



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

Trabajo Terminal II

**“DISPOSITIVO MECATRÓNICO MÓVIL
AUTÓNOMO PARA LA EXPLORACIÓN
INTERNA DE TUBERÍAS”**

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presentan:

Jorge Alonso Ramírez Araiza

José Luis Hernández Hernández

Luis Ricardo Orejel Saavedra

Ubaldo Jair Olguin Bautista

Asesores:

Dr. Juan Alejandro Flores Campos

M. en C. David Arturo Gutiérrez Begovich

Dr. Gastón Hugo Salazar Silva



JULIO 2015

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS



Trabajo Terminal II

“DISPOSITIVO MECATRÓNICO MÓVIL AUTÓNOMO PARA LA EXPLORACIÓN INTERNA DE TUBERÍAS”

Que para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presentan:

Jorge Alonso Ramírez Araiza

José Luis Hernández
Hernández

Luis Ricardo Orejel Saavedra

Ubaldo Jair Olguin Bautista

Asesores:

Dr. Juan Alejandro Flores
Campos

M. en C. David Arturo
Gutiérrez Begovich

Dr. Gastón Hugo Salazar

Silva

Profesor titular



Presidente del Jurado

M. en C. Guillermo Puriel Gil

M. en C. Griselda Sánchez
Otero

DEDICATORIAS

Este trabajo es para todas las personas que me apoyaron, guiaron y motivaron para terminar mi carrera: mi familia, amigos, profesores y compañeros, mis más grandes agradecimientos, por su tiempo, esfuerzo y apoyo. En especial para mis padres y mi tía.

Jorge Alonso

Para ellos, quienes se esfuerzan día a día, segundo a segundo, en darme siempre lo mejor, a esos dos extraordinarios seres que jamás han dudado de mí, que nunca han dejado de apoyarme, en cualquier circunstancia. . . a ellos, de sentimientos puros y amor infinito. A ellos especialmente, todos y cada uno de mis logro. . . Mis incondicionales y universales por siempre. . . padres. Irma y Pablo, esto es para ustedes.

José Luis

Para mi Madre...

No puedo compensar todas las palabras que no he dicho, así que te ofrezco mis acciones.

Luis Ricardo

Dedicado a todas las personas que se esforzaron junto conmigo para culminar este trabajo, a mis asesores, a mis profesores, a mis compañeros y en especial a mi familia.

Ubaldo Jair Olguin Bautista

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos por que día a día me regalaban de su apoyo, consejos y atención para seguir mejorando en mi desarrollo profesional y personal.

Jorge Alonso

A mis padres, a mis amigos, a dios y a todo aquel que me ha tendido su mano y ha estado para mí para hacer esto posible.

Jose Luis

Gracias padre, porque tu ausencia me empujo al camino correcto.

Luis Ricardo

A mis padres por nunca dejarme vencer ni dejar de creer en mí. A mi hermano por ser una motivación de superación. A mis amigos por darme la mano cuando los necesité. A Jessica por ser un apoyo incondicional.

Ubaldo Jair Olguin Bautista

Resumen	xv
Objetivos	xvii
Introducción	xix
I Panorama General	1
1. Antecedentes	3
1.1. Robot In-Pipe	4
2. Definición del proyecto	9
2.1. Planteamiento del problema	9
2.2. Propuesta de solución	10
2.2.1. Estructura	11
2.2.2. Módulo de comunicación	13
2.2.3. Movimiento	14
3. Marco teórico	17
3.1. Modelo matemático de un motor de CD con carga	17
3.2. Análisis del modelo del motor CD de imán permanente	19

3.2.1. Parte eléctrica	19
3.2.2. Parte mecánica	21
3.3. Cálculo de los parámetros de un controlador PID	22
3.4. Conversión de un sistema continuo en una forma discreta, aproximación tra- pezoidal	24
3.5. Diseño de resortes	26
3.6. Método de Denavit-Hartenberg	29
3.6.1. Asignación de sistema de referencia	29
3.6.2. Trasformación de coordenadas	32
3.6.3. Matriz del cambio de base	33
3.6.4. Cinemática diferencial.	36
3.7. Protocolo RS-232 de comunicación serial	37
3.8. Odometría	37
II Desarrollo	39
4. Diseño detallado	41
4.1. Estructura	41
4.1.1. Diseño de piezas mecánicas	42
4.1.2. Mecanismos del dispositivo	43
4.1.3. Diseño e implementación del circuito de control del prototipo	47
4.2. Comunicación	51
4.2.1. Cámara IP	51
4.2.2. Driver de video en NI MAX	53
4.2.3. Interfaz de monitoreo	54
4.3. Movimiento	56
4.3.1. Método para la medición del avance lineal del dispositivo	56
4.3.2. Control PID del motor con carga	58
4.3.3. Simulación del control de velocidad	65
4.3.4. Simulación del desplazamiento lineal	72

4.3.5. Diseño del controlador digital y su implementación en un sistema embebido	74
4.3.6. Implementación de la función de transferencia del desplazamiento angular digital	75
4.3.7. Sistema de navegación	77
4.3.8. Simulación del sistema de navegación	79
4.4. Plataforma experimental	80
5. Construcción	83
5.1. Comparación de dimensiones entre el dispositivo y la tubería	83
5.2. Rediseño	87
5.3. Descripción del ensamblaje final	89
5.3.1. Sección 1	89
5.3.2. Sección 2 y su conexión con la sección 1	93
5.3.3. Conexión entre sección 2 y 3	93
6. Aproximación del modelo	97
6.1. Modelado Matemático	97
6.1.1. Validación por software del modelo matemático.	101
III Validación	103
7. Pruebas	105
7.1. Pruebas del mecanismo	105
7.1.1. Movimiento del rotor	105
7.1.2. Movimiento para el direccionamiento	106
7.2. Pruebas electrónicas y de comunicación	107
7.2.1. Prueba de los módulos WIFI	107
7.2.2. Prueba de comunicación dentro de la tubería	108
7.2.3. Prueba de las entradas digitales del circuito	110
7.2.4. Prueba de la entrada analógica del circuito	111
7.2.5. Prueba de las salidas digitales del circuito	112

7.3. Prueba de la ley de control en tiempo discreto	113
8. Resultados	117
8.1. Tubería recta	117
8.2. Conexión Tee	118
8.3. Conexión Codo	119
8.4. Tubería recta de forma autónomo	119
8.5. Prueba en plataforma inclinada	120
Conclusiones	121
IV Apéndices	125
Apendice 1	127
.1. Obtención del modelo cinemático	127
Bibliografía	129

Índice de figuras

1.1. Clasificación de los robots in-pipe. (a) tipo “PIG”, (b) Con llantas, (c) Con orugas, (d) Bajo presión (e) Caminador, (i) De gusano, (g) Tipo tornillo o “Screw”. Fuente: Yunwei Zhang and Guozheng yan, “In-Pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting”, 2007	5
2.1. Áreas funcionales del prototipo a desarrollar.	10
2.2. Divisiones del Robot.	11
2.3. Fuerza de arrastre del robot.	12
2.4. Posicionamiento final de la cámara.	12
2.5. Estructura mecánica del prototipo.	12
2.6. Esquema general de comunicación, a) PC, b) Módulo “WIFI/UART” (servidor), c) Módulo “WIFI/UART” (cliente), d) Modem (Repetidor), e) Camara “IP/WIFI”.	13
2.7. Actuadores del prototipo.	14
3.1. Modelo de un motor de CD con carga.	17
3.2. Diagrama simplificado de la maquina eléctrica (parte eléctrica y mecánica).	19
3.3. Diagrama de la parte eléctrica de la máquina.	20
3.4. Diagrama de la parte mecánica de la máquina eléctrica.	21
3.5. Contantes geométricas de un resorte helicoidal a compresión.	26
3.6. Posiciones y cargas dispuestas en un resorte.	27

3.7. Gráfica de zonas de trabajo de un resorte con relación al pandeo.	29
3.8. Detalle de marcos de referencia para un brazo robotico.	30
3.9. Caso 1 en la metodología para encontrar los parámetros para DH.	31
3.10. Caso 2 en la metodología para encontrar los parámetros para DH.	32
4.1. Dos últimas versiones del diseño tridimensional del dispositivo.	42
4.2. Movimientos de la sección uno.	43
4.3. Motores y engranes de la sección uno.	44
4.4. a) Detalle de cámara, b) Constitución del rotor en la sección 1.	44
4.5. Constitución sección 2.	45
4.6. Movimiento de la sección 2.	45
4.7. Motor y engranes sección 2.	46
4.8. Sección 3 a detalle.	46
4.9. Esquema físico representativo general.	47
4.10. Circuito rectificador mediante opto acopladores.	49
4.11. Pines del módulo Wi-Fi.	49
4.12. Placa real.	50
4.13. Interfaz de comunicación de camara IP.	52
4.14. Video transmitido por la camara IP mostrado en el navegador.	53
4.15. Driver de cámara IP reconocido por NI MAX.	54
4.16. Interfaz de monitoreo.	55
4.17. Hélice dibujada	57
4.18. Diagrama de bloques del sistema de control.	59
4.19. Resultado de caracterización del motor con la tarjeta de adquisición de datos.	62
4.20. Acercamiento a la gráfica obtenida para medición del tiempo de subida.	63
4.21. Diagrama de bloques diseñado.	65
4.22. Configuración del Bloque PID.	67
4.23. Uso de PID tuning tool.	67
4.24. Velocidad angular del motor en rad/seg.	68
4.25. Gráfica de control.	68
4.26. Gráfica de desplazamiento angular.	69

4.27. Diagrama de bloques para simulación con el modelo del motor de Simscape.	70
4.28. Parámetros del motor.	70
4.29. Velocidad angular del motor en rad/seg.	71
4.30. Gráfica de control.	71
4.31. Gráfica de desplazamiento angular.	72
4.32. Diagrama de bloques con cálculo del desplazamiento lineal.	72
4.33. Gráfica de desplazamiento lineal del robot.	73
4.34. Gráfica de desplazamiento del robot después de un tiempo de 1 minuto.	73
4.35. Diagrama de flujo del controlador PID digital.	75
4.36. Diagrama de flujo del controlador PID digital.	76
4.37. Direcciones mostradas en el plano tridimensional.	78
4.38. Trayectoria con magnitudes y direcciones.	80
4.39. Plataforma experimental con una conexión tipo codo.	81
4.40. Plataforma experimental con una conexión tipo Tee.	81
5.1. Conexión real Codo.	84
5.2. Prueba del robot en Codo.	85
5.3. Conexión real Tee.	85
5.4. Acercamiento a la reducción de diámetro.	86
5.5. Cambio de orientación del robot.	87
5.6. Nueva base para las llantas.	88
5.7. Diámetros mínimos del robot.	88
5.8. Prueba del robot después del cambio de bases y llantas.	89
5.9. Ensamblaje de la parte central.	90
5.10. Brazo conectado al rotor.	90
5.11. Pieza tipo tuerca y base para camara y sensor infrarrojo.	91
5.12. Anclaje de motores al eje central	92
5.13. Anclaje de motores al eje central.	92
5.14. Brazos de la seccion 2 anclados a la pieza “C de rotación,”.	93
5.15. Conexión entre la sección 1 y sección 2.	93
5.16. Conexión entre la sección 1 y sección 2.	94

5.17. Base y llantas de la sección 3.	94
5.18. Estructura mecánica final.	95
6.1. Marcos de referencias y parámetros longitudinales para el método Denavit-Harterberg.	98
6.2. Representación esquemática del robot con la ayuda de Robotics de Matlab®.	101
7.1. Movimiento del rotor	106
7.2. Movimiento para direccionar la sección uno	106
7.3. Área de alcance de comunicación.	107
7.4. Espectro total de comunicación.	108
7.5. Módulo WIFI montado en el robot dentro de la tubería.	108
7.6. Conexión inalámbrica entre el módulo Wi-Fi emisor del robot y el receptor.	109
7.7. Recepción de “Hola Mundo” en la PC.	109
7.8. Frecuencia de prueba de entrada.	110
7.9. Recepción de la frecuencia de entrada en la computadora.	110
7.10. Objeto frente al sensor.	111
7.11. Distancia medida por el sensor entregada a la computadora.	111
7.12. Señales al 50 %.	112
7.13. Señales al 25 % dirección izquierda.	113
7.14. Señales al 25 % dirección derecha.	113
7.15. Respuesta del control a varios valores, valor mínimo estable de 0.6 rad/s.	114
7.16. Valor máximo de control: 2.8 rad/s.	115
8.1. Recorrido del prototipo en tubo recto.	118
8.2. Vuelta del prototipo en una conexión tipo Tee.	118
8.3. Recorrido del robot sobre tubo recto inclinado.	120

Índice de tablas

1.1. Comparación de los tipos de Robots	6
4.1. Características de la estructura mecánica	42
4.2. Mediciones para determinar k_b	61
4.3. Mediciones del tiempo de subida	63
4.4. Mediciones para determinar B_m	64
4.5. Cadena de caracteres enviada al robot.	77
4.6. Interpretación de los caracteres recibidos para el sistema de navegación.	77
4.7. Decodificación de carácter y coordenadas para el sistema de navegación	78
4.8. Ejemplo de una cadena de caracteres y su significado codificado para el sistema de navegación.	79
6.1. Parámetros D.H. para cada eslabón.	98
7.1. Parámetros de control	114

“DISPOSITIVO MECATRÓNICO MÓVIL AUTÓNOMO PARA LA EXPLORACIÓN INTERNA DE TUBERÍAS”

KeyWords: In-pipe robot, Inspección visual, Mecanismo, Estación de monitoreo inalámbrica, Tuberías, Exploración, Autonomía, Odometría.

Abstract

The present report describes the design, development and manufacturing of an in-pipe robot prototype that has the purpose to explore into pipes aided by a visual inspection device. The prototype has a navigation system based on path following through odometry to make its goal in an autonomic way and let it move freely inside the pipe. The mechanism design allows the prototype to move and pass through certain kind of connections in the pipe net, such as bend pipes, “Tee” pipes and straight pipes.

The inner exploration of pipes helps to observe the physical state of the inner wall, which, will be implemented by a wireless monitoring station.

Resumen

Palabras Clave: Robot In-pipe, Inspección visual, Mecanismo, Estación de monitoreo inalámbrica, Tuberías, Exploración, Autonomía, Odometría.

El presente trabajo describe el desarrollo para diseñar y construir un prototipo de robot in-pipe para realizar la exploración interna de tuberías apoyada con un instrumento de inspección visual. El prototipo consta de un sistema de navegación basado en el seguimiento de trayectorias mediante odometría para realizar de manera autónoma dicha tarea y permitir su libre movimiento dentro de las tuberías. El diseño del mecanismo permite al prototipo moverse sobre algunos tipos de conexiones que componen una red de tuberías, tales como tipo codo, tipo tee y tubo recto.

La exploración interna de las tuberías ayudará a observar el estado físico de las paredes de las mismas, la cual, se llevará a cabo a través de una estación de monitoreo inalámbrica.

Objetivo general

Diseñar y construir un dispositivo mecatrónico móvil tipo “in-pipe”, para auxiliar la exploración visual en el interior de tuberías de manera inalámbrica y autónoma.

Objetivos Particulares

1. Diseñar la estructura mecánica del prototipo.
2. Diseñar un sistema electro-mecánico para el movimiento del prototipo dentro de una red de tubería.
3. Diseñar un sistema de suspensión ajustable para la estabilidad del prototipo durante su movimiento.
4. Obtener y validar el modelo cinemático del prototipo con el uso de software especializado.
5. Diseñar un controlador implementado en un sistema embebido.
6. Diseñar un sistema para la navegación autónoma del prototipo basado en la odometría.
7. Manufacturar la estructura mecánica del dispositivo.
8. Implementar el sistema de control del dispositivo mediante un sistema embebido.

9. Implementar el sistema de navegación autónoma del dispositivo.
10. Implementar una estación inalámbrica de monitoreo.
11. Diseñar una plataforma experimental para validar el desempeño de la tarea del dispositivo.

Introducción

Las tuberías son la principal herramienta para transportar gases, líquidos o sólidos y se utilizan en la mayoría de las industrias del mundo para construir una red o un sistema de transporte.

Con el tiempo, las tuberías se desgastan y pueden ocasionar problemas ambientales e industriales debido a la corrosión, fallas y daños mecánicos en las tuberías. Son ocasionados debido a derrames o fugas de los fluidos que se encuentran dentro de ellas. Actualmente se utilizan y diseñan robots como herramientas capaces de inspeccionar y dar mantenimiento a las tuberías, limpiarlas, pintarlas, protegerlas con material anticorrosivo, etc.

Dichos robots son considerados como una de las soluciones más atractivas disponibles en el mercado y en el campo de desarrollo científico. Reciben el nombre de robots “in-pipe”; porque realizan la tarea para la que están programados en el interior de las tuberías.

Debido a que existe un amplio campo de aplicación para los robots “in-pipe”, a lo largo del presente trabajo, se detallarán aspectos importantes de la construcción de un robot para la exploración interna de tuberías. En la primera parte se abordan conceptos generales y consideraciones para el prototipo. En la segunda parte se detalla el diseño y construcción del prototipo y en la parte tres se muestran las pruebas para cada área funcional que integra al prototipo y la validación su desempeño en una plataforma experimental.

Parte I

Panorama General

CAPÍTULO 1

Antecedentes

En los últimos años, se han utilizado diferentes estrategias para diseñar dispositivos que auxilien la exploración de tuberías. Cada una aporta ideas diferentes y suficientes para realizar dicha tarea, sin embargo, varían en los aspectos de diseño, en las técnicas de control utilizadas y en los aspectos matemáticos que describen el modelado de los trabajos presentados. Los trabajos publicados describen las especificaciones, alcances, limitaciones y la metodología utilizada para obtener resultados de manera experimental o por medio de simulación. A continuación, se revisan brevemente, la literatura existente que se utiliza como referencia con base en sus características más representativas para desarrollar el prototipo de robot “in-pipe” descrito en este trabajo, así como los dispositivos comerciales que cumplen con el objetivo general mencionado anteriormente.

El primer dispositivo revisado, es el robot Versatrax 150 (TM) de la empresa INUKTUM [8], diseñado en 2013, el cual enfoca su diseño para la inspección de tuberías hidroeléctricas. El dispositivo es capaz de sumergirse hasta 30 metros dentro del agua y se apoya de una cámara de 360 grados de visión. Es un sistema tele-operado, no autónomo y comercial. En México, las industrias hidráulicas han comenzado a emplear este dispositivo para inspeccionar redes de tuberías de agua potable [19].

El trabajo en [17] es un robot tipo “screw”, que es utilizado en la industria para la revisión de tuberías de gas, implementa un diseño con múltiples articulaciones además de un sistema de graficación 3D para la trayectoria recorrida dentro de las tuberías .

La relevancia de este prototipo se debe al sistema de rotación y traslación que el robot implementa para su movimiento en posición vertical y horizontal, enfatizando la ventaja de realizar un robot con dichas características respecto a otros modelos. En [1] se presenta el modelo y análisis dinámico de un robot que se propone como herramienta para la inspección de tuberías. Los autores detallan el mecanismo diseñado para que el dispositivo se ajuste a diámetros diferentes, se hace referencia a este trabajo, debido al número de grados de libertad empleados para llevar a cabo la tarea.

Un trabajo publicado en 2003 [9], se presenta un diseño simple para lograr la tracción del dispositivo, que cumple de manera eficaz la inspección visual de tuberías empleando dispositivos de bajo costo. Sin embargo el dispositivo solo puede realizar la exploración de tuberías con un diámetro fijo y de geometría recta, limitando su movilidad multidireccional. Por otro lado [3], se presenta el diseño de un nuevo mecanismo para el movimiento libre de un robot “in-pipe” dentro de un sistema de tuberías, el cual puede tener conexiones tipo codo y tipo tee únicamente. Puntualiza la importancia del diseño del modelo para realizar la tarea bajo cualquier condición geométrica. Se hace mención sobre la importancia de los factores externos que pueden afectar el movimiento del prototipo y se establece un análisis para contrarrestar el efecto que pudieran presentar sobre él. También se describe el análisis dinámico del dispositivo y la síntesis del mecanismo diseñado para realizar la tarea. El análisis y diseño, se utilizan como base para desarrollar el prototipo descrito en este trabajo.

1.1. Robot In-Pipe

Los robots “in-pipe” se han desarrollado de tal forma que se han clasificado dependiendo su geometría y la forma en que se deslizan en el interior de las tuberías (Figura 1.1). La mayoría se diseña con base en condiciones específicas de entorno y geometría donde deben realizar dicha tarea.

