

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA, A.C.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

TESIS DE MAESTRIA

**ROBOT SEMI-AUTÓNOMO PARA LA NAVEGACIÓN EN ESPACIOS
RESTRINGIDOS DE CONFIGURACIÓN ARBITRARIA**

por

MISAEEL JIMÉNEZ GUTIÉRREZ
Ingeniero en Mecatrónica

Dirigida por
Dr. Evguenii Kourmychev y Dr. Víctor Ayala Ramírez

Tesis presentada como uno de los requisitos para
obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica

LEON
MEXICO
2009

A la memoria del Dr. Cirilo Medina Gutiérrez

Agradecimientos

Hay tantas personas que me han ayudado orientado, enseñado y motivado durante estos años de maestría que no me alcanza el espacio para expresarles toda mi gratitud.

Primero que nada quiero agradecer a mi asesor de tesis, Evguenii Kourmychev por confiar en mí y permitirme desarrollar su idea, y que además ha sabido darme la suficiente libertad para tomar distintos caminos, aconsejarme para tomar decisiones, y obligarme a realizar la parte más ingrata del trabajo de tesis.

Por supuesto agradecer a mí también asesor de tesis Víctor Ayala que me orientó y me dio la oportunidad de trabajar en su laboratorio en la División de Ingenierías campus Irapuato Salamanca (DICIS) de la Universidad de Guanajuato, desde luego que este agradecimiento se extiende al grupo de trabajo de LaViRIA y al Dr. Raúl, donde los lavirianos junto con el Dr. Víctor Ayala, y el Dr. Raúl me enseñaron una forma de trabajar que me encaminó a resolver los problemas que se me presentaron, gracias a todos.

Agradecer también a mis compañeros de generación Moisés y Carlos, gracias por su ayuda y por su apoyo durante nuestra jornada en esta maestría.

De igual manera le doy las gracias al Centro de Investigaciones en Óptica, por ayudarme y brindarme todo lo que necesitaba para la realización de este trabajo así como a cada uno de los trabajadores del centro, de la misma forma agradecer el apoyo económico que me brindaron el CONCYTEG y el CONACYT.

He de dar también las gracias a mis padres José Manuel y Yolanda y mis hermanos Christian, Israel, Doraly, Yoli y Lili, por todo su apoyo incondicional y porque gran parte de lo que soy hoy como persona se lo debo a ellos.

Agradecer a todos los que se escapan en este espacio, a todos aquellos que me han ayudado en mi educación y formación con sus consejos y escucha, gracias de verdad.

Resumen

La presente tesis se enmarca dentro del área de robótica móvil y se centra específicamente en el estudio y diseño de los robots para la exploración de espacios restringidos de configuración arbitraria, como los son los ductos o las tuberías. El problema a resolver es como coordinar los elementos del robot para lograr el movimiento de desplazamiento dentro de la tubería, integrar los sistemas de sujeción, eléctrico y neumático en el robot en una simulación de computadora.

Para el desarrollo de un robot se tiene un gran reto, que es el desarrollo de un robot lo más robusto posible que sea capaz de desplazarse de un lugar a otro, no importando la configuración del entorno o el ambiente. Esto tiene especial interés cuando no se conoce el entorno, como la exploración de ambientes hostiles o las operaciones de búsqueda y rescate.

Dentro de este marco, en esta tesis se estudia el diseño de los robots para la exploración de tuberías llamados en la industria como “pipe crawlers”. Particularmente éste trabajo de tesis se enfoca en el diseño de un robot con locomoción tipo inch-worm con un nuevo sistema de sujeción adaptable a su entorno para el fin mencionado.

En esta tesis se establece una clasificación de los robots pipe crawlers según su forma de locomoción, su adaptabilidad a la configuración de las tuberías y si tienen la capacidad de navegar en tuberías verticales. Los resultados muestran que nuestra propuesta de robot es totalmente viable y que los movimientos son de acuerdo a lo planeado en cuanto a su forma de locomoción.

Uno de los grandes problemas en las tuberías ya sea industriales o de servicios, es que el acceso para el hombre es restringido y se requiere por ende un medio confiable para su valoración, ya sea por mantenimiento, prevención o por alguna falla o fuga que ya se tenga.

Regularmente la forma de hacer esto es inspeccionar una parte de la tubería por medios que comprometen la integridad de la tubería, como sería cortar una parte para hacer la valoración de ésta y dependiendo del caso se podría extender el resultado a toda la tubería haciendo esto un proceso muy costoso.

Los principales problemas en las tuberías son: el adelgazamiento de las paredes y la acumulación de materiales, lo cual obstruye el flujo dentro de las tuberías. Por lo tanto para inspeccionar las tuberías se requiere un robot que sea lo suficientemente robusto para adaptarse a la configuración de las tuberías y que su forma de locomoción no comprometa la tubería si ésta tuviera sus paredes adelgazadas por corrosión años de servicio. En esta tesis se propone una forma de sujeción que permite al robot adaptarse a la configuración de la tubería protegiendo la integridad de ésta debido a la naturaleza de los elementos usados para este fin, que serían bolsas neumáticas.

Se ha realizado la simulación de la coordinación de los sistemas electro neumático dentro del software de simulación FluidSIM de FESTO. De la misma forma se ha diseñado el sistema mecánico en el software Solidworks.

Índice general

	Pág.
Resumen	vii
Lista de figuras	xii
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Estado del arte.....	4
1.3. Objetivos de la tesis.....	6
1.4. Limitaciones y dependencias.....	8
1.5. Estructura del documento.....	9
2. Encuadre científico-tecnológico	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Locomoción.....	11
2.2.1. Niveles en la locomoción.....	11
2.2.2 Tipos de locomoción.....	12
2.2.3. Locomoción de robots.....	12
2.2.4. Diseño de robots móviles.....	13
2.2.5. El problema de la locomoción.....	14
2.3. Robots ápodos.....	14
2.4. Clasificación y análisis de los robots para la exploración de tuberías.....	15
2.4.1. Tipo “pig”.....	16
2.4.2. Con ruedas.....	18
2.4.3. Con orugas.....	21

2.4.4. De presión contra la pared.....	22
2.4.5. Tipo andante.....	24
2.4.6. Tipo “inch-worm“.....	26
2.4.7. Tipo tornillo.....	32
2.4.8. Tipo serpiente.....	34
2.5. Conclusiones.....	36
3. Ventajas de la Simulación	37
3.1. Introducción.....	37
3.2. Algunas definiciones.....	37
3.3. Porque usar simulación.....	39
3.4. Herramientas de simulación.....	40
3.5. Conclusiones.....	41
4. Un modelo de locomoción tipo inch-worm	42
4.1. Introducción.....	42
4.2. Movimiento tipo inch-worm.....	42
4.3. Un modelo simple de un robot tipo inch-worm.....	44
4.4. Cinemática de la locomoción inch-worm.....	45
4.5. Modelar la locomoción tipo inch-worm como autómeta.....	46
4.6. Extensores y sujetadores auxiliares.....	48
4.7. Movimiento de un solo paso.....	49
4.8. Movimiento de doble paso.....	51
4.9. Movimiento de onda fija.....	51
4.10. Conclusiones.....	52
5. Descripción de la simulación del sistema electro neumático	54
5.1. Introducción.....	54
5.2. Sistema electro neumático.....	54

5.3. Secuencia de avance del robot.....	57
5.4. Secuencia de retroceso.....	60
5.5. Conclusiones.....	63
6. Un diseño mecánico del robot	64
6.1. Introducción.....	64
6.2. Sistema mecánico.....	64
6.3. Camisa del cilindro.....	66
6.4. Cilindro externo.....	67
6.5. Culata posterior y anterior.....	68
6.6. Embolo y vástago.....	70
6.7. Bolsa neumática.....	71
6.8. Conclusiones.....	73
7. Conclusiones y trabajo a futuro	74
7.1. Principales contribuciones.....	74
7.2. Resumen de conclusiones.....	75
7.3. Trabajo a futuro.....	78
A. Plan de negocios	81
B. Costo de producción	92
C. Perspectivas de trabajo a futuro	94
D. Vinculación con la industria	95
Bibliografía	96

Lista de figuras

Figura	Pág.
2.1. Clasificación de los robots para la inspección de tuberías. (a) Tipo “pig”. (b) Con ruedas. (c) Con orugas. (d) De presión contra la pared. (e) Tipo andante. (f) Tipo “inch-worm“. (g) Tipo tornillo. (h) Tipo serpiente.....	16
2.2. Diferentes ejemplos de robots tipo pig para la inspección de tuberías.....	17
2.3. Prototipo para explorar tuberías KURT.....	18
2.4. KARO prototipo para tuberías de drenaje en el rango de 20-40 cm.....	19
2.5. Fotos del robot para la exploración de tuberías diseñado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).....	20
2.6. Robot para la inspección de tuberías Versatrax 300.....	21
2.7. Robot pipe crawler de presión contra la pared diseñado por Inspector Systems....	23
2.8. Robot para la inspección de tuberías PIC.....	24
2.9. Robot pipe crawler “MORITZ”.....	25
2.10. Robot tipo inch-worm bottle-brush.....	28

Figura	Pág.
2.11. Fotografía del robot pipe-crawler MOCCASIN II.....	29
2.12. Robot pipe-crawler apparatus con locomoción tipo inch-worm.....	30
2.13. Robot para exploración de tuberías tipo inch-worm.....	32
2.14. Arquitectura del robot tipo tornillo.....	33
2.15. Robot tipo serpiente funciona como tren en tuberías horizontales y maniobra en tuberías verticales.....	34
2.16. Robot pipe-crawler tipo serpiente PiKo.....	35
3.1. Simulación de los actuadores neumáticos de nuestro robot.....	41
4.1. Modelo de un robot tipo inch-worm.....	44
4.2. Locomoción de un robot tipo inch-worm de dos extensores.....	46
4.3. Locomoción de un robot tipo inch-worm de tres extensores.....	47
4.4. Generación del movimiento mediante una búsqueda exhaustiva en el grafo formado por el generador A	48
4.5. Movimiento de avance de un paso con idénticas condiciones iniciales.....	51
4.6. Generación de movimiento multi pasos.....	52

Figura	Pág.
5.1. Secuencia de desplazamiento del robot.....	56
5.2. Sistema electro neumático del robot.....	62
6.1. Sección del robot.....	65
6.2. Camisa del cilindro del robot.....	66
6.3. Cilindro externo del robot.....	67
6.4. Detalle de la culata posterior del robot.....	68
6.5. Detalle da la culata anterior del robot.....	68
6.6. Detalle de rascador, casquillo guía, obturador y tórica de cierre (de derecha a izq.) de la culata anterior del robot.....	69
6.7. Detalle del vástago y embolo del cilindro neumático del robot.....	70
6.8. Bolsa neumática del robot.....	71
6.9. Vista explosionada del sistema mecánico del robot.....	72
6.10. Detalle del segmento trasero del robot.....	72

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo introductorio se presenta el ámbito de aplicación de esta tesis, sus objetivos y como se ha organizado el contenido de la memoria. En el siguiente capítulo se describirá con más detalle su contexto.

1.1. Planteamiento del problema

La navegación de robots en espacios restringidos es una tarea interesante debido a la variedad de aplicaciones que implica.

En la investigación de robótica de rescate se busca que los robots puedan navegar por lugares que han sufrido algún tipo de desastre y se encuentran inaccesibles para los humanos o resultan muy peligrosos para el acceso de las personas. Aquí los robots entran para la explorar el escenario y poder encontrar víctimas o sobrevivientes, lo cual requiere de cierta autonomía. En estos escenarios también se podrían utilizar las tuberías de los servicios de gas, agua etc., para la expiración de los mismos.

Otro escenario de aplicación, lo ocupan tareas de interés económico, como la inspección automatizada de tuberías tanto en dominios industriales, como en el caso de los oleoductos petroleros; como en el caso de recursos naturales, en la conducción de agua o aún incluso en sistemas de higiene, como en el caso de drenajes.

Para reparar tuberías se requiere la habilidad para monitorear y evaluar el interior de las tuberías. La inspección del interior de las tuberías es deseable antes de tomar acciones correctivas lo cual implica costos de capital. Debe ser de forma no destructiva para tener una confirmación de parte de la tubería está dañada o si se presenta oxidación en tuberías de metal o alguna acumulación de material extraño que disminuya el flujo. Además de ser muy útil cuando la tubería esta fuera del alcance como tuberías subterráneas.

Generalmente la forma más común de resolver estos problemas es cortar uno o más tramos de la tubería, lo que implica un alto gasto inherente a este tipo de soluciones además del tiempo que se emplea en tal acción, Debido a los diferentes tipos de corrosión encontrados en las tuberías, rajaduras en las paredes, y diferentes tipos de adhesión de objetos en diferentes partes de la tubería, es cuestionable y riesgoso, extender los resultados del análisis de una sola área a toda la tubería.

En esta tesis se presenta el diseño de un dispositivo conocido en la industria como pipe crawler. Estos dispositivos son usados frecuentemente para monitorear la integridad del interior de las tuberías por medio de sensores y/o cámaras y de esta manera ayudar al diagnostico del estado de las tuberías necesario para su reparación o mantenimiento. Esta tesis se enfoca en el diseño de un aparato capaz de trasladarse por el interior de la tubería mediante un nuevo sistema de locomoción que para fines de identificación lo llamaremos push-pull.

Esta tesis se enmarca dentro del área de la locomoción de robots que denominamos ápodos. El problema a resolver es desarrollar un nuevo sistema de locomoción, utilizando un

sistema adaptable al entorno que rodea al robot para que pueda desplazarse tanto en forma horizontal como anti gravitatoria.

Se considera locomoción como la capacidad de los seres vivos que pertenecen al reino animal que les permite trasladarse de un lugar a otro. En la locomoción se consideran dos aspectos importantes el control y la voluntariedad. Es importante que el individuo quiera realizar el movimiento y controlarlo para que este sea llamado locomoción. En robótica los dispositivos capaces de realizar locomoción se denominan robots móviles. La parte de la robótica que se encarga del estudio de robots que tienen la capacidad de navegar en ambientes desconocidos se denomina robótica móvil.

En locomoción tenemos dos niveles principales de estudio que de acuerdo con [1] los denomina nivel inferior y nivel superior. González [1] define como nivel inferior al encargado del control y la coordinación de los actuadores para que el robot se desplace. Engloba también los diferentes tipos de maneras de caminar que se pueden lograr (desplazarse en línea recta, desplazarse lateralmente, girar, etc.), en este nivel se atienden los problemas de desplazamiento del robot y la coordinación de los actuadores para lograr avanzar un paso. En el nivel superior se consideran los conceptos de la planificación de trayectorias, navegación y otras tareas de mayor nivel.

Esta tesis se concentra en el nivel inferior de la locomoción donde se atiende el problema de la coordinación de los actuadores del robot para poder desplazarse en el interior de la tubería.

En robótica es un gran reto el desarrollo de un dispositivo que sea capaz de desplazarse de un lugar a otro enfrentando cualquier terreno o condiciones de este. Esto es de especial interés cuando queramos que nuestro robot se maneje por terrenos desconocidos, como la exploración de planetas, navegación en entornos peligrosos para los humanos, u operaciones de búsqueda y rescate, o como en nuestro caso la exploración de tuberías, aunque la facilidad en este aspecto es

que podemos contar con los planos de las tuberías. El reto en este caso es el saber los sedimentos que podríamos encontrar dentro de las tuberías, y por lo tanto en este caso es importante contar con un robot con la capacidad para sortear este tipo de obstáculos. Aún cuando los robots sean operados a larga distancia, su movilidad está limitada por su diseño. Y para mejorarla se requieren decisiones de diseño como el tipo de efectores que va a emplear, si son mejores las patas, ruedas, orugas etc., o ¿cuántas piezas de este tipo se requieren?, ¿qué tipo de locomoción emplear?, etc.

En general se requiere estudiar *a priori* el entorno en el que se va a desenvolver nuestro robot, para realizar el diseño que más nos convenga ya sea con ruedas, patas, o algún otro tipo de efector. Como en nuestro caso donde se emplea un efector nuevo, el cual tiene la ventaja de adaptarse cuando el entorno es cambiante.

En esta tesis se estudia el diseño del prototipo de un aparato que se mueve dentro de las tuberías para su inspección.

1.2. Estado del arte

Típicamente, los pipe crawlers incluyen una sonda de prueba, un sensor, o una cámara mediante una estructura de soporte que viaja a través del sistema de tuberías que está siendo inspeccionado [2-17].

Mientras tales pipe crawlers son ventajosos en que permiten la limpieza, evaluación e inspección de los sistemas de tuberías, también poseen desventajas. Muchos conceptos originales de locomoción han sido propuestos para resolver numerosas dificultades técnicas asociadas con los cambios de diámetro de las tuberías, la presencia de tuberías verticales, varios codos y juntas en “T” y el abastecimiento de energía.

Los mecanismos más simples que permiten el movimiento solamente en tuberías horizontales [2-5] tienen la dificultad de producir la fuerza de fricción necesaria para continuar moviéndose en distancias largas en las tuberías. Debido a que estos dispositivos necesitan proveer suficiente fuerza de movimiento para jalar grandes longitudes de cables de alimentación y de señal aunque actualmente se están desarrollando dispositivos sin cables [6]. Además otra importante desventaja de estos pipe crawlers es que estos no pueden moverse a través de tuberías verticales o en tuberías curvadas. Estas dificultades han sido resueltas en algunos aspectos en el pasado [7-17].

Una forma es utilizar objetos elásticos como los resortes para presionar las ruedas la pared de la tubería [7-9], lo cual provee la pre-carga suficiente y fuerza de fricción al accionamiento de las ruedas en una tubería inclinada o vertical. Estos robots consisten en dos partes; principalmente las redas frontales y las traseras. Estas dos partes están articuladas por un enlace flexible o por una junta universal que permiten al robot corresponder con las curvas y vueltas y negociar con ellas. El movimiento de dirección puede ser provisto por conjunto de ruedas moviéndose en forma paralela al eje de la tubería [7] o mediante conducción helicoidal que por medio de ruedas inclinadas rotando respecto al eje de la tubería suministrando propulsión hacia adelante en forma de un tornillo giratorio [15]. Aunque esta forma de locomoción tiene sus propios inconvenientes, y es que los robots fueron diseñados para un tamaño de diámetro [15], y algunos de estos son adaptables a pequeños cambios de diámetro de las tuberías debido a la restricción del rango radial de los resortes.

Aún vehículos más complejos son aquellos que usan movimientos de serpiente [16, 17] o mecanismos “inch-worm” (tipo oruga) [11-14] para propulsión en horizontal, vertical y también en tuberías curvadas. Estas soluciones han mostrado grandes promesas pero permanecen en fase de experimentación debido a la complejidad de los mecanismos. Un “robot serpiente” es un mecanismo multi-segmentado que deriva la propulsión de ruedas, piernas, o zapatas en cada segmento. Un “robot serpiente” provee capacidades de direccionamiento en tuberías curvadas y la pre-carga necesaria contra la pared de la tubería mediante el movimiento

relativo de sus segmentos usando juntas de conexión motorizadas. Mientras que un mecanismo “inch-worm” está hecho de varias unidades, las cuales son capaces de trabajar en una radial y axial, contracción y extensión.

En algunos casos se utilizan mecanismos andantes especialmente diseñados para moverse en forma horizontal, vertical y también en tuberías curvadas [10]. Los mecanismos andantes ofrecen complejo discreto más que un simple continuo contacto con la pared de la tubería.

En esta tesis se propone un nuevo concepto para la sujeción de un robot tipo “inch-worm” que tiene la capacidad de recorrer en forma horizontal y verticalmente tuberías, además de tener la ventaja de tener movimiento hacia adelante y hacia atrás. Otra ventaja es la capacidad de adaptarse a la forma y diámetro de la tubería.

1.3. Objetivos de la tesis

EL objetivo principal de esta tesis es **desarrollar una simulación computacional dinámica que muestre un nuevo sistema de sujeción para locomoción tipo inch-worm, denominado para fines de identificación como push-pull, que se implementará en un robot semi-autónomo para la navegación en espacios restringidos, en particular tuberías de configuración arbitraria, además de el diseño de un robot mediante simulación, para la inspección de tuberías con diámetro variable, para probar el un nuevo efector de sujeción con una locomoción “inch-worm” para el movimiento en tuberías tanto verticales como horizontales así como movimiento hacia adelante y hacia atrás.** Queremos establecer mediante la simulación las especificaciones del prototipo físico que se pretende construir en un futuro y cómo hay que coordinar los sensores y actuadores para lograr la locomoción del dispositivo.

Se trata de un problema muy amplio que puede ser abordado por varios expertos. La forma de afrontarlo será mediante la simulación en programas de uso comercial. **Los objetivos** concretos los enunciamos a continuación.

1. Estudiar la viabilidad de la locomoción (inch-worm) utilizando el nuevo sistema de sujeción. (¿Se consigue que el robot se desplace?)
2. Desarrollo del movimiento horizontal y vertical dentro de la tubería.
3. El movimiento del robot dentro de la tubería tiene que ser hacia adelante y hacia atrás.
4. Establecer las especificaciones para la construcción del prototipo físico.

Para abordar este estudio se plantean los siguientes **objetivos secundarios**:

- Revisión del estado del arte en robótica para la inspección, evaluación y mantenimiento de tuberías. Estudiar los robots utilizados para este fin y clasificarlos e identificar los aportes originales de esta tesis.
- Revisión de los sistemas de los modelos para los robots con locomoción “inch-worm”.
- Desarrollo de un prototipo virtual utilizando el software Solidworks, para la evaluación de las propuestas.

1.4. Limitaciones y dependencias

Para comprobar la viabilidad de las ideas propuestas en la tesis se planea la demostración virtual del robot mediante el software marilou. Los objetivos que explícitamente no forman parte de esta tesis son:

- La construcción del robot para la inspección de espacios restringidos (tuberías) autónomo. Para la verificación de las ideas propuestas no es necesario que los prototipos construidos sean autónomos. Los controladores estarán programados en el PC y enviarán las posiciones de los actuadores y dispositivos de sujeción a través de un cable, mediante conexión en serie. La alimentación se obtendrá a través de una fuente de alimentación externa, situada fuera del robot. Para que el robot no precise de ningún tipo de cables es un problema puramente tecnológico y totalmente viable.
- Niveles superiores de locomoción. No es objetivo de esta tesis programar comportamientos en el robot ni abordar otros aspectos relacionados con los niveles superiores de la locomoción, como la percepción del entorno, la planificación de trayectorias etc.

