manizales, Colombia.



Cuarto Congreso Internacional Sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura - AMDM 2018. Manizales, Colombia, Noviembre 7 al 9 de 2018

Diseño de Mecanismo Adaptable para Robot de Inspección Interna de Tuberías

Design of Adaptable Mechanism for Internal Pipe Inspection Robot

Ana Rocío Córdoba Malaver^γ, Eduardo Castillo Castañeda

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional, Querétaro, México

γ. Autor corresponsal: anarcordobam@gmail.com

Resumen

Este documento presenta la selección de concepto y Diseño Asistido por Computadora (CAD) de un mecanismo adaptable para robot de inspección interna de tuberías. Es un prototipo modular electromecánico que se ajusta al diámetro de la cavidad por la cual se desplaza, mecanismo que comprende cuatro extremidades por cada sección -distribuidas radialmente y de forma equidistante entre sí-, que se extienden y retraen por medio de elementos mecánicos realizando un movimiento tipo bisagra, cada extremidad cuenta con una rueda en su extremo como medio de desplazamiento. Donde una de las secciones está compuesta por dos extremidades que poseen motores para la generación del movimiento a través de la tubería. La locomoción está pensada en desplazamientos dentro de tuberías tanto horizontales como verticales. Adicionalmente, cuenta con una articulación flexible entre secciones, que le permite ajustarse a los cambios de dirección en la tubería como lo son los codos de 90° y tes.

Palabras clave: Inspección de tubería, Robot adaptable, Robot de inspección.

ANEXO G.

Resumen del artículo presentado en el Tercer congreso nacional de mecatrónica y robótica en Querétaro, México; y publicado como capítulo del libro Sinergia Mecatrónica 2019, ISBN 978-607-9394-17-2.

Sinergia Mecatrónica, Capítulo 11, pp.127 - 143, 2019.
ISBN: 978-607-9394-17-2.



Diseño de Sistema Robótico Semiautónomo para Monitoreo de Calidad del Agua Superficial

Córdoba Malaver Ana Rocío¹, Gamboa Contreras Wilson², Castillo Castañeda Eduardo³ y Benítez Muñoz Sandra Johana⁴

Instituto Politécnico Nacional – IPN, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Querétaro, México ^{1,3}
Fundación Universitaria de San Gil - UNISANGIL, Grupo de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Unisangil - IDENTUS, San Gil, Santander, Colombia ^{1,2,4}
*E-mail: anarcordobam@gmail.com*¹


Resumen

El presente artículo, comprende la descripción de la actividad de medición, materiales y métodos usualmente empleados para la obtención y análisis de calidad de agua superficial. Dichos parámetros se obtienen empleando protocolos de monitoreo manuales para análisis de calidad del agua in situ y otras son llevadas a laboratorio. Los desarrollos tecnológicos como, robots y vehículos aéreos no tripulados aportan una solución a esta problemática actual. Se desarrolló un diseño asistido por computador (CAD) de un sistema robótico que cumple con los requerimientos para llevar a cabo el procedimiento de monitoreo de calidad del agua superficial. El diseño comprende: actuador para toma de muestras por medio de un brazo robótico, dispositivo de traslado y conservación de muestras, sistema de instrumentación de análisis in-situ, dispositivo de reconocimiento panorámico, georeferenciación y sistema de comunicación y transferencia de información. La integración del desarrollo tecnológico se modeló matemáticamente en Matlab y estructuralmente en Solidworks.

Palabras clave: Calidad del agua superficial, Sistemas de monitoreo del agua superficial, Sistemas Robotizados.

ANEXO H.

Oficio de confirmación de registro de solicitud de patente de la invención denominada “Dispositivo móvil para inspección remota de cavidades adaptable a dimensiones irregulares”.

**Instituto Politécnico Nacional**
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Unidad Politécnica para el Desarrollo y la Competitividad Empresarial

2019, Año del Caudillo de Sur, Francisco Zúñiga
69 años de la Unidad Profesional "Abelardo Lúpez Mateos"
70 Aniversario de CECyT, los 3 "Escuelas Rurales Rurales"
80 años de RCMP Canal Ocosingo, Digitalización Politécnica
80 Aniversario del CECyT, los 3 "Escuelas Rurales Rurales"

Folio
UPDCE.D/STDT/CEPAT/00506/2019

Asunto
Número de expediente de Patente

Ciudad de México, 27 de Febrero de 2019

Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán
Director del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Unidad Querétaro, del IPN
PRESENTE

Me permito hacer de su conocimiento que la División de Legislación y de lo Consultivo de la Oficina del Abogado General, presentó ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), el registro de la solicitud de patente de la invención denominada **“DISPOSITIVO MÓVIL PARA INSPECCIÓN REMOTA DE CAVIDADES ADAPTABLE A DIMENSIONES IRREGULARES”**, desarrollada por el Dr. Eduardo Castillo Castañeda, trabajador académico adscrito al Centro a su digno cargo, la C. Ana Rocío Córdoba Malavar y el C. Gilberto Jiménez Díaz, alumnos del mismo Centro, a la cual recayó el número de expediente **MX/a/2018/015143**, por lo que se informará tan pronto se tenga notificación sobre el examen de forma.

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

“La Técnica al Servicio de la Patria”


M. en C. Ricardo Monterrubio López
Director



Se emiten copias de conocimiento vía correo electrónico a:
Dr. Eduardo Castillo Castañeda, Profesor del CICATA Querétaro.
C. Ana Rocío Córdoba Malavar, C. Gilberto Jiménez Díaz, Alumnos del CICATA Querétaro.

RMU/CEPAT/00506/2019