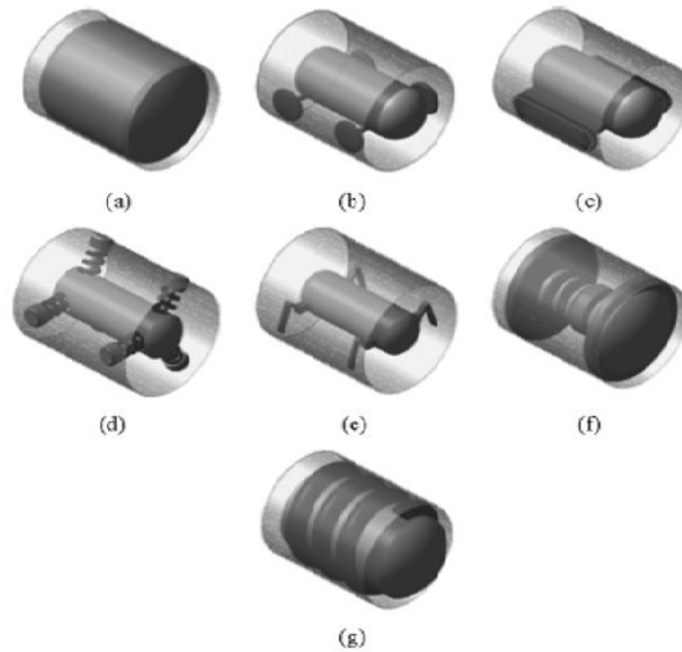


Figura 1.1: Clasificación de los robots in-pipe. (a) tipo “PIG”, (b) Con llantas, (c) Con orugas, (d) Bajo presión (e) Caminador, (i) De gusano, (g) Tipo tornillo o “Screw”. Fuente: Yunwei Zhang and Guozheng yan, “In-Pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting”, 2007

Cada una de estas clasificaciones, tienen ventajas y desventajas. A continuación se presenta una tabla comparativa entre las distintas configuraciones (Tabla 1.1). Esta tabla muestra características como:

1. Facilidad de su construcción.
2. Estimación del número de actuadores que requieren.
3. Movilidad que permite dentro de la tubería (únicamente de manera lineal hacia el frente).
4. Facilidad de estimación de su posición.

Tabla 1.1: Comparación de los tipos de Robots

Tipo de Robot	Construcción	Número de Actuadores	Movilidad	Información de Posición
Con Llantas	Sencilla	4	Rápida	Media
Con Orugas	Sencilla	2	Rápida	Media
Caminador	Intermedia	8	Lenta	Difícil
De Gusano	Muy Complicada	Indefinido	Lenta	Muy Difícil
Tipo Screw	Complicada	1	Media	Media

Robot con llantas.

1. Ventajas. Este robot tiene un actuador por llanta, obtener el modelo cinemático es menos complejo que en las otras configuraciones.
2. Desventajas. Para el avance en dirección vertical, se necesitan actuadores que suministren mayor par, lo que se traduce en componentes grandes y un elevado consumo de corriente, así como una fuente de alimentación robusta que suministre la corriente necesaria a los motores. Debido al espacio limitado dentro de la tubería se complica el diseño de la estructura del robot.

Robot con orugas.

1. Ventajas. En comparación con el motor de llantas, el par necesario para su avance es menor.
2. Desventajas. Las orugas complican el movimiento en codos y tees, y es necesario un mecanismo extra para navegación a través de estas conexiones.

Robot caminador

1. Ventajas. Sus articulaciones permiten la adaptación en conexiones codo o tee y su navegación es más sencilla que en los demás casos.
2. Desventajas. Sus articulaciones necesitan un alto número actuadores, por lo que el control del movimiento del robot y el diseño de la estructura es complejo debido al espacio limitado.

Robot tipo gusano.

1. Ventajas. La estabilidad del robot es alta.
2. Desventajas. La misma forma del robot complica todos sus movimientos, tanto lineales como en conexiones de tubería.

Robot tipo "screw".

1. Ventajas. El consumo de corriente es reducido en comparación con los demás tipos de robot. La inercia del movimiento del robot en avance helicoidal ayuda al ascenso vertical.
2. Desventajas. Para dar vueltas en conexiones es necesario la adaptación de un mecanismo especializado. Seleccionar la ubicación de un elemento de visión se complica debido a que el robot se encuentra en movimiento rotacional para avanzar.

Dentro de la Tabla 1.1 no se contemplan el robot tipo PIG y el robot bajo presión. El robot tipo PIG necesita que dentro de la tubería exista un fluido a presión que empuje el robot, esto dificulta la inspección del estado de la tubería. En la figura 2 el robot bajo presión solo indica la forma en la que se apoya sobre la tubería pero no especifica el tipo de movimiento que realiza para su avance.

2.1. Planteamiento del problema

Las industrias petroleras, gaseras e hidráulicas, utilizan tuberías para el transporte y la distribución de fluidos para su procesamiento y posterior abastecimiento a zonas poblacionales donde su uso es indispensable. A través del tiempo, las propiedades físicas y químicas del fluido que se transporta dentro de las tuberías, así como las condiciones geográficas que las rodean, ocasionan fallas y agrietamiento en su interior debido a la corrosión y la oxidación. Dichas afectaciones, representan una elevada cantidad de pérdidas económicas para las industrias, pues para aislar o corregir estas fallas, se deben inspeccionar largos tramos de la tubería donde se debe detener el paso del fluido, afectando su producción.

Para inspeccionar tuberías se han diseñado y comercializado una gran variedad de robots “in-pipe”, los cuales implementan sensores, cámaras y una estructura que le permite adaptabilidad y multifuncionalidad eficaz para realizar esta tarea. Sin embargo, no todos los prototipos auxilian en la inspección interna de tuberías, debido a que su diseño está orientado a cumplir otras tareas en específico. Esto da paso a desarrollar múltiples dispositivos en ese campo de aplicación para ayudar a resolver esta problemática.

Es por eso que el presente trabajo propone el diseño y construcción de un prototipo de robot tipo “in-pipe” mediante el uso de dispositivos electrónicos de fácil interconexión, auxiliado de un sistema autónomo de navegación basado en la odometría y con la asignación previa de la trayectoria que el prototipo debe seguir, así como el uso de una cámara para la inspección visual, con el fin de reducir significativamente el contacto directo entre los operadores de mantenimiento en el sistema de tuberías.

2.2. Propuesta de solución

Con base en el objetivo general enunciado anteriormente, se pueden clasificar y describir los módulos que constituyen el prototipo a desarrollar mediante la identificación de las áreas funcionales que lo integran (Figura 2.1).

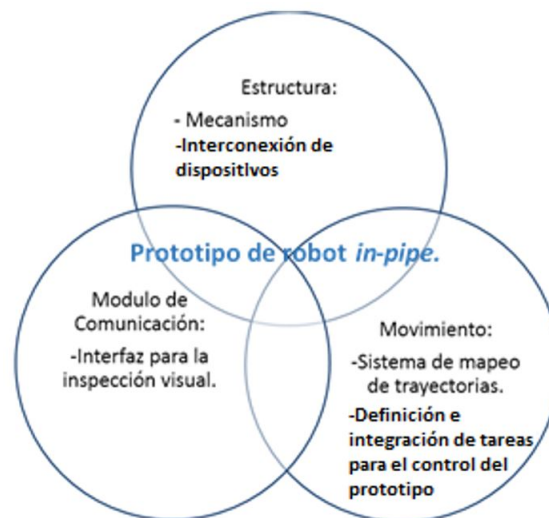


Figura 2.1: Áreas funcionales del prototipo a desarrollar.

En esta sección se describe la propuesta de solución para el prototipo dividido en cada una de sus áreas funcionales. Se muestra el diseño conceptual obtenido para cada una de ellas.

2.2.1. Estructura

Se refiere a la composición física del prototipo, así como la descripción de cada uno de los elementos que lo componen y su interconexión. Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para la estructura se mencionan a continuación.

La configuración “screw” de un robot “in-pipe” necesita de un mecanismo independiente que auxilie a la navegación a través de una tubería. Para esto, se propone dividir la estructura del prototipo en dos secciones independientes, unidas por una articulación (Figura 2.2).



Figura 2.2: Divisiones del Robot.

Debido a que el prototipo posee un elemento para la visualización del interior de la tubería, la estructura debe contar con una sección que no se encuentre en rotación, con el objetivo de que la imagen sea completamente perceptible, y el observador no tenga conflictos al visualizarla.

Para determinar el orden de las secciones, se analiza el comportamiento del robot en una conexión “Tee”. Si se coloca la sección fija atrás (Figura 2.3b), la fuerza de empuje generada por la sección con rotación, puede ocasionar que el robot se atore. Si se coloca la sección fija adelante (Figura 2.3a), la sección con rotación genera una fuerza de arrastre en la dirección deseada. Debido a esto se coloca la sección con rotación, en lo sucesivo llamada sección 1, en la parte delantera.

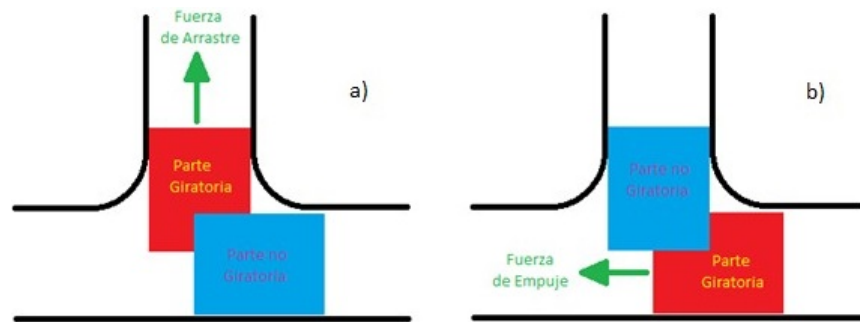


Figura 2.3: Fuerza de arrastre del robot.

Para posicionar el elemento de visualización en la estructura, se propone una configuración distinta, esta es que la sección 3 se extienda hasta el frente del robot por el centro (la Figura 2.4), sirviendo al mismo tiempo de eje para la sección con rotación y de base para la cámara.

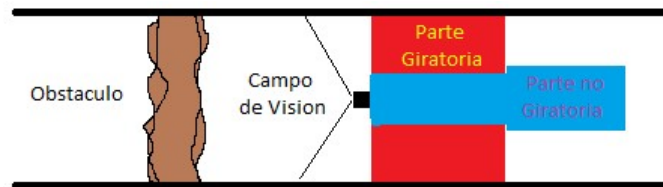


Figura 2.4: Posicionamiento final de la cámara.

A continuación se muestra la estructura mecánica del prototipo (Figura 2.6) basada en el concepto de solución descrito anteriormente. La estructura está compuesta por un mecanismo, partes móviles, circuitos electrónicos y fuentes de alimentación para su construcción.

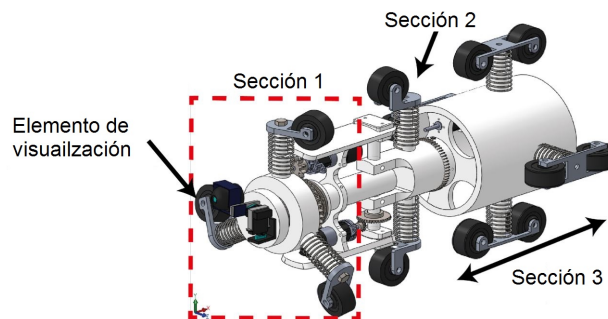


Figura 2.5: Estructura mecánica del prototipo.

2.2.2. Módulo de comunicación

Se refiere al sistema empleado para la comunicación inalámbrica entre el prototipo y el usuario para su operación. El diagrama general de comunicación se lleva a cabo mediante señales “WIFI” tal como se muestra en la Figura 2.14.



Figura 2.6: Esquema general de comunicación, a) PC, b) Módulo “WIFI/UART” (servidor), c) Módulo “WIFI/UART” (cliente), d) Modem (Repetidor), e) Camara “IP/WIFI”.

a) PC: La computadora visto como un módulo tendrá la capacidad de conectarse con dos dispositivos de comunicación.

b) Módulo “WIFI/UART” (servidor): Mediante el protocolo de comunicación serial UART (RS232) se enviarán y recibirán datos entre este módulo y la computadora.

c) Módulo “WIFI/UART” (cliente): Este dispositivo se encontrará dentro del robot como principal medio de envío y recepción de datos entre la PC y el robot. El procesador central del robot se comunicará con este módulo mediante el protocolo de comunicación serial.

d) Modem (repetidor): En una red conformada por la PC, la cámara y este módulo, se obtendrá el video de la cámara. La demanda de ancho de banda de la cámara necesita utilizar un repetidor de señales WIFI para no obstruir el esquema general de comunicación inalámbrica.

e) Cámara “IP/WIFI”: Esta cámara estará enlazada al modem repetidor para transmitir el video hacia la computadora en la interfaz de monitoreo con el objetivo de visualizar el interior de la tubería.

2.2.3. Movimiento

Esta sección describe los actuadores para generar los movimientos que se deben realizar en cada una de las secciones del prototipo para su navegación.(Figura 2.15).

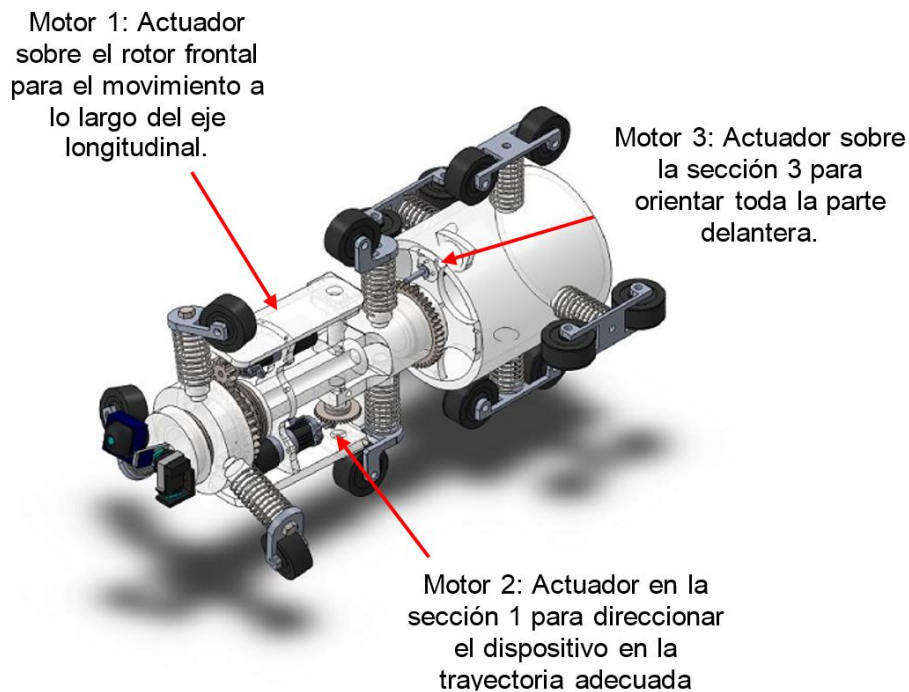


Figura 2.7: Actuadores del prototipo.

Cada actuador localizado en el prototipo genera un movimiento diferente sobre la estructura. Estos actuadores se describen a continuación:

Motor 1

Es el actuador encargado del avance lineal del dispositivo a lo largo del eje longitudinal, ya que la inclinación de las llantas colocadas en el rotor. Produce un movimiento helicoidal del mismo, provocando el avance de la sección no giratoria del dispositivo.

Motor 2

Es el actuador que está dedicado a direccionar la sección 1, lo cual permite la navegación a través de las conexiones en la tubería.

Motor 3

Este actuador orienta la sección 2 y la sección 1 alrededor del eje longitudinal. El objetivo de dicho movimiento es permitir el cambio de dirección en la tubería.

Sistema de navegación

Se diseña un sistema de navegación para el robot que permita el desplazamiento dentro de la tubería de manera autónoma en una trayectoria específica. Este sistema está basado en odometría.

La idea general de este sistema se basa en la comparación del valor de distancia predeterminado. El cálculo de la posición actual por medio de odometría es el valor de entrada que necesita este sistema para realizar la navegación dentro de la tubería.

El presente proyecto contará con una interfaz remota en donde se construirá la trayectoria deseada que se debe seguir. Esta interfaz debe enviar la información de la trayectoria hacia el robot por medio de comunicación inalámbrica. Una vez recibidos los datos en el sistema embebido, estos serán decodificados para ser interpretados por el robot e iniciar la navegación.

Los datos que deben ser enviados hacia el robot son la magnitud en metros de cada segmento lineal de trayectoria y su dirección.

Una vez que el robot decodifica la información, éste conoce la trayectoria que debe recorrer en el plano tridimensional absoluto. Las tareas de recorrido se centran en la comparación de la magnitud de cada segmento lineal de la trayectoria con el valor de posición obtenido por medio de odometría.

En este capítulo se introducirá los conceptos teóricos para el desarrollo del prototipo en sus diferentes áreas funcionales.

3.1. Modelo matemático de un motor de CD con carga

En la Figura 3.1 se observa el circuito básico de un motor de C.D. tipo serie con campo de imán permanente.

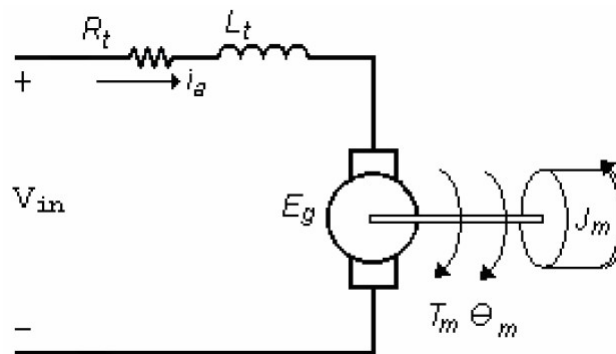


Figura 3.1: Modelo de un motor de CD con carga.

El modelado matemático resultante del análisis de la parte eléctrica y mecánica de este sistema, dicho modelo corresponde a un sistema controlable representado en variables de estado [16]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} \\ \frac{d\theta_m(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_t}{L_t} & -\frac{k_b}{L_t} & 0 \\ \frac{k_i}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} e_g(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_L(t) \quad (3.1)$$

Donde:

1. i_a = Corriente de armadura.
2. ω_m = Velocidad angular del motor.
3. θ_m = Desplazamiento angular del motor.
4. e_g = Voltaje suministrado al motor.
5. R_t = Resistencia de armadura.
6. L_t = Inductancia de armadura.
7. J_m = Inercia del motor.
8. B_m = Coeficiente de fricción viscosa.
9. k_b, k_i = Constante de fuerza contraelectromotriz.
10. T_L = Carga del motor.

El sistema puede ser visto y utilizado como un sistema de dos entradas y dos salidas:

Entrada 1	Voltaje del motor
Entrada 2	Carga en el motor
Salida 1	Velocidad angular del motor
Salida 2	Desplazamiento angular

Las funciones de transferencia del modelo obtenidas de la matriz de estado están definidas por:

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{k_i}{J_m L_t s^2 + (J_m R_t + B_m L_t)s + B_m R_t + k_b k_i} \quad (3.2)$$

$$\frac{\omega(s)}{T_l(s)} = -\frac{R_t + L_t s}{J_m L_t s^2 + (J_m R_t + B_m L_t)s + B_m R_t + k_b k_i} \quad (3.3)$$

$$\frac{\theta(s)}{V_{in}(s)} = \frac{k_i}{J_m L_t s^3 + (J_m R_t + B_m L_t)s^2 + (B_m R_t + k_b k_i)s} \quad (3.4)$$

$$\frac{\theta(s)}{T_l(s)} = -\frac{R_t + L_t s}{J_m L_t s^3 + (J_m R_t + B_m L_t)s^2 + (B_m R_t + k_b k_i)s} \quad (3.5)$$

3.2. Análisis del modelo del motor CD de imán permanente

Para obtener el modelo de un motor de corriente-directa de imán permanente es necesario dividir el sistema en sus partes que lo componen y desarrollando fórmulas matemáticas que describan el comportamiento de su parte mecánica y eléctrica, como se observa en la Figura 3.2.

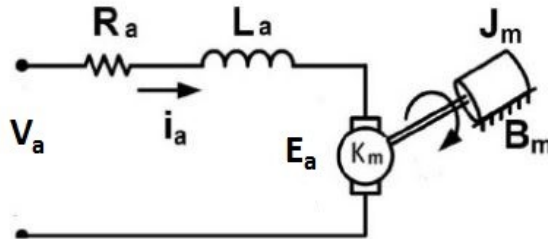


Figura 3.2: Diagrama simplificado de la maquina eléctrica (parte eléctrica y mecánica).

3.2.1. Parte eléctrica

La parte eléctrica del sistema consiste en un circuito de una malla, la cual está compuesta por el voltaje de entrada V_a , la resistencia interna del motor R_t , la inductancia del embobinado L_t y una fuente de corriente contra-electromotriz E_a que se genera en la armadura del motor como se muestra en la Figura 3.3.

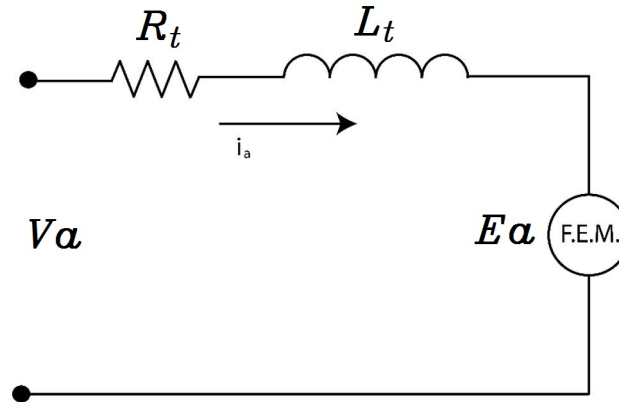


Figura 3.3: Diagrama de la parte eléctrica de la máquina.

Y al resolver la ecuación de la malla por L.K.V. queda de la siguiente manera:

$$-V_a + R_t I_a + V_{L_a} + E_a = 0 \quad (3.6)$$

Después se considera que el voltaje en la bobina y la fuerza contra electromotriz se pueden representar de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$V_{L_a} = L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (3.7)$$

$$E_a = k_B \omega \quad (3.8)$$

Donde k_B representa la constante de velocidad correspondiente del motor, y ω la velocidad angular de salida del eje del mismo.