Además para hacer abordable el estudio de la locomoción de los robots ápodos, se han aplicado las siguientes restricciones:

- El robot virtual solo ejecutará las primitivas de movimiento bidireccional y en forma horizontal y vertical.
- Que la superficie interna de la tubería es homogénea y sin obstáculos, (no tiene partes filosas, puntiagudas que comprometan el sistema de locomoción), además de no tener cambios de diámetro. Como primer paso buscaremos soluciones al problema de la coordinación para este tipo de superficies.
- Fuente de aire comprimido ilimitado.

1.3. Estructura del documento

En este primer capítulo se ha introducido el contexto de la tesis, sin entrar en detalles y se han presentado los objetivos. En el segundo capítulo describiremos con más rigor todos los avances que han producido en el área de los robots para la exploración, evaluación e inspección de tuberías y mostraremos con más exactitud donde encaja esta tesis. En el tercer capítulo se expondrán las ventajas de usar simulación en un sistema optomecatrónico.

En el cuarto capítulo se presenta el modelo empleado para robots de locomoción “inch-worm”.

En el siguiente capítulo de la tesis, se dedica a un problema diferente, la simulación del sistema electro neumático (capítulo quinto). En el capítulo sexto se presenta la descripción del sistema mecánico y las ventajas del diseño

Finalmente en el capítulo séptimo, exponemos las conclusiones y las líneas futuras de investigación. Al final de cada capítulo se presentan las conclusiones particulares, de manera que sólo con leer la introducción y las conclusiones de cada capítulo el lector tendrá una idea resumida del trabajo realizado.

Capítulo 2

Encuadre científico-tecnológico

2.1. Introducción

En este capítulo estudiaremos los diferentes tipos de robots desarrollados para la exploración, evaluación e inspección de tuberías. Haremos hincapié en los prototipos creados y veremos desde una perspectiva general dónde encaja esta tesis y sus aportaciones. Muchas de las ideas y ejemplos ya han sido presentados en el capítulo introductorio, sin embargo se volverán a incluir en este capítulo para que sea auto contenido.

Primero introduciremos **el problema de la locomoción** y algunas ideas previas. Continuaremos con el estado del arte de **los robots pipe crawlers**. Las investigaciones actuales se centran tanto en la locomoción de estos robots como en sus capacidades para formar diferentes estructuras. Finalizaremos esta parte **estableciendo una clasificación** que engloba los robots para la exploración, de tuberías (pipe crawlers) de acuerdo a la forma e lo conoció de los robots resaltando sus ventajas y desventajas en cuanto a su capacidad para adaptarse a la configuración de la tubería (su diámetro), la robustez de éstos para sortear obstáculos como la acumulación de material en las tuberías y si poseen la capacidad de navegar en tuberías de forma vertical.

2.2. Locomoción

2.2.1. Niveles en la locomoción

La locomoción es la capacidad que tienen los seres vivos pertenecientes al reino animal que les permite trasladarse voluntariamente de un lugar a otro. Es una de las características diferenciadoras de los animales con respecto a las plantas. Hay dos aspectos importantes a tener en cuenta: el **control** y la **voluntariedad**. Para que el movimiento sea considerado locomoción el individuo tiene que querer realizarlo y además controlarlo.

El estudio de la locomoción se divide en dos niveles, que de acuerdo con González [1] denominaremos nivel inferior y superior.

El **nivel inferior** es el encargado del control y la coordinación de los músculos (o actuadores en el caso de los robots) para que el individuo pueda desplazarse. Engloba también los diferentes tipos de maneras de desplazarse que se pueden lograr (giros, desplazamiento en línea recta, desplazamiento lateral, etc.). Las preguntas que se resuelven en este nivel son: ¿Cómo me desplazo? ¿Cómo coordino todos los músculos (actuadores) para lograr la locomoción?

El **nivel superior** se encarga de la planificación de trayectorias, navegación y otras tareas de mayor nivel. Está relacionado con la voluntariedad. Las preguntas que definen este nivel son: ¿Dónde quiero ir? ¿Qué camino seguir?

En esta tesis nos centraremos en el nivel inferior de la locomoción, estudiando el circuito electro neumático y el sistema mecánico para que el robot pueda desplazarse.

2.2.2 Tipos de locomoción

En la naturaleza, la locomoción de los animales se ha adaptado al medio en el que viven. Se puede realizar una primera clasificación según el medio en el que se desplazan. Así, la locomoción puede ser: aérea, acuática o terrestre. Esta clasificación no es excluyente. Los mamíferos terrestres son capaces también de desplazarse cortas distancias por el agua, por ejemplo para cruzar un río. En este caso utilizan un modo de caminar (*gait*) diferente, que les permite nadar.

La locomoción terrestre se puede dividir a su vez en dos categorías, según los órganos empleados para realizar el desplazamiento: **locomoción mediante patas** (mamíferos, insectos) o mediante **movimientos corporales** (serpientes, orugas, lombrices).

2.2.3. Locomoción de robots

Una de las áreas de investigación en robótica es la locomoción: dotar a los robots de capacidades de locomoción para que puedan trasladarse de un lugar a otro. Estos robots reciben el nombre genérico de **robots móviles**. A su vez, el estudio de la locomoción se realiza en los dos niveles mencionados en los apartados previos. En las investigaciones del nivel superior se parte de que el robot puede desplazarse, haciéndose abstracción de los mecanismos para que sea posible (patas, ruedas...) y se centra en las tareas de alto nivel de navegación, planificación de trayectorias, visión, cooperación, etc.

Al igual que sucede con los animales, en el estudio del nivel inferior de la locomoción se pueden clasificar los robots según los efectores empleados para su desplazamiento: **ruedas**, **orugas**, **patas** o el **cuerpo**. Bajo el término **robots ápodos** quedan englobados aquellos robots, que igual que sus homólogos en la naturaleza, realizan la locomoción mediante movimientos corporales. Estos son las cuatro categorías clásicas para el estudio de la locomoción. Sin embargo pueden aparecer nuevos efectores y abrir la posibilidad de una nueva clasificación.

Los temas de investigación en el nivel inferior de la locomoción son las propiedades de los diferentes efectores, cómo realizar la coordinación de los actuadores, los diferentes modos de caminar, algoritmos de control, etc. En lo que resta de capítulo al hablar de locomoción nos referiremos siempre al nivel inferior.

2.2.4. Diseño de robots móviles

Lo mismo que ocurre en el reino animal, donde la locomoción de los individuos está especialmente adaptada al entorno en el que normalmente se desenvuelven, para el diseño de un robot móvil es esencial conocer el terreno por el que se va a desplazar. Es **el entorno** el elemento clave en la decisión de qué efectores elegir y qué tipos de modo de caminar implementar. Así por ejemplo, si el robot se va a desplazar por superficies lisas donde no existe la necesidad de superar obstáculos, bastará con utilizar ruedas o a lo sumo orugas.

El proceso de diseño se podría resumir en los siguientes pasos:

1. Estudiar el entorno en el que se va a desplazar el robot
2. Seleccionar los efectores
3. Implementar los modos de caminar

Estos pasos son muy críticos. Una mala elección a este nivel, implicaría tener que volver a reconstruir el robot. Esta es la razón por la que las investigaciones a este nivel son tan importantes: cuanto mejor se conozcan las propiedades de los efectores, los modos de caminar posibles, su eficiencia, etc., mayor serán los datos disponibles para tomar una decisión de diseño correcta. ¿Qué diseño implementar? Un error en la configuración del robot a este nivel es muy crítico.

Sin embargo, existen aplicaciones en las que es difícil conocer a priori y con detalle el terreno, por lo que hay mucha incertidumbre en la etapa inicial de diseño. Tal es el caso del diseño de robots para las **operaciones de búsqueda y rescate** o **la exploración de planetas**. Debido a ello, el robot tiene que tener la **máxima versatilidad** posible. Las investigaciones se centran en estudiar los efectores más versátiles y los diferentes modos de caminar posibles.

2.2.5. El problema de la locomoción

Uno de los grandes retos es el de desarrollar un robot que sea capaz de moverse por cualquier tipo de entorno por muy escarpado y complicado que sea. Es decir, un robot con una gran versatilidad. Esto tiene especial interés en las aplicaciones en las que el entorno no es lo suficientemente conocido o es cambiante, como en la exploración de las superficies de otros planetas, exploración en entornos hostiles o operaciones de búsqueda y rescate. ¿Qué es mejor utilizar, patas, ruedas, orugas...? ¿Qué número de patas? ¿Qué tipo de movimiento? ¿Qué configuración de las patas si es que las tiene?

2.3. Robots ápodos

Frente a la locomoción terrestre mediante patas, están los seres vivos que utilizan movimientos corporales. Los robots que utilizan este tipo de desplazamiento los denominaremos **robots ápodos**. El término ápodo significa “carente de patas”.

Estos robots tienen unas características que los hacen únicos, al igual que sus homólogos las serpientes y gusanos. Por un lado está su capacidad para cambiar su forma. Frente a las rígidas estructuras del resto de robots, los ápodos pueden doblarse y adoptar la forma del terreno por el que se desplazan. Por otro lado, su sección es muy pequeña en comparación con su tamaño, lo que les permite introducirse por tubos u orificios pequeños y llegar a lugares donde otros robots no pueden.

Dentro de los robots móviles existe esta clasificación de robots ápodos donde la locomoción del dispositivo se hace sin patas, a la cual pertenece la propuesta de esta tesis, puesto que nuestro robot no cuenta con patas para desplazarse.

2.4. Clasificación y análisis de los robots para la inspección de tuberías

En este apartado clasificaremos los robots pipe crawlers y daremos una breve descripción de algunas propuestas de cada tipo de robot móvil pipe crawlers, resaltando las soluciones y propuestas que ofrecen para la exploración, evaluación, e inspección de tuberías. Además los clasificaremos de acuerdo al tipo de locomoción en el nivel inferior y al tipo de los efectores utilizados para ésta. Por otro lado analizaremos estos dispositivos en base a la robustez de su diseño para su navegación dentro de las tuberías.

Los robots para inspeccionar tuberías pueden clasificarse en varias formas elementarias de acuerdo a los patrones de movimiento o locomoción. Como se muestra en la figura 2.1, se ofrece una clasificación de ocho tipos diferentes de robots para la navegación de tuberías a saber: Tipo “pig”, Con ruedas, Con orugas, De presión contra la pared, Tipo andante, Tipo “inch-worm“, Tipo tornillo y Tipo serpiente. Aunque la mayoría se diseña dependiendo de aplicaciones específicas.

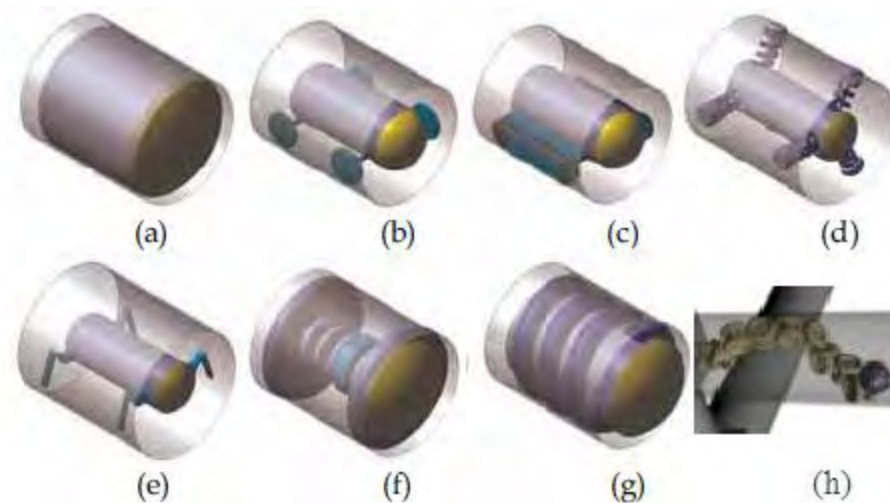


Figura 2.1. Clasificación de los robots para la inspección de tuberías. (a) Tipo “pig”. (b) Con ruedas. (c) Con orugas. (d) De presión contra la pared. (e) Tipo andante. (f) Tipo “inch-worm”. (g) Tipo tornillo. (h) Tipo serpiente.

Es preciso señalar que el análisis de estos robots se sostendrá en la robustez que estos robots ofrezcan en cuanto a su locomoción, como lo es: si pueden viajar en forma vertical en los sistemas de tuberías, si tienen la posibilidad de moverse hacia adelante y hacia atrás, si son capaces de sortear obstáculos o su capacidad para adaptarse a diferentes diámetros de tuberías. Estos puntos de análisis son importantes destacarlos, debido a que son características que la propuesta de esta tesis mejora de los diseños hechos para la exploración de tuberías.

2.4.1. Tipo pig

Como se muestra en la figura 2.1 (a), los robots tipo “pig” para la inspección y/o limpieza del interior de las tuberías, son uno de los más conocidos y comerciales, usados en el mercado. Algunos de estos robots tipo pig tienen centro hueco lo que les permite expandirse mientras están bajo presión. Pueden ser usados para albergar transmisores para rastreo de Pigs. Cepillos de alambre atornillados están disponibles cuando se requiere una limpieza más

agresiva. Los robots tipo pig son usados para remover líquidos de sistemas mojados de gas y tuberías con productos líquidos. También se usan para controlar la acumulación de parafina en las líneas de petróleo crudo, separación o productos derivados del petróleo ya refinado; también para tuberías que serán puestas en marcha (commissioning) y desplazamiento de producto. De la misma forma cuentan con escáneres ultrasónicos para la recolección de datos acerca del estado de las tuberías.

Es importante señalar que este tipo de robots “in pipe” tipo pig se impulsan pasivamente debido a la presión del flujo del material dentro de las tuberías. Estos robots tipo pig se comercializan en diferentes rangos para diferentes rangos de diámetros. Otros se han empleado para la inspección de tuberías con diámetros grandes [2].

Algunos ejemplos se muestran en la figura 2.2.

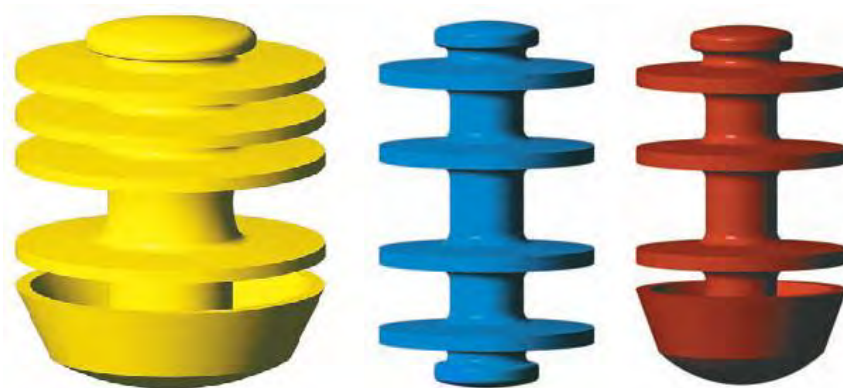


Figura 2.2. Diferentes ejemplos de robots tipo pig para la inspección de tuberías.

Pero estos dispositivos tienen ciertas desventajas como la de no poder moverse en sentido inverso y sólo ser impulsados por la presión del flujo de el material de las tuberías además para un movimiento inteligente o controlado no cuenta con la forma de locomoción más apropiada.

2.4.2. Con ruedas

Los tipos de robots para la inspección del interior de las tuberías con ruedas como se ilustra en la figura 2.1 (b) son básicamente robots planos móviles y se han reportado un gran número de estos tipos de robot.

A continuación se analizan las características de algunos ejemplos de este tipo de robots.

2.4.2.1 KURT

KURT [3] se muestra en la figura 2.3 es una plataforma prototipo de robot autónomo que puede navegar en sistemas de tuberías. Este robot es un vehículo de seis ruedas, cuenta con una arquitectura de hardware y control modular en capas. Su configuración de sensores consiste principalmente de traductores ultrasónicos estacionarios y uno flexible además de dos inclinómetros. KURT se desarrolló para tuberías de concreto con un diámetro de 600 mm, además que solo viaja en forma horizontal aunque tiene la capacidad de dar vuelta en los cruces de las tuberías cuenta también con la habilidad de navegar a puntos arbitrarios de la tubería partiendo de un punto dado.



Figura 2.3. Prototipo para explorar tuberías KURT.

Como la mayoría de estos tipos de robots KURT tiene la desventaja de que no pueden viajar en forma vertical, además de la dificultad que le presenta para librar obstáculos grandes como acumulación de material. También no es posible usarlo en tuberías de diámetro diferente de el que está especificado.

2.4.2.2. KARO

El sistema KARO [4] que se muestra en la figura 2.4 se diseñó para la inspección de sistemas de tuberías de agua. El movimiento del robot y las funciones de los sensores son controlados y monitoreados por un operador en un control móvil y una estación de vigilancia. Estas unidades están comunicadas mediante un cable.

La forma de controlar el robot en áreas resbaladizas es difícil en especial en tuberías inclinadas. Para superar esto las cuatro llantas están controladas de forma independiente. El robot está diseñado para navegar en tuberías de 20 centímetros. Para compensar las posiciones inclinadas en las tuberías la mecánica del vehículo consiste en dos partes las cuales pueden rotar una contra otra por la cintura. Para adaptarse a diferentes diámetros y formas de tuberías utiliza accesorios auxiliares los cuales no se abordan en la referencia.

Este robot posee los mismos problemas para viajar en tuberías de forma vertical de los robots con ruedas, así como las obstrucciones que pudiera tener la tubería con obstáculos como la acumulación de material o alguna tubería rota etc.



Figura 2.4. KARO prototipo para tuberías de drenaje en el rango de 20-40 cm.

2.4.2.3. Robot Explorador de ductos

Este proyecto consiste en la construcción de un robot autónomo conformado por dos bases (tipo tráiler) cuya función es identificar obstrucciones en ductos superiores a 14 pulgadas [5]. Diseñado principalmente para adaptarse a la superficie curva de las tuberías capaz de desplazarse por trayectorias de hasta 90° (figura 2.5). Esto se logra mediante la articulación que une las dos bases de la estructura del robot, las cuales están unidas por un perno pasante y este a su vez contiene a un resorte. El resorte asegura el regreso a la posición inicial en caso de que el móvil se desplace por pequeñas pendientes.

De nueva cuenta este robot para la inspección de tuberías presenta las mismas restricciones de los robots con ruedas que es el no poder conducirse por tuberías en forma vertical además de no contar con el diseño para adaptarse a los diferentes diámetros de tuberías.

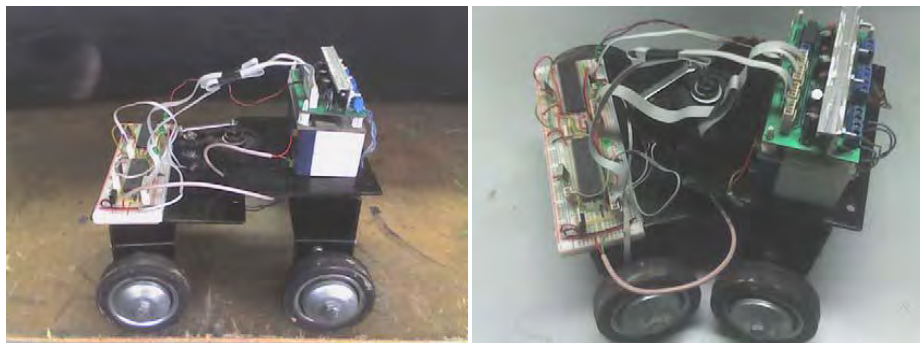


Figura 2.5. Fotos del robot para la exploración de tuberías diseñado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

Con estos tres ejemplos podemos observar las limitantes de estos tipos de robots en cuanto a la robustez de su diseño para la navegación de tuberías, donde su diseño no les permite pasar grandes obstáculos o moverse por tuberías muy inclinadas o verticales. A continuación se presentan los robots para la navegación de tuberías con orugas.

2.4.3. Con Orugas

Los robots para la exploración de tuberías con orugas son una variación de los robots con ruedas donde claramente se sustituyen las ruedas por orugas dando a los robots mayor tracción y estabilidad. A continuación se presenta un ejemplo de este tipo de robot.

2.4.3.1. Versatrax 300

Versatrax 300 [6] es un dispositivo diseñado por la compañía Inuktun Services. El sistema viene con orugas individualmente micro-controladas. Está diseñado para ambientes peligrosos y puede inspeccionar tuberías desde 12 pulgadas. El sistema usa un chasis que le permite cambiar su configuración para adaptarse a tuberías de distintos diámetros.

La forma de desplazarse es parecida a los robots para la exploración de tuberías con ruedas sólo que las orugas le dan mayor tracción y estabilidad. Las limitantes de su diseño como en los robots con ruedas son: la navegación de tuberías, que solamente lo puede hacer en forma horizontal y en un solo sentido que es hacia adelante y para adaptarse a un diámetro diferente de tubería hay que configurarlo manualmente.



Figura 2.6. Robot para la inspección de tuberías Versatrax 300.

2.4.4. De Presión contra la pared

Los robots pipe crawlers de presión contra la pared interna de la tubería cuentan con varias ventajas en cuanto a la navegación de tuberías verticales, este tipo de pipe crawlers utilizan la presión ejercida por diferentes medios sobre las paredes internas de la tubería, para lograr la fricción que les permita la locomoción ya sea en forma horizontal o vertical.

En seguida se presentan un par de ejemplos de este tipo de pipe crawlers.