Para obtener la primera ecuación que describe el comportamiento de la máquina se sustituyen los valores V_{L_a} y E_a de las ecuaciones 3.7 y 3.8, y se despeja de la ecuación 3.6 a $\frac{dI_a}{dt}$ para llegar a la ecuación 3.9:

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{V_a}{L_t} - \frac{R_t}{L_t} I_t - \frac{k_B}{L_a} \omega \quad (3.9)$$

3.2.2. Parte mecánica

Para esta parte se describirá el movimiento de la flecha, las fuerzas y reacciones que interactúan con su movimiento, es así que utilizando la ecuación dinámica de un cuerpo en rotación y tomando en cuenta una inercia constante y una fricción viscosa presente se llega a la siguiente formula.

$$\tau_m = J_m \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3.10)$$

Donde J_m es la inercia rotacional del eje conectado al motor, τ_m es el par del motor, y B es el coeficiente de fricción viscosa del eje. Una representación de la parte mecánica de la máquina se puede observar en la Figura 3.4.

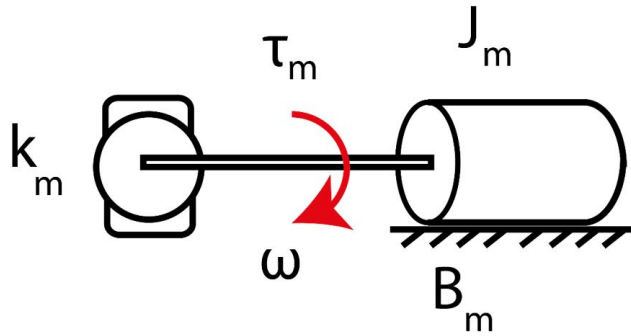


Figura 3.4: Diagrama de la parte mecánica de la máquina eléctrica.

Existe otra ecuación que relaciona el par con la corriente en la parte eléctrica y esta es:

$$\tau_m = k_i I_t \quad (3.11)$$

Utilizando esta ecuación para sustituir τ_m en la ecuación anterior y despejando $\frac{d\omega}{dt}$ se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_i}{J_m} I_t - \frac{B}{J_m} \omega \quad (3.12)$$

La representación en variables de estado en forma matricial para el sistema que modela el motor queda de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_t \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_t}{L_t} & \frac{-k_B}{L_a} \\ \frac{k_i}{J_m} & \frac{-B}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_t \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_t} \\ 0 \end{bmatrix} V_a \quad (3.13)$$

De esta manera el sistema puede ser aproximado de manera matemática y después se le pueden aplicar leyes de control con la intensidad de control alguno de las variables de estado del sistema.

3.3. Cálculo de los parámetros de un controlador PID

Existe una relación matemática entre un sistema con control PID y la ecuación característica de un sistema de segundo orden, ayuda a calcular los parámetros del controlador debido a que el sistema con control PID imita el comportamiento transitorio de un sistema de segundo orden representado por dicha ecuación. Un sistema con control PID en lazo cerrado tiene como función de transferencia la siguiente ecuación:

$$T_c(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{PID(s)T(s)}{1 + (PID(s)T(s))} \quad (3.14)$$

donde la ecuación del controlador PID está definida como:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \quad (3.15)$$

y la función de transferencia está definida como:

$$T(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^{n-1}}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^{m-1}} \quad (3.16)$$

por lo que la función de un sistema con control PID está definida por:

$$T_c(s) = \frac{(K_p s + K_i + K_d s^2)(b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^{n-1})}{(s)(a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^{m-1}) + (K_p s + K_i + K_d s^2)(b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^{n-1})} \quad (3.17)$$

La función de transferencia del sistema con control PID es de al menos orden 2, por lo que resulta relevante la comparación con la ecuación característica de segundo orden dada por [4], [14]:

$$T_2(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.18)$$

donde:

1. ω_n : Representa la frecuencia natural del sistema.
2. ξ : Representa el factor de amortiguamiento.

Dichos valores son calculados con base en los parámetros deseados de la respuesta transitoria del sistema al escalón unitario, tales como el tiempo de establecimiento (t_s) y el máximo sobre impulso (M_p), definidos como [8], [9]:

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (3.19)$$

$$M_p = e^{\frac{-\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.20)$$

Ambas funciones de transferencia deben tener el mismo orden para que los coeficientes de los polos de cada una de ellas sean igualados y se obtengan los parámetros del controlador PID (k_p, k_i y k_d). Si el sistema con control PID es de orden mayor a 2, la ecuación característica de segundo orden debe ser elevada al orden del sistema, para ello, se adicionan polos, $(s + \phi_n)^{-1}$, a la ecuación característica, los cuales deben estar alejados de los polos dominantes del sistema al menos 5 veces la parte real de uno de los polos dominantes [10], [11]. Por tanto la ecuación característica de segundo orden adicionando polos se define como:

$$T_2'(s) = \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \right) \left(\frac{1}{s + \phi_n} \right)^n \quad (3.21)$$

donde:

$$n = \text{Orden del sistema con control PID} - 2$$

3.4. Conversión de un sistema continuo en una forma discreta, aproximación trapezoidal

Existen diferentes métodos para la discretización de sistemas continuos [13] [2] [10], sin embargo, el método de la aproximación trapezoidal o transformación bilineal de Tustin [13], [5] se define como:

$$H_d(z) = H_a|_{s=\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)} = H_a\left(\frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right)\right) \quad (3.22)$$

donde T es el periodo de muestreo. La expresión general del controlador PID está dada por

$$PID(s) = \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \quad (3.23)$$

Y la función discreta del controlador PID con el uso de la transformada Z es

$$PID(z) = K_p + K_i \left(\frac{T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} \right) + \frac{K_d}{T}(1-z^{-1}) \quad (3.24)$$

Mediante la reordenación de términos, se tiene que

$$PID(z) = \frac{(2TK_p + K_i T^2 + 2K_d) + (K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d)z^{-1} + 2K_d z^{-2}}{2T(1-z^{-1})} \quad (3.25)$$

o bien

$$PID(z) = \frac{K_1 + K_2 z^{-1} + K_3 z^{-2}}{(1-z^{-1})} = \frac{u(z)}{e(z)} \quad (3.26)$$

donde

$$k_1 = \frac{2TK_p + K_i T^2 + 2K_d}{2T} \quad (3.27)$$

$$k_2 = \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{2T} \quad (3.28)$$

$$k_3 = \frac{2K_d}{2T} \quad (3.29)$$

Aplicando la transformada inversa z , se puede obtener el controlador PID discreto como ecuación en diferencias dado como:

$$u(n) = u(n - 1) + k_1e(n) + k_2e(n - 1) + k_3e(n - 2) \quad (3.30)$$

Donde:

1. $u(n)$: Es la salida del sistema.
2. $u(n - 1)$: Es la salida anterior.
3. $e(n)$: Es la entrada del sistema.
4. $e(n - 1)$: Es la entrada anterior.

En general, una función de transferencia continua está definida como:

$$T(s) = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ns^{n-1}}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ms^{m-1}} = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (3.31)$$

Al aplicar la transformada bilineal el sistema discretizado, se define como:

$$T(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{n-1}}{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_ms^{m-1}} \quad (3.32)$$

Para representar dicha ecuación como ecuación de diferencias se utiliza la transformada z inversa:

$$b(n) = \frac{1}{a_0} \sum_{i=0}^m b_i a(n - i) - \frac{1}{a_0} \sum_{i=1}^n a_i b(n - i) \quad (3.33)$$

Donde:

1. $b(n)$: Es la salida del sistema.
2. $b(n - i)$: Es la salida anterior.
3. $a(n)$: Es la entrada del sistema.
4. $a(n - i)$: Es la entrada anterior.

3.5. Diseño de resortes

Para el diseño de resortes se utiliza la metodología para selección de resortes helicoidales en compresión [12]. Las constantes de diseño físico del resorte son el diámetro medio, exterior, interior y el diámetro del alambre Figura 3.5.

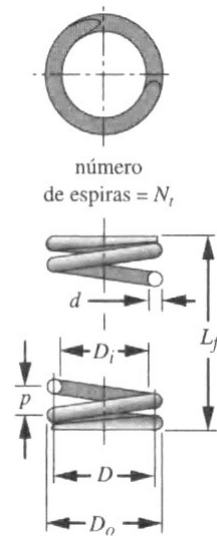


Figura 3.5: Constantes geométricas de un resorte helicoidal a compresión.

Las relaciones correspondientes son:

$$D_i = D - d \quad (3.34)$$

$$D_o = D + d \quad (3.35)$$

$$p = \frac{L_f}{N_a} \quad (3.36)$$

donde N_a es el número de espiras activas del resorte, este valor es igual a N_t cuando el resorte es de extremos simples, $N_t - 1$ cuando es de extremos simples rectificadas y $N_t - 2$ cuando es de extremos cuadrados rectificadas. Otras constantes correspondientes a la longitud son: la longitud libre, longitud ensamblada o de instalación, longitud mínima de trabajo y altura de cierre, estas se observan en la Figura 3.6.

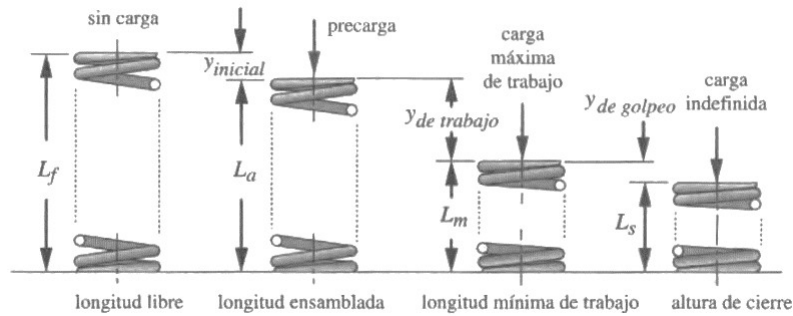


Figura 3.6: Posiciones y cargas dispuestas en un resorte.

Las relaciones entre estas variables son:

$$L_f = L_s + y_{golpe} + y_{trabajo} + y_{inicial} \quad (3.37)$$

donde:

$$L_s = dN_t \quad (3.38)$$

$$y_{inicial} = \frac{F_{precarga}}{k} \quad (3.39)$$

Generalmente $y_{trabajo}$ es uno de los requerimientos de diseño y la variable y_{golpe} se presenta para poder dar holgura en situaciones máximas, en muchos casos se propone como 15% de la distancia de trabajo. El primer paso para el diseño del resorte es establecer uno de los diámetros, si es que se necesita cumplir con relaciones geométricas. Después se propone el índice del resorte, variable que relaciona el diámetro medio de la hélice y el diámetro de alambre de la siguiente manera:

$$C = \frac{D}{d} \quad (3.40)$$

Esta relación junto con las ecuaciones (3.34) y (3.35) definirán geoméricamente el resorte. Con estos datos se puede probar el diseño al cortante, para esto se obtiene este esfuerzo con la siguiente ecuación:

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (3.41)$$

Donde F es la fuerza máxima de trabajo y K_s es el factor de cortante directo que es igual a:

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{C} \quad (3.42)$$

Se determina la resistencia máxima a la tensión de este material para alambre:

$$S_{ys} = 0.6Ad^b \quad (3.43)$$

Las constantes A , b y d son valores tabulados que varían a partir del material del resorte [6].

Para comprobar se debe encontrar el factor de seguridad que sea mayor a 1.

$$N_s = \frac{S_{ys}}{\tau} \quad (3.44)$$

Se procede a obtener la constante k del resorte, esta tiene que ver con la fuerza necesaria y la distancia de trabajo, de la siguiente manera:

$$k = \frac{\Delta F}{y_{trabajo}} \quad (3.45)$$

Se utilizan las siguientes ecuaciones para encontrar N_a :

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} \quad (3.46)$$

$$N_a = \frac{d^4 G}{8D^3 k} \quad (3.47)$$

Dependiendo del tipo de resorte y con el número de espiras activas se obtiene el número de espiras totales y posteriormente la altura de cierre. A partir de aquí, se establece completamente la geometría del resorte. Se obtiene la fuerza a la altura de cierre y se comprueba al cortante. Para terminar se prueba al pandeo con las siguientes relaciones:

$$\frac{L_f}{D} \quad (3.48)$$

$$\frac{y_{max}}{L_f} \quad (3.49)$$

Estos datos deben aparecer en la parte inferior izquierda de las curvas de la gráfica en la Figura 3.7. 3.5 .

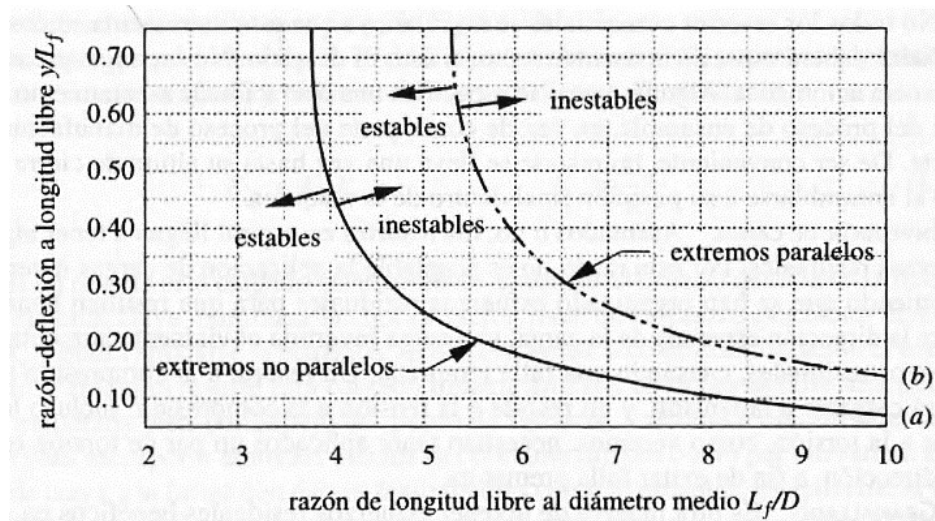


Figura 3.7: Gráfica de zonas de trabajo de un resorte con relación al pandeo.

3.6. Método de Denavit-Hartenberg

El método de Denavit-Hartenberg es un procedimiento sistemático para describir la estructura de una cadena cinemática abierta constituida por articulaciones con un solo grado de libertad. Para ello, a cada articulación se le asigna un sistema de referencia local con origen en un punto Q_i y ejes ortonormales $\{X_i, Y_i, Z_i\}$, comenzando con un primer sistema de referencia fijo dados por los ejes $\{X_0, Y_0, Z_0\}$, a un lado de un punto fijo q_0 de la base donde estaba montada toda la estructura de la cadena. Este sistema de referencia no tiene por qué ser el universal con origen en $\{0, 0, 0\}$ y la base canónica.

3.6.1. Asignación de sistema de referencia

Las articulaciones se numeran desde 1 hasta n . a la articulación i -ésima se le asocia su propio eje de rotación como eje $Z_{(i-1)}$, de forma que el eje de giro de la primera articulación es Z_0 y el de la n -ésima articulación, $Z_{(n-1)}$.

En la Figura 3.8 se muestra la estructura de un robot junto con sus articulaciones y ejes de rotación.

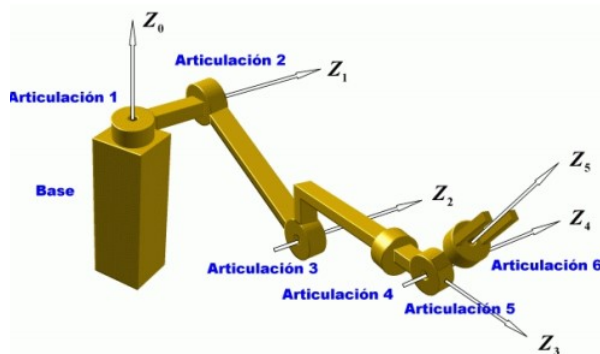


Figura 3.8: Detalle de marcos de referencia para un brazo robotico.

Para la articulación i -ésima (que es la que gira alrededor de Z_{i-1}), la elección del origen de coordenadas Q_i y del eje X_i sigue reglas muy precisas en función de la geometría de los brazos articulados. El eje Y_i por su parte, se escoge para que el sistema X_i, Y_i, Z_i , sea dextrógiro. La especificación de cada eje X_i depende de la relación espacial entre Z_i y $Z_{(i-1)}$, distinguiéndose 2 casos:

1.- Z_i y $Z_{(i-1)}$ no son paralelos

Cuando los ejes Z_i y $Z_{(i-1)}$ no son paralelos existe una única recta perpendicular a ambos, cuya intersección con los ejes proporciona su mínima distancia a_i (que puede ser 0) que es medida desde el eje $Z_{(i-1)}$ hacia el eje Z_i (tomando en cuenta su signo), y es uno de los parámetros asociados a la articulación i -ésima. La distancia d_i desde $Q_{(i-1)}$ a la intersección de la perpendicular común entre Z_i y $Z_{(i-1)}$ con $Z_{(i-1)}$ es el segundo de los parámetros.

En este caso, el eje X_i es esta recta, siendo el sentido positivo el que va desde el eje $Z_{(i-1)}$ al Z_i si $a_i > 0$. El origen de coordenadas Q_i es la intersección de dicha recta con el eje Z_i .

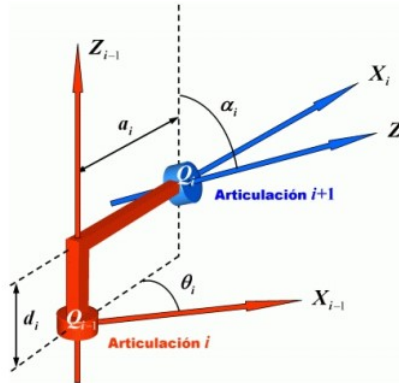


Figura 3.9: Caso 1 en la metodología para encontrar los parámetros para DH.

2.- Z_i y $Z_{(i-1)}$ son paralelos

En esta situación el eje X_i se toma en el plano contenido a Z_i y $Z_{(i-1)}$ y perpendicular a ambos. El origen Q_i es cualquier punto conveniente el eje Z_i . El parámetro a_i es, como antes, la distancia perpendicular entre los ejes Z_i y $Z_{(i-1)}$, y d_i es la distancia desde $Q_{(i-1)}$. Una vez determinado el eje X_i , a la articulación i -ésima se le asocia un tercer parámetro fijo α_i que es el ángulo que forman los ejes Z_i y $Z_{(i-1)}$ en relación al eje X_i . Nótese que cuando el eslabón i -ésimo (que une rígidamente las articulaciones i e $i + 1$) gira en torno al eje $Z_{(i-1)}$ (que es el de rotación de la articulación i), los parámetros a_i, d_i y α_i permanecen constantes, pues dependen exclusivamente de las posiciones/orientaciones relativas entre los ejes Z_i y $Z_{(i-1)}$, que son invariables.

Por tanto a_i, d_i y α_i pueden calcularse a partir de cualquier configuración de la estructura articulada, en particular a partir de una configuración inicial estándar. Precisamente el ángulo θ_i de giro que forman los ejes X_i y $X_{(i-1)}$ con respecto al eje $Z_{(i-1)}$ es el cuarto parámetro asociado a la articulación i y el único de ellos que varía cuando el brazo i gira.

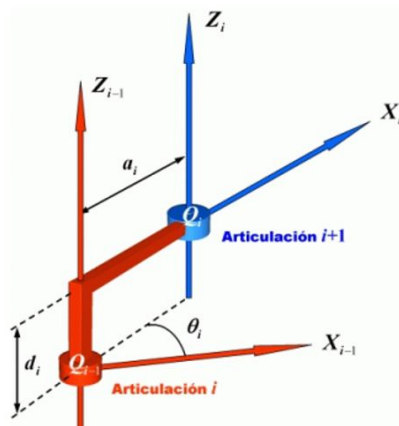


Figura 3.10: Caso 2 en la metodología para encontrar los parámetros para DH.

Es importante observar que el conjunto de los 4 parámetros a_i , d_i , θ_i y α_i determinan totalmente el sistema de referencia de la articulación $i+1$ en función del sistema de referencia de la articulación i .

3.6.2. Transformación de coordenadas

De los 4 parámetros asociados a una articulación, los 3 primeros son constantes (en el caso que todos los grados de libertad sean rotacionales) y dependen exclusivamente de la relación geométrica entre las articulaciones i e $i+1$, mientras que el cuarto parámetro θ_i es la única variable de la articulación, siendo el ángulo de giro del eje $X_{(i-1)}$ alrededor del eje $Z_{(i-1)}$ para llevarlo hasta X_i . Es conocido que dados dos sistemas de referencia $R_1 = \{Q_1, [u_1, u_2, u_3]\}$ y $R_2 = \{Q_2, [v_1, v_2, v_3]\}$ con bases ortonormales asociadas, el cambio de coordenadas del segundo sistema de referencia al primero viene dado por:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \alpha_1 \\ & R & \alpha_2 \\ & & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Donde β_1 , β_2 y β_3 son las coordenadas de un punto en el S.R. R_2 , R es la matriz de cambio de base tal que $[v_1|v_2|v_3] = [u_1|u_2|u_3]R$ y λ_1 , λ_2 y λ_3 son las coordenadas del origen del segundo S.R. Q_2 respecto al primero.

La expresión permite entonces obtener las coordenadas α_1 , α_2 y α_3 del punto en cuestión con respecto al primero de los S.R. En nuestro caso, para pasar de la $(i + 1)$ -ésima articulación a la i -ésima, los sistemas de referencia son: $R_1 = \{Q_{(i-1)}, [X_{(i-1)}, Y_{(i-1)}, Z_{(i-1)}]\}$ y $R_2 = \{Q_i, [X_i, Y_i, Z_i]\}$. Se estudiara por separado la matriz del cambio de base y la expresión de Q_i en el primer S.R.

3.6.3. Matriz del cambio de base

Ya que se asignaron los ejes a cada articulación mediante la representación Denavit-Hartenberg, se tiene que:

1. El eje X_i se obtiene rotando el eje $X_{(i-1)}$ alrededor del eje $Z_{(i-1)}$ un ángulo θ_i .
2. el eje Z_i se obtiene rotando el eje $Z_{(i-1)}$ alrededor del eje X_i un ángulo α_i . Por su parte, el eje Y_i viene ya determinado por X_i y Z_i .

La primera transformación es una rotación alrededor del tercer vector de la primer base, cuyas ecuaciones genéricas son:

$$[u_1^{(1)} | u_2^{(1)} | u_3^{(1)}] = [u_1 | u_2 | u_3] R_3(\theta_i) \quad (3.51)$$

La segunda transformación es una rotación alrededor del primer vector ya transformada, y tiene por expresión:

$$[u_1^{(2)} | u_2^{(2)} | u_3^{(2)}] = [u_1^{(1)} | u_2^{(1)} | u_3^{(1)}] R_1(\alpha_1) \quad (3.52)$$

Por tanto concatenándolas:

$$[u_1^{(2)} | u_2^{(2)} | u_3^{(2)}] = [u_1 | u_2 | u_3] R_1(\alpha_1) R_3(\theta_i) \quad (3.53)$$

Finalmente, cambiando la notación para tener:

$$[X_i | Y_i | Z_i] = [X_{(i-1)} | Y_{(i-1)} | Z_{(i-1)}] R_3(\theta_i) R_1(\alpha_1) \quad (3.54)$$

Con lo cual, la matriz del cambio de base es:

$$R = R_3(\theta_i)R_1(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i) & 0 \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\text{sen}(\alpha_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Que son coordenadas de Q_i en el primer S.R. Según la representación de Denavit-Hartenberg, el origen del segundo sistema de referencia se obtiene mediante:

1. Traslación de $Q_{(i-1)}$ a lo largo del eje $Z_{(i-1)}$ por la magnitud de d_i .
2. Traslación a lo largo del eje X_i por la magnitud a_1 .

La primera transformación es: $Q_{(i-1)}^{(1)} = Q_{(i-1)} + d_i Z_{(i-1)}$

La segunda transformación es: $Q_i = Q_{(i-1)}^{(1)} + a_i X_i$

Teniendo ahora en cuenta que:

$$[X_i|Y_i|Z_i] = [X_{(i-1)}|Y_{(i-1)}|Z_{(i-1)}] \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\text{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \text{sen}(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) \\ \text{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\text{sen}(\alpha_i) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Se tiene, para el primer vector:

$$X_i = [X_{(i-1)}|Y_{(i-1)}|Z_{(i-1)}] \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) \\ \text{sen}(\theta_i) \\ 0 \end{bmatrix} = \cos(\theta_i)X_{(i-1)} + \text{sen}(\theta_i)Y_{(i-1)} \quad (3.58)$$

De donde:

$$Q_i = Q_{(i-1)}^{(1)} + a_i X_i = Q_{(i-1)} + d_i Z_{(i-1)} + a_i (\cos(\theta_i)X_{(i-1)} + \text{sen}(\theta_i)Y_{(i-1)})$$

$$Q_i = Q_{(i-1)} + (a_i \cos(\theta_i))X_{(i-1)} + (a_i \text{sen}(\theta_i))Y_{(i-1)} + d_i Z_{(i-1)}$$

Y por tanto, las coordenadas Q_i en el 1^{er} sistema de referencia son:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i \cos(\theta_i) \\ a_i \operatorname{sen}(\theta_i) \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Finalmente, la transformación de coordenadas del Sistema de referencia $Q_i[X_i|Y_i|Z_i]$ al Sistema de referencia $Q_{(i-1)}, [X_{(i-1)}|Y_{(i-1)}|Z_{(i-1)}]$ es:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\operatorname{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \operatorname{sen}(\theta_i)\operatorname{sen}(\alpha_i) \\ \operatorname{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\operatorname{sen}(\alpha_i) \\ 0 & \operatorname{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_i \cos(\theta_i) \\ a_i \operatorname{sen}(\theta_i) \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Cambiando la notación para las coordenadas:

$$\begin{bmatrix} X_{(i-1)} \\ Y_{(i-1)} \\ Z_{(i-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\operatorname{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \operatorname{sen}(\theta_i)\operatorname{sen}(\alpha_i) \\ \operatorname{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\operatorname{sen}(\alpha_i) \\ 0 & \operatorname{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_i \cos(\theta_i) \\ a_i \operatorname{sen}(\theta_i) \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

Donde el subíndice se denota el sistema de referencia respecto al cual están expresadas las coordenadas. Y por ultimo expresando esto en coordenadas homogéneas:

$$\begin{bmatrix} X_{(i-1)} \\ Y_{(i-1)} \\ Z_{(i-1)} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\operatorname{sen}(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \operatorname{sen}(\theta_i)\operatorname{sen}(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \operatorname{sen}(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\operatorname{sen}(\alpha_i) & a_i \operatorname{sen}(\theta_i) \\ 0 & \operatorname{sen}(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Si se requiere la posición del siguiente eslabón con respecto al marco de referencia del primero lo único que se tiene que hacer es multiplicar esta matriz de transformación homogénea.

$$T^i = \prod A_n \quad (3.63)$$

3.6.4. Cinemática diferencial.

Al obtener las matrices homogéneas de las transformaciones para cada eslabón se puede obtener el jacobiano de cada eslabón, el cual representa el vínculo entre la velocidad de las variables de estado y las velocidades angulares de cada eslabón. Si esta relación existe esta expresada de la siguiente manera:

$$J = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_{(i-1)} \times (p - p_{(i-1)}) \\ z_{(i-1)} \end{bmatrix} & \text{si la articulación } i \text{ es rotacional} \\ \begin{bmatrix} z_{(i-1)} \\ 0 \end{bmatrix} & \text{si la articulación } i \text{ es prismatica} \end{cases} \quad (3.64)$$

Donde \times representa el producto cruz, $p_{(i-1)}$ es la posición del origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo con respecto al sistema de referencia, $z_{(i-1)}$ es el vector unitario a lo largo del eje del movimiento de la articulación i y p es la posición del eslabón con respecto al sistema de coordenadas de referencia.

$$T^i = \begin{bmatrix} \vec{A} & \vec{B} & z_{(i-1)} & \vec{p}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$\vec{p}_0 = \vec{0} \quad (3.66)$$

Si la matriz jacobiana existe en $q(t)$, entonces las velocidades de la articulación $\dot{q}(t)$ del manipulador se pueden calcular a partir de las velocidades del último eslabón con la siguiente ecuación:

$$\dot{q}(t) = J^{-1}(q) \begin{bmatrix} v(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

3.7. Protocolo RS-232 de comunicación serial

El estándar RS-232 es un protocolo para comunicación serial entre dispositivos. En general el puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez. Aunque comparado con la comunicación paralela esta es más lenta, debido a las posibilidades de enviar mas datos al mismo tiempo, este método de comunicación puede alcanzar mayores distancias. Utilizando comunicación serial el largo del cable de comunicación puede llegar a los 1200 metros.

Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII. Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: (1) Tierra (o referencia), (2) Transmisor, (3) Receptor. También es posible la comunicación Full-Duplex donde es posible enviar datos por una línea mientras se reciben datos por otra. Las parámetros más importantes de la comunicación serial son la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las parámetros sean iguales.

3.8. Odometría

La odometría es el estudio de la posición de vehículos durante la navegación. Para estimar la posición del móvil a lo largo del tiempo se utiliza información sobre la rotación o traslación de los actuadores. Los robots móviles utilizan la odometría para estimar su posición relativa a su localización inicial.

En cortas distancias la odometría proporciona una buena precisión, es un método simple y su costo de implementación es reducido.

La información del movimiento incremental del móvil al pasar el tiempo acumula un error en la medición de la posición relativa y éste aumenta proporcionalmente con la distancia recorrida del robot móvil [7]. La odometría presenta limitaciones pero forma parte fundamental del sistema de navegación de un robot y esta debe usarse con medidas de posicionamiento absolutas para obtener una estimación de posición relativa más confiable. La odometría está basada en cálculos matemáticos sencillos y utiliza sensores situados en los actuadores del robot.

También la odometría está basada en la suposición de que las revoluciones de las ruedas pueden ser traducidas en un desplazamiento lineal relativo a la referencia. Una situación en donde la odometría puede presentar errores sería cuando las ruedas del robot no avancen debido a una baja fricción en el suelo o debido a una obstrucción.

En esta condición el robot no tiene la capacidad de reconocer que no se está desplazando, pero los sensores siguen registrando el movimiento de las ruedas generando un error en la estimación.

Existen otros tipos de errores que se presentan al utilizar la odometría que tienen que ver con la estructura del móvil o con el ambiente. Los errores que tienen que ver con la estructura del móvil se denominan sistemáticos. Ejemplos de este tipo de error pueden ser que los diámetros de las ruedas no sean iguales o que se tenga una mala construcción en la estructura del robot que provoque distancias diferentes en la colocación de las ruedas. El ambiente en el que se mueve el robot puede generar errores llamados no sistemáticos. Estos errores tienen que ver con el desnivel del suelo, patinaje de las llantas debido a suelos resbaladizos, derrapes, obstrucciones en las llantas, etc. Ya que las ecuaciones de odometría se basan en distancias constantes (diámetro de ruedas, distancia entre ruedas) este tipo de errores resultarían en un mal cálculo de la posición relativa.

Parte II

Desarrollo

CAPÍTULO 4

Diseño detallado

En esta sección se explica el diseño detallado de cada una de las áreas funcionales en las que está dividido el prototipo.

4.1. Estructura

Para iniciar el diseño se selecciona el material del cual se constituyen las piezas. Para esto, se considera que se presentan esfuerzos en los elementos de la estructura debido a las dimensiones y al tipo de robot (robot móvil). Es conveniente que el prototipo sea ligero para disminuir la carga sobre actuadores. Por lo que se utiliza el material denominado Nylamid ya que presenta desempeño mecánico de alto rendimiento, baja densidad y este se adapta a las necesidades del prototipo [11].

4.1.1. Diseño de piezas mecánicas

El diseño de las piezas mecánicas se realiza en el software CAD SolidWorks® con Nailon 6/10 el cual es un material similar en densidad al Nylamid y tiene un módulo de elasticidad 3 veces mayor. [11].

Durante el proceso de diseño se evaluaron diferentes versiones del mismo, donde se buscó que las piezas resistieran los esfuerzos máximos presentes, y que se tuviera la menor masa posible, esto último comprometido con el consumo eléctrico por parte de los actuadores. Se muestran la versión del dispositivo en la Figura 4.1.

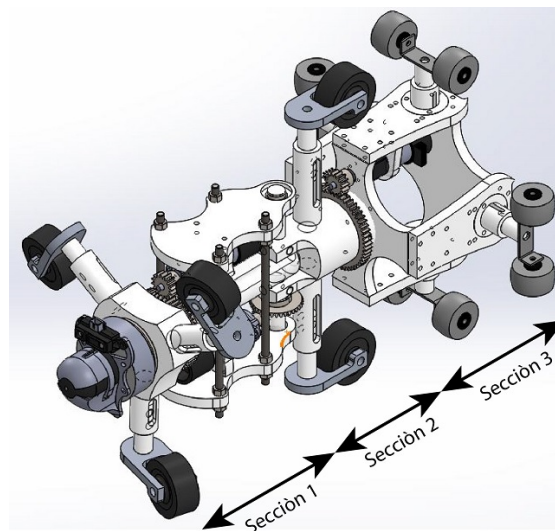


Figura 4.1: Dos últimas versiones del diseño tridimensional del dispositivo.

En la Tabla 4.1 se muestran las características de las diferentes secciones del dispositivo.

Tabla 4.1: Características de la estructura mecánica

Piezas modeladas	Masa (g)	Longitud (cm)
Ensamble completo	2346.05	36.5
Sección 1	1149.40	19
Sección 2	395.32	8
Sección 3	801.34	9.5

La última versión redujo en un 22 % aproximadamente la masa total del prototipo respecto a las primeras versiones diseñadas, y fue la versión que mejor se adapta a las exigencias del diseño. Se apoyó en tablas de propiedades mecánicas de materiales para conocer los valores de máximo de esfuerzo y elongación que puede soportar el material [11].

Los valores usados para los análisis de esfuerzo en el prototipo son $\sigma_{max.atension} = 9,900$ psi y elongación máxima a la tensión igual a 50 %, ambos a temperatura de 73.° F. El valor de resistencia a la tensión, es el valor límite del esfuerzo que puede soportar el material sin deformarse de manera permanente, es decir el esfuerzo de cedencia. Este valor en pascuales es igual a:

$$9900\text{psi} = 6.825 \times 10^7 \text{Pa}$$

Por otro lado, para algunas partes del análisis se utilizó el torque máximo que otorga el motor, el cual tiene un valor de $\tau_{max.mot.} = 1.6$ Nm.

4.1.2. Mecanismos del dispositivo

La estructura mecánica del dispositivo se divide en tres secciones principales, las cuales le permiten orientarse y moverse dentro de diferentes conexiones de una red de tubería.

Sección 1

Esta sección cuenta con dos actuadores. Un actuador hace girar el rotor para desplazar al robot a lo largo de la tubería, mientras que el otro direcciona la sección uno, Figura 4.2.

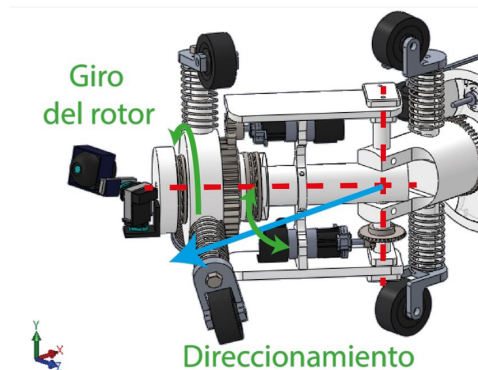


Figura 4.2: Movimientos de la sección uno.

Ambos actuadores transmiten el movimiento con la ayuda de un par de engranes, el primero juego es de dientes rectos, y el otro es de engranes cónicos (Figura 4.3).

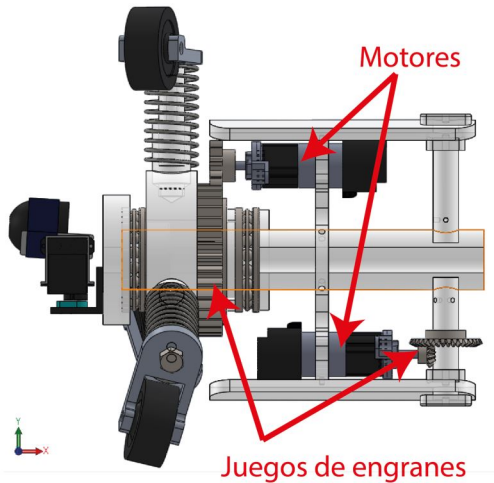


Figura 4.3: Motores y engranes de la sección uno.

Esta sección (Figura 4.4a) tiene espacio necesario para colocar un elemento de visión. El rotor (Figura 4.4b) se encuentra unido al eje central mediante rodamientos, los cuales evitan que se desplace longitudinalmente y ayudan al giro sobre el eje evitando fricciones. El motor cuenta con un engrane el cual transmitirá movimiento al rotor de tres brazos, cada uno con suspensión, base y llanta.

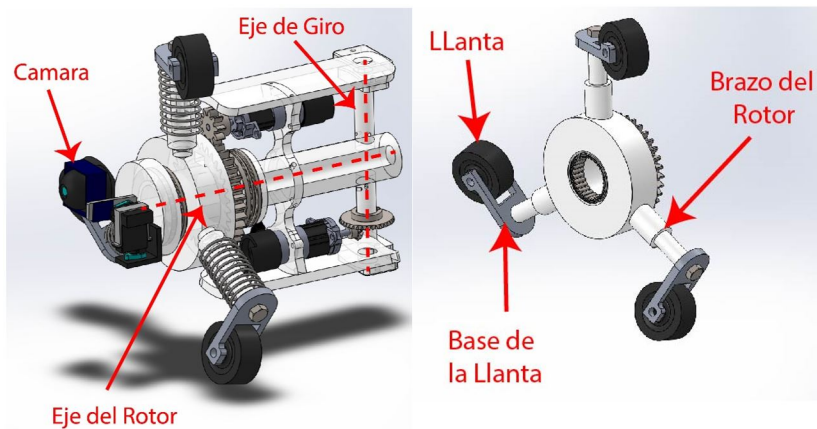


Figura 4.4: a) Detalle de cámara, b) Constitución del rotor en la sección 1.

Para el desplazamiento del dispositivo, las llantas del rotor se posicionaron en ángulo respecto a un plano transversal del móvil, de tal manera que cuando el rotor gira la fuerza de fricción entre las llantas y la pared interna de la tubería genera el movimiento del mismo hacia una dirección específica.

Sección 2

La sección 2 mostrada en la Figura 4.5 tiene una pieza central que se conecta a la primera sección, esta conexión coincide con el eje de giro de la parte delantera. La pieza tiene dos brazos con sus correspondientes suspensiones, bases y ruedas libres.

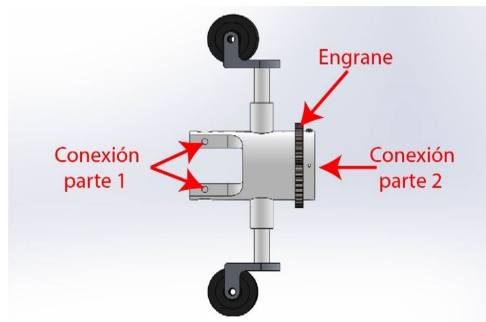


Figura 4.5: Constitución sección 2.

Esta pieza tiene un movimiento giratorio sobre el buje de la sección 3, esto para ayudar a la dirección a alcanzar diferentes posiciones, Figura 4.6. Para evitar la fricción entre la pieza central y el buje se coloca un rodamiento.

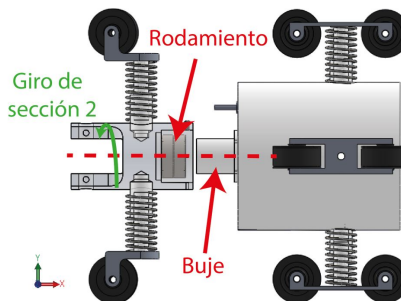


Figura 4.6: Movimiento de la sección 2.

El movimiento de esta sección es generado por un motor anclado a la última parte del robot, este es transmitido mediante un par de engranes Figura 4.7.

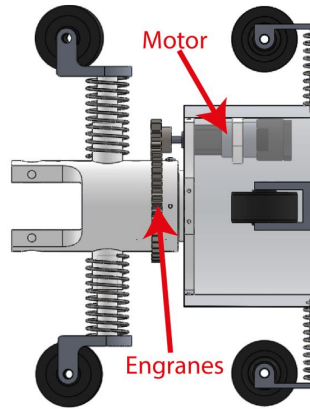


Figura 4.7: Motor y engranes sección 2.

Sección 3

La última sección del prototipo (Figura 4.8) consta de cuatro brazos, con suspensiones y llantas. La tapa de sección es usada para sostener el actuador y el buje de conexión. La parte interior de la estructura está vacía, con la finalidad de utilizar el espacio para colocar los componentes electrónicos.

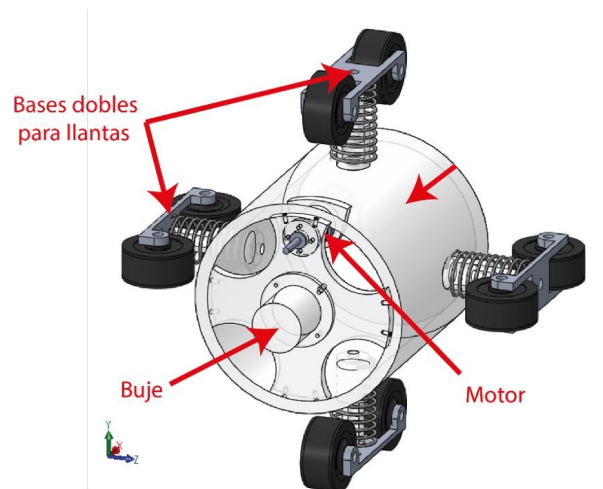


Figura 4.8: Sección 3 a detalle.

4.1.3. Diseño e implementación del circuito de control del prototipo

El circuito tiene como propósito realizar el control del robot explorador de tuberías a través de dispositivos analógicos y digitales que faciliten el uso de los actuadores y sensores utilizados en el mismo. El esquema general del circuito es el mostrado en la Figura 4.9.

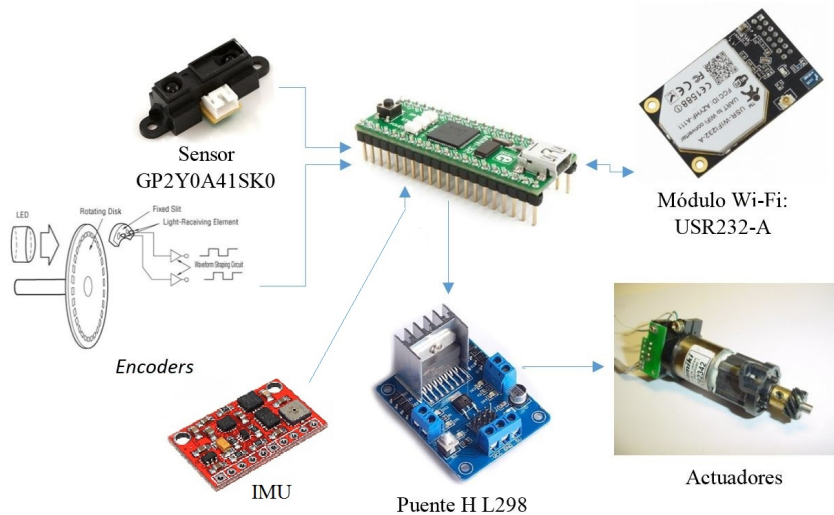


Figura 4.9: Esquema físico representativo general.