2.4.4.1. Inspector Systems

El Robot [7] diseñado por la compañía Inspector Systems cuenta para realizar la inspección cuenta con video y laser, posee tres elementos de impulso y una cabeza de inspección. Cada elemento de impulso está conectado con el otro usando fuelles flexibles y contienen dos motores e DC. Los tres elementos de impulso proveen una velocidad de hasta 200 m/h en ambas direcciones horizontal y vertical, y permiten vueltas y doblamientos con un radio de 1.5 D. Gracias a las llantas revestidas de un caucho especial, las cuales son presionadas a la pared interior de la tubería y pueden ser ajustadas por tensión, incluso tuberías inclinadas verticalmente pueden ser recorridas. Las llantas de caucho son presionadas contra la pared utilizando ya sea aire comprimido o resortes. Esto quiere decir que incluso los cordones infestados de soldadura no presentan problema. Este robot cuenta con diferentes configuraciones de acuerdo al rango de diámetro de tubería que se quiera utilizar como sigue:

- Tipo 1000: diameter 70 - 110 mm
- Tipo 2000: diameter 95 - 140 mm
- Tipo 3000: diameter 130 - 200 mm
- Tipo 4000: diameter 180 - 325 mm
- Tipo 5000: diameter 310 - 510 mm
- Tipo 6000: diameter 440 - 750 mm

En este caso el robot puede navegar en forma vertical dentro de las tuberías pero sufre una limitante; el robot no puede saltar obstáculos grandes como por ejemplo acumulación de material dentro de la tubería. Otra limitante es que se tienen que emplear diferentes robots para diferentes rangos de diámetro si bien algunos (los más grandes) tienen rangos mayores lo ideal sería tener un robot que pueda abarcar un rango amplio de diámetros de tubería.



Figura 2.7. Robot pipe crawler de presión contra la pared diseñado por Inspector Systems.

2.4.4.2. Pipe Inspection Crawler (PIC)

El robot PIC [8, 9] emplea un tornillo de ajuste para la expansión y la contracción de las conexiones pares de las unidades de tracción paralelas al eje de la tubería y así adaptarse al tamaño del diámetro interno de la tubería como se muestra en la figura 2.8.

El mecanismo emplea tres unidades independientes de tracción de caucho las cuales están circunferencialmente espaciadas a 120 grados, separadas simétricamente. El aparato emplea un modo activo para adaptarse a un amplio rango de diámetros de tubería, de 250 mm a 350 mm. Sin embargo este rango puede extenderse incrementando la longitud de las articulaciones del robot. También tiene la capacidad de recorrer tuberías verticales, horizontales y curvadas. Además, puede pasar pasivamente sobre pequeños obstáculos de la superficie interior de las tuberías y navegar a través de uniones en codo en el sistema de tuberías con la ayuda de un diseño especial de los brazos con resortes. Aún más, un nuevo algoritmo autónomo ajustable se presenta para asistir al operador in la mejor regulación de la fuerza de contacto sin utilizar ningún sensor de fuerza.



Figura 2.8. Robot para la inspección de tuberías PIC.

Algunas de las desventajas de este robot es como en los casos anteriores es el no puede saltar obstáculos grandes, además de que su rango de adaptación a los diámetros de las tuberías es muy pequeño solo de 10 centímetros, por ultimo curvas más cerradas serian un problema para la navegación de este robot debido a que el tornillo que para el ajuste de las unidades de tracción interferiría.

2.4.5. Tipo andante

Los robots tipo andante pueden realizar movimientos altamente sofisticados gracias a sus piernas articuladas, lo que les permite navegar en forma vertical dentro de las tuberías gracias a su complejo funcionamiento. Presentan una tecnología más avanzada capaz de adaptarse mejor en ambientes complejos como los que podría presentar la tubería. Entre los más comunes se encuentran los de cuatro piernas. A continuación se describe un ejemplo de este tipo de pipe crawler.

2.4.5.1. MORITZ

MORITZ [10] fue construido en la Universidad Técnica de Múnich. Este robot puede navegar dentro de tuberías diferentes inclinaciones y puede manejar las intersecciones en los ductos. Este robot posee dos juntas plegables y dos juntas rotativas, que dividen el cuerpo central en tres partes, el cuerpo frontal y trasero, en los que se tienen montadas las patas y una tercera parte que es el cuerpo medio. Esta configuración permite al robot doblar su cuerpo central y

maniobrar las intersecciones que están localizadas en éste plano plegable. Las otras dos juntas (las rotativas) separan cada grupo de patas en dos pares de patas que permiten un movimiento alrededor del eje del pipe crawler.

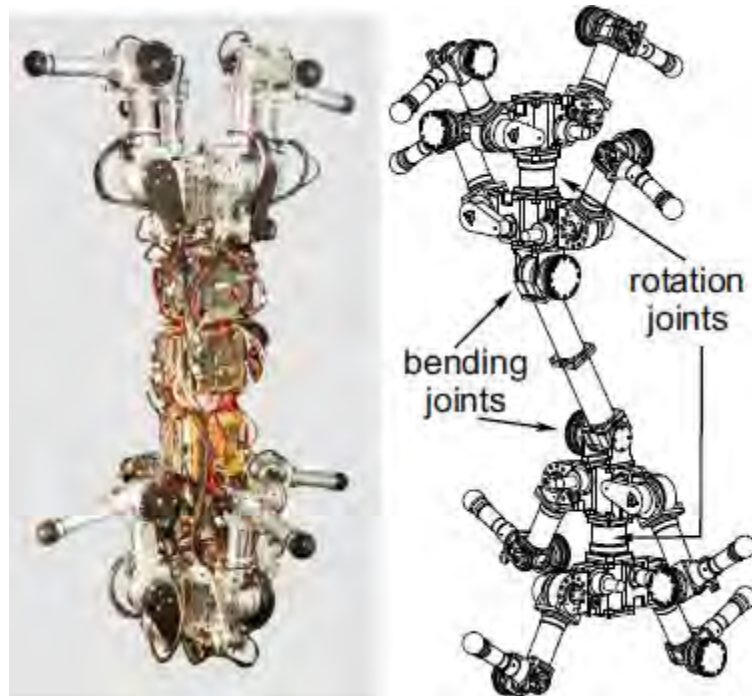


Figura 2.9. Robot pipe crawler “MORITZ”.

Para trepar a través de la tubería el robot tiene que extender sus patas contra la pared de la tubería para generar fuerza de fricción. Por lo tanto dos pares de patas, cada uno formado por dos patas opuestas, son necesarios para soportar al robot (fase de postura) mientras que las otras patas se balancean al siguiente punto de postura (fase de aire). Debido a que cada pata solo cuenta con dos grados de libertad, las cuatro patas son usadas para soportar al robot, las cuales están en un plano de la pata. Cuando las patas, en la fase de aire, alcanzan el plano plegable paralelo al plano de la junta. Por lo tanto el robot se expande en la tubería ya sea con las patas exteriores o interiores. Después el robot rota los dos pares de patas en el cuerpo frontal y trasero que están en la fase de aire a la nueva posición. Para este movimiento el robot requiere las juntas rotatorias. Después de lo anterior el robot cambia su plano de posición y orienta el plano de sus patas a la posición normal. Ahora las juntas plegables permiten doblar el cuerpo central. En esta

posición el plano de posición es alternado de nueva cuenta, y por lo tanto los cuerpos frontal y trasero pueden alcanzar un movimiento solamente en sus planos de posición. Esto es para lo que se usa el cuerpo medio. El cuerpo medio separa el movimiento de avance del cuerpo frontal del cuerpo trasero y de esta forma evita la fricción por perforación en la posición del pie. En lo siguiente el plano de posición se alterna nuevamente a la posición dentro de la tubería de intersección. El robot finalmente flexiona el cuerpo frontal completamente dentro de la intersección del ducto. Análogicamente a esto el cuerpo trasero se moverá dentro de la intersección del tubo.

Al analizar la forma de locomoción de “MORITZ” se puede apreciar lo complejo de sus movimientos, aunque se logra el objetivo de navegar dentro de la tubería se observa que el robot depende de la presión que las patas ejerzan contra la pared, lo que puede comprometer la integridad de ésta si se encuentra con una pared desgastada u oxidada según sea el caso. Otro aspecto a considerar es que la misma complejidad de su diseño le impide sortear obstáculos debido al contacto puntual de sus patas contra la pared de la tubería. Otra limitante es la poca capacidad de adaptación del robot al cambio de diámetro de la tubería, la cual está restringida por la extensión de sus patas.

2.4.6. Tipo inch-worm

Los robots tipo inch-worm son relativamente de los más simples en cuanto a su tipo locomoción. Estos tipos de robots pueden soportar más peso debido a la fuerza que logran desarrollar para sostenerse en el interior de la tubería. Son robots compactos y flexibles y pueden navegar en forma horizontal y vertical por las tuberías y tienen cierto grado de adaptación al cambio de diámetro de la tubería de acuerdo a su sistema de sujeción.

Los robots tipo inch-worm tienen una secuencia de pasos para lograr la locomoción dependiendo las secciones que los forman. A continuación se describen los pasos en un robot tipo inch-worm de dos secciones o módulos.

Primeramente se tienen dos módulos uno frontal y otro trasero, los cuales poseen patas u otro tipo de sistema que se expande radialmente hacia afuera para ejercer presión contra la pared interior de la tubería, estos módulos están unidos por un cilindro neumático u otro tipo de extensor. Se introduce el robot en la tubería y los sujetadores se expanden contra la pared interior de la tubería, para que el robot se sujete, enseguida se contrae el sistema de sujeción de la parte frontal para que le permita al cilindro extenderse, al extenderse el se sujeta nuevamente la parte frontal y la parte trasera se libera para que el extensor se contraiga, una vez hecho esto la parte trasera se sujeta y la parte frontal se libera y el ciclo comienza nuevamente.

En esta tesis se presenta un nuevo sistema de sujeción para este tipo de robots, que permite adaptarse mejor al ambiente de la tubería y superar obstáculos que presentan éstas. Además de adaptarse a los cambios de diámetro. A continuación se presentan algunos ejemplos de este tipo de robots.

2.4.6.1. Bottle-brush robot

Este pipe-crawler cuenta con cerdas de acero rígidas pero flexibles, como sistema de sujeción y se compone de dos o tres módulos conectados mediante un cilindro neumático. Las cerdas del bottle-brush robot [11] se flexionan hacia atrás para adaptarse a los cambios de forma dentro de la tubería, como secciones angostas de los ductos o tuberías parcialmente bloqueadas además proveen una forma de propulsión al robot. Cuando el cilindro intenta empujar el módulo posterior del robot, la parte trasera del robot no se puede mover debido a la resistencia de las cerdas flexionadas hacia atrás, entonces el cilindro neumático empujan al modulo delantero del robot hacia adelante, como se aprecia en la figura 2.10, de esta manera se mueve la parte trasera hacia adelante. Cuando el cilindro de la parte anterior intenta empujar el modulo delantero del robot, la parte trasera se sujeta de la pared interna de la tubería mediante las cerdas flexionadas hacia atrás y la parte delantera es empujada hacia adelante. Esta forma de sujeción le da la capacidad de lograr movimiento tanto horizontal como vertical.



Figura 2.10. Robot tipo inch-worm bottle-brush.

Una de las limitantes de este robot es que de acuerdo a la longitud de las cerdas de acero es el tamaño del diámetro de tubería que puede navegar, por lo que se tendría que construir un robot para distintos rangos de diámetros. Se observa también que el diseño de este robot no le permite desplazarse en reversa. Otra limitante es la forma de sujeción, aunque las cerdas de acero flexionadas hacia atrás le dan la sujeción necesaria para propulsarse, conlleva el riesgo de dañar a la tubería si ésta se encontrara debilitada por oxidación o desgaste, en caso de que sea metálica. Por otro lado también compromete la integridad de las tuberías con una pared delgada desgastándolas por la fricción que ocasionan las cerdas contra la pared de la tubería, lo que nos limita el uso de este robot en tuberías de paredes gruesas como las del drenaje o gas. Una desventaja más, es que si la tubería contiene material viscoso es probable que no pueda sujetarse firmemente, lo que le causaría al robot problemas de locomoción.

2.4.6.2. MOCCASIN II

Este pipe-crawler desarrollado por estudiantes de la universidad del estado de Carolina del Norte en Estados Unidos [12], puede navegar un curso complicado de tuberías completas con vueltas de 90 grados y ascensos verticales. El robot segmentado luce como una ciber-oruga, utiliza neumática para forzar los pies acolchados hechos de un tipo de plástico contra las paredes internas de la tubería cuando extiende y contrae el cuerpo a lo largo del camino.

MOCCASIN II está formado por tres segmentos, cuenta con secciones de hule unidas a los cilindros neumáticos, cuando los cilindros neumáticos se contraen las secciones de hule se extienden radialmente hacia afuera contra la pared interna de la tubería para ejercer presión contra ésta y de esta forma sujetarse, al sujetarse las secciones libres se expanden para avanzar y sujetarse mediante las secciones de hule como se muestra en la figura 2.11.

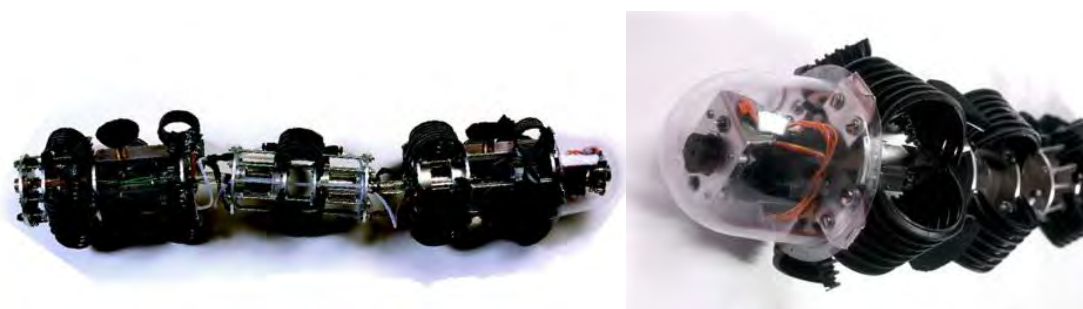


Figura 2.11. Fotografía del robot pipe-crawler MOCCASIN II.

Este pipe-crawler es lo más cercano a nuestro diseño. Puede moverse hacia adelante y hacia atrás, además de poder navegar en tuberías tanto horizontales como verticales. Pero si se trata de cambios grandes de diámetro, este robot está limitado por el poco rango que pueden desarrollar los sujetadores de hule.

2.4.6.3. Small diameter pipe crawler apparatus

Inventado por Gregory L. Hovis et al en la WSRC (Washington Savannah River Company). El pipe-crawler apparatus [13] cuenta con un pistón en la unidad frontal de sujeción que hace girar tres pies hacia afuera para aferrarse en el interior de la tubería como se muestra en la figura 2.12. El pistón en la unidad central de impulso hala la unidad trasera de sujeción hacia adelante. El pistón en la unidad trasera de sujeción hace girar los pies de sujeción traseros hacia afuera para aferrarse al interior de la tubería, mientras el pistón en la unidad frontal de sujeción

empuja los pies fuera de la superficie de la tubería. El pistón en la unidad central de impulso empuja la unidad frontal hacia adelante. Esta misma secuencia puede ocurrir en reversa para mover el robot hacia atrás.

Este movimiento tipo oruga impulsa al crawler con igual facilidad hacia adelante y en reversa en el plano horizontal y hacia arriba y hacia abajo en el plano vertical. Además gracias a la junta universal en las uniones de las unidades este pipe-crawler puede recorrer curvas de hasta 90 grados.

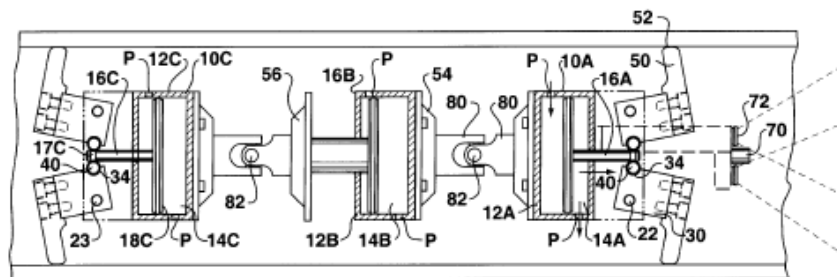


Figura 2.12. Robot pipe-crawler apparatus con locomoción tipo inch-worm.

A pesar de ser un diseño que cumple con cierto nivel de robustez, se encuentran con algunas limitantes, como el hecho de que este robot sólo puede navegar por tuberías en un rango de 3 a 4 pulgadas de diámetro. Además de que no puede saltar obstáculos grandes debido al poco rango de movimiento de su sistema de sujeción. El hecho de que utilice como sistema de sujeción solo tres pies en cada unidad le da poca área de contacto aumentándola fuerza necesaria en cada pie para lograr sujetarse lo que puede comprometer la integridad de la tubería si ésta se encuentra en mal estado ó sus paredes se han adelgazado.

2.4.6.4. Robot para exploración de tuberías

Este robot [14] fue desarrollado por L.M. Di Matteo et al en la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires Argentina. Este robot cuenta con cinco módulos principales figura 2.13:

- a) Módulo de carga frontal: allí se aloja el sistema de visión y un artefacto para iluminar el interior de la tubería.
- b) Módulos de patas: estas dos unidades poseen un juego de tres patas cada una en una disposición de 120 grados, cada uno de ellos se encarga de presionar el interior de la tubería para sujetarse a ella respectivamente, el accionamiento lo brinda un cilindro neumático.
- c) Modulo de tracción: su núcleo es un cilindro neumático, el cual produce el avance o retroceso longitudinal del robot.
- d) Modulo de carga posterior: aloja las tres electroválvulas empleadas para comandar a los respectivos neumáticos y a la placa electrónica con microcontrolador.

El avance y retroceso del robot se produce por secuencia de activaciones de los cilindros neumáticos. Para que el robot avance, los módulos de patas se accionan mediante el cilindro neumático para presionando la pared interna de la tubería y de esta forma sujetarse, una vez que el robot se asegura, el modulo de tracción contrae o expande dinámicamente la longitud del robot, produciendo el avance o retroceso longitudinal.

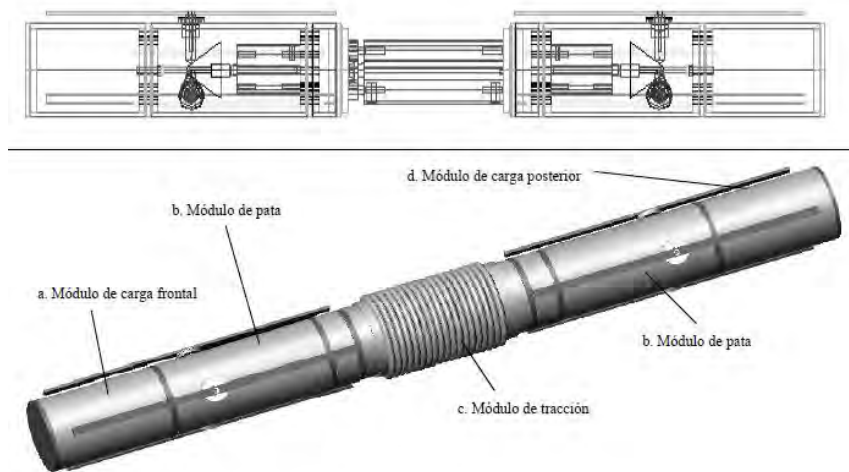


Figura 2.13. Robot para exploración de tuberías tipo inch-worm.

De nueva cuenta los robots con sistemas de sujeción rígidos en cuanto a la robustez del diseño, las limitantes de este tipo de diseño se aprecian para problemas como el cambio grande de diámetro del interior de las tuberías, ya que este robot cuenta con un rango limitado en el movimiento del sistema de sujeción al extenderse las patas solamente 2.8 cm. Otra limitante para ese robot son las tuberías parcialmente obstruidas, que, debido al diseño rígido de las patas es difícil adaptarse a los materiales que estén acumulados en la pared de la tubería cual

2.4.7. Tipo tornillo

Los robots tipo tornillo son en general una combinación de los robots pipe-crawlers con rueda y los pipe-crawlers de presión contra la pared, diseñados principalmente para la navegación en tuberías horizontales y verticales. Este tipo de pipe-crawlers describen un movimiento helicoidal como el de un tornillo cuando éstos avanzan en la tubería. Estos robots cuentan con ruedas que se mueven paralelas al eje de la tubería y están presionadas contra la pared interna de la tubería además de que las ruedas están giradas en un ángulo determinado para conseguir avanzar girando respecto al eje de la tubería la parte donde se encuentran las ruedas. A continuación se presenta un ejemplo de este tipo de robot.

2.4.7.1. A simple architecture for in-pipe inspection

Diseñado en la Universite Libre de Bruxelles en Belgica por Mihaita Horodincea et al. El robot [15] consiste en dos partes articuladas con una junta universal. Una parte es guiada a lo largo de la tubería por un conjunto de ruedas moviéndose en paralelo al eje de la tubería, mientras que la otra parte es forzada a seguir un movimiento helicoidal gracias a las ruedas inclinadas rotando sobre el eje de la tubería. Un solo motor es puesto entre los dos cuerpos para producir el movimiento figura 2.14. Todas las ruedas están montadas en una suspensión para acomodar a los cambios de diámetro y curvas en la tubería. El robot es autónomo y trae consigo sus propias baterías y un enlace de radio. De esta forma el robot consigue un movimiento horizontal y vertical.

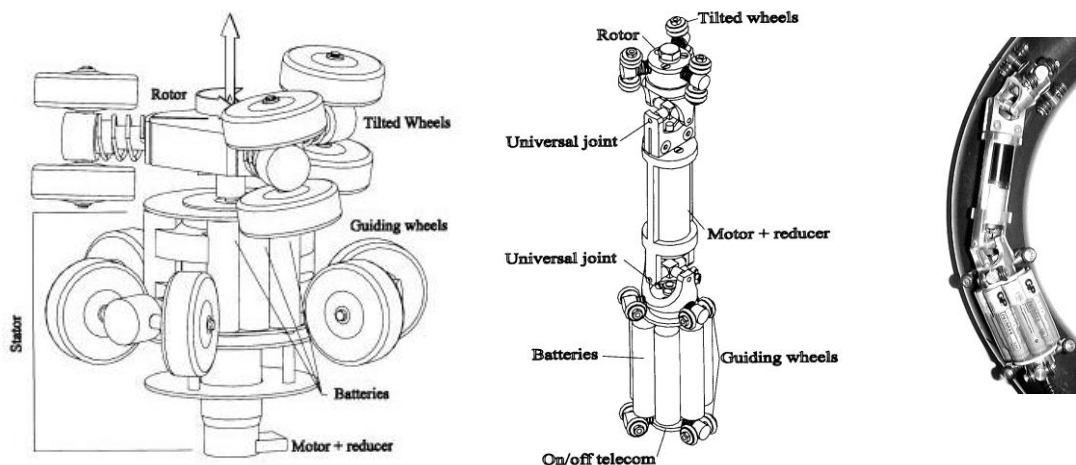


Figura 2.14. Arquitectura del robot tipo tornillo.