Cada elemento se describe brevemente a continuación:

Microcontrolador ARM. Este elemento es un microcontrolador de 32 bits STM32F415RG que cuenta con un oscilador de 120 MHz. La velocidad de procesamiento, módulos de comunicación, timers, multiplicadores de frecuencia, etc. son características bastas para el control del robot.

Módulo de comunicación WIFI/UART. El medio de comunicaci3n entre la interfaz de monitoreo y el robot se llevará a cabo mediante este módulo. El controlador USR232-S convierte las se1ales recibidas WIFI a protocolo de comunicaci3n UART.

Encoders. Este sensor entrega un tren de pulsos al momento que su actuador (Motor) se encuentra en movimiento. Estos sensores ya se encuentran sujetos a los motores. En un giro de la flecha del motor se consideran 80 veces los pulsos entregados por este encoder debido a la reducci3n 80:1.

IMU (Unidad de movimiento inercial). Para conocer el ángulo de inclinación de la sección 2. Al conocer este ángulo se podrá realizar una compensación para posicionar la sección 3 de manera vertical.

Sensor infrarrojo. Sera utilizado para conocer cuando el robot se encuentre próximo a una pared de alguna conexión en la tubería.

Dentro del sistema de odometría este sensor será procesado para conocer si se ha terminado de recorrer una sección de la trayectoria programada. Sera el auxiliar en la realización de la odometria en el robot.

Etapa de potencia. Las señales TTL son sensibles al ruido eléctrico generado en el ambiente por esto las señales para los actuadores serán conectadas mediante opto acopladores PC817 que aislaran la parte de electrónica digital de la de potencia en donde se encontrarán conectados los motores. Para controlar el sentido de giro y velocidad en los motores se utilizaran los circuitos integrados puente H L298.

Motores. Se hará uso de tres motores NAMIKI CORELESS 22CL-3501PG. Sus características de voltaje de operación y par de salida se acoplan a los objetivos del robot.

Entradas digitales

El circuito tiene como entradas digitales, las señales de frecuencia obtenidas de los codificadores rotatorios o “encoders” conectados en cada uno de los actuadores del prototipo.

Cada codificador rotatorio o “encoder” de los actuadores tiene 3 pines, los cuales son conectados a 3 señales: voltaje, tierra y a un divisor de voltaje respectivamente en el circuito. Las señales generadas por los codificadores rotatorios son rectificadas mediante opto acopladores para la generación de señales digitales de 3.3 volts necesarias para que sean reconocidas por el microcontrolador (Figura 4.10).

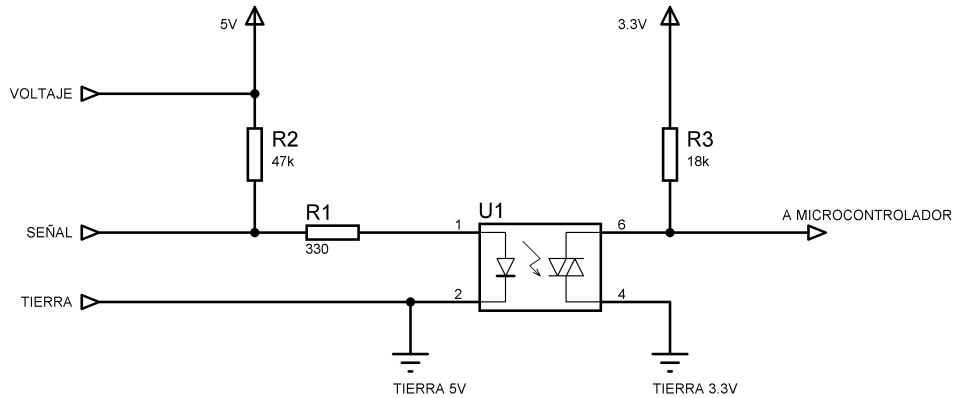


Figura 4.10: Circuito rectificador mediante opto acopladores.

Salidas digitales

Las salidas digitales constan de la interfaz digital para la conexión del dispositivo de comunicación Wi-Fi emisor del prototipo. Mediante la hoja de datos del fabricante del dispositivo Wi-Fi se identifican los pines de conexión (Figura 4.11) que se utilizan para su implementación.

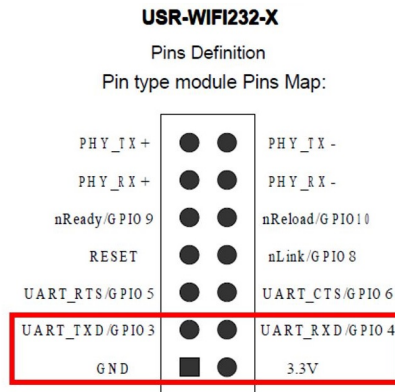


Figura 4.11: Pines del módulo Wi-Fi.

De igual manera se cuentan con salidas digitales para la activación de cada uno de los actuadores del prototipo, a través de una etapa de potencia implementada mediante los circuitos denominados “puente H”.

Sensor infrarrojo

La entrada analógica del circuito es el sensor infrarrojo conectado al frente del prototipo. El sensor de distancia infrarrojo *GP2Y0A41SK0F* requiere de una conexión de voltaje de 5V ya que es un dispositivo analógico. Mediante la hoja de datos se puede observar el valor de distancia que mide respecto al voltaje de salida que está representada mediante una gráfica, la cual, se utiliza para crear una ecuación matemática de tal manera que entregue la distancia medida respecto al voltaje de entrada. La obtención de la ecuación se logra mediante el uso del software especializado MATLAB® , dicha ecuación es la siguiente:

$$Distancia = 53.33e^{-2.506V} + 12.18e^{-0.3929V} \quad (4.1)$$

Todo el circuito está controlado por un microcontrolador ARM de 32 bits perteneciente a la serie STM32F4 con matrícula STM32F415RG mostrado en el circuito impreso de la Figura 4.12.

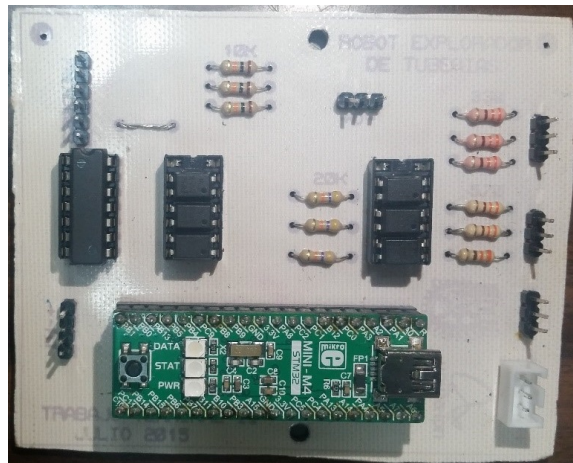


Figura 4.12: Placa real.

4.2. Comunicación

En este apartado se presenta el diseño y las configuraciones necesarias para la construcción de la interfaz de monitoreo.

4.2.1. Cámara IP

El elemento de visión que será utilizado para observar el interior de la tubería es una cámara IP (ai ball) elegida por sus dimensiones y sus alcances de transmisión de video de manera inalámbrica. Las características de la cámara IP inalámbrica en cuanto a velocidad son las siguientes:

Velocidad inalámbrica: IEEE 802.11b/g 2.4GHz

Con esta velocidad el fabricante menciona en su hoja de datos que el alcance máximo cuando la cámara se conecta a un Modem (Router) es de 20 metros. A continuación se observan estas características.

Wireless interface

*IEEE802.11b/g 2.4GHz ISM Band.

Wireless Security

*WEP 64/128, WPA, WPA2.

Wireless Range

*Infrastructure: 20m (Typical).

*Adhoc: 7.5m (Typical).

Para obtener el video transmitido por esta cámara es necesario realizar una serie de configuraciones por software para la conexión.

Al conectar la batería de la cámara esta emite una red AD-HOC visible para las tarjetas de red inalámbricas. Aparece con el nombre de “Trek ai-ball”. Al unirse a esta red es posible acceder al video de la cámara pero únicamente en el navegador.

Para obtener únicamente el video de la cámara se utiliza un programa llamado “IP Camera Adapter” que es un decodificador de video MPGJ que transmiten las cámaras IP desarrollado como software libre.

La interfaz de configuración únicamente utiliza los parámetros mostrados en la Figura 4.13.

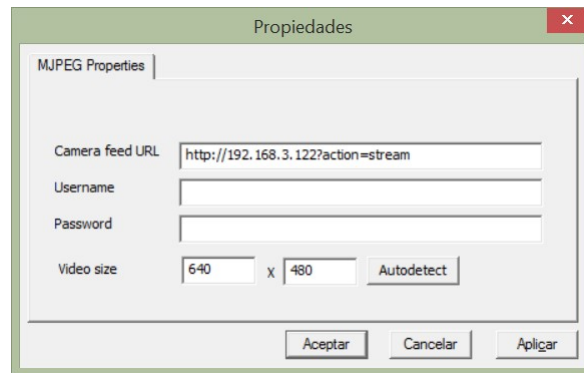


Figura 4.13: Interfaz de comunicación de cámara IP.

Como se puede observar en la figura anterior es necesario escribir la dirección IP del dispositivo conectado a la red, el usuario y la contraseña si es que el dispositivo las necesita. Según la hoja de datos del fabricante de la cámara indica que la dirección IP es la siguiente:

<http://192.168.3.122>

Al acceder a esta dirección en la red se puede ver una interfaz que muestra el video de la cámara y un panel de configuración de video y audio. Para los propósitos del presente trabajo únicamente es necesario obtener el video en tiempo real. Para lograr lo anterior se agrega una instrucción al link de conexión para indicar en la red que solo se quiere acceder al video, de esta manera la dirección IP queda como sigue:

<http://192.168.3.122?action=stream>

El video se muestra en un recuadro sobre el navegador como se observa en la Figura 4.14.

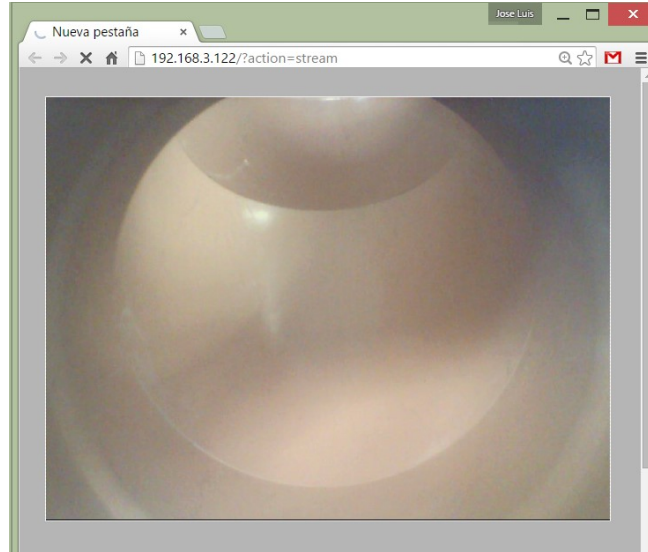


Figura 4.14: Video transmitido por la camara IP mostrado en el navegador.

4.2.2. Driver de video en NI MAX

La interfaz de monitoreo del presente trabajo será construida en NI LabView®. Para visualizar el video transmitido por la cámara IP inalámbrica en un instrumento virtual desarrollado en este software, es necesario que el administrador de Interfaces y Dispositivos NI MAX reconozca un driver adecuado para la cámara. Como se mencionó anteriormente el programa "IP Camera Adapter" puede recuperar el video de cualquier cámara IP únicamente sabiendo su dirección pero también este programa instala un driver en la computadora que es reconocido por NI MAX como se muestra en la Figura 4.15.

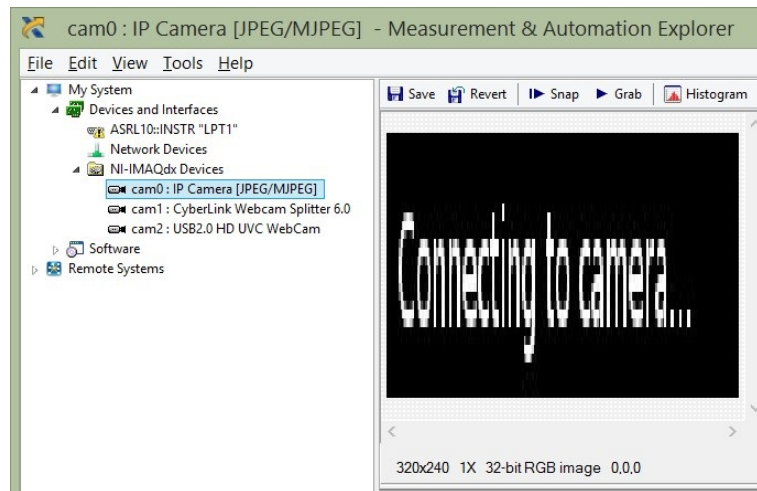


Figura 4.15: Driver de cámara IP reconocido por NI MAX.

Cuando NI MAX reconoce el driver de la cámara es posible configurar las opciones de video que se necesitan para la aplicación. La configuración de video de la cámara tiene las siguientes características:

1. Resolución: 320X240 pixeles.
2. Velocidad de transmisión: 10 fps (Frames por segundo).
3. Formato: RGB (Color).

Una vez realizado esto el video de la cámara se encuentra disponible para ser utilizado en un instrumento virtual, en este caso la interfaz de monitoreo del prototipo.

4.2.3. Interfaz de monitoreo

La interfaz de monitoreo tiene como objetivo poder programar una trayectoria y enviarla al robot así como visualizar el interior de la tubería y la posición del robot en una gráfica tridimensional. Esta interfaz se construyó en el software NI LabView y se muestra en la Figura 4.16.

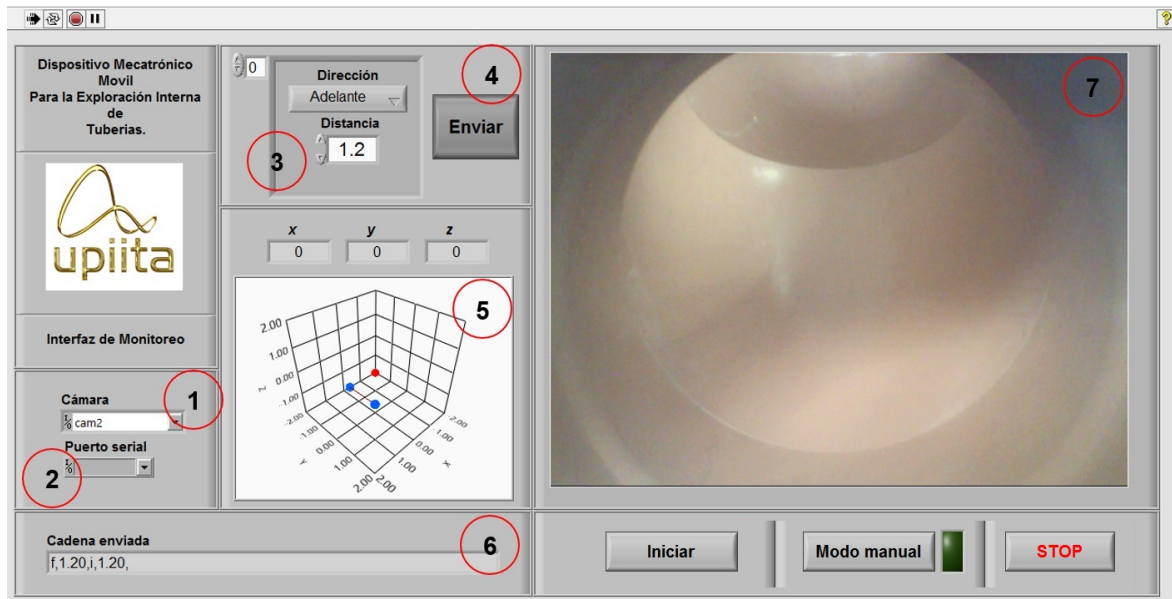


Figura 4.16: Interfaz de monitoreo.

La interfaz mostrada en la figura anterior contiene controles e indicadores para realizar la función de inspección en la tubería. Las partes enumeradas en la imagen se describen a continuación:

1. Combobox “Selecciona cámara”: En este control se selecciona una de las cámaras conectadas a la computadora. Se selecciona el driver conectado a la camara IP reconocido por NI MAX.
2. Combobox “Puerto Serial”: En este control se selecciona el puerto serial por el que se reciben los datos de posición del robot (Puertos COM).
3. Cluster de datos: Para establecer la trayectoria que debe recorrer el robot en la tubería en este control se insertan los datos de dirección y magnitud.
4. Botón “Enviar”: Cuando se ha establecido la trayectoria, al presionar este botón, la interfaz envía por el puerto serial la cadena de caracteres codificados al robot.
5. Gráfica 3D: La trayectoria programada y la posición actual del robot se grafica en este espacio tridimensional. Los indicadores (x, y, z) muestran el valor numérico de posición en cada eje.

6. Cadena enviada: Se muestra la cadena de caracteres enviada al robot.
7. Video: En este indicador se muestra el video recibido de la camara IP para visualizar el interior de la tubería.
8. Botón “Iniciar”: Al presionar este botón la interfaz envía un comando al robot para iniciar el recorrido.
9. Botón “Stop”: Con este botón se detiene la ejecución de la interfaz de monitoreo.

4.3. Movimiento

En esta sección se detallan los procedimientos realizados para la implementación del movimiento del prototipo.

4.3.1. Método para la medición del avance lineal del dispositivo

Según el análisis realizado para el avance lineal del prototipo el desplazamiento L es igual a:

$$L = r\theta\sin(\alpha) \quad (4.2)$$

Para ángulos pequeños $\sin(\alpha) = \alpha$, por lo tanto la fórmula del desplazamiento lineal del robot es:

$$L = r\theta\alpha \quad (4.3)$$

Para comprobar el método de odometría se dibuja una hélice de una vuelta en Solidworks® y se mide su ángulo de inclinación así como su desplazamiento L (Figura 4.17).

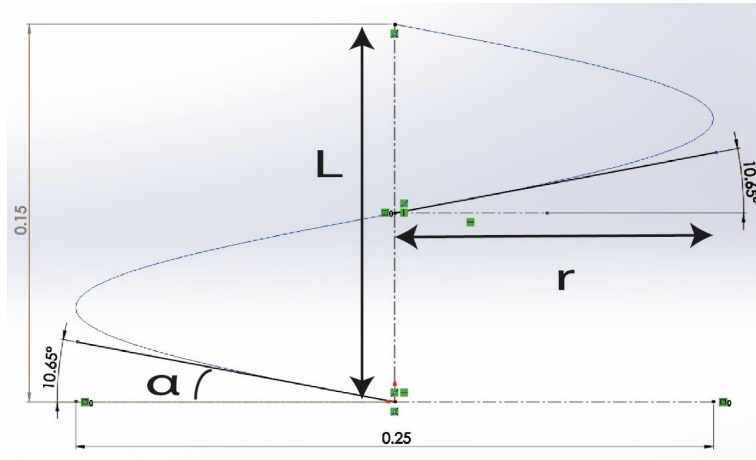


Figura 4.17: Hélice dibujada

Los parámetros son:

1. $L = 0.15 \text{ m}$
2. $r = 0.1275 \text{ m}$ (radio del rotor)
3. $\alpha = 10.6461^\circ = 0.1858 \text{ rad}$

Utilizando la formula obtenida para desplazamiento lineal se comprueba el valor L para un giro ($\theta = 2\pi$), esto es:

$$L = 0.127(0.1858)(2\pi) = 0.1482m$$

$$L = 0.15m \cong 0.1488m$$

Si se utiliza la formula sin aproximación:

$$L = 0.127\sin(0.1858)(2\pi) = 0.1474m$$

$$L = 0.15m \cong 0.1474m$$

La ecuación calculada y descrita anteriormente que utiliza el desplazamiento angular del rotor es capaz de entregar un valor muy aproximado de desplazamiento lineal en metros. Se utilizará este método para conocer la posición del robot en cualquier instante que el rotor se encuentre en movimiento y para realizar las operaciones de odometria.

4.3.2. Control PID del motor con carga

Dado que la función de transferencia del motor de CD con el controlador PID es de tercer orden, la ecuación de segundo orden debe tener sólo un polo extra, la cual, simplificada queda como:

$$T_2'(s) = \frac{\omega_n^2}{s^3 + s^2(\phi + 2\xi\omega_n) + s(2\xi\omega_n\phi + \omega_n^2) + \phi\omega_n^2} \quad (4.4)$$

Y la función de transferencia del motor con el control PID:

$$T_c(s) = \frac{(K_p s + K_i + K_d s^2)(K_{im})}{(s)(B_m R_t + K_b K_{im} + (J_m R_t + B_m L_t)s + J_m L_t s) + (K_p s + K_i + K_d s^2)(K_{im})} \quad (4.5)$$

Igualando los coeficientes de los polos de las ecuaciones anteriores y simplificando se obtiene lo siguiente:

$$K_i = \left(\frac{\omega_n^2 \phi}{k_{im}} \right) (J_m L_t) \quad (4.6)$$

$$K_p = \frac{(J_m L_t)(2\xi\omega_n\phi + \omega_n^2) - (B_m R_t + k_b k_{im})}{k_{im}} \quad (4.7)$$

$$K_d = \frac{(J_m L_t)(2\xi\omega_n + \phi) - (J_m R_t + B_m L_t)}{k_{im}} \quad (4.8)$$

El valor matemático de dichos parámetros, es proporcional a la ubicación del polo adicional y de los valores de la frecuencia natural y del coeficiente de amortiguamiento. La obtención de los parámetros del controlador, se obtienen con el uso de software especializado MATLAB®.

Diagrama de bloques del controlador

El diagrama de bloques para el controlador de velocidad y el cálculo del desplazamiento angular se muestra en la Figura 4.18. Las funciones de transferencia utilizadas son las deducidas en la parte del modelado matemático de un motor con carga.

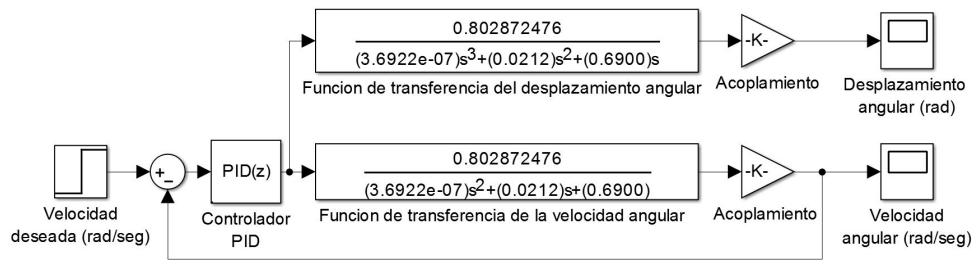


Figura 4.18: Diagrama de bloques del sistema de control.

En el diagrama de bloques se observa que la función de transferencia para el desplazamiento angular se trabaja a lazo abierto. Con un nivel de tensión dado necesario para el control de velocidad se calcula el desplazamiento angular del motor sin realizar ninguna retroalimentación.

Se utiliza un controlador PID para simular este sistema de control. Ya que el controlador será implementado en un sistema embebido digital se utiliza un controlador PID digital con un intervalo de muestreo propuesto de 1 ms. Cabe mencionar que la salida del controlador es directamente proporcional al valor de tensión que se ingresara al motor.

El bloque de acoplamiento para ambas salidas de la función de transferencia se utiliza para adecuar el valor de salida a:

1. Reducción de velocidad del motor por medio de caja reductora.
2. Acoplamiento al valor de las unidades de velocidad deseada (RPM's o rad/seg).

Es necesario conocer el desplazamiento lineal del robot para realizar la odometría descrita posteriormente en este documento. El planteamiento de este sistema será justificado mediante simulación.

Parámetros del motor

Para poder utilizar e implementar las funciones de transferencia encontradas en un sistema embebido así como en simulación, es necesario conocer los parámetros del motor. El motor de DC será el actuador que mueva el rotor del robot diseñado. Estos parámetros se determinan mediante mediciones físicas en el motor.

A continuación se describen las mediciones experimentales que se realizan para obtener los parámetros del motor seleccionado Namiki coreless 22CL-3501PG que se utilizarán para el control de velocidad.

Determinación de R_a

Para establecer el valor de R_a , se midió con ayuda de un multímetro la resistencia entre las terminales del motor. El valor medido fue de:

$$R_a = 6\Omega$$

Determinación de k_b

Para conocer el valor numérico de k_b podemos partir de las ecuaciones 3.6 y 3.8, donde despejamos k_b y suponemos el valor de voltaje en la inductancia igual a cero, esto para el caso de una señal de tensión constante.

$$k_b = \frac{V_a - R_a I_a}{\omega} \quad (4.9)$$

Por lo tanto se midió el valor de corrientes y velocidad del motor a diferentes voltajes de armadura, lo cual se tabuló como se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Mediciones para determinar k_b

Tensión de entrada (V)	Corriente consumida (A)	Frecuencia (H)	Frecuencia (rad/seg)	k_b
1,51	3,57E-02	40	1,5708	0,82492997
2,104	4,03E-02	57,8	2,269806	0,82042254
3,023	4,50E-02	86,2	3,385074	0,81327616
4,02	4,89E-02	117,9	4,629933	0,80489286
5,02	5,12E-02	149,7	5,878719	0,80167125
6,01	5,35E-02	181,2	7,115724	0,799497
7,02	5,52E-02	212,8	8,356656	0,80041586
8,03	5,62E-02	246,3	9,672201	0,79535154
9,03	5,82E-02	277,7	10,905279	0,79601815
10	5,97E-02	308,7	12,122649	0,79535422
11,01	6,04E-02	341,3	13,402851	0,79442799
12	6,44E-02	375,2	14,734104	0,78821216

De donde el valor promedio de la constante es:

$$k_b = 0,80287248 \text{ V}/(\text{rad}/\text{seg})$$

Determinación de la inercia del motor J_m

Para determinar el valor de J_m se utiliza la prueba de escalón, la cual consiste en observar que el motor se puede aproximar a un sistema de primer orden, y cuando se introduce una entrada escalón al mismo, se presenta una constante de tiempo τ . La siguiente ecuación muestra la forma general en el dominio del tiempo de la ecuación de un sistema de primer orden. El valor de la constante τ está relacionada con el tiempo que debe transcurrir para que el sistema alcance el 63.2% del valor de salida.

$$C(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.10)$$

Cabe mencionar que mientras más pequeña es la constante de tiempo de los sistemas, estos alcanzan más rápido su valor final.

En estos sistemas, la constante de tiempo se utiliza como parámetro para indicar cuanto tiempo tardaría el sistema en alcanzar el nivel de salida deseado, en general se dice que cuando el tiempo transcurrido es cuatro veces el valor de la constante $t = 4\tau$, el sistema se encuentra en una salida de $\pm 2\%$ del valor de salida deseado.

Dicha constante está definida en los motores eléctricos por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{J_m R_t}{k_b k_i} \quad (4.11)$$

De la ecuación anterior se puede despejar la inercia del eje de salida de la siguiente manera:

$$J_m = \frac{\tau k_b k_i}{R} \quad (4.12)$$

De la ecuación anterior tenemos R , k_b y k_i es numéricamente igual a k_b (acorde con la teoría de maquinas eléctricas), entonces la única variable que es desconocida es τ . Para calcularla se debe alimentar el motor con una entrada escalón y encontrar el tiempo de subida al 63.2% del valor final, pues esta es la definición de tiempo de subida.

Para esto utilizamos una interfaz en la computadora y una tarjeta DAQ que se encargan de controlar y recopilar los datos de velocidad del motor, se tiene el resultado de la Figura 4.19.

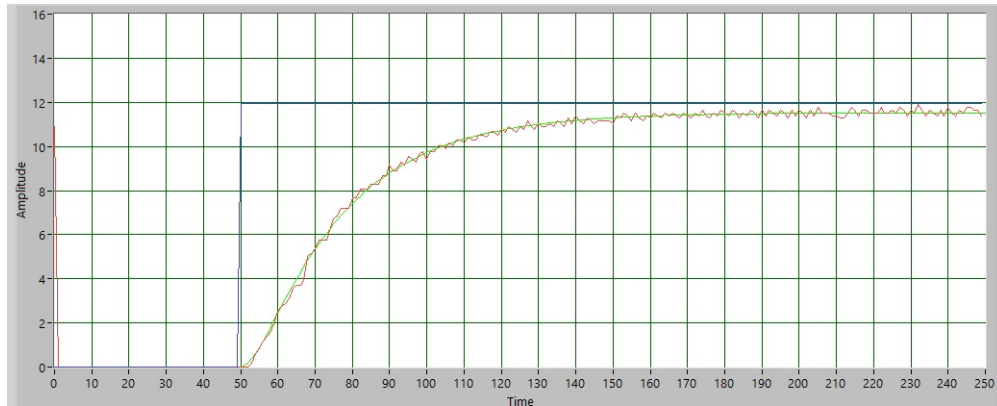


Figura 4.19: Resultado de caracterización del motor con la tarjeta de adquisición de datos.

La medición del tiempo de subida en el porcentaje establecido se realizó haciendo un acercamiento a la gráfica obtenida como se muestra en la Figura 4.20.

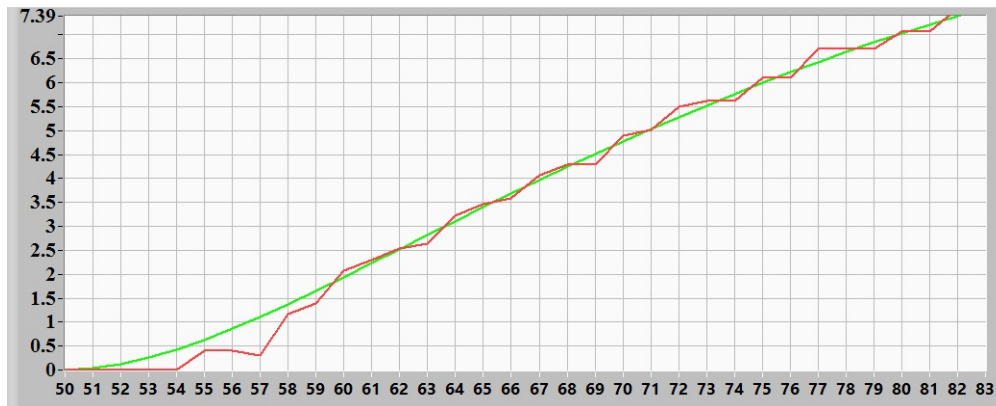


Figura 4.20: Acercamiento a la gráfica obtenida para medición del tiempo de subida.

Tabla 4.3: Mediciones del tiempo de subida

Medición	τ
1	3.45e-02
2	3.12e-02
3	3.32e-02
4	3.11e-02
5	3.44e-02
6	3.10e-02
7	3.52e-02
8	3.42e-02
9	3.35e-02
10	3.14e-02

Se tomaron varias medidas para calcular un promedio y se encontró que el tiempo de subida es igual a:

$$\tau = 33 \text{ ms}$$

Por lo tanto J_m es igual a:

$$J_m = \frac{\tau k_b^2}{R_t} = 3,54 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$$

Determinación de B_m

Para determinar el valor de B_m se usará la ecuación 3.12 considerando el estado estacionario donde no existe la aceleración angular, y se despeja B_m como sigue:

$$B_m = \frac{k_i I_a}{\omega} \quad (4.13)$$

Para tener una medida del parámetro precisa, se tabularon los valores de estas variables y al final se obtuvo un promedio, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Mediciones para determinar B_m

Voltaje de entrada (V)	Corriente consumida (A)	Frecuencia (H)	Frecuencia (rad/seg)	k_i	B_m
1,51	3,57e-02	40	1,5708	0,82492997	0,01874841
2,104	4,03e-02	57,8	2,269806	0,82042254	0,01456646
3,023	4,50e-02	86,2	3,385074	0,81327616	0,01081141
4,02	4,89e-02	117,9	4,629933	0,80489286	0,00850104
5,02	5,12e-02	149,7	5,878719	0,80167125	0,00698206
6,01	5,35e-02	181,2	7,115724	0,799497	0,00601107
7,02	5,52e-02	212,8	8,356656	0,80041586	0,00528716
8,03	5,62e-02	246,3	9,672201	0,79535154	0,00462136
9,03	5,82e-02	277,7	10,905279	0,79601815	0,00424824
10	5,97e-02	308,7	12,122649	0,79535422	0,00391685
11,01	6,04e-02	341,3	13,402851	0,79442799	0,00358009
12	6,44e-02	375,2	14,734104	0,78821216	0,00344513

Se obtuvo como el valor promedio:

$$B_m = 0.00755994 \frac{Nmseg}{rad}$$

Determinación de L_a

Para determinar el valor de L_a se utilizó un osciloscopio especial con la función de medición de inductancia, con este instrumento se midió que el valor de inductancia de armadura es:

$$L_a = 104.3 \mu H$$

En resumen los parametros del Motor DC NAMIKI 22CL-3501PG encontrados son:

1. $R_t = 6\Omega$
2. $L_t = 104.3e - 6 H$
3. $J_m = 3.54e - 3 kgm$
4. $B_m = 7.55994e - 3 \frac{Nm}{rad/s}$
5. $k_b, k_i = 802.872476e - 3 \frac{Nm}{A}$

Estos valores fueron substituidos en las funciones de transferencia del motor vistas en el marco teórico (ecuaciones 3.2 y 3.4).

4.3.3. Simulación del control de velocidad

A partir de los parámetros del motor encontrados se construirán las funciones de transferencia numéricas para simulación del control de velocidad.

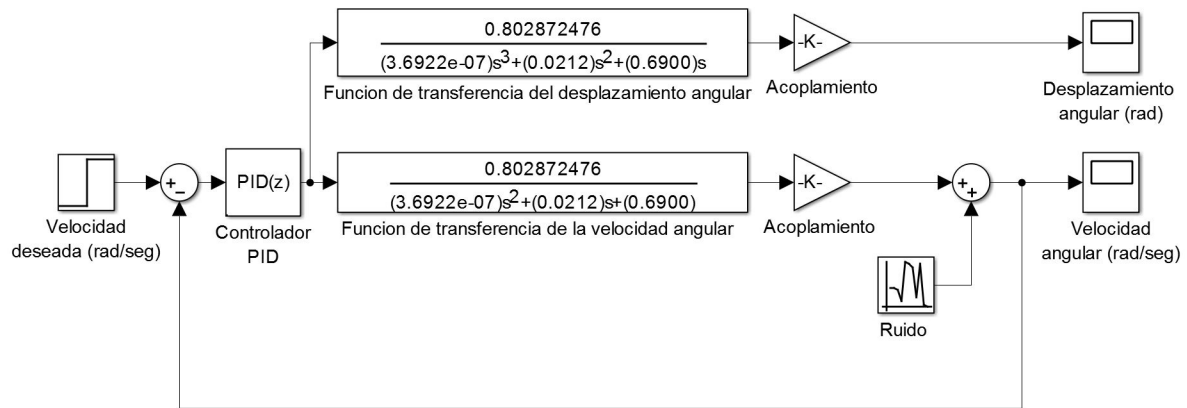


Figura 4.21: Diagrama de bloques diseñado.

En el diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.21 se suma una señal de ruido al sistema para asemejar completamente la simulación a un sistema real.

Valor deseado de velocidad

Para los propósitos de inspección de robot la velocidad del viaje dentro de la tubería debe estar en un rango de 25 RPM a 30 RPM para que el avance del robot permita visualizar el interior de la tubería [15] [6].

Se define para simulación un valor deseado de 28 revoluciones por minuto (3 rad/seg).

Acoplamiento

Para el acoplamiento del valor de velocidad se toman en cuenta las siguientes características:

1. La reducción de la caja de engranes del motor es de 80:1
2. Existe una segunda reducción de engranes que conecta el motor al rotor del robot de 15:55.

La constante de reducción para el acoplamiento del giro del motor es:

$$c = \frac{1}{80(55/15)}$$

La constante describe que hay que dividir los giros totales del motor, entre las reducciones existentes en el acoplamiento del motor. Esta constante también se aplica sobre el valor de desplazamiento angular.

Obtención de los valores PID mediante MATLAB®

Utilizando una herramienta del software MATLAB® (*PID tuning tool*) se pueden obtener los coeficientes de control (kp, ki, kd) una vez que el sistema de control ha sido construido. Se procede de la siguiente manera:

En el bloque del controlador se puede abrir la configuración del bloque "Control PID Discreto" (Figura 4.22) y sintonizar los valores como se muestra en la Figura 4.23.

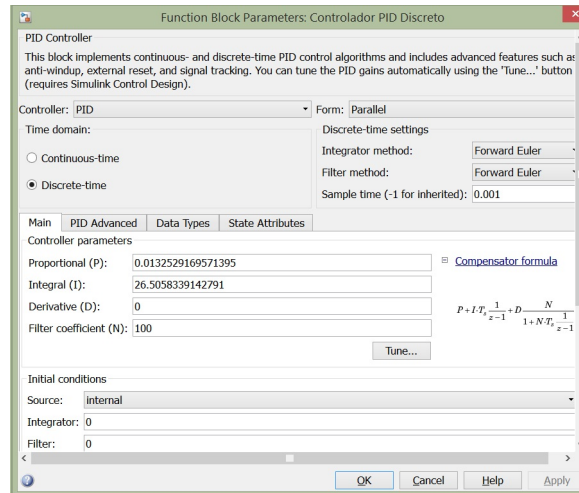


Figura 4.22: Configuración del Bloque PID.

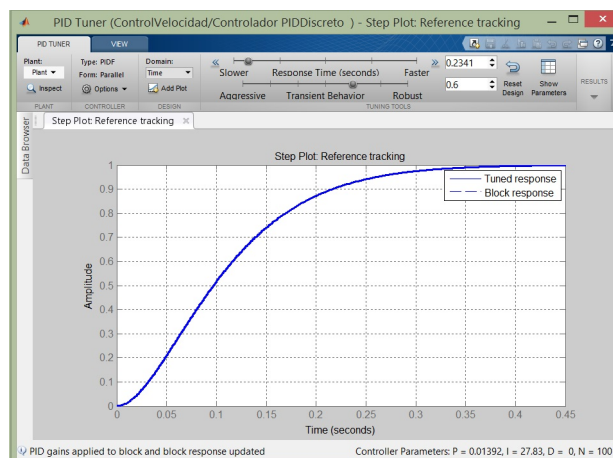


Figura 4.23: Uso de PID tuning tool.

Una vez que la herramienta llega a una convergencia encuentra los parámetros del controlador. Los parámetros para el controlador adecuados según la herramienta son:

$$k_p = 0.0139171389239006$$

$$k_i = 27.8342778478011$$

$$k_d = 0$$

Simulación del controlador

Con todos los parámetros establecidos y calculados se procede a simular durante 10 segundos. La salida del sistema de control en respuesta a una señal escalón es la siguiente (Figura 4.24):

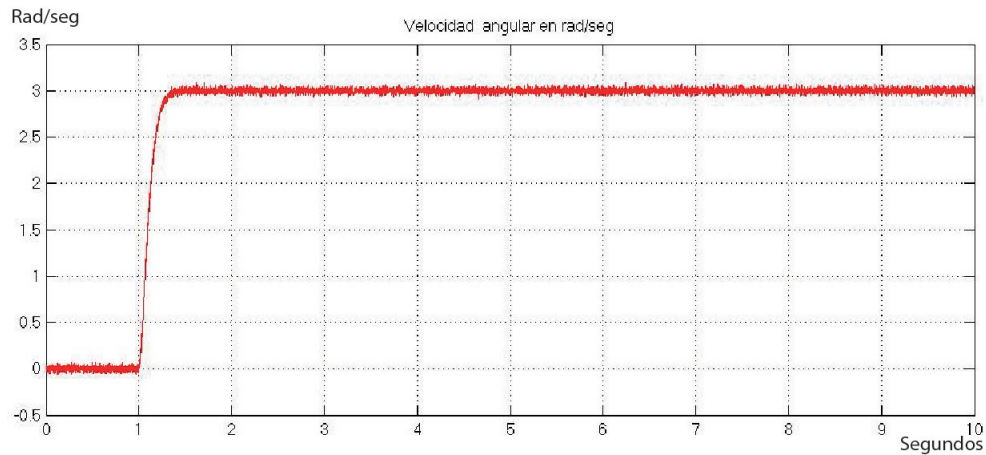


Figura 4.24: Velocidad angular del motor en rad/seg.

La señal de velocidad del motor corresponde al valor deseado de 3 rad/seg sin dejar de considerar el posible ruido eléctrico presente.

El valor de control es directamente proporcional al voltaje insertado al motor. La siguiente gráfica (Figura 4.25) muestra el comportamiento del valor de control:

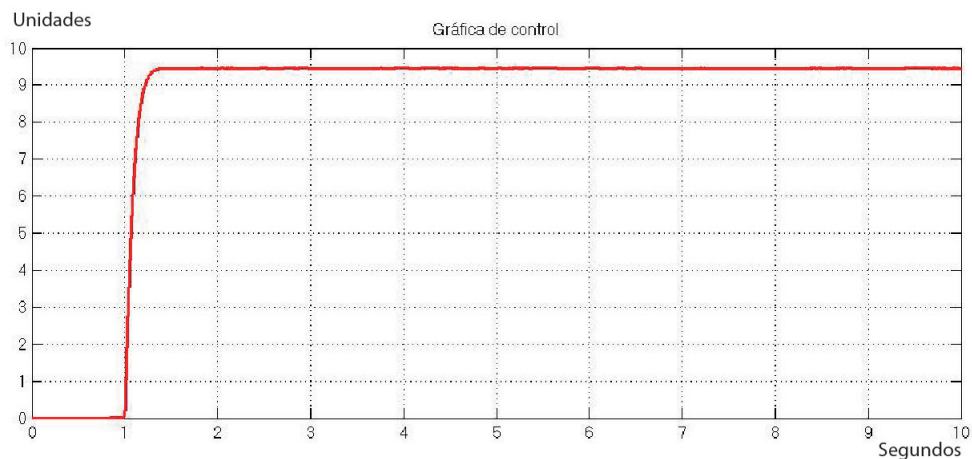


Figura 4.25: Gráfica de control.

De acuerdo a las gráficas anteriores, para mantener una velocidad en el motor de 3 rad/seg se deben insertar aproximadamente 9.5V. Esto comprueba que efectivamente el valor de control es directamente proporcional al voltaje aplicado.