Este robot tiene tres diseños de acuerdo al diámetro de las tuberías de 170, 70 y 40 mm. lo cual es una limitante en cuanto a la robustez del diseño porque se tendría que construir un robot para cada uno de estos diámetros. Al utilizar ruedas se tienen menos fricción dependiendo únicamente de la presión de los resortes para lograr sujetarse en las tuberías muy inclinadas o verticales cuando las paredes de la tubería cuentan con materiales que causen que las ruedas pierdan tracción. Además le es difícil moverse a través de las obstrucciones que pudieran existir en el interior de la tubería.

2.4.8. Tipo serpiente

Los robots pipe-crawlers tipo serpiente presentan sistemas más complejos de locomoción, la mayoría de estos robots utilizan la modularidad para la configuración de las arquitecturas de sus diseños. Estos robots presionan su cuerpo contra la pared interna de la tubería para lograr sujetarse y lograr navegar por tuberías muy inclinadas o verticales esto mediante ruedas en sus módulos. Enseguida se presentan dos ejemplos de este tipo de robots.

2.4.8.1. Robot serpiente

Los científicos del SINTEF desarrollan este robot [16], la idea esta ocasión es fabricar un robot con 10 módulos unidos, cada uno de los cuales tiene un par de ruedas idénticas de plástico figura 2.15. El peso debe ser distribuido convenientemente entre cada junta para que el robot opere como un tren cuando se mueva horizontalmente.

Cuando el robot entra en una tubería vertical, levanta la cabeza dentro de la tubería para encontrarse directamente con las paredes de la tubería, entonces el robot puede ya sea deslizarse de lado con su “abdomen”, enrollarse sobre sí mismo o agarrarse a las paredes de la tubería de la misma manera como si pusiéramos nuestros pies contra un pared para sujetarnos y enseguida movernos hacia arriba.

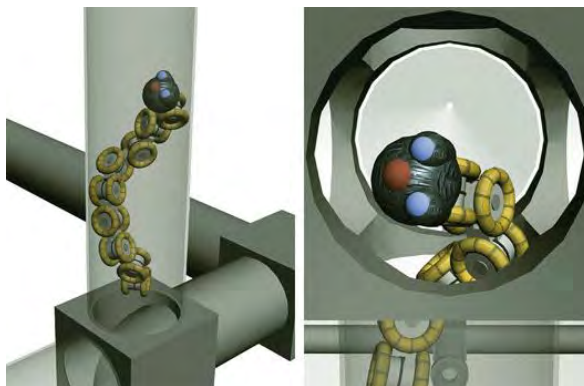


Figura 2.15. Robot tipo serpiente funciona como tren en tuberías horizontales y maniobra en tuberías verticales.

Es conveniente aclarar que este robot se encuentra aún en fase de diseño por la complejidad del mismo. Este tipo de robots parecen ser los más convenientes para exploración de tuberías aunque su diseño sea complejo lo que podría ser una desventaja por la cantidad de partes que involucra.

2.4.8.2. PiKo (Pipe Inspecting KONDA)

PiKo [17] es el antecesor del robot presentado anteriormente. Consiste de un conjunto de once o más módulos idénticos conectados por un set de horquillas especiales. Dos módulos están conectados por una horquilla. Para moverse hacia adelante, cada modulo tiene un motor dando propulsión al par de ruedas. Los dos pares de ruedas (superior e inferior) giran en dirección opuesta una de la otra, permitiendo que PiKo empuje hacia adelante si es necesario. Uno de los aspectos centrales del robot es el hecho de que cada modulo también controla el ángulo vertical y horizontal en relación con sus módulos vecinos (tiene juntas activas con dos grados de libertad). Puede hacer curvas cerradas, moverse verticalmente, evadir obstáculos, y resistir el flujo en una tubería.

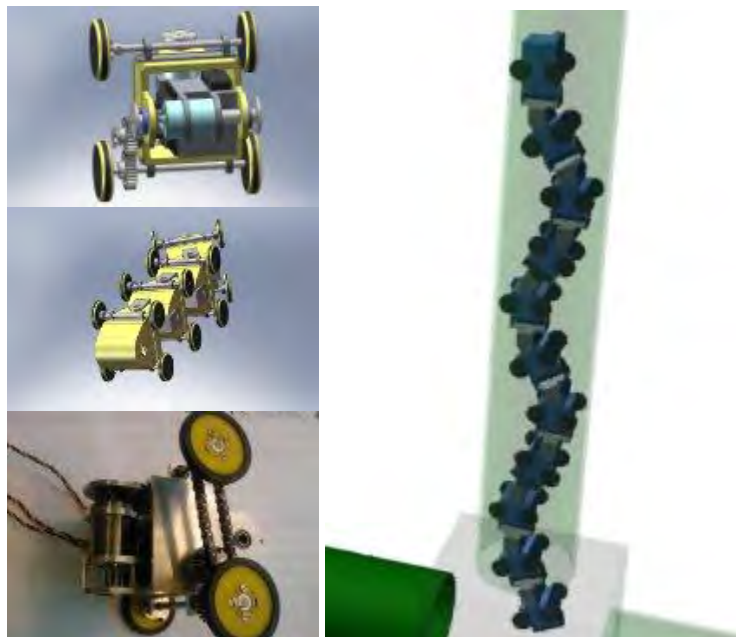


Figura 2.16. Robot pipe-crawler tipo serpiente PiKo.

Horizontalmente, se mueve como un tren. Cada módulo sigue al anterior en fila. Verticalmente, el movimiento es diferente. El robot trata de empujar contra las paredes opuestas con partes alternas de su cuerpo. Las horquillas especiales entre cada módulo permiten sentir si, y que tan fuerte, el robot está empujando con cada módulo contra la pared. Después de montarse para un ascenso o descenso vertical, el robot se moverá hacia adelante en forma normal como un tren.

Este tipo de robots como se mencionó anteriormente son complejos y se requiere tener un control sobre todos los módulos que componen el robot. Los grandes obstáculos representan un problema para poder desarrollar su forma de locomoción, debido a que necesita un contacto continuo de las ruedas sobre la pared de la tubería para avanzar, sobre todo en tuberías verticales

2.5. Conclusiones

En este capítulo se estableció el contexto en el que se encuentra nuestro robot dentro la robótica móvil.

Se desarrollaron los conceptos de locomoción y los tipos de locomoción que existen para los robots móviles.

Se ha establecido una clasificación de los robots móviles para la exploración, navegación e inspección de tuberías; llamados en la industria como pipe-crawlers. En esta clasificación se describió el funcionamiento de cada tipo de robot pipe-crawler junto con un análisis sobre la robustez de su diseño para la navegación dentro de las tuberías.

El grupo de interés en esta tesis son los robots pipe-crawlers tipo inch-worm, debido a que nuestro robot pertenece a este tipo de robots. Los robots pipe crawlers tipo inch-worm están compuestos por módulos los cuales cuentan con un sistema de sujeción el cual se expande radialmente respecto al eje de la tubería para asirse de la tubería y poder avanzar mediante un actuador, que regularmente es usado un cilindro neumático para extender y contraer el cuerpo del robot longitudinalmente, tal como una oruga lo haría en la naturaleza.

Capítulo 3

Ventajas de la Simulación

3.1 Introducción

En este capítulo discutiremos la complejidad de un sistema optomecatrónico y como es importante considerar todas las interacciones entre los diferentes subsistemas, para hacer esto implementamos la simulación lo cual es una manera fácil para implementar nuevos sistemas, hacer diferentes configuraciones del dispositivo y encontrar problemas antes de realizar una gran inversión en un prototipo. En este aspecto se consideran las herramientas disponibles comercialmente con los cuales se ha trabajado en el diseño de nuestro robot.

3.2. Algunas definiciones

La optomecatrónica puede definirse como la disciplina donde dispositivos ópticos son usados en combinación sinérgica con sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales con el fin de realizar útiles tareas ingenieriles. De acuerdo con [25] podemos observar que los sistemas optomecatrónicos tienen las siguientes características:

1. Poseen una o más funcionalidades para desempeñar ciertas tareas dadas.

2. Para producir tales funcionalidades, varios módulos funcionales básicos son requeridos para ser combinados apropiadamente.
3. Lograr funciones que se combinen en una forma deseada, utilizando la mecánica, óptica o mecánica básica.
4. Los sistemas optomecatrónicos son jerárquicamente compuestos de subsistemas, los cuales están de la misma forma compuestos de unidades o subsistemas que a su vez están integrados para formar un sistema optomecatrónico.

Es importante recordar que la integración optomecatrónica causa que las tres señales fundamentales interactúen entre sí. Por ejemplo, una señal óptica incluye energía lumínica, potencia y flujo de la radiación; las señales mecánicas incluyen: energía, estrés, tensión, presión, movimiento y flujo de calor; las señales eléctricas incluyen: corriente, voltaje y flujo magnético. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta si estas interacciones son realizables.

Banks [26] dice que la simulación es la imitación de la operación de un proceso o sistema sobre el tiempo. Carson [27] da las definiciones para los elementos de un sistema de simulación como sigue:

Un modelo es la representación de un sistema o proceso. Conceptualmente podemos definir al estado del modelo como un vector largo, el cual es una lista de valores que son suficientes para definir el estado del sistema en cualquier momento en el tiempo. En la práctica, el estado del modelo es el estado del modelo de todas las entidades usadas el paquete de software de simulación.

Un evento es un acontecimiento instantáneo que cambia el estado del sistema. Tenemos dos tipos de eventos: los internos, que son aquellos generados dentro del sistema que está siendo simulado, y externos los cuales son generados fuera de la simulación.

Una entidad es un objeto en el modelo. Las entidades dinámicas son creadas en el tiempo cero o en otros tiempos por un evento entrante. Las entidades que proveen un servicio a las entidades dinámicas son llamadas recursos. Un recurso es una secuencia de eventos, actividades, y otros retrasos en el tiempo asociados con una entidad cuando fluye a través del sistema.

3.3. Porque usar simulación.

Una de las ventajas cuando diseñamos una simulación es cuando necesitamos hacer diferentes configuraciones del mismo modelo, esto puede realizarse cambiando los parámetros incluidos en el sistema de simulación. Con la simulación podemos hacer una evaluación y un análisis de diferentes configuraciones para predecir el comportamiento del sistema, su desempeño, además que los resultados clave de utilizar la simulación es poder identificar los problemas del sistema y sus causas.

De acuerdo con Carson [27] la simulación es útil en los siguientes casos:

1. No existe un modelo analítico simple.
2. Los componentes del sistema pueden ser definidos y caracterizados sus interacciones pueden ser definidas
3. El sistema real tiene cierto nivel de complejidad, es difícil predecir el efecto de los cambios propuestos.
4. Para diseñar un nuevo sistema.
5. Cuando se piensa realizar una gran inversión en un sistema y esto puede representar un riesgo considerable.
6. El modelo de simulación puede ser usado para que todos los miembros de un equipo tengan un entendimiento común.

7. La simulación con animación puede ser la única manera en la cual la mayoría de los participantes pueden visualizar como su trabajo contribuye para el éxito o los problemas del sistema.

3.4. Herramientas de simulación

En el mercado tenemos varias herramientas que nos dan elementos necesarios para realizar la simulación de nuestro sistema, como ejemplo FluidSIM¹ el cual es un software para simular circuitos neumáticos y eléctricos para controlar al sistema. FluidSIM también cuenta con una interface CAD para el usuario lo que lo hace más fácil de usar.

Otro paquete de software utilizado en el diseño de nuestro robot fue SolidWorks² esta herramienta nos permite no solamente simular un sistema sino que también nos permite crear animaciones de los sistemas, lo cual es muy útil para la demostración del desempeño del diseño o como dijimos anteriormente para mejorar el entendimiento del equipo de diseño sobre el desarrollo del sistema.

Debido a que el diseño de un sistema puede ser muy complejo y difícil. Realizar un prototipo completo conlleva un gran gasto de dinero, por lo tanto las herramientas y las técnicas de simulación son imprescindibles para llevar a cabo el proceso de diseño optomecatrónico. Los dispositivos optomecatrónicos utilizan técnicas derivadas de varios campos. Tenemos elementos ópticos, mecánicos, eléctricos, electrónicos y de software interactuando para conformar un solo dispositivo. Necesitamos entonces herramientas para cada uno de los dominios de los elementos que están siendo analizados. En adición, también necesitamos herramientas de simulación capaces de modelar interacciones con otros subsistemas en el dispositivo.

En nuestro diseño utilizamos el paquete de software FluidSIM como ya se mencionó, en éste paquete se simuló la secuencia de activación de tres actuadores neumáticos. Esta secuencia

¹Más información disponible en: <http://www.festo-didactic.com>.

²Más información disponible en: <http://www.festo-didactic.com>.

es importante en nuestro diseño, debido a que representa la forma en que nuestro robot se va a mover. Para desarrollar nuestro diseño separamos la parte mecánica para evaluar y analizar las conexiones de los actuadores neumáticos así como las conexiones e interacciones entre los movimientos de los actuadores neumáticos y los sensores del sistema. En la figura 3.1 podemos ver la interface CAD de FluidSIM así como los actuadores neumáticos de nuestro diseño. El desarrollo de esta simulación se presenta más adelante en los capítulos 5 y 6.

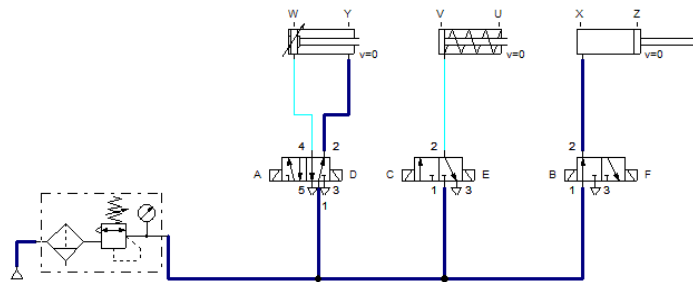


Figura 3.1. Simulación de los actuadores neumáticos de nuestro robot.

3.5. Conclusiones

En este capítulo presentamos algunos conceptos de simulación Además de analizar la complejidad de los sistemas optomecatrónicos donde se deben considerar las deferentes interacciones entre los diferentes subsistemas y señales involucradas, para lo cual se implementa la simulación, con lo que se facilita la implementación de nuevos sistemas, realizar diferentes configuraciones del dispositivo y encontrar problemas en el diseño.

Se presentaron las herramientas de simulación utilizadas en el desarrollo de nuestro dispositivo. Una de ellas es FluidSIM la cual nos permite simular las conexiones entre los elementos neumáticos y las interacciones con los sensores del sistema. La segunda herramienta utilizada fue SolidWorks en la que se desarrolló el sistema mecánico. Esta herramienta nos permite observar los espacios físicos de nuestro diseño y las interacciones mecánicas de los elementos de nuestro.

Capítulo 4

Un modelo de locomoción tipo inch-worm

4.1. Introducción

En este capítulo presentamos los modelos empleados para el estudio del robot inch-worm presentado como modelos de estado finito. Se presentará los modelos para la generación de movimiento a saber: de un paso, de doble paso y de onda estacionaria.

4.2. Movimiento tipo inch-worm

Como vimos en el capítulo anterior un robot tipo inch-worm es un robot que imita el patrón de locomoción de un gusano por ejemplo las orugas, las cuales tienen dos grupos de patas; uno en la parte de enfrente y el otro en la parte trasera de su cuerpo, cuando el grupo de patas de el frente se sujeta la oruga dobla su cuerpo acercando las patas traseras a las delanteras, después las patas traseras se sujetan y las patas delanteras se estiran hacia adelante para sujetarse una vez más, este principio es como nuestro robot se desplaza, sujetándose y estirándose.

Los robots tipo inch-worm se componen básicamente de módulos interconectados que se pueden ya sea deformar en la dirección de desplazamiento (extensores) o para producir fricción contra su entorno (sujetadores) que en nuestro caso son las paredes internas de la tubería. La

manera en que se realiza la locomoción del robot es mediante una serie de acciones cíclicas de los actuadores para sujetarse de su ambiente y extenderse de tal manera que con estas acciones le permita desplazarse.

A continuación se presenta la descripción de la locomoción en los robots multi-segmentados tipo inch-worm usando modelos de estado finito hecha por I. Ming Chen et al [18].

Para varios tipos de movimientos se exhiben diferentes comportamientos dinámicos y cinemáticos, que para el ambiente de operación de la aplicación es crucial. Básicamente, los robots tipo inch-worm traen consigo herramientas de inspección o sistemas para llevar material, por lo tanto el control preciso de su posición usualmente no es necesaria. Por lo tanto actuadores con solo dos estados o acciones binarias, por ejemplo apagado o encendido, se utilizan para el diseño de los sujetadores y extensores en los robots tipo inch-worm. La condición entre los estados de encendido y apagado es considerada como comportamiento transitorio, la cual tarda poco tiempo en establecerse. Basados en esto I-Ming Chen et al [20], utiliza un modelo de autómatas finitos [21] para estudiar los robots tipo inch-worm con solo acciones binarias de los actuadores. La acción de los actuadores en los robots inch-worm se puede describir como estados. El movimiento se convierte en una secuencia de transiciones de estado que siguen la cinemática de locomoción. Ya que un autómata finito puede expresarse como un grafo direccionado, con los estados como los nodos y las transiciones como los arcos, el problema de la generación de movimiento se convierte en un problema de búsqueda de grafo. La ventaja de utilizar este tipo de aproximación es que se reduce el esfuerzo en la generación del movimiento de un espacio de estado continuo a un espacio de estado binario. Además, la generación y la planeación de movimiento en línea se pueden desarrollar directamente mediante estructuras adicionales impuestas en el modelo de autómatas finitos.

La generación de locomoción de paso único y multipasos son investigados. La estrategia para la locomoción de paso único permite el movimiento ya sea hacia adelante o hacia atrás, además de poseer la característica de poseer tolerancia al error. La generación de locomoción en

línea y el cambio de movimiento pueden lograrse mediante locomoción de paso único. La generación de locomoción multipasos conduce a la locomoción de onda fija, la cual es la locomoción más rápida en cuanto al número de transiciones de estado en un ciclo de locomoción completo.

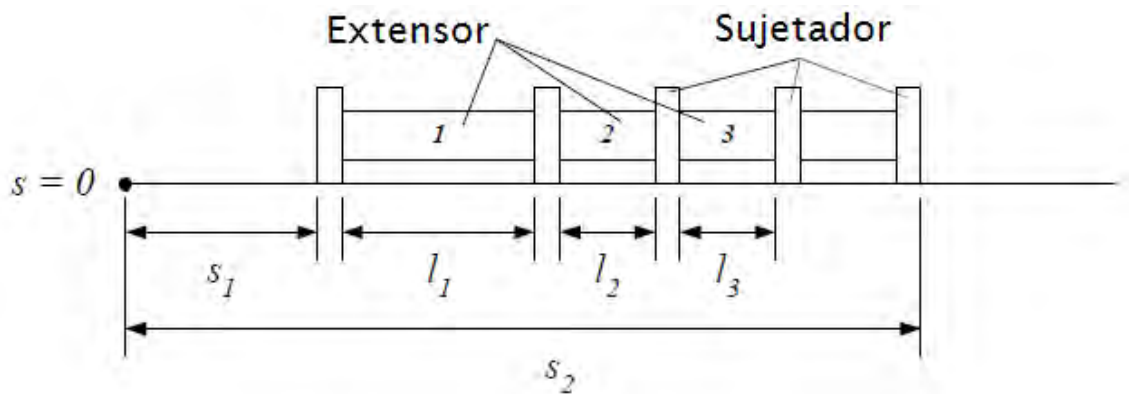


Figura 4.1. Modelo de un robot tipo inch-worm.

4.3. Un modelo simple de un robot tipo inch-worm

Actualmente existen diferentes modelos mecánicos por lo tanto se presenta un modelo simplificado de los actuadores de un robot tipo inch-worm como se muestra en la figura 4.1. Un robot con n segmentos tiene n extensores y $(n+1)$ sujetadores. Cada sujetador o extensor puede ser accionado independientemente. Todos los sujetadores emplean idénticos diseños mecánicos modulares. La principal función de los sujetadores es la de proveer fricción para conseguir la locomoción del robot. Sin perder la generalidad se asume que el ancho del sujetador es constante. Un concepto de diseño modular similar se aplica de la misma manera al extensor. Las longitudes del recorrido de los extensores son igual para todos los extensores. Las longitudes completamente contraída y extendida se denotan por l_{min} y l_{max} respectivamente. La longitud intermedia del extensor, l_i , está dentro del rango $l_{min} \leq l_i \leq l_{max}$. Asumimos que el robot se mueve en un ambiente con una topología unidimensional, como una tubería con una pared rígida. El

robot puede hacer que los módulos extensores y sujetadores negocien con las curvas y los ambientes limitados además de poderse adaptar a la forma que los rodea.

4.4. Cinemática de la locomoción inch-worm

Primero usamos un robot tipo inch-worm cuya longitud de cuerpo puede cambiar constantemente para ilustrar este principio de locomoción. Para un robot de n -segmentos mostrado en la figura 4.1, la restricción cinemática para permitir al robot moverse en un espacio de unidimensional está dada por

$$\dot{s}_1 + \sum_1^n \dot{l}_i - \dot{s}_2 = 0 \quad (4.1)$$

Donde s_1 y s_2 son las posiciones de el sujetador trasero y delantero de acuerdo con Kelly y Murray [22] $(s_1, s_2) \in G \equiv (R, +) \times (R, +)$ es la variable de grupo que refleja la posición de el robot como un subgrupo de movimiento rígido, y $(l_1, l_2, \dots, l_n) \in M \equiv R^n$ es la variable de espacio que describe el movimiento del cuerpo (cada segmento). La expresión de (4.1) es una conexión en el paquete trivial principal $Z = M \times G$. Esto describe como las trayectorias en el espacio base M están relacionadas al movimiento en el grupo G . La locomoción es por lo tanto una trayectoria cerrada en M que generará movimiento neto en G [23].