Se observa en la Figura 4.26 la salida del desplazamiento angular:

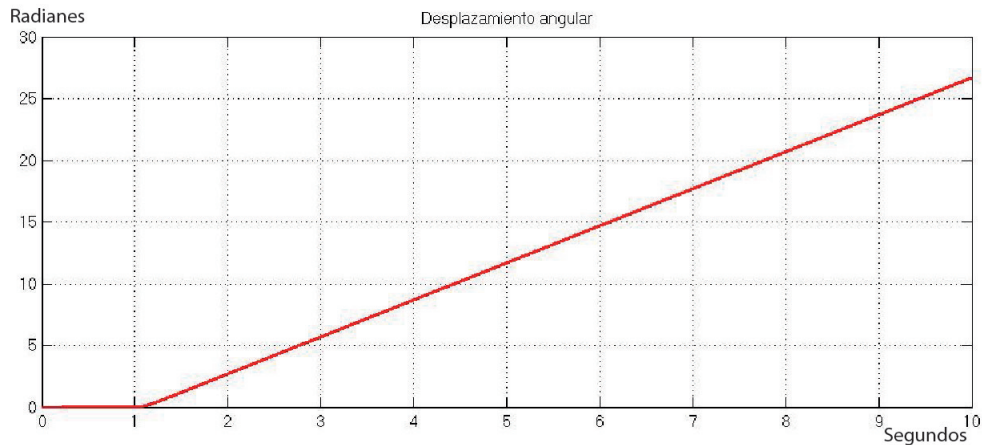


Figura 4.26: Gráfica de desplazamiento angular.

El comportamiento creciente de una señal tipo rampa es lo que se observa en la gráfica de desplazamiento angular. Después de 10 segundos de simulación se midieron 27 radianes, lo que es equivalente a decir que el rotor giró aproximadamente ocho vueltas y media.

Esta gráfica comprueba que con la función de transferencia de lazo abierto para el desplazamiento angular se podrá conocer el ángulo de giro del motor en radianes en cualquier momento para posteriormente calcular el desplazamiento lineal.

Simulación en Simscape Simulink

Para reforzar los resultados de las simulaciones obtenidas con las funciones de transferencia antes simuladas, se utiliza un módulo de Simulink de MATLAB® llamado Simscape. Este módulo contiene modelos de elementos mecánicos y eléctricos que buscan asemejarse en mayor grado a los sistemas reales.

En Simscape se puede construir el mismo sistema de control, con el controlador, acoplamientos y velocidad deseada pero con un modelo de motor de DC definido en este programa.

Para conocer el desplazamiento angular del motor con este nuevo modelo, se integrará la velocidad para obtener el desplazamiento angular.

Se compararán los resultados obtenidos con las funciones de transferencia y este modelo en Simscape para tener bases más sólidas a la hora de implementar el modelo real. El diagrama de bloques construido para el sistema de control es el de la Figura 4.27.

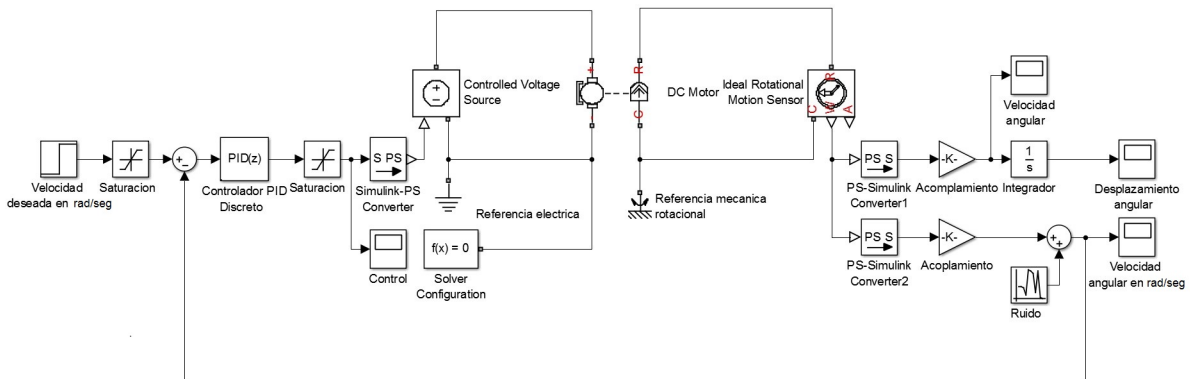


Figura 4.27: Diagrama de bloques para simulación con el modelo del motor de Simscape.

El “modelo DC Motor” necesita los parámetros del motor para su configuración. Los parámetros del motor utilizado se insertan en el modelo como se observa en la Figura 4.28:

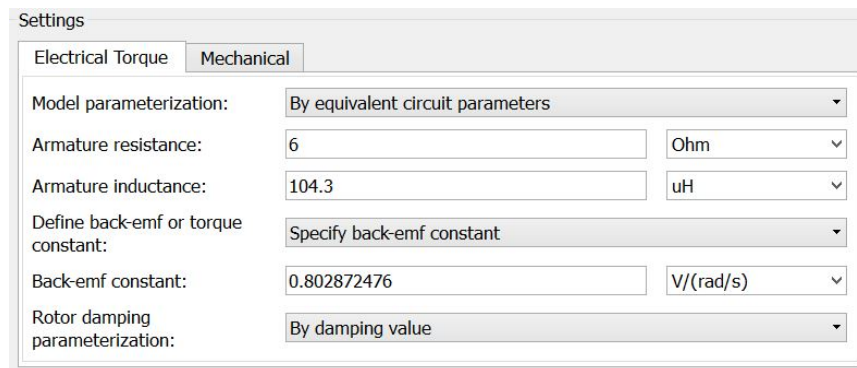


Figura 4.28: Parámetros del motor.

El controlador, el acoplamiento y la velocidad deseada presentan los mismos valores que la simulación con las funciones de transferencia. Los resultados de la simulación con este modelo en Simscape son los siguientes:

La gráfica de velocidad deseada para 3 rad/seg (Figura 4.29) se mantuvo sobre este valor de igual manera sin dejar de considerar el ruido eléctrico.

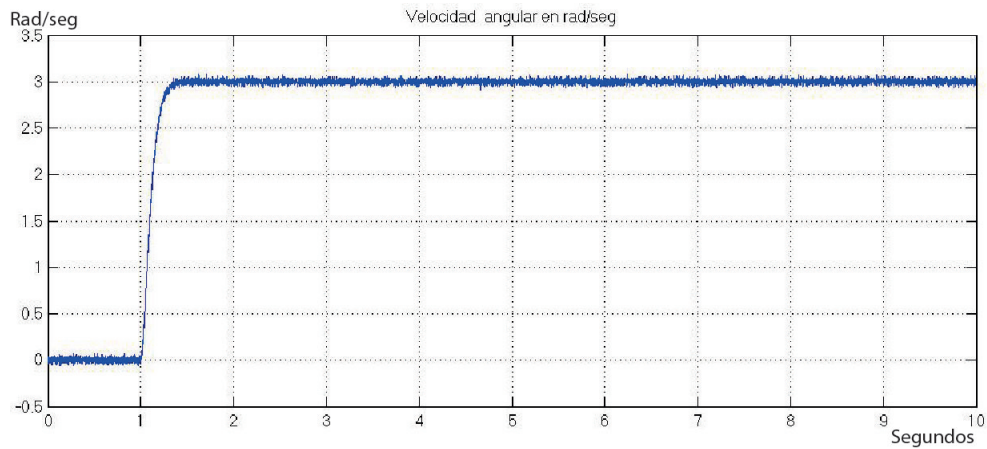


Figura 4.29: Velocidad angular del motor en rad/seg.

La señal de control se aproximó a un valor de 9.5V para que el motor a la salida se mantuviera con 3 rad/seg como se observa en la Figura 4.30.

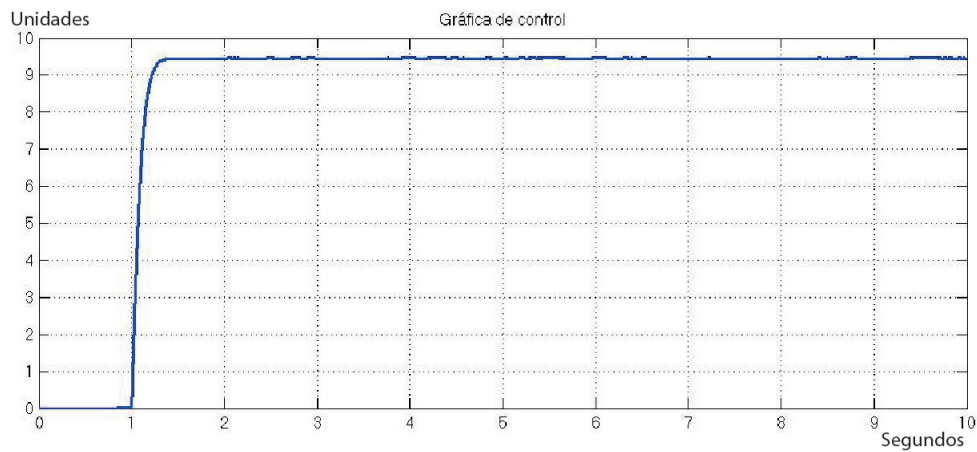


Figura 4.30: Gráfica de control.

Al realizar la integración del valor de velocidad se obtuvo una gráfica creciente tipo rampa (Figura 4.31). El valor después de simular 10 segundos fue de 27 rad equivalente a que el rotor gire aproximadamente 8.5 vueltas.

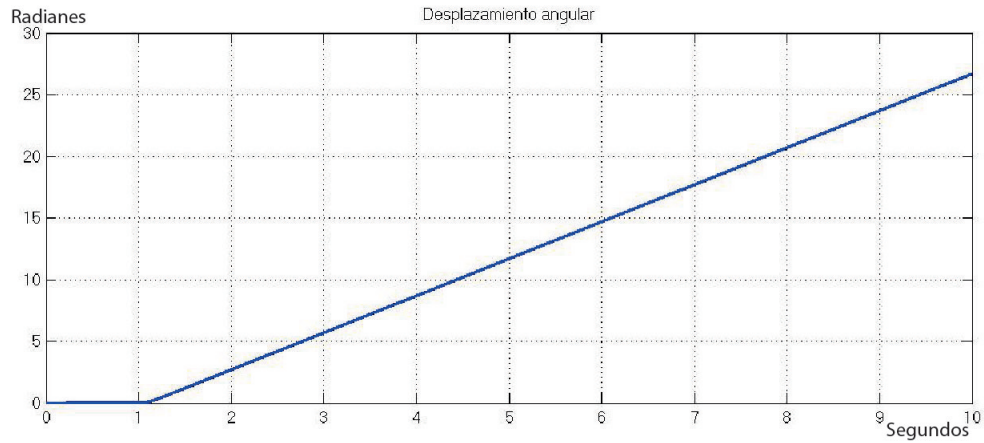


Figura 4.31: Gráfica de desplazamiento angular.

4.3.4. Simulación del desplazamiento lineal

Introduciendo a la ecuación 4.2 el valor de desplazamiento angular calculado en las simulaciones anteriores, es posible simular el posible desplazamiento lineal del prototipo introduciendo un ángulo para las llantas $\alpha = 10^\circ$.

El diagrama de bloques se plantea como se muestra en la Figura 4.32.

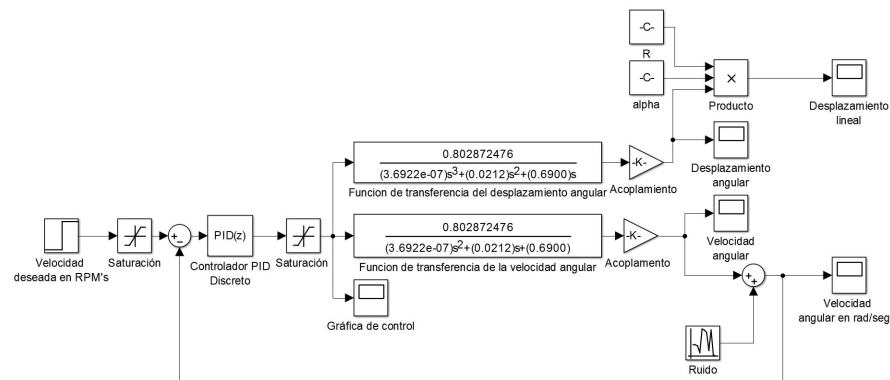


Figura 4.32: Diagrama de bloques con cálculo del desplazamiento lineal.

En el diagrama de bloques se observa que se ha agregado la fórmula para el cálculo del desplazamiento lineal. La gráfica resultante que describe este desplazamiento se muestra en la Figura 4.33.

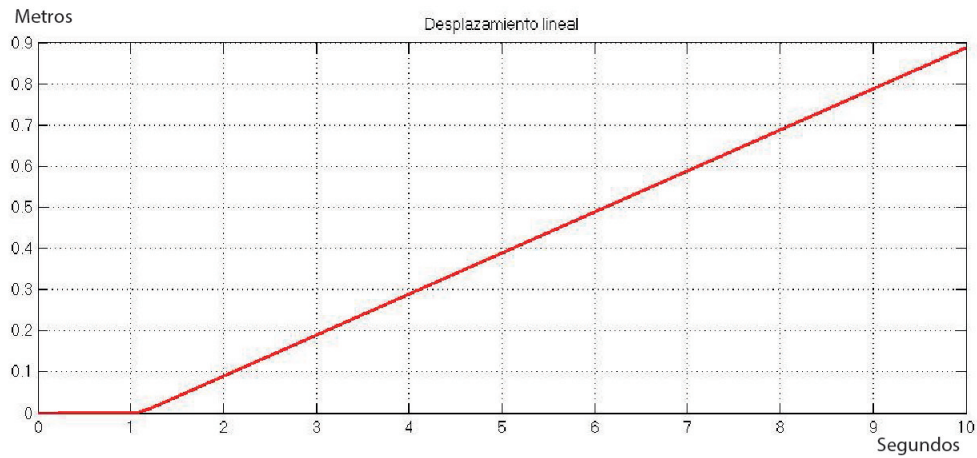


Figura 4.33: Gráfica de desplazamiento lineal del robot.

La simulación indica que después de 20 segundos que gira el rotor a 3 rad/seg el robot avanza 0.9 metros. Esta función es de igual manera linealmente creciente que depende totalmente del valor de desplazamiento angular del rotor. Para comprobar que la respuesta tiene el mismo comportamiento en un tiempo mayor, se simula para un tiempo de 1 minuto. La respuesta es la mostrada en la Figura 4.34:

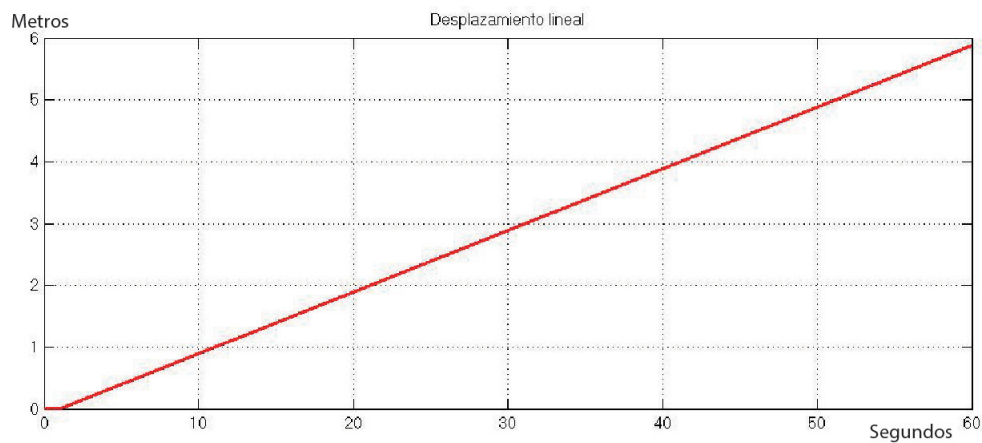


Figura 4.34: Gráfica de desplazamiento del robot después de un tiempo de 1 minuto.

Según el resultado obtenido, después de un tiempo de 1 minuto el robot sigue su marcha desplazándose a través de la tubería recorriendo una distancia total de 6 metros. Tomando en cuenta que la simulación del modelo se trató de aproximar en mayor grado al sistema real, se prevee que este sistema de medición de desplazamiento lineal será eficiente y correcto al momento de implementar el modelo real.

4.3.5. Diseño del controlador digital y su implementación en un sistema embebido

En esta sección se detalla el diseño del controlador digital embebido que utiliza el robot para implementar la función de transferencia del control PID para el motor, así como la función de transferencia para obtener el desplazamiento angular e implementar el sistema de navegación basado en odometría.

Controlador PID digital e implementación

Para la implementación del controlador digital se deben obtener las ganancias para así se poder construir el controlador PID digital con la ecuación siguiente, obtenida de las ecuaciones 3.27, 3.28, 3.29 y 3.30:

$$u(n) = u(n-1) + \frac{2TK_p + K_iT^2 + 2K_d}{2T}e(n) + \frac{K_iT^2 - 2K_pT - 4K_d}{2T}e(n-1) + \frac{2K_d}{2T}e(n-2) \quad (4.14)$$

Donde la salida $u(n)$ debe ser traducida a una señal de PWM de alta frecuencia con ancho de pulso proporcional al valor de control, esto para que el motor la interprete como a una analógica [18]. La correspondiente señal de entrada debe ser programada con respecto a la referencia de velocidad angular que debe reflejar el motor a su salida. Para implementar el controlador, se utiliza el siguiente diagrama de flujo de la Figura 4.35.

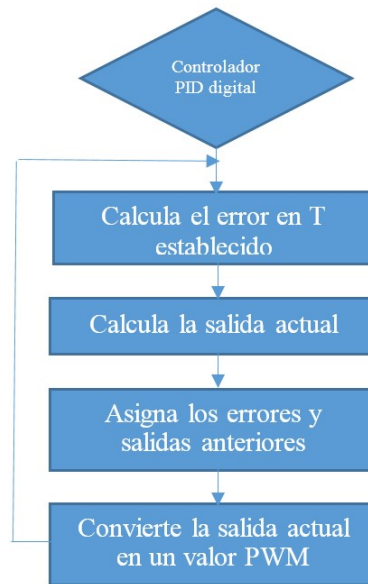


Figura 4.35: Diagrama de flujo del controlador PID digital.

4.3.6. Implementación de la función de transferencia del desplazamiento angular digital

Como se mencionó anteriormente, la función de transferencia del desplazamiento angular con respecto al voltaje del motor de corriente directa, está dada por:

$$\frac{\theta(s)}{V_{in}(s)} = \frac{k_i}{J_m L_t s^3 + (J_m R_t + B_m L_t) s^2 + (B_m R_t + k_b k_i) s} \quad (4.15)$$

Donde:

1. $R_t = 6\Omega$
2. $L_t = 104.3e - 6 H$
3. $J_m = 3.54e - 3 kgm$
4. $B_m = 7.55994e - 3 \frac{Nm}{rad/s}$
5. $k_b, k_i = 802.872476e - 3 \frac{Nm}{A}$

Por tanto:

$$\frac{\theta(s)}{V_{in}(z)} = \frac{0.802872476}{(3.6922e - 07)s^3 + 0.0212s^2 + 0.6900s} \quad (4.16)$$

Al aplicar la transformada bilineal de Tustin, mediante MATLAB® se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\theta(z)}{V_{in}(z)} = \frac{-(8.99e - 6)z^{-3} - (2.697e - 5)z^{-2} - (2.697e - 5)z^{-1} - (8.991e - 6)}{z^{-3} - 1.035z^{-2} - 0.8677z^{-1} + 0.9029} \quad (4.17)$$

Con T=0.001.

La representación en ecuación de diferencias es:

$$\theta(n) = \frac{-(8.991e-6)V_{in}(n)-(2.697e-5)V_{in}(n-1)-(2.697e-5)V_{in}(n-2)-(8.991e-6)V_{in}(n-3)+(0.8677)\theta(n-1)+(1.035)\theta(n-2)-\theta(n-3)}{0.9029} \quad (4.18)$$

Para implementar la transferencia del desplazamiento angular, se utiliza el siguiente diagrama de flujo de la Figura 4.36.

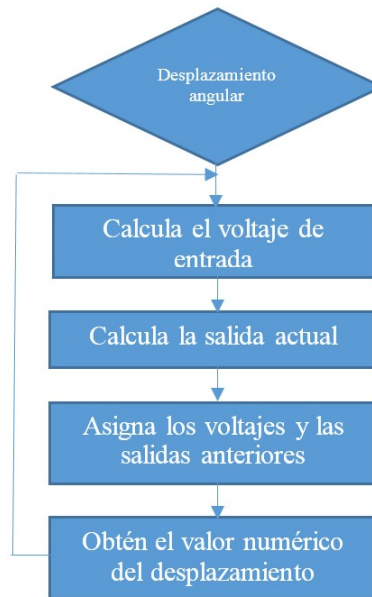


Figura 4.36: Diagrama de flujo del controlador PID digital.

4.3.7. Sistema de navegación

Para la implementación del sistema de navegación los datos que deben ser enviados hacia el robot son la magnitud en metros de cada segmento lineal de trayectoria y su dirección. Esta información está codificada en una sola cadena de caracteres como la que se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Cadena de caracteres enviada al robot.

'3'	'f'	'3'	'l'	'5'	'b'	'5'	'u'	'10'	'f'	'5'	'r'	'5'	'd'	'5'	'l'
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

La cadena de caracteres debe ser leída en pares. El primer parámetro es la magnitud de cada segmento lineal de trayectoria. El segundo parámetro es su dirección. Este valor está representado por un solo carácter ASCII que el prototipo interpreta como se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Interpretación de los caracteres recibidos para el sistema de navegación.