Las figuras 4.2 y 4.3 demuestran la locomoción de robots tipo inch-worm de dos y tres segmentos respectivamente y sus trayectorias cerradas correspondientes en M . Ambas locomociones generarán un movimiento neto con una longitud de paso $(l_{max} - l_{min})$ a lo largo de la dirección x . Otros tipos de locomoción con diferentes longitudes de paso pueden lograrse mediante la elección de las condiciones iniciales de las variables del espacio base y la trayectoria cerrada que se tomará en M . Se aprecia que mientras el número de segmentos aumenta, la dimensión del espacio base se incrementa también. Para generar locomociones

apropiadas (o las trayectorias cerradas) en espacios de gran dimensión se dificulta cuando el número posible de trayectorias aumenta.

4.5. Modelar la locomoción tipo inch-worm como autómeta

Basado en el principio de actuación simple, podemos modelar un robot tipo inch-worm multi-segmentado cuyos sujetadores y extensores poseen solamente acciones binarias como un autómeta finito [24]. El extensor y el sujetador tienen solamente estados de valores binarios “0” y “1”.

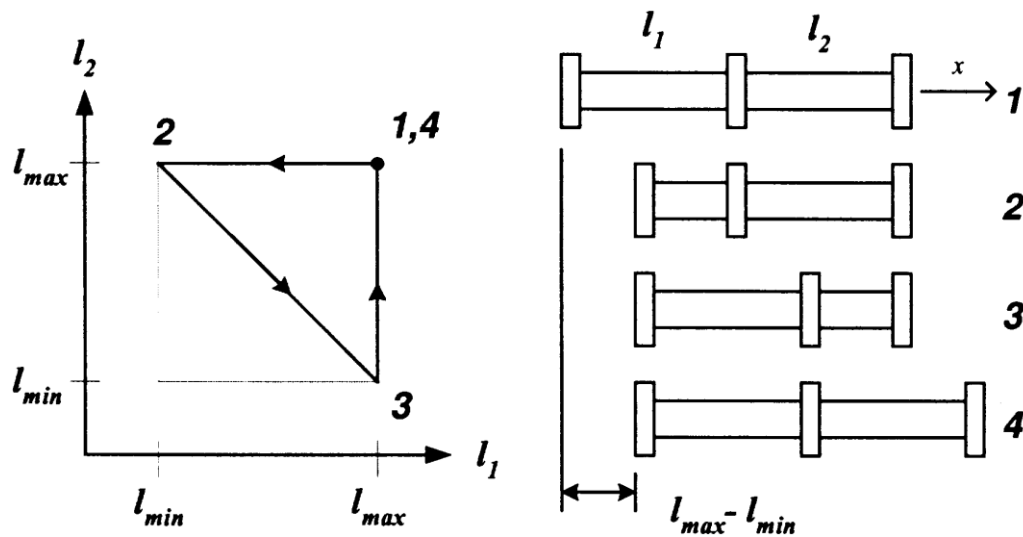


Figura 4.2. Locomoción de un robot tipo inch-worm de dos extensores.

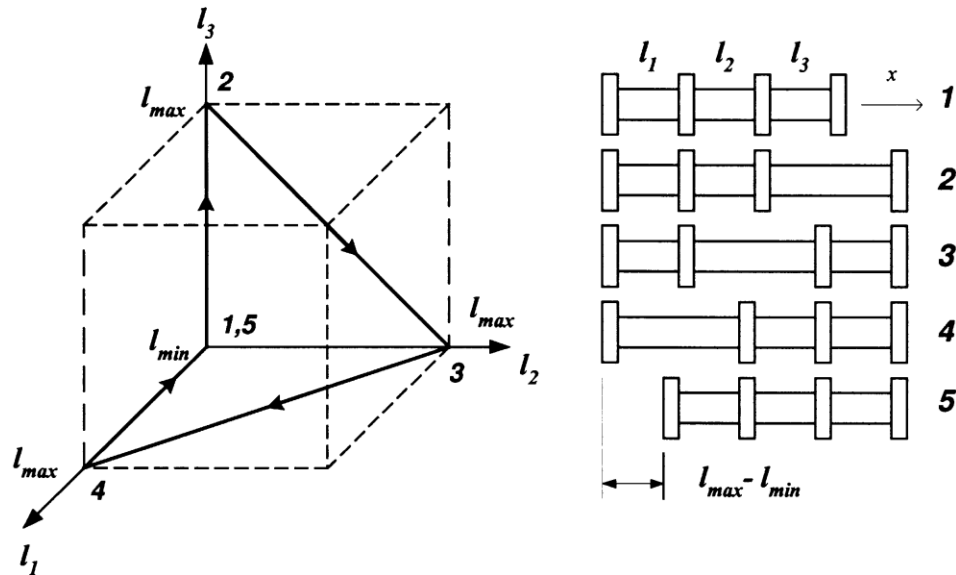


Figura 4.3. Locomoción de un robot tipo inch-worm de tres extensores.

El estado del extensor de un robot inch-worm de n -segmentos es un vector n -tupla con números binarios, $q = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, donde $x_i \in \{0, 1\}$. Cuando $x_i = 0$, el extensor está retractado; $x_i = 1$, el extensor está completamente expandido. El estado del sujetador de un robot inch-worm de n -segmentos es un vector $(n+1)$ -tupla con números binarios, $\theta = (y_1, y_2, \dots, y_n, y_{n+1})$, donde $y_i \in \{0, 1\}$. Cuando $y_i = 0$, el sujetador se libera; $y_i = 1$, el sujetador está totalmente activado.

Debido a que la locomoción de los robots inch-worm se logra por la deformación de los extensores. El movimiento inch-worm puede ser definido solamente con el estado del extensor q . El estado del sujetador p puede ser determinado por la función de transición entre los estados consecutivos del extensor [29]. Por lo tanto, decimos que *el movimiento de un robot inch-worm de n -segmentos es una secuencia de estados de los extensores (q_0, q_1, \dots, q_f) tal que $q_0 = q_f$* . Esto también implica que el movimiento es una trayectoria cerrada en el espacio de estados del extensor $\{0, 1\}^n$ (o un espacio base M "digitalizado"). Por ejemplo el movimiento del robot de dos segmentos en la figura 4.2 es $(1, 1) \rightarrow (0, 1) \rightarrow (1, 0) \rightarrow (1, 1)$. El movimiento en la figura 4.3 es $(0, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 1) \rightarrow (1, 0, 0) \rightarrow (0, 0, 0)$.

La generación del movimiento de un robot inch-worm de n-segmentos es una 5-tupla $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ donde Q es un conjunto de estados inch-worm, Σ es un conjunto no vacío de etiquetas de eventos llamado *alfabeto de entrada*, $q_0 \in Q$ es el estado inicial, $F \subseteq Q$ es el conjunto de estados finales, y δ es la *función de transición*, mapeando $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$, esto quiere decir que, $\delta(q, a)$ es un estado para cada estado q y símbolo de entrada $a \in \Sigma$.

Alternativamente, A puede ser representado por un grafo dirigido en el cual los nodos son estados en Q , los arcos son la transición definida por la función δ , y el conjunto de etiquetas para los arcos son los alfabetos en Σ . El problema de la generación del movimiento se convierte en encontrar una trayectoria (una secuencia de arcos) desde el nodo raíz (denotado por el estado inicial q_0) al nodo deseado (denotado por el estado final q_f) como se ilustra en la figura 4.4.

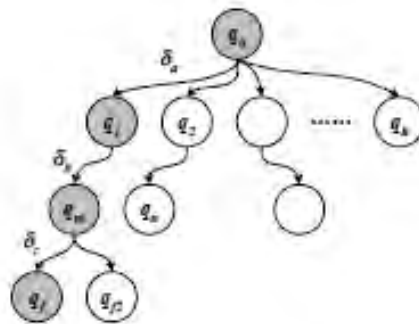


Figura 4.4. Generación del movimiento mediante una búsqueda exhaustiva en el grafo formado por el generador A .

4.6. Extensores y sujetadores auxiliares

Con el propósito de generar el movimiento, se agrega un extensor y un sujetador en la parte delantera y trasera del robot respectivamente. Los actuadores auxiliares no existen físicamente. Estos permanecen estacionarios en todo el ciclo del movimiento. Por ejemplo. Si el robot se mueve a la derecha, los extensores derecho e izquierdo se inicializan en 1 y 0 respectivamente. El derecho es el frontal y el izquierdo es el trasero. Cuando un ciclo se completa, los extensores físicos regresan a sus estados iniciales pero el extensor auxiliar frontal

será contraído y el trasero será extendido. Los sujetadores frontal y trasero permanecen estacionarios, y el robot se mueve un paso de longitud respecto a los sujetadores auxiliares frontal y trasero. Cuando un nuevo ciclo comienza los extensores auxiliares frontal y trasero se regresan a 1 y 0 respectivamente. Si el robot se mueve a la izquierda, los extensores derecho e izquierdo deberán inicializarse en 0 y 1. Los roles de los extensores frontal y trasero son cambiados.

El estado del extensor aumentado de un robot inch-worm de n-segmentos es una (n+2)-tupla vector binario: $q' = (x_0, x_1, \dots, x_n, x_{n+1})$. Los estados de los extensores auxiliares derecho e izquierdo son x_0 y x_{n+1} respectivamente.

Por lo tanto, un movimiento inch-worm es una secuencia de estados $(q'_0, q'_1, \dots, q'_f)$ tal que $q'_0 = (x_0^0, q^0, x_{n+1}^0)$, y $q'_f = (x_0^f, q^0, x_{n+1}^f)$, siendo q^0 el estado inicial dado. Si $(x_0^0, x_{n+1}^0) = (0,1)$, entonces $(x_0^f, x_{n+1}^f) = (1,0)$; si $(x_0^0, x_{n+1}^0) = (1,0)$, entonces $(x_0^f, x_{n+1}^f) = (0,1)$. El generador de movimiento es $A = (Q', \Sigma, \delta, q'_0, F')$, donde Q' es el conjunto de estados de extensores aumentados; $F' \subseteq Q'$ es el conjunto de estados finales.

4.7. Movimiento de un solo paso

De las figuras 4.2 y 4.3 observamos que la posición de cada sujetador se mueve un paso de longitud cuando un ciclo de andadura es completado. El movimiento del sujetador depende de los estados de los dos extensores vecinos. Por ejemplo, el sujetador 2 de la figura 4.2 no puede moverse debido a que ambos extensores 1 y 2 están extendidos a su límite. El sujetador 2 solo se puede mover un paso de longitud a la derecha, del estado 2 al estado 3, mediante la extensión simultánea del extensor 1 y la contracción del extensor 2. Volviendo a observar el estado 1, el sujetador 1 se puede mover coordinando la extensión del extensor trasero, y la contracción del extensor 1. En términos de los estados binarios de los actuadores, el movimiento del sujetador

depende del cambio simultáneo de los estados de los extensores vecinos, de (0,1) a (1,0) si el robot se mueve a la derecha. Y viceversa, si el robot se mueve a la izquierda.

Observar que cada transición de estado de un paso permite solamente que dos extensores se muevan simultáneamente. El resto de los extensores permanecen estacionarios, Los sujetadores que no están afectados se sostienen mediante la fricción del contacto con su ambiente. Con un $q'_f = (0, q_0, 1)$, una secuencia de etiquetas en Σ puede ser generada de δ_f para satisfacer el estado final $q'_f = (1, q_0, 0) \in F'$. Esta secuencia de etiqueta representa la secuencia de los estados de los extensores del movimiento. Debido a que hay un número de posibles funciones de transición de estado permitidas para el estado q'_a en cualquier paso, el generador de movimiento A puede ser representado por un árbol direccionado con el nodo raíz como $q'_0 = (0, q_0, 1)$, y todos los nodos pendientes como $q'_f = (1, q_0, 0)$. Cada ruta dirigida desde el nodo raíz hacia un nodo pendiente es un movimiento válido (Figura 4.4). Utilizando la búsqueda exhaustiva en el árbol, es posible encontrar todos los movimientos con la misma condición inicial. La figura 4.5 muestra la generación de movimiento de un solo paso de un robot de tres extensores. Se puede generar un nuevo movimiento de avance basado en este nuevo estado inicial usando la función de transición idéntica. Debido a que la interrupción puede ser activada en cualquier momento de la secuencia, se puede lograr la generación de movimiento en tiempo real y en línea.

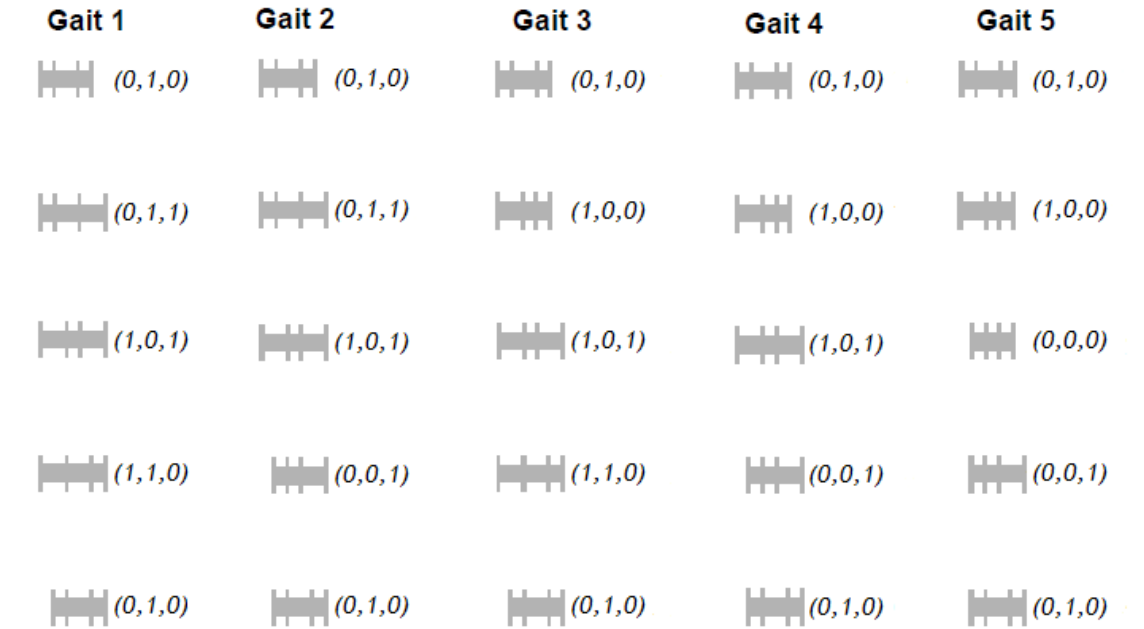


Figura 4.5. Movimiento de avance de un paso con idénticas condiciones iniciales.

4.8. Movimientos de doble paso

Un movimiento de doble paso hace que el robot se mueva dos pasos de longitud cuando un ciclo de movimiento es completado Figura 4.6 a. En base a la analogía de la estrategia para la generación del movimiento de un paso, el movimiento de doble paso requiere que 4 extensores sean activados simultáneamente. Con los movimientos de doble paso, el robot puede completar un ciclo de movimiento en menos pasos pero la gran energía que se consume es comparable con la de los movimientos de un paso.

4.9. Movimientos de onda fija

El movimiento de onda fija requiere que todos los extensores trabajen al mismo tiempo y que los extensores vecinos sean activados en la dirección contraria. Por lo tanto, requiere

solamente dos estados de transición para completar el ciclo. Notar que las condiciones iniciales usualmente no pueden comenzar el patrón de onda fija.

Los extensores auxiliares frontal y trasero son restablecidos a 0 y 1 por cada estado de transición δ_w . Esto asegurará que las limitaciones de la cinemática impuestas por los sujetadores auxiliares estacionarios sean correspondidas para cada estado. Esta función de estado de transición también describe un proceso completo de generación de onda fija comenzando por la condición inicial, pasando por una fase de transición para activar todos los extensores, y finalmente entrar en el ciclo de onda estacionaria de doble paso. El comportamiento es muestra en el robot de 4-extensores de la figura 4.6 b. Del estado 1 al 3, el robot está en la fase de transición. Del estado 4 al estado 6 y hacia adelante, el robot entra en la fase del movimiento de onda estacionaria. Para esto siempre hay dos o tres sujetadores sosteniéndose del ambiente para proveer fuerza de fricción en el ciclo del movimiento de onda estacionaria. Las limitaciones cinemáticas de locomoción se mantienen durante el movimiento.

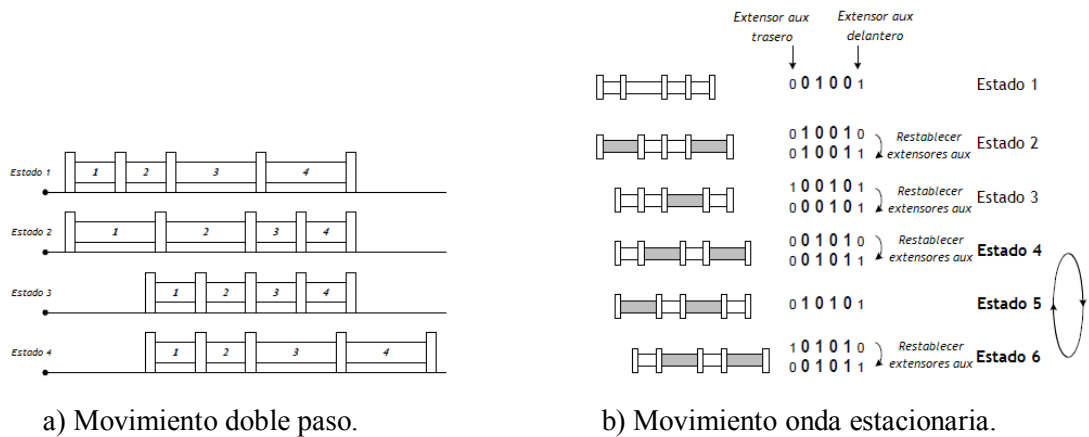


Figura 4.6. Generación de movimiento multi pasos.

4.10. Conclusiones

Se observo una forma de modelar un robot con locomoción tipo inch-worm como autómata finito.

Lo cual para nuestro propósito es útil ya que refleja la forma como se activan los actuadores en nuestro robot ya que se toman como estados binarios los actuadores ya sea extendido (0) o retractado (1). La generación de este tipo de andar se convierte entonces en una búsqueda exhaustiva en los grafos direccionados. Se observaron varias formas de generación de movimiento: de un paso, doble paso y de onda estacionaria.

Para generar el movimiento inch-worm se utilizan extensores y sujetadores auxiliares de referencia, que nos indican si un ciclo de secuencia de movimiento ha terminado. Para la generación de movimiento de un paso los actuadores se activan uno a la vez. En la generación de movimiento de doble paso dos extensores se activan a la vez mientras los otros dos están estacionarios. Aunque la generación de doble paso termine el ciclo de movimiento utilizando menos estados de transición, la energía para este tipo de movimiento es comparable con la de un paso. En la generación de movimiento por onda fija todos los extensores se activan al mismo tiempo y los extensores vecinos se activan en la dirección contraria, por lo tanto requiere solo dos estados de transición para completar el ciclo. El estado de transición de la generación de movimiento por onda fija comienza por la condición inicial, pasando por una fase de transición para activar todos los extensores, y finalmente entra en un ciclo de generación de movimiento de onda estacionaria de doble paso.

Capitulo 5

Descripción de la simulación del sistema electro neumático

5.1 Introducción

En este capítulo se describe el diseño del sistema electro neumático de nuestro robot simulado en el paquete de software de simulación de electro neumática de FESTO FluidSIM. Se describirán las etapas de las secuencias de avance y retroceso mediante la interacción de los actuadores neumáticos y los sensores del sistema.

5.2 Sistema electro neumático

La simulación del sistema electro neumático se realizó en el paquete de software de FESTO FluidSIM versión 3.6. El sistema electro neumático simulado en este paquete consta de tres cilindros neumáticos, uno de doble efecto el cual es el actuador de nuestro robot y de dos cilindros neumáticos de simple efecto con retroceso por resorte, que hacen las veces de bolsas neumáticas, las cuales son nuestro sistema de sujeción.

El robot consta principalmente de dos segmentos o módulos, uno frontal y otro trasero. El cilindro de doble efecto es controlado por una electroválvula de cinco vías y dos posiciones, los cilindros de simple efecto son controlados por electroválvulas de tres vías y dos posiciones [30].

Los cilindros cuentan con sensores de posición al principio y al final de la carrera del vástago. Los sensores de principio y final de carrera de los cilindros de simple efecto simulan la presión de las bolsas neumáticas, siendo los sensores de principio de carrera el nivel mínimo de presión en las bolsas neumáticas, para que el segmento en turno pueda ser jalado o empujado en la secuencia de movimiento del robot según sea el caso. El sensor de final de carrera, es el sensor de presión, el cual simula la presión necesaria para que el segmento del robot se sostenga dentro de la tubería. En la figura 5.1 se observa la secuencia de desplazamiento del robot. El avance y retroceso del robot son ciclos en secuencias de seis movimientos que se describe a continuación.

Se introduce el robot a la tubería con las bolsas del sistema de sujeción desinfladas, una vez introducido por completo se enciende el robot. Enseguida se infla la bolsa del segmento trasero, de modo que el robot quede firmemente sujeto dentro de la tubería, el cilindro neumático se activa y el segmento frontal del robot avanza, la bolsa del segmento frontal se infla para sujetar el robot dentro de la tubería. Una vez que el robot está sujeto se desinfla la bolsa del segmento trasero para permitir la contracción del cilindro neumático, al contraerse completamente el cilindro neumático se vuelve a inflar la bolsa del segmento trasero, al estar el robot sujeto firmemente se desinfla la bolsa del segmento frontal, de modo que permita el movimiento de éste segmento para avanzar y de esta forma completar un paso en la secuencia de avance. De esta forma la secuencia se repite nuevamente en para avanzar. Para retroceder se realizaría la secuencia en forma inversa.

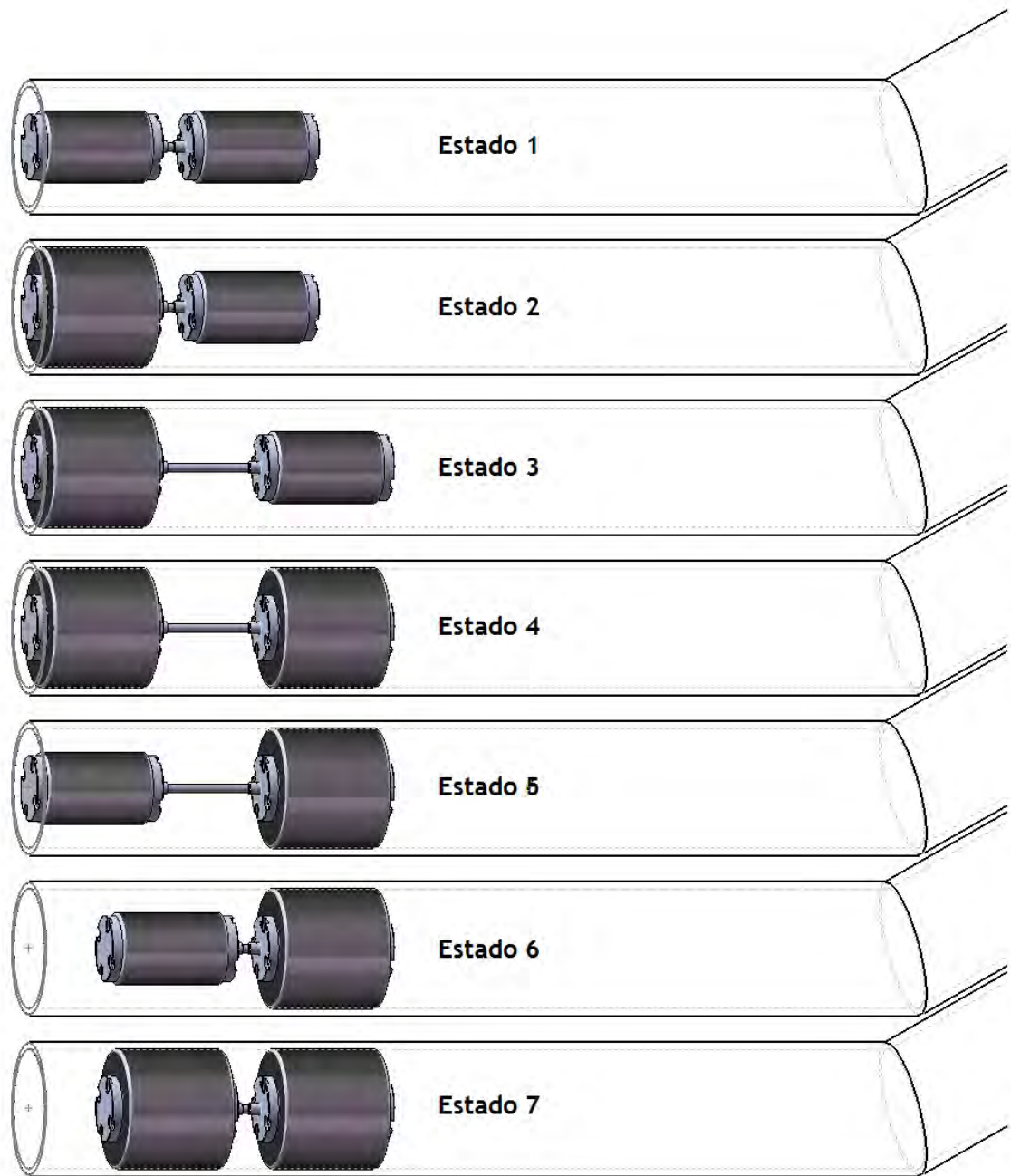


Figura 5.1. Secuencia de desplazamiento del robot.

5.3. Secuencia de avance del robot

El sistema electro neumático se observa en la figura 5.2. En esta figura se aprecian dos botones, el botón de encendido o avance S1 y el botón S2 para activar la secuencia de retroceso. En este diagrama también se observan los cilindros neumáticos C1, B1, y B2, sobre cada uno de los sensores se aprecian los sensores de principio y final de carrera para cada cilindro, en el cilindro neumático C1 tenemos el sensor de principio de carrera W y el sensor de final de carrera Y. C1 es el actuador del robot, nuestro extensor. B1 y B2 son los cilindros neumáticos que simulan el comportamiento de las bolsas neumáticas del segmento frontal y trasero respectivamente. En el cilindro B1 se observan los sensores V de principio de carrera y U de final de carrera. En el cilindro B2 el sensor de principio de carrera es X y el sensor de final de carrera es Z.

El cilindro C1 está controlado por la electro válvula V1, la cual es activada por dos bobinas A y B. La bobina A cambia a la posición uno a V1, la bobina C cambia a la posición dos a V2. De la misma forma el cilindro B1 es controlado por la electro válvula V2 la cual es activada por la bobinas C y E. El cilindro B2 es gobernado por la electroválvula V3, donde las posiciones uno y dos de V3 son controladas por B y F respectivamente.

A continuación se describen las interacciones de los sensores, cilindros y válvulas que nos permiten la locomoción inch-worm de acuerdo a los estados de la figura 5.1 y el diagrama electro neumático de la figura 5.2.

Estado 1

Al introducir el robot en la tubería encendemos el sistema electro neumático mediante el botón S1. Al activar el sistema, se energizan las bobinas B, D, y E esto nos asegura las posiciones de la electro válvulas para que los cilindros C1 y B1 estén con el vástago dentro.

Estado 2

Al activarse la bobina B de la electro válvula V2, ésta pasa a la posición uno, dejando pasar el aire hacia el cilindro B2, para que el vástago salga. Al llegar al final de carrera el vástago del cilindro B2 hace contacto con el sensor Z, el cual activa la bobina A de la electro válvula V1.

Estado 3

Al activarse la electro válvula V1 ésta pasa a la posición uno y deja pasar el aire al cilindro C1. El vástago del cilindro C1 sale hasta alcanzar su final de carrera, al llegar al final de carrera el sensor Y se activa.

Estado 4

La señal del sensor Y es enviada para estimular la bobina C de la electro válvula V2, la electro válvula V2 pasa a la posición uno y permite el paso del aire al cilindro B1 y así el vástago del cilindro B1 sale para terminar su carrera en el sensor U.

Estado 5

El sensor U activa la bobina F de la electro válvula V3 la cual pasa a la posición dos impidiendo el paso del aire al cilindro B2 y por acción del resorte el vástago del cilindro B2 regresa dentro del cilindro.

Estado 6

Al regresar el vástago del cilindro B2 se activa el sensor X el cual excita a la bobina D de la válvula V1 para que ésta pase a la posición dos y permita que el aire pase al cilindro C1 y regrese el vástago dentro del cilindro C1.

Estado 7

Un vez que el vástago del cilindro C1 está, por completo dentro del cilindro se acciona el sensor W, cuya señal hace que se energice la bobina B de la electro válvula V2, y así pasar a la posición uno, la cual permite el flujo de aire al cilindro B2 para que el vástago salga.

Estado 2

Al llegar al final de carrera el vástago del cilindro B2 hace contacto con el sensor Z, el cual en este caso activa la bobina E de la electro válvula V2 que a su vez pasa a la posición dos impidiendo el paso del aire para que el vástago del cilindro B1 regrese por acción del resorte. En este punto se alcanza el final de la secuencia de avance del robot, para lograr un desplazamiento de la longitud del cilindro (un paso). La secuencia comienza nuevamente para dar un segundo desplazamiento de la misma longitud y así sucesivamente.

5.4. Secuencia de retroceso del robot.

El robot como ya se mencionó tiene la capacidad para navegar en dirección inversa, mediante la activación del botón S2 estando activado el botón S1 de la figura 5.2. Es importante recalcar que el diseño de este sistema se realizó para que en cualquier momento de la secuencia de avance se pueda activar el botón S2 y en ese instante el robot comenzará a desplazarse en forma inversa. De la misma forma, en cualquier momento, de la secuencia de desplazamiento al desactivar el botón S2 el robot comenzará a desplazarse hacia adelante.

Cuando se accione el botón S2, mientras el robot está en la secuencia de avance, éste cambiará a la secuencia de retroceso mediante la activación del relevador G que actúa como una compuerta “OR” que elige dos tipos de arreglos de los contactos de los sensores para la misma bobina de las electro válvulas.

Para explicar la secuencia de retroceso se supondrá que el robot alcanzó el **estado 7** de la secuencia de avance y en ese momento se acciona el botón S2.

Estado 6

Al Presionar el botón S2 las electro válvulas V1 y V3 permanecen en la posición dos debido a que las bobinas D y F respectivamente están excitadas para mantener a los vástagos de los cilindros C1 y B1 dentro de los mismos. Por otra parte la bobina C de la electro válvula V2 esta activada en este instante por lo que la electro válvula está en la posición uno lo que permite el paso del aire al cilindro B1. Cuando el vástago del cilindro B1 llega al final de carrera, el sensor U se activa.

Estado 5

Al activarse el sensor U, la bobina A de la electro válvula V1, se energiza y pasa a la posición uno, la cual deja pasar el aire hacia el cilindro C1 y así el vástago sale del cilindro C1 hasta alcanzar el final de carrera, con lo cual se activa el sensor Y.

Estado 4

Al activarse el sensor Y, la bobina B de la electro válvula V3, se energiza lo que hace que la electroválvula V3 se mueva a la posición uno para dejar pasar el flujo de aire hacia el cilindro B2, el vástago del cilindro B2 sale hasta llegar al sensor Z.

Estado 3

El sensor Z activa la bobina E de la electro válvula V2, la cual se mueve a la posición dos e impide el paso del aire al cilindro B1 y de esta forma el vástago regresa dentro del cilindro mediante la acción del resorte y activar el sensor V.

Estado 2

Cuando el sensor V es alcanzado la bobina D de la electro válvula V1 es energizada y la electro válvula se mueve a la posición dos y así dejar pasar el aire al cilindro C1 lo que hace que el vástago regrese dentro del cilindro C1 hasta alcanzar al sensor W.

Estado 7

Cuando se alcanza el sensor W se acciona la bobina C de la electro válvula V2 por lo que la electro válvula V2 cambia a la posición uno permitiendo el paso del aire al cilindro B1 donde el vástago sale alcanzando al sensor U

Estado 6

El sensor U energiza a la bobina F de la electro válvula V3 y con esto la electro válvula pasa a la posición dos donde el aire es obstruido hacia el cilindro B2 y por lo tanto el vástago de este cilindro regresa por acción del resorte hasta accionar el sensor X. De esta manera se completa la secuencia para retroceder un paso.

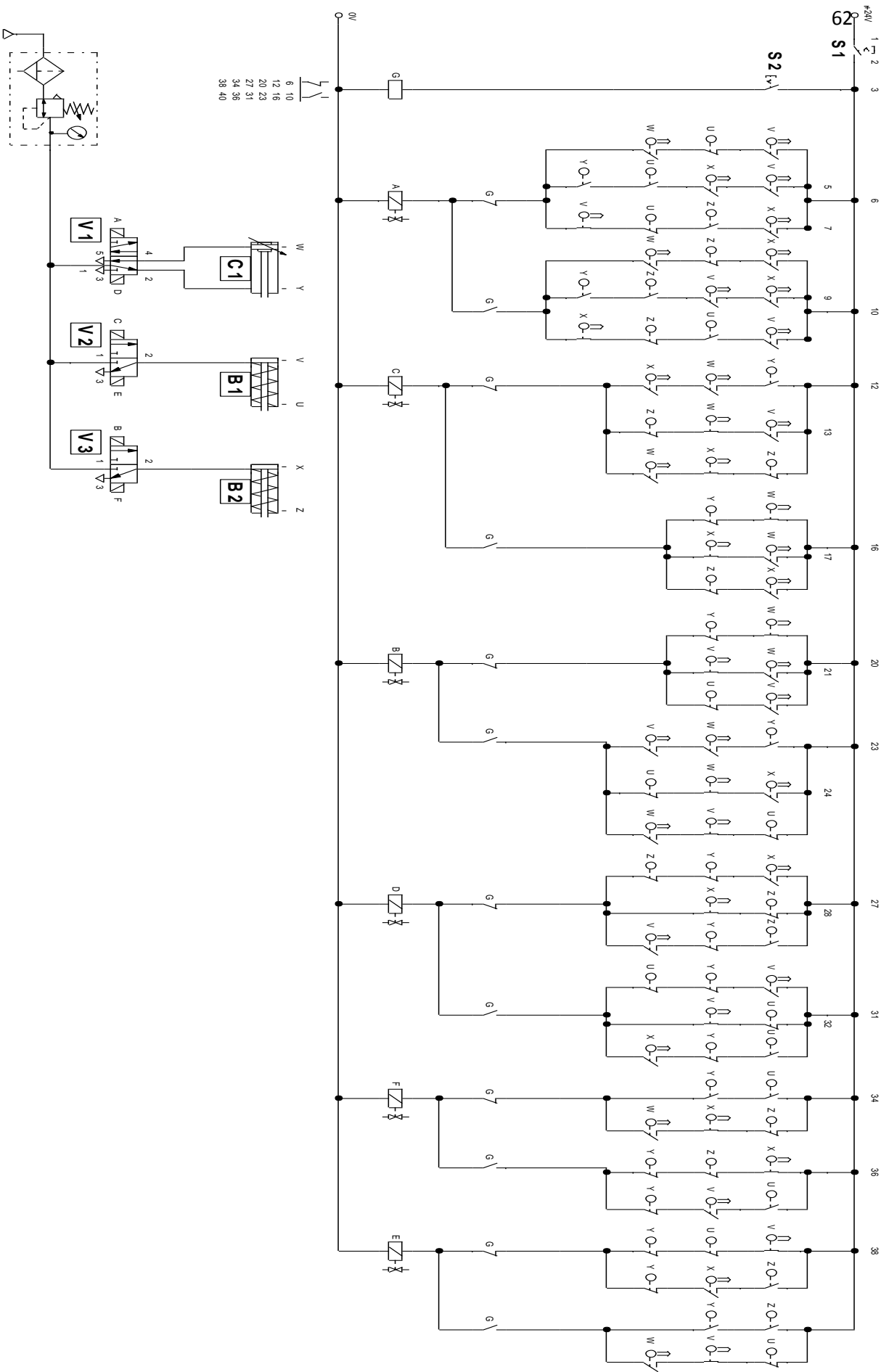


Figura 5.2. Sistema electro neumático del robot.

5.5. Conclusiones

En este capítulo se describió la simulación del robot hecha en el paquete de software para la simulación de circuitos electro neumáticos de FESTO FluidSIM. La secuencia de locomoción del robot consta de seis movimientos.

Se introduce el robot a la tubería con las bolsas del sistema de sujeción desinfladas, una vez introducido por completo se enciende el robot. Enseguida se infla la bolsa del segmento trasero, de modo que el robot quede firmemente sujeto dentro de la tubería, el cilindro neumático se activa y el segmento frontal del robot avanza, la bolsa del segmento frontal se infla para sujetar el robot dentro de la tubería. Una vez que el robot está sujeto se desinfla la bolsa del segmento trasero para permitir la contracción del cilindro neumático, al contraerse completamente el cilindro neumático se vuelve a inflar la bolsa del segmento trasero, al estar el robot sujeto firmemente se desinfla la bolsa del segmento frontal, de modo que permita el movimiento de éste segmento para avanzar y de esta forma completar un paso en la secuencia de avance. De esta forma la secuencia se repite nuevamente en para avanzar. Para retroceder se realizaría la secuencia en forma inversa.

Para la simulación de nuestro robot se utilizaron tres cilindros neumáticos. El extensor, de nuestro robot es un cilindro neumático de doble efecto controlado por una válvula electro neumática de cinco vías y dos posiciones. Los dos cilindros restantes son cilindros de simple efecto con retorno por resorte, los cuales simulan las bolsas neumáticas y están controlados por electro válvulas igualmente de cinco vías y dos posiciones. La simulación del circuito electro neumático muestra las interacciones entre los cilindros, sensores y electro válvulas del sistema.

El diseño del circuito electro neumático tiene la capacidad de lograr la secuencia de avance y retroceso del robot mediante el accionamiento del botón S2. El accionamiento del avance o retroceso se puede activar en cualquier momento de la secuencia de avance o retroceso según sea el caso.

Capítulo 6

Un diseño mecánico del robot

6.1. Introducción

En ese capítulo se hará una descripción del diseño mecánico del robot, de las partes que lo integran y la funcionalidad de su diseño. Además analizar las ventajas de este diseño frente a los pipe crawlers propuestos

6.2. Sistema mecánico

El diseño del sistema mecánico completo así como sus partes se muestra en la figura 6.1. El sistema se desarrollo en el software de simulación y diseño Solidworks. El sistema mecánico consta de dos segmentos frontal y trasero, donde en cada uno de estos segmentos cuenta con una bolsa neumática en el exterior de los segmentos a modo de dona. El segmento trasero es el que aloja el cilindro neumático, que está integrado de: tapa posterior y tapa posterior con cojinete y aro rascador, además de piezas de unión y juntas. El segmento trasero es el actuador para realizar la extensión y contracción del robot mediante el vástago y embolo. A continuación se hace la descripción de los elementos que componen nuestro robot:

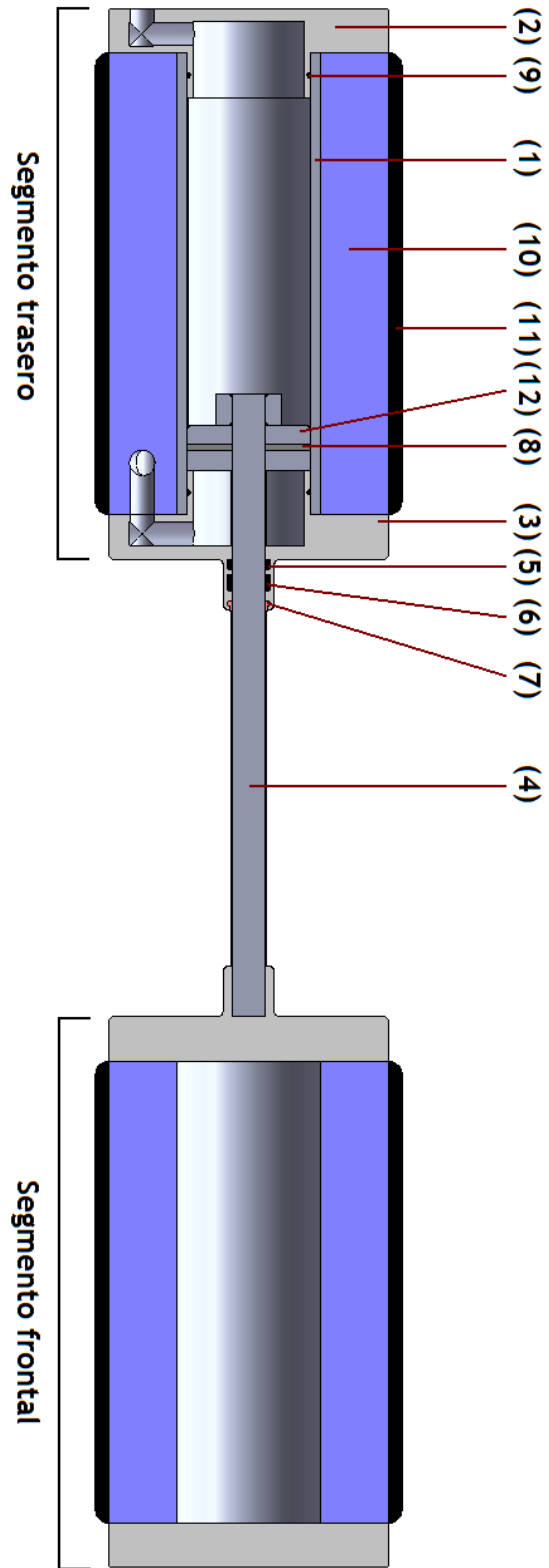


Figura 6.1. Sección del robot.

6.3. Camisa del cilindro

La camisa mostrada en la figura 6.2 parte (1) en la figura 6.1, en la mayoría de los casos se fabrica de tubo de acero embutido. Para nuestro diseño se utilizaría aluminio debido a que es liviano y resistente a influencias corrosivas y para la captación de finales de carrera magnéticamente.

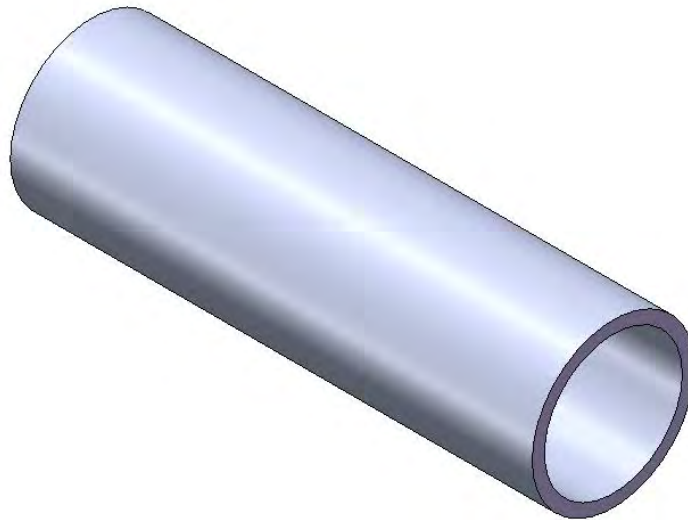


Figura 6.2. Camisa del cilindro del robot.

La camisa marca dos parámetros fundamentales del cilindro.

- Por un lado, su diámetro interno marcará la sección que presenta el cilindro y por tanto, para una presión dada nos indicará la fuerza que este es capaz de realizar. Evidentemente, a mayor diámetro, mayor fuerza y consumo.
- Por otro lado, la longitud del tubo delimita lo que se conoce como carrera del cilindro, o longitud útil para el trabajo con el mismo.

Tanto los diámetros como carreras se encuentran normalizados.

6.4. Cilindro externo

El diseño del cilindro externo (10) se muestra en la figura 6.3 de igual manera de pensado para realizarse en aluminio. Esta pieza del robot cuenta con una ventaja que nos permite, mediante canales internos en el cilindro externo, alimentar tanto las bolsas neumáticas como el cilindro neumático. De esta forma las mangueras de alimentación no están comprometidas por las bolsas neumáticas cuando éstas se inflen y las puedan dañar.

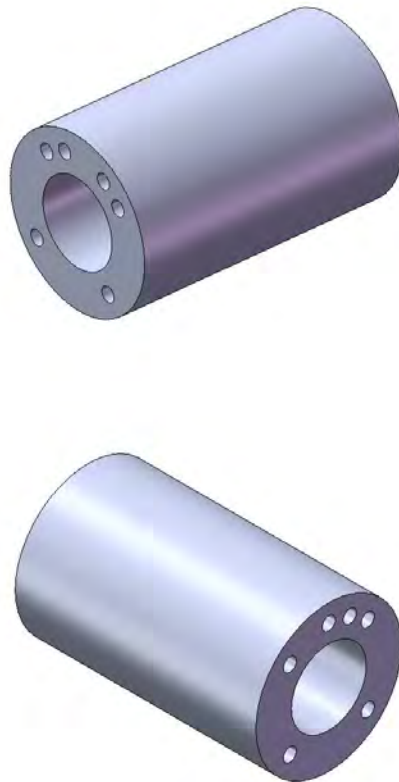


Figura 6.3. Cilindro externo del robot.

El cilindro externo del segmento frontal solo cuenta con la entrada de aire para la bolsa neumática.

6.5. Culata posterior y culata anterior

Para las tapas posterior (2) y anterior (3) se emplea preferentemente de material de fundición de aluminio. La fijación de ambas tapas en el tubo se realiza mediante tornillos. El diseño de las culatas al igual que el cilindro externo tiene la finalidad de comunicar mediante canales internos la alimentación del cilindro neumático y de esta forma no usar mangueras al exterior de las bolsas neumáticas.

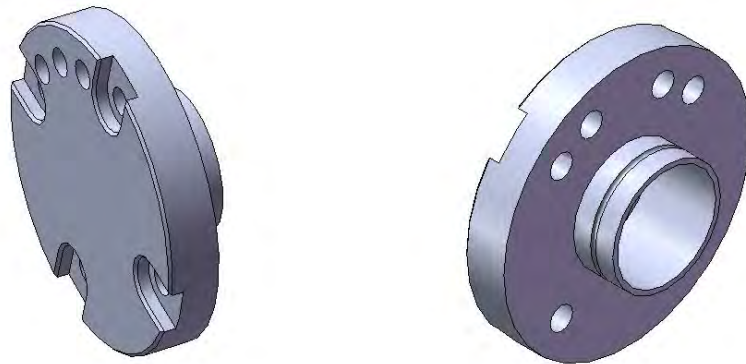


Figura 6.4. Destalle de la culata posterior del robot.

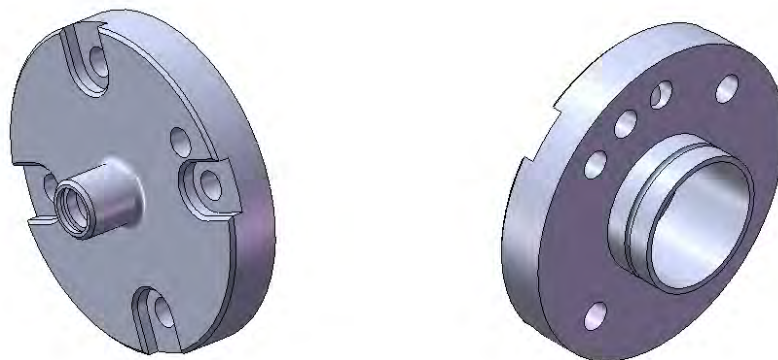


Figura 6.5. Detalle da la culata anterior del robot.

Las culatas posterior y anterior del segmento frontal están diseñadas sólo para recibir el vástago del cilindro.

En la figura 6.6 se observa los de talles de las piezas para hermetizar el vástago, se monta en la culata anterior un collarín obturador (5). De la guía de vástago se hace cargo un casquillo del cojinete (6), que puede ser de bronce sinterizado o un casquillo metálico con revestimiento de plástico. Delante del casquillo de cojinete, se encuentra un aro rascador (7). Este impide que entren partículas de polvo y suciedad en el interior del cilindro.

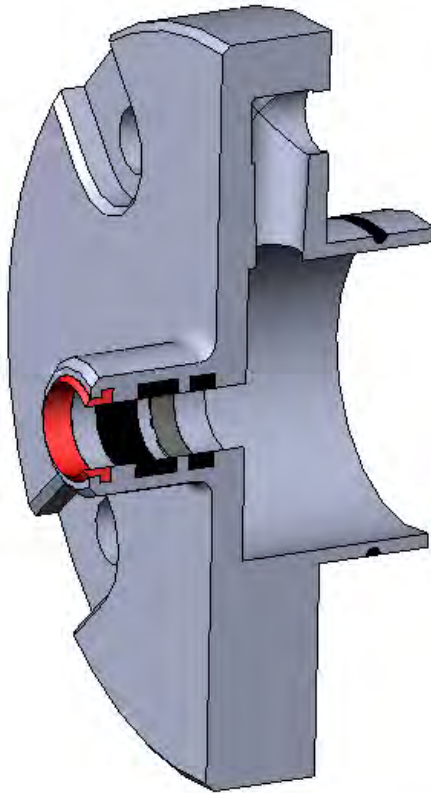


Figura 6.6. Detalle de rascador, casquillo guía, obturador y tórica de cierre (de derecha a izq.) de la culata anterior del robot.

6.6. Embolo y vástago

El vástago (12) se fabrica preferentemente de acero bonificado este acero contiene un determinado porcentaje de cromo que lo protege de la corrosión. El vástago se acopla mecánicamente con el émbolo mediante tuerca y juntas estáticas (para el sellado).

Sobre el émbolo (8) se montarán las juntas dinámicas y el imán para la captación magnética de la posición.



Figura 6.7. Detalle del vástago y embolo del cilindro neumático del robot.

La junta dinámica (8), hermetiza las cámaras del cilindro para un óptimo rendimiento. Las juntas tóricas o anillos toroidales (9), se emplean para la obturación estática, porque deben pre-tensarse, y esto causa pérdidas elevadas por fricción.

6.7. Bolsa neumática

El sistema de sujeción de nuestro robot son las bolsas neumáticas, están colocadas sobre el cilindro externo en forma de dona y se alimentan mediante los canales internos del cilindro externo, su presión se mide mediante un sensor de presión colocado en el circuito electro neumático.

Tienen la ventaja de adaptarse al contorno de las tuberías y a las obstrucciones que esta pudiera tener. La desventaja es que solo se pueden adaptar a las obstrucciones que no tengan filos que comprometan las bolsas.

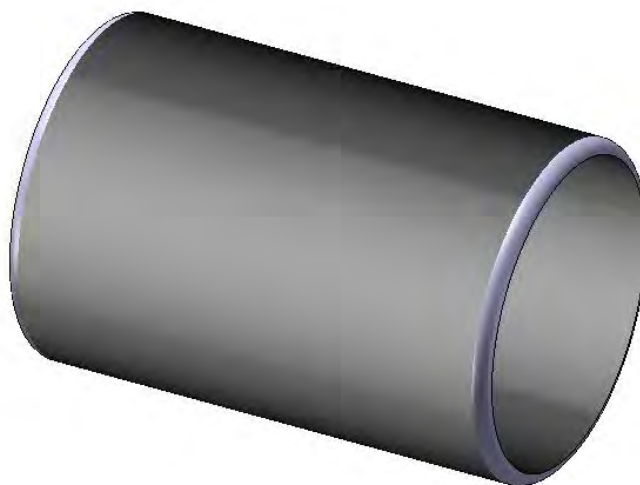


Figura 6.8. Bolsa neumática del robot.

A continuación se muestran algunas imágenes de los detalles del robot:

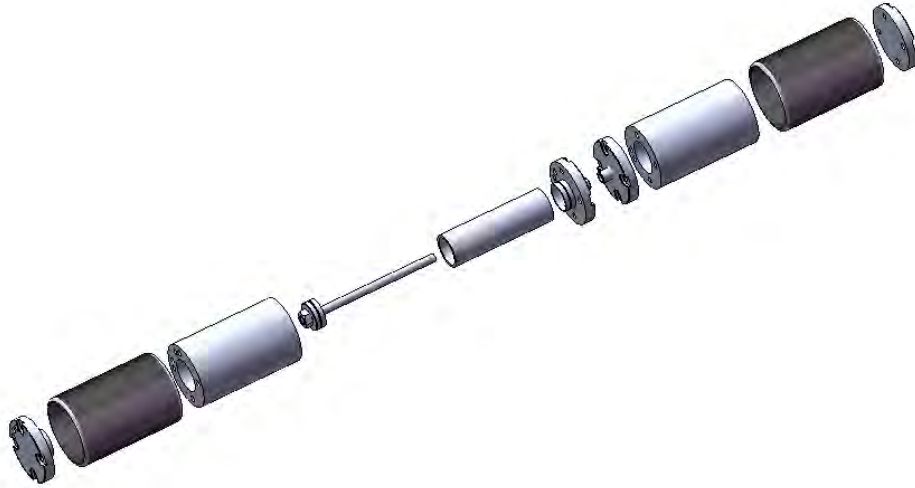
Robot completo

Figura 6.9. Vista explosionada del sistema mecánico del robot.

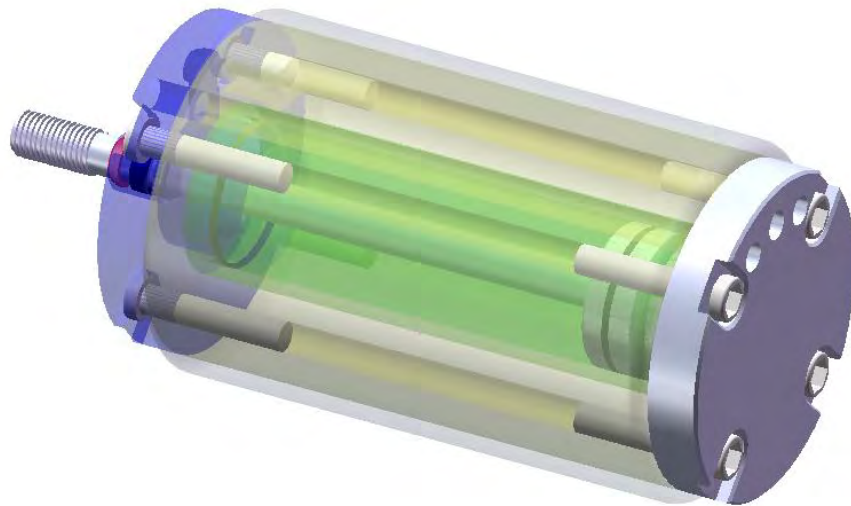
Partes ensambladas

Figura 6.10. Detalle del segmento trasero del robot.

6.8. Conclusiones

En este capítulo se describió el sistema mecánico. Se revisaron los detalles del sistema en sus partes así como las ventajas del diseño con los vistos en el capítulo dos.

Algunas de las ventajas son:

- Presenta un diseño estanco lo que lo hace inmune a la suciedad dentro de las tuberías.
- Posee un sistema de sujeción capaz de adaptarse al entorno o las formas e la tubería y además de poder adaptarse a la acumulación de material.
- El diseño del cilindro externo y de las culatas anterior y posterior permite la conexión de la alimentación de aire comprimido por medio de canales dentro de los cuerpos de los mencionados, lo que permite que las bolsas se infle libremente, aunque las bolsas se pueden adaptar a las mangueras, con este diseño se impide que las mangueras que estarías situadas por fuera se zafaran y causaran la falla de la secuencia de locomoción.

Capitulo 7

Conclusiones y trabajo a futuro

El ultimo capitulo se ha dividido en tres secciones. Primer las principales contribuciones de esta tesis son listadas. Enseguida las conclusiones de cada capítulo son presentadas y finalmente se bosqueja el trabajo a futuro.

7.1. Principales contribuciones

Se ha realizado una clasificación de los tipos de pipe crawlers que se estudian y comercializan.

Se propuso un nuevo sistema de sujeción para los pipe crawlers tipo inch-worm, que permite la navegación en espacios cerrados de configuración arbitraria.

Se propuso un diseño del sistema electro neumático que permite realizar el tipo de locomoción propuesto.

Se realizó la simulación de la locomoción del robot, de esta forma se obtuvo un circuito electro neumático que funciona realmente. Este circuito funcionará con los dispositivos físicos una vez comprados.

Se mejoro el diseño mecánico de los robots tipo inch-worm presentados en el capítulo dos permitiendo con este mejorar el sistema de sujeción, permitiendo de esta forma adaptarse a la forma de las tuberías, no importando el material del que están hechas, además este diseño mejora la forma de alimentar al cilindro y las bolsas mediante canales internos.

7.2. Resumen de conclusiones

Clasificación de pipe crawlers

Se estableció el contexto en el que se encuentra nuestro robot dentro la robótica móvil.

Se desarrollaron los conceptos de locomoción y los tipos de locomoción que existen para los robots móviles.

Se ha establecido una clasificación de los robots móviles para la exploración, navegación e inspección de tuberías; llamados en la industria como pipe-crawlers. En esta clasificación se describió el funcionamiento de cada tipo de robot pipe-crawler junto con un análisis sobre la robustez de su diseño para la navegación dentro de las tuberías.

El grupo de interés en esta tesis son los robots pipe-crawlers tipo inch-worm, debido a que nuestro robot pertenece a este tipo de robots. Los robots pipe crawlers tipo inch-worm están compuestos por módulos los cuales cuentan con un sistema de sujeción el cual se expande radialmente respecto al eje de la tubería para asirse de la tubería y poder avanzar mediante un actuador, que regularmente es usado un cilindro neumático para extender y contraer el cuerpo del robot longitudinalmente, tal como una oruga lo haría en la naturaleza.

Ventajas de simulación

Presentamos algunos conceptos de simulación Además de analizar la complejidad de los sistemas optomecatrónicos donde se deben considerar las deferentes interacciones entre los diferentes subsistemas y señales involucradas, para lo cual se implementa la simulación, con lo que se facilita la implementación de nuevos sistemas, realizar diferentes configuraciones del dispositivo y encontrar problemas en el diseño.

Se presentaron las herramientas de simulación utilizadas en el desarrollo de nuestro dispositivo. Una de ellas es FluidSIM la cual nos permite simular las conexiones entre los elementos neumáticos y las interacciones con los sensores del sistema. La segunda herramienta utilizada fue SolidWorks en la que se desarrolló el sistema mecánico. Esta herramienta nos permite observar los espacios físicos de nuestro diseño y las interacciones mecánicas de los elementos de nuestro.

Modelo autómeta finito

Se observo una forma de modelar un robot con locomoción tipo inch-worm como autómeta finito.

Lo cual para nuestro propósito es útil ya que refleja la forma como se activan los actuadores en nuestro robot ya que se toman como estados binarios los actuadores ya sea extendido (0) o retractado (1). La generación de este tipo de andar se convierte entonces en una búsqueda exhaustiva en los grafos direccionados. Se observaron varias formas de generación de movimiento: de un paso, doble paso y de onda estacionaria.

Para generar el movimiento inch-worm se utilizan extensores y sujetadores auxiliares de referencia, que nos indican si un ciclo de secuencia de movimiento ha terminado. Para la generación de movimiento de un paso los actuadores se activan uno a la vez. En la generación de movimiento de doble paso dos extensores se activan a la vez mientras los otros dos están estacionarios. Aunque la generación de doble paso termine el ciclo de movimiento utilizando menos estados de transición, la energía para este tipo de movimiento es comparable con la de un paso. En la generación de movimiento por onda fija todos los extensores se activan al mismo tiempo y los extensores vecinos se activan en la dirección contraria, por lo tanto requiere solo dos estados de transición para completar el ciclo. El estado de transición de la generación de movimiento por onda fija comienza por la condición inicial, pasando por una fase de transición para activar todos los extensores, y finalmente entra en un ciclo de generación de movimiento de onda estacionaria de doble paso.

Simulación del sistema de locomoción

Se describió la simulación del robot hecha en el paquete de software para la simulación de circuitos electro neumáticos de FESTO FluidSIM. La secuencia de locomoción del robot consta de seis movimientos.

Se introduce el robot a la tubería con las bolsas del sistema de sujeción desinfladas, una vez introducido por completo se enciende el robot. Enseguida se infla la bolsa del segmento trasero, de modo que el robot quede firmemente sujeto dentro de la tubería, el cilindro neumático se activa y el segmento frontal del robot avanza, la bolsa del segmento frontal se infla para sujetar el robot dentro de la tubería. Una vez que el robot está sujeto se desinfla la bolsa del segmento trasero para permitir la contracción del cilindro neumático, al contraerse completamente el cilindro neumático se vuelve a inflar la bolsa del segmento trasero, al estar el robot sujeto firmemente se desinfla la bolsa del segmento frontal, de modo que permita el movimiento de éste segmento para avanzar y de esta forma completar un paso en la secuencia de avance. De esta forma la secuencia se repite nuevamente en para avanzar. Para retroceder se realizaría la secuencia en forma inversa.

Para la simulación de nuestro robot se utilizaron tres cilindros neumáticos. El extensor, de nuestro robot es un cilindro neumático de doble efecto controlado por una válvula electro neumática de cinco vías y dos posiciones. Los dos cilindros restantes son cilindros de simple efecto con retorno por resorte, los cuales simulan las bolsas neumáticas y están controlados por electro válvulas igualmente de cinco vías y dos posiciones. La simulación del circuito electro neumático muestra las interacciones entre los cilindros, sensores y electro válvulas del sistema.

El diseño del circuito electro neumático tiene la capacidad de lograr la secuencia de avance y retroceso del robot mediante el accionamiento del botón S2. El accionamiento del avance o retroceso se puede activar en cualquier momento de la secuencia de avance o retroceso según sea el caso.

Sistema mecánico

Se describió el sistema mecánico. Se revisaron los detalles del sistema en sus partes así como las ventajas del diseño con los vistos en el capítulo dos.

Algunas de las ventajas son:

- Presenta un diseño estanco los que lo hace inmune a la suciedad dentro de las tuberías.
- Posee un sistema de sujeción capaz de adaptarse al entorno o las formas e la tubería y además de poder adaptarse a la acumulación de material.
- El diseño del cilindro externo y de las culatas anterior y posterior permite la conexión de la alimentación de aire comprimido por medio de canales dentro de los cuerpos de los mencionados, lo que permite que las bolsas se infle libremente, aunque las bolsas se pueden adaptar a las mangueras, con este diseño se impide que las mangueras que estarías situadas por fuera se zafaran y causaran la falla de la secuencia de locomoción.

7.3. Trabajo a futuro

Se encontraron problemas con la simulación de las bolsas neumáticas debido a la poca información disponible sobre estas, por este aspecto se decidió utilizar para la simulación dos cilindros de simple efecto con retorno por resorte para simular las bolsas. La caracterización de los elastómeros utilizados para la creación de bolsas neumáticas se basa en cuatro pruebas mecánicas, que fue imposible realizar debido a la falta de equipo para este aspecto y experiencia en el mismo. Debido a estos factores estudiar a fondo estos tipos de materiales es un trabajo a realizar para poderlos caracterizar y simular debidamente la presión mínima y máxima para sujetarse en el interior de la tubería o en su entorno.

Otro tema interesante a desarrollar es el sistema de visión, el cual es indispensable para la navegación en espacios restringidos. El sistema deberá ser capaz de reconocer patrones,

determinar la localización del robot y orientación para escoger el mejor camino en una intersección dentro de la tubería.

Desarrollar el sistema de direccionamiento del robot es un tema importante para poder expandir las capacidades del robot en cuanto a su robustez y autonomía, como poder navegar en curvas cerradas o intersecciones. El sistema de direccionamiento también es importante si se quiere utilizar el robot fuera de la tubería, como podría ser en zonas de desastre.

Diseñar diferentes tipos de configuraciones, entre nuestro sistema de sujeción y otros mostrados o diferentes para que el sistema sea más robusto en cuanto a su capacidad para navegar en diferentes ambientes.

El paso siguiente es construir el prototipo físico y equipar al prototipo con los sensores para la implementación del comportamiento del robot en una ambiente real y hacer al robot autónomo.



VISION EMPRESARIAL

ROBOT PARA EXPLORACIÓN DE TUBERÍAS

Ing. Misael Jiménez Gutiérrez

Apéndice A: Plan de Negocios

Debido a la naturaleza ingenieril de la maestría en optomecatrónica, por medio de la misma se busca establecer enlaces con las empresas de la región de las tecnologías desarrolladas en el CIO, en el presente anexo se establece un plan de negocios en donde se pone en perspectiva la viabilidad del trabajo de tesis realizado para la obtención del grado de maestro en optomecatrónica.

El plan de negocios es un documento que ayuda al empresario a analizar el mercado y planificar la estrategia de un negocio.

El plan se utiliza tanto para una gran empresa como para un pequeño emprendimiento. En distintas etapas de la vida de una empresa es necesario establecer a través de un documento los aspectos esenciales de proyectos que pueden estar relacionados con: lanzamiento de nuevos productos, mejorar los productos existentes, cambiar o ampliar locales para aumentar la capacidad de producción, respaldar un pedido de crédito o interesar a un socio potencial.

"El plan de negocios posibilita a través de un documento reunir toda la información necesaria para valorar un negocio y establecer los parámetros generales para ponerlo en marcha".

En el documento se establece la naturaleza del negocio, los objetivos del empresario y las acciones que se requieren para alcanzar dichos objetivos. La implementación de un proyecto no depende sólo de una "buena idea", también es necesario demostrar que es viable desde el punto de vista económico y financiero.

En el plan de negocios predominan los aspectos económicos y financieros, pero también es fundamental la información que está relacionada con los recursos humanos, las propuestas estratégicas, comerciales y operativas.

Para la realización del presente documento se participó en el curso "Business Foundations for Scientists Certificate Program" impartido por el Eller College of Management, facultad de la Universidad de Arizona. Donde se presentaron los procesos de transferencia, valuación de una empresa, redes de negocios y estructuración de una presentación de negocios.

La estructura del documento es como sigue: se presenta el estado financiero del proyecto donde se analiza la operación de la empresa en los primeros cinco años. Donde se calcula un precio base a partir de los costos de operación además que se establece un precio meta de valuación de la empresa. Para cada espacio de tiempo se realiza una estimación de equipos vendidos como meta.

A continuación se presenta un resumen ejecutivo de ventas para la presentación ante un comité evaluador con el fin de conseguir apoyo económico para la comercialización del producto. Finalmente se presenta un análisis con más detalle en el trabajo a futuro.

VISION EMPRESARIAL:

Noviembre 2009 Misael Jiménez Gutiérrez

MISION:

Establecerse en el mercado mexicano como una de las principales empresas en la navegación, exploración e inspección de tuberías, en las áreas tanto como de servicios como en el sector privado. Proveer el mejor servicio en el mantenimiento de las tuberías para que las empresas nacionales sean más eficientes y tengan mejor rendimiento de sus recursos.

VISION:

Ser la mejor empresa en el país en la venta de equipos y servicios inspección, exploración y navegación de tuberías para los sistemas de tuberías de servicios públicos como en el sector privado empresas, mediante técnicas modernas de censado y dispositivos robóticos de punta.

PLAN DE NEGOCIO:

EL PRODUCTO/IDEA:

- Robots para la exploración, navegación e inspección de tuberías de servicios públicos y en el sector privado – reemplazando técnicas de sondeo externo y robots con poca capacidad de navegación dentro de las tuberías, implementando mejores formas de navegación en los robots.
- Dispositivos compactos modulares.
- Fácil mantenimiento debido a la modularidad.

MERCADO:

- ❖ Oportunidades
 - Única empresa en el país.
 - Sinergia de varias tecnologías.
- ❖ Amenazas
 - Costos de operación elevados en el comienzo de la empresa.
 - Varias propuestas para este fin.
 - Competencia con empresas internacionales (Inspector Systems, Inuktun Services Limited, SINTEF).
- ❖ Clientes potenciales
 - Cualquier sistema de tuberías ya sea público o toda aquella empresa privada que precise de inspección y mantenimiento de sus sistemas de tuberías.
- ❖ Medio de distribución
 - Por medio de una cartera de clientes, realizando ofertas y demostraciones de trabajo.
 - Venta directa, por medio de un equipo de ventas.

PLAN DE NEGOCIO:

MERCADO (continua):

- ❖ Modo de operación
 - Integración de productos hechos por otras compañías, para posterior manufactura.
 - Desarrollo de nuevos y mejores dispositivos por medio del equipo de trabajo intelectual.

- ❖ Estructura de la organización
 - Dos científicos expertos en el desarrollo de dispositivos robóticos, uno ocupando el cargo de gerente.
 - Un equipo de trabajo técnicamente calificado, de aproximadamente cuatro personas, siendo uno de ellos el enlace con la gerencia.

PUNTOS CLAVE PARA EL ÉXITO:

- ❖ El dispositivo (robot para la exploración de tuberías), trabaré según el plan de diseño.
- ❖ Reducir el costo de manufactura desarrollando mejores formas de realizarlo a través de la experiencia y el tiempo.
- ❖ Realizar un rediseño cada seis meses en conjunto con la fuerza intelectual de trabajo para incorporar mejoras al diseño y añadir dispositivos más eficientes.
- ❖ Mejorar y aumentar las ventas mediante un buen plan de mercadeo.

PLAN DE NEGOCIO:

PLAN DE ACCION:

- ❖ Comprobar los resultados de las pruebas de la simulación en un prototipo físico.
- ❖ Realizar el plan de negocio.
- ❖ Realizar un estudio a fondo de mercado.
- ❖ Establecer un equipo de trabajo dedicado a la implementación del sistema de direccionamiento y de visión del robot.
- ❖ Capitalizar el proyecto por medio de apoyos otorgados para profesionistas emprendedores.

ESTADO FINANCIERO:

Venture Valuation Worksheet							
Robot Explorador de Tuberías							
Venture Financial Targets							
Year	0	1	2	3	4	5	
Units	0	10	20	40	90	200	<< Unit Sales Goal
Growth	0		200%	200%	230%	220%	<< Unit Sales Growth Goal
Avarage Selling Price		\$5,000	\$4,600	\$4140	\$3643	\$3133	<< Avarage Selling Price
ASP Delta			-8%	-10%	-12%	-14%	<< Reflects Competitive Conditions
Revenue	\$0	\$45,000	\$67,500	\$155,250	\$310,500	\$574,425	<< Revenue Goal
Growth			150%	130%	100%	85%	<< Revenue Growth Goal
Expenses	\$20,000	\$45,000	\$54,000	\$116,438	\$217,350	\$315,934	
% of Revenue		100%	80%	75%	70%	55%	
Earnings (EBITDA)	-\$20,000	\$0	\$13,500	\$38,812	\$93,150	\$258,491	<< Earnings Goal
% of Revenue		0%	20%	25%	30%	45%	
Cumulative Earnings	-\$20,000	-\$20,000	-\$6,500	\$32,312	\$125,462	\$383,953	
EBITIDA Multiple	5	5	5	5	5	5	<< EBITDA Multiple
Venture Valuation A	-\$100,000	\$0	\$67,500	\$251,438	\$468,788	\$1,000,000	<< VENTURE VALUATION GOAL
Venture Valuation B	\$140,625	\$253,125	\$450,000	\$810,000	\$1,458,000	\$2,624,400	<< Venture Valuation Goal
		80%	80%	80%	80%	80%	
		1.8	3.2	5.9	10.6	19	
Risk	Very High	Very High	High	High	Moderate	Low	Relative Risk

EJEMPLOS DE APLICACIÓN.



Figura 1. Inspección de los sistemas de tuberías de los servicios públicos.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

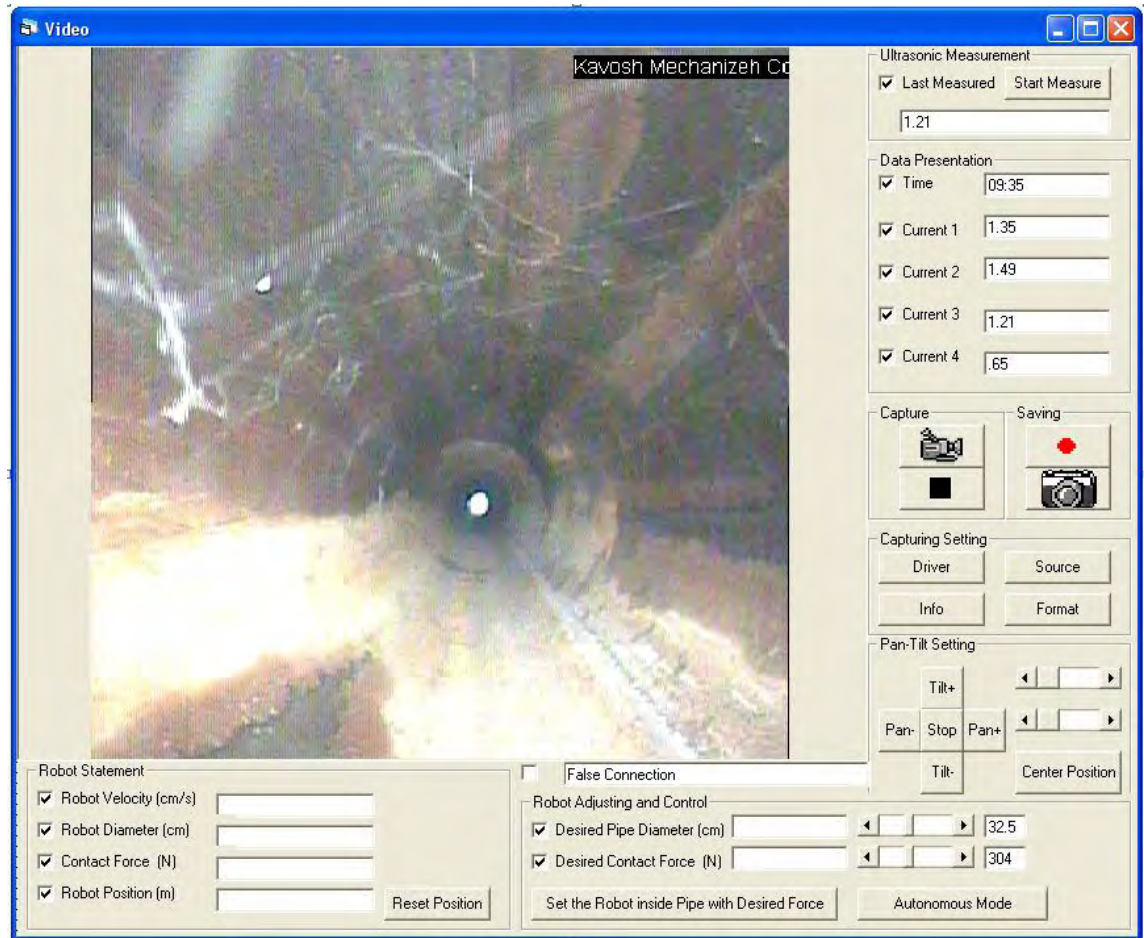


Figura 2. Valorización de las tuberías en tiempo real.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

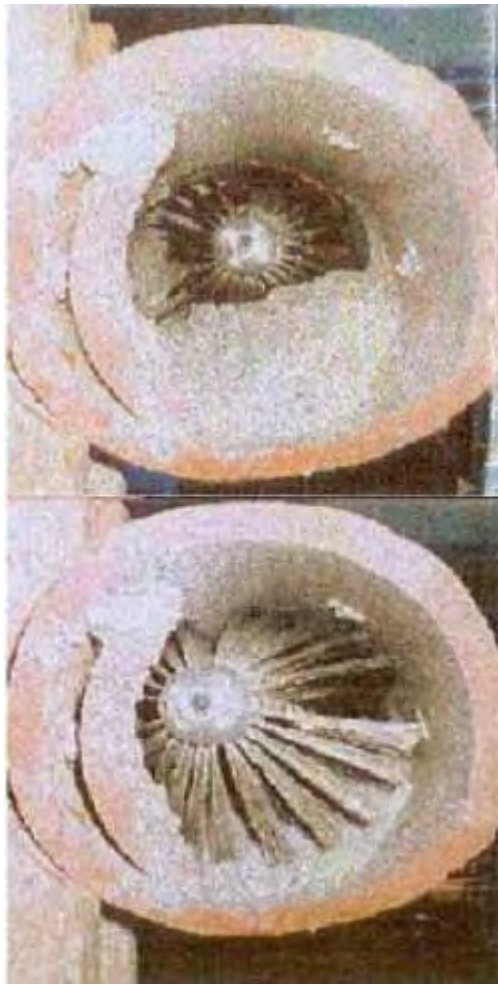


Figura 3. Detección de fallas en las tuberías.

Apéndice B: Costo de producción

En esta sección se presenta una lista de costos para cada uno de los componentes del robot al 20 de noviembre de 2009. Cabe destacar que la cantidad de dispositivos y material es especulativa, ya que nuestro proyecto está en una fase temprana de desarrollo, donde se ha realizado una simulación del sistema, aunque el diseño deberá funcionar como se espera.

Descripción	Proveedor	Precio USD/u	Cantidad
Cilindro de doble efecto presión máx.: 250 psi. Puertos 1/8 npt, montaje universal, flecha giratoria.	Clippard Minimatic	\$40.56 + IVA	1
Válvula 3 vías, 1/8" npt, 40 pcm, solenoide/solenoide	Mindman	\$60.20 + IVA	2
Válvula solenoide 5 vías, 1/8" npt, solenoide/solenoide	Mindman	\$43.89 + IVA	1
Manguera de poliuretano, dureza 85a, presión de trabajo 130 psi a 24°C, rango de temperatura - 40 °C a + 74°F.	FREELIN-WADE	\$0.46 USD +IVA/m	600 m
Conexión rápida "recta" pisco mang. 5/32" a rosca 1/8 npt	PISCO	\$1.20 +IVA	12
Unión "t" de 1/8", para manguera de 1/8" d.i.	Clippard Minimatic	\$1.81 + IVA	2
Sensor de Presión	Honeywell	29.79 + IVA	2
	TOTAL	\$504.87 + IVA	

Los precios de esta lista podrían modificarse ya que los componentes se tendrán que decidir cuáles y qué tipo de sensores y actuadores se utilizaran una vez comenzada la fase de desarrollo del prototipo. Como se indicó anteriormente estos componentes son especulativos.

Al costo total del dispositivo se le agrega un costo razonable de fabricación para que el precio total de cada dispositivo compita con los equipos ya en el mercado.

Se espera que en el transcurso del tiempo se aumente la producción lo que llevaría a una reducción de los precios de las unidades una vez recuperados los recursos invertidos.

Apéndice C: Perspectivas de trabajo a futuro.

En el trabajo de tesis para la obtención del grado de maestro en Optomecatrónica, se seguirá desarrollando, dando seguimiento a los sistemas de direccionamiento del robot y al sistema de visión, así como los sistemas de sensores para detectar fallas dentro de las tuberías.

Una de las limitantes de nuestro trabajo fue la poca experiencia y conocimiento sobre materiales elásticos específicamente elastómeros. Lo que impidió modelar el sistema de sujeción del robot.

Se continuará trabajando en el proyecto realizando estudios de doctorado en colaboración con estudiantes de maestría del CIO y del CULagos de la U. de G para desarrollar los sistemas antes mencionadas del robot. Además de seguir el contacto con el Dr. Víctor Ayala y su empresa lo cuás aportará el conocimiento y experiencia en el desarrollo de robots móviles.

Además se seguirán investigando nuevos diseños de este tipo de robots, y de esta forma obtener un dispositivo capaz de navegar en cualquier configuración.

Apéndice D: Vinculación con la Industria



Salamanca, Gto. a 7 de Diciembre del 2009.

A quien corresponda:

Por medio de la presente se hace constar que el **Ing. Misael Jiménez Gutiérrez**, estudiante de la Maestría en Optomecatrónica del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. ha realizado una estancia profesional en nuestra Empresa. Esta estancia ha durado del 3 de Febrero al 29 de Mayo del 2009 y ha conestado de un total de 400 horas. Las actividades que el Ing. Jiménez Gutiérrez realizó durante este tiempo bajo la dirección del Dr. Víctor Ayala Ramírez, tuvieron como objetivo el desarrollo de la ingeniería de un producto denominado "Robot de Inspección de Tuberías" e incluyeron el desarrollo de la especificación de producto a partir del uso de herramientas de simulación electrónica, hidráulica y computacional. El ingeniero **Misael Jiménez Gutiérrez** ha mostrado un desempeño excelente dentro de sus actividades y esto ha motivado a considerar el "Robot de Inspección de Tuberías" como un prospecto de desarrollo comercial por parte de nuestra empresa en un futuro cercano. Esta intención está condicionada a conseguir los apoyos financieros requeridos para un proyecto de esta magnitud.

A petición del interesado, se expide esta constancia para los fines que considere pertinentes.

Atentamente



Dr. Raúl Enrique Sánchez Yáñez
Gerente General de
VIDDE, S.A. de C.V



Visión, Integración, Desarrollo Dinámico & Educación, S.A. de C.V.
Bld. Vasco de Quiroga # 101 int. 505 Col. Los Gavilanes C.P. 37266
Tel. 01 (477) 211.00.82 y 211.00.83 www.vidde.com.mx León, Gto., Mex.

Bibliografía

- [1] Juan González (2008): *Robótica modular y locomoción: Aplicación a robots ápodos*. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.
- [2] Okamoto, J.; Adamowski, Jr. J. C.; Tsuzuki, M. S. G.; Buiocchi, F. & Camerini, C. S. (1999), “Autonomous system for oil pipelines inspection”, *Mechatronics*, vol. 9, pp. 731– 743.
- [3] Kirchner F, Hertzberg J. “*A Prototype Study of an Autonomous Robot Platform for Sewerage System. Maintenance Autonomous*”, *Robots* 1997; 4(4):319-331.
- [4] Kuntze HB, Haffner H. *Experiences with the development of a robot for smart multisensoric pipe inspection*. Proc. IEEE International Conf. on Robotic and Automation, 1998. p. 1773-8.
- [5] Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. “Robot Explorador de Ductos”. Enero 2009. Disponible en: [http://www.upc.edu.pe/html/0/0/carreras/ing-electronica/proyectos/Robot explorador de ductos.pdf](http://www.upc.edu.pe/html/0/0/carreras/ing-electronica/proyectos/Robot%20explorador%20de%20ductos.pdf) [consulta 19 enero 2009].
- [6] Inuktun Services Limited. Versatrax 300™ VLR. Enero 2009. Disponible en: <http://www.inuktun.com/versatrax300vlr.htm>. [Consulta 30 enero 2009]
- [7] INSPECTOR SYSTEMS Rainer Hitzel GmbH, Johann Friedrich Böttgerstr. Febrero 2009. http://www.inspector-systems.com/video_robots.html. [consulta 15 febrero 2009]
- [8] ACTA PRESS. In-pipe inspection crawler adaptable to the pipe interior diameter. Disponible en: <http://www.actapress.com/review/InitPDF/206/206-3078wqs.pdf>. [consula 10 enero 2009]
- [9] Majid. M. Moghaddam1, and Alireza. “Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC)” . *Hadi2 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005 - September 11-14, 2005, Ferrara (Italy)*.
- [10] Andreas Zagler and Friedrich Pfeiffer. “MORITZ a pipe crawler for tube junctions”. In *IEEE Int. Conf. Rob. Aut.*, pages 2954–2959, Taipei, Taiwan, 2003.
- [11] Zhelong Wang, Hong Gu (2008); “**A Bristle-Based Pipeline Robot for Ill-Constraint Pipes**”, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 13, Issue 3, June, pp: 383–392.

- [12] ENGINEERING COMMUNICATIONS COLLEGE OF ENGINEERING NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. NC State Engineers Design Pipe-Crawling Robot to Save Lives. 22 abril 2009. Disponible en: http://www.engr.ncsu.edu/news/news_articles/pipecrawler.html. [consulta 8 enero 2009]
- [13] WESTINGHOUSE SAVANNAH RIVER COMPANY *Pipe crawler apparatus*. Inventors: Gregory L. Hovis, Scott A. Erickson, Bruce L. Blackmon. U.S. Filed: Jul. 2, 2001. U.S. Patent No. US 6, 427,602 B1.
- [14] UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES. Robot para exploracion de tuberias de diseño compacto, modular, estanco y de seguridad intrínseca. Disponible en: www.secyt.frba.utn.edu.ar/gia/ROB07.pdf. [consulta 9 enero 2009].
- [15] Horodincă M, Dorftel I, Mignon E, Preumont A. (2002): “A simple architecture for in-pipe inspection robots”. *Proc. International Colloquium on Mobile and Autonomous Systems*, pp. 61-4.
- [16] SINTEF. The robot that climbs in the pipe. 23 junio 2008. Disponible en: <http://www.sintef.no/Home/Press-Room/Research-News/The-robot-that-climbs-in-the-pipe/>. [consulta 10 noviembre 2008]
- [17] SINTEF. The Pipe Inspection robot PiKo. 28 mayo 2009. Disponible en: <http://www.sintef.no/Home/Information-and-Communication-Technology-ICT/Applied-Cybernetics/Projects/The-Pipe-Inspection-robot-PiKo/> [consulta 4 febrero 2009]
- [18] A. Brunete, M. Hernando, E. Gambao (2004): “Drive modules for pipe inspection microrobots”, *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics*, pp.925-930.
- [19] Scholl KU, Kepplin V, Berns K, Dillmann R. Controlling a multi-joint robot for autonomous sewer inspection. *Proc. IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, 2000. vol. 2, p. 1701-6.
- [20] Chen, I.-M., Yeo, S. H., Gao, Y., “Locomotive Gait Generation for Inchworm-Like Robots Using Finite State Approach,” *Robotica*, Vol. 19, No.5, pp535-542, 2001.
- [21] G. Poi, C. Scarabeo, B. Allotta, *Traveling Wave Locomotion Hyper-Redundant Mobile Robot*. *Proc. IEEE Robotics Automation*, Leuven, Belgium, 1998.
- [22] S.D. Kelly and R.M. Murray, “Geometric Phases and Robotic Locomotion”, *J. Robotic Systems*, **12**, No. 6, 417–431 (1995).

- [23] R.M. Murray, et al., “Trajectory Generation for Mechanical Systems with Application to Robotic Locomotion”, *Robotics: The Algorithmic Perspective: WAFR 1998* (P. K. Agarwal, et al, edited.) (A. K. Peters Ltd., MA, USA, 1999) pp. 81–90.
- [24] J.E. Hopcroft & J.D. Ullman, *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. (Addison-Wesley, 1979).
- [25] H.S. Cho (2003): *Opto-Mechatronic Systems Handbook—Techniques and Applications*. CRC Press.
- [26] J. Banks, “Introduction to simulation,” in Proc. of the 2000 Winter Simulation Conference, J. Joines, R. Barton, K. Kang, and P. Fishwick, Eds., 2000, pp. 9–16.
- [27] J. S. C. II, “Introduction to modeling and simulation,” in Proc. of the 2004 Winter Simulation Conference, R. Ingalls, M. Rossetti, J. Smith, and B. Peters, Eds., 2004, pp. 9–16.
- [28] Robert H. Bishop, *The Mechatronics Handbook*, CRC Press LLC, 2002, Boca Raton Florida.
- [29] Gao, Y., “*Gait Generation and Planning for Inchworm-like Robot Locomotion*”, Technical Report, School of Mechanical & Production Engineering, Nanyang Technological University, 1998.
- [30] Festo S.A., Manual de Referencia Festo “Automatizar con neumática” (2002).