Carácter	Dirección
'f'	Adelante
'b'	Atrás
'r'	Derecha
'l'	Izquierda
'u'	Arriba
'd'	Abajo

Cada una de estas direcciones se muestran en el plano tridimensional de la Figura 4.37.

Cada carácter de dirección debe ser decodificado por el sistema embebido del robot para conocer la dirección que se debe seguir.

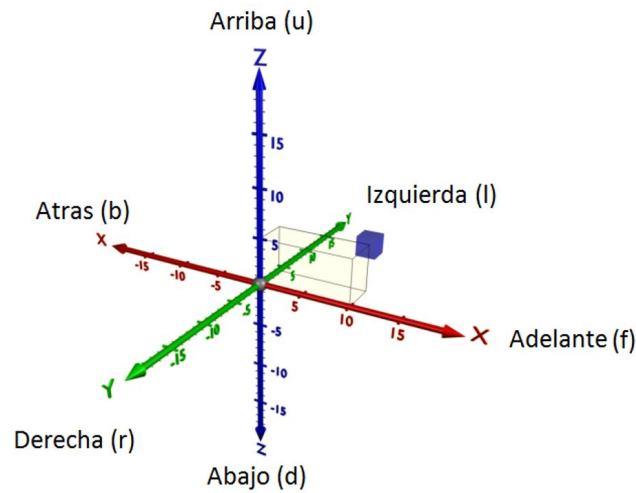


Figura 4.37: Direcciones mostradas en el plano tridimensional.

El sistema de navegación se diseñó para que el robot viaje en un sistema de coordenadas absoluto. Donde la posición (0,0,0) en el espacio tridimensional corresponde al punto de inicio de la trayectoria. La cadena de caracteres mostrada en la Tabla 4.5 contiene la información de magnitud y dirección de una trayectoria conformada por 8 segmentos lineales con diferente dirección. Si se codifica la información se tendrían las instrucciones para el robot mostradas en la Tabla 4.7:

Tabla 4.7: Decodificación de carácter y coordenadas para el sistema de navegación

Carácter	Dirección	Decodificación, coordenadas (x,y,z)
'f'	Adelante	[1,0,0] (X+)
'b'	Atrás	[-1,0,0] (X-)
'r'	Derecha	[0,-1,0] (Y-)
'l'	Izquierda	[0,1,0] (Y+)
'u'	Arriba	[0,0,1] (Z+)
'd'	Abajo	[0,0,-1] (Z-)

Tabla 4.8: Ejemplo de una cadena de caracteres y su significado codificado para el sistema de navegación.

Magnitud (m)	Carácter	Dirección	Vector de dirección
3	'f'	Adelante	[1,0,0] (X+)
3	'l'	Izquierda	[0,1,0] (Y+)
5	'b'	Atrás	[-1,0,0] (X-)
5	'u'	Arriba	[0,0,1] (Z+)
10	'f'	Adelante	[1,0,0] (X+)
5	'r'	Derecha	[0,-1,0] (Y-)
5	'd'	Abajo	[0,0,-1] (Z-)
5	'l'	Izquierda	[0,1,0] (Y+)

Cuando el valor de posición actual y el valor de posición objetivo coinciden, se inicia el recorrido del siguiente segmento lineal hasta recorrer por completo la trayectoria propuesta.

4.3.8. Simulación del sistema de navegación

En la simulación del sistema de navegación el valor de posición actual se toma como una variable creciente en el tiempo y se comparará con el valor objetivo. La simulación se realizó en MATLAB® definiendo los parámetros de amplitud y dirección para cada segmento de la trayectoria mostrados en la Figura 4.38. Los resultados de la trayectoria trazada por los parámetros definidos en la simulación se pueden observar en la Figura 4.38.

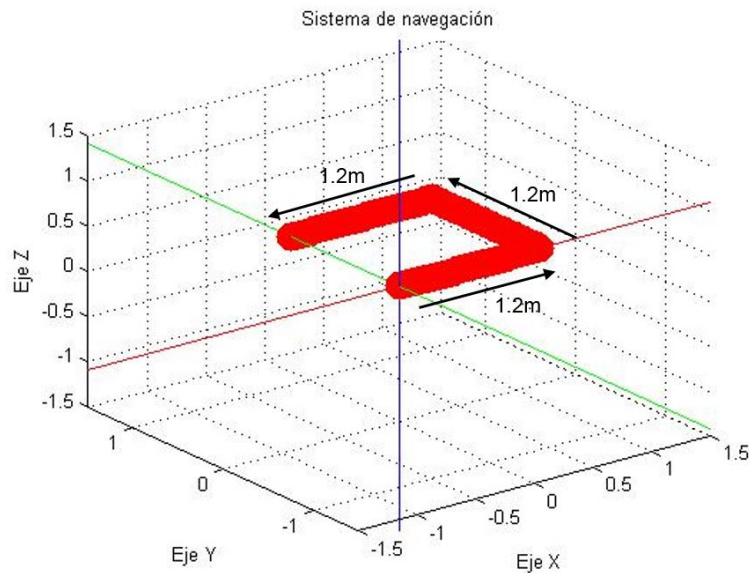


Figura 4.38: Trayectoria con magnitudes y direcciones.

En la figura anterior se observa la trayectoria trazada por el robot al utilizar el sistema de navegación diseñado. La magnitud y dirección de cada segmento de la trayectoria se cumple según el plano mostrado en la gráfica tridimensional. Cuando el valor de posición actual se empata con el valor de posición objetivo se observa en la gráfica que se inicia el recorrido del siguiente segmento y se cambia de dirección. Los resultados de simulación comprueban que el sistema de navegación diseñado es correcto y podrá ser implementado en el sistema real para la implementación de la odometría.

4.4. Plataforma experimental

La plataforma experimental para las pruebas del prototipo tiene las siguientes especificaciones:

1. Tubo de PVC sanitario alcantarillado de 10 pulgadas serie 25.
2. Conexiones tipo T 90° de 10 pulgadas.
3. Conexiones tipo codo 90° de 10 pulgadas.

Restricciones del ambiente

1. Tubería libre de fluido.
2. Tubería con inicio y fin abierto para facilitar la exploración.

Se proponen dos trayectorias diferentes para la plataforma experimental. La primera es una plataforma con una conexión tipo codo con se muestra en la Figura 4.39.

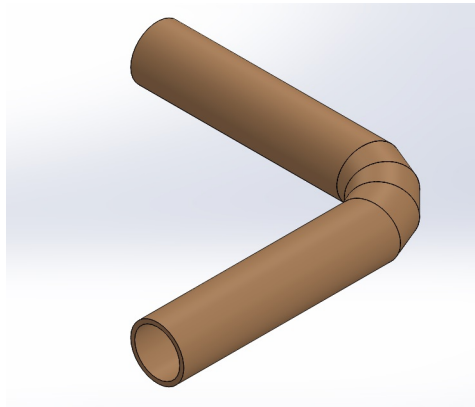


Figura 4.39: Plataforma experimental con una conexión tipo codo.

La segunda plataforma es una trayectoria con una conexión tipo Tee (Figura 4.40).

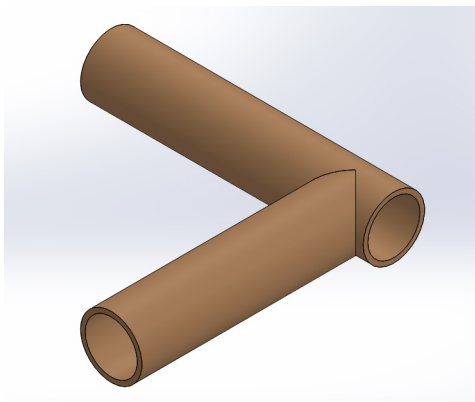


Figura 4.40: Plataforma experimental con una conexión tipo Tee.

En esta sección se describen las diferentes partes del dispositivo y la forma en que se constituye, así como su funcionalidad y la secuencia para ensamblar sus diversas partes. Se comienza con la prueba de la primera versión construida en el entorno de la plataforma experimental y el rediseño necesario para una mejor adaptación del prototipo a las condiciones reales de la plataforma.

5.1. Comparación de dimensiones entre el dispositivo y la tubería

Con la finalización de la construcción mecánica de la primera versión del prototipo se realizaron las primeras pruebas, las cuales consistieron principalmente en verificar que el robot fuera capaz de atravesar las conexiones con el mínimo de problemas.

La experimentación mostró que la sección tres es la que presenta mayor dificultad durante el trayecto, pues el mecanismo de acoplamiento se comprime lo suficiente para que el robot entre y se ajuste en tubería recta, en cambio, esta compresión no es suficiente para desplazarse en las conexiones codo y Tee.

Como se observa en la Figura 5.1 la forma en la que está construida la conexión codo es a partir de secciones de tubos rectos unidos con pegamento, esto crea dos aristas a lo largo de la conexión, dichas aristas no se tuvieron contempladas dentro del diseño inicial del robot, se consideraron codos curvos, es decir, donde la superficie de la conexión es continua.

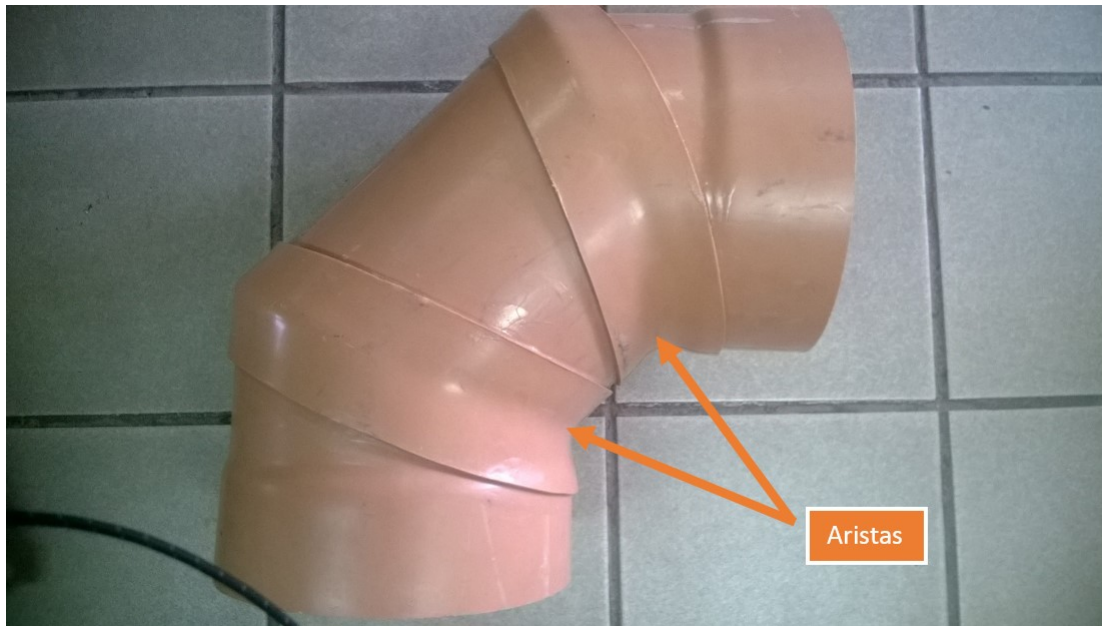


Figura 5.1: Conexión real Codo.

Cuando se introduce el robot dentro de esta conexión, las secciones 1 y 2 del robot presentan pequeñas dificultades para navegar dentro del codo, sin embargo ninguna lo suficientemente grande para impedir su travesía, en cambio, cuando la sección 3 del robot, se presenta el mayor de los problemas.

En la Figura 5.2 podemos observar que los apoyos del robot en la tubería en el plano horizontal se torsiona respecto a la dirección de movimiento, lo que ocasiona que por un lado, como se muestra en la Figura 5.2 la llanta en el lado derecho de la fotografía, se encuentra con las aristas de la tubería antes mencionadas mientras que la llanta del lado izquierdo en la fotografía necesita expandirse un poco más debido a la misma arista, ocasionando que la base de esta llanta haga contacto con la superficie de la tubería aumentando las fuerzas contrarias al movimiento impidiendo de esta manera la circulación de robot.

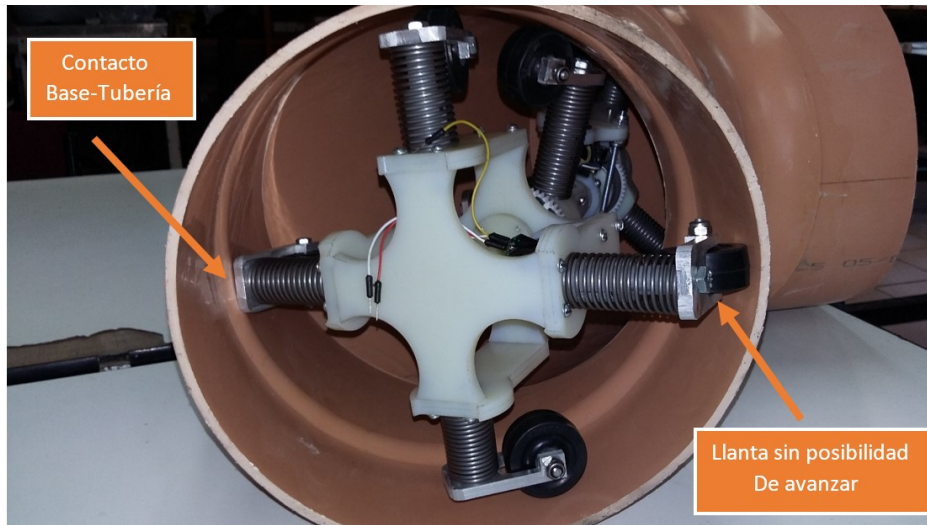


Figura 5.2: Prueba del robot en Codo.

La conexión Tee presenta similitudes de construcción, en la Figura 5.3 se puede observar que dicha tubería esta construida por medio de tubo recto incrustado en otro, y sujeto con pegamento. También podemos ver que existen dos reducciones de diámetro donde el tubo se encuentra adherido.



Figura 5.3: Conexión real Tee.

Se llegó a la conclusión de que fue aplicada una cantidad considerable de calor para lograr deformar la tubería y lograr construir la conexión con esta forma, resultando en dicha reducción en el diámetro interior. En la Figura 5.4 se puede ver de manera más detallada la deformación.



Figura 5.4: Acercamiento a la reducción de diámetro.

Al introducir el robot dentro de esta conexión, sucede algo similar que en el codo, donde la llanta se encuentra con esta reducción en el diámetro de la tubería, impidiendo el avance y acoplamiento a la siguiente sección de la tubería.

Durante otra de las experimentaciones, en la prueba del robot en tubería recta, se encontró que durante el trayecto, el cuerpo completo del robot rota respecto al eje de movimiento debido a la fuerza de torsión ejercida por el rotor y transmitida al resto del robot, es decir, si se introduce el robot con una orientación vertical, llega un punto en el cual dicha orientación cambia a horizontal como se muestra en la Figura 5.5.

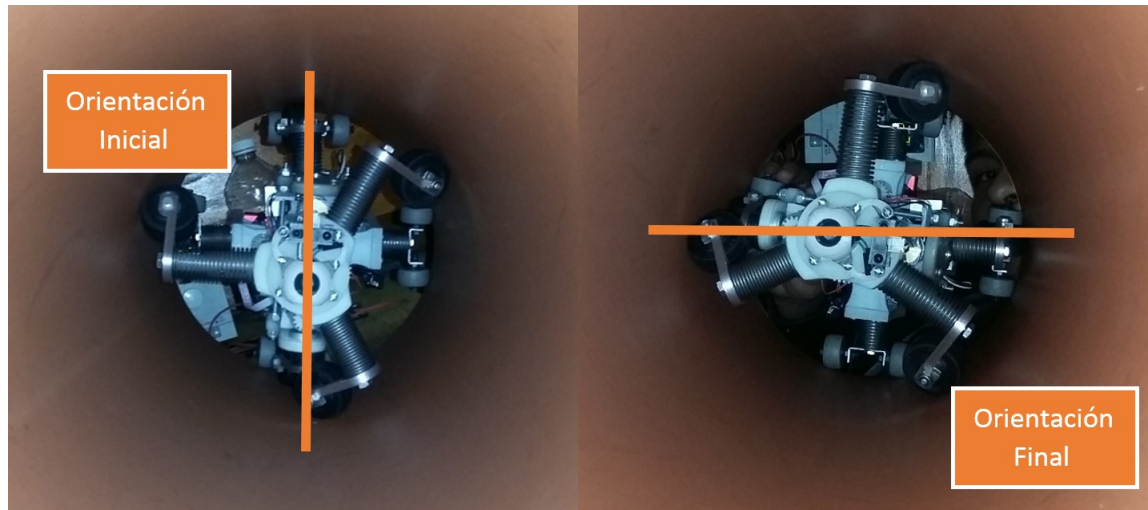


Figura 5.5: Cambio de orientación del robot.

5.2. Rediseño

Debido a los inconvenientes presentados durante las pruebas de la primera versión en la plataforma experimental, fue necesario hacer un rediseño en el mecanismo de acoplamiento de la sección 3 con el objetivo de facilitar su navegación y evitar estancamientos.

La principal necesidad es hacer que la llanta mantenga contacto con la tubería en la mayoría del trayecto, evitando que el soporte donde se encuentra sostenida la llanta entre en contacto con la superficie interna en cualquier punto del recorrido a través de las conexiones, pues en tubería recta no presento ningún problema.

Para esto, se propone cambiar la forma en la cual se encuentran sostenidas las llantas de la sección 3, diseñando una base nueva, así como reducir el diámetro mínimo a la que pueden llegar los émbolos que sostienen estas bases, la nueva base se puede ver en la Figura 5.6.

Con esta nueva base, se tiene la seguridad de que en ningún momento existirá algún tipo de contacto entre la base y la tubería, ya que al tener una llanta de cada lado la base queda completamente protegida.

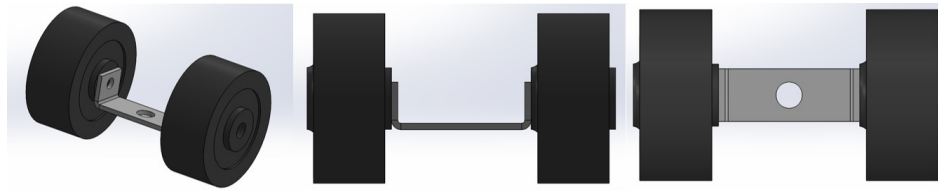


Figura 5.6: Nueva base para las llantas.

Con esta nueva base, y en conjunto con un cambio en la longitud del embolo que sostiene la base, se puede llegar a un diámetro mínimo, el cual determina la libertad de acoplamiento que tiene el robot dentro de la tubería, midiendo este diámetro como se muestra en la Figura 5.7a, se puede ver que el diámetro mínimo es de 232.56 mm, por lo que deja una variación de alrededor de 1cm.

Para aumentar aún más esta diferencia, se cambia el diámetro de las llantas (únicamente para la sección 3), de un diámetro de 1.625 pulgadas a un diámetro de 30 mm, como se observa en la Figura 5.7b. Con esto, el diámetro mínimo disminuye a 219.60 mm, por lo que ahora la variación es de 2 cm.

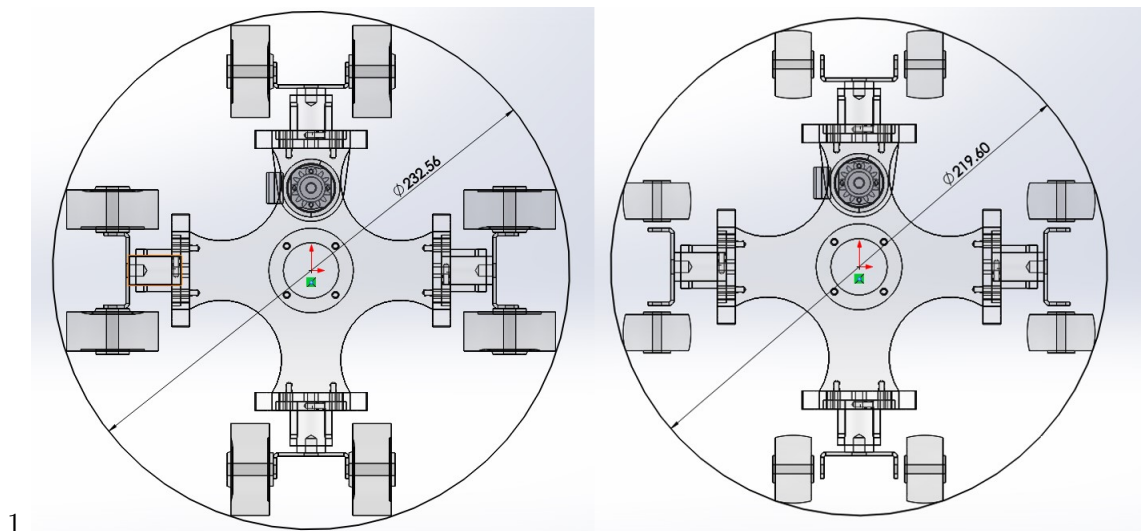


Figura 5.7: Diámetros mínimos del robot.

Una vez realizados estos cambios en la estructura física, se volvió a probar el robot de manera manual dentro de las conexiones, como se puede observar en la Figura 5.8, con las nuevas bases y el cambio de diámetro de las llantas, el robot presento menos problemas para navegar dentro de las conexiones codo y Tee, en la imagen se observa que las llantas de la de sección 3 pierden contacto en algunos puntos, esto facilita el poder cruzar la tubería, pues disminuye la fricción, y la disposición de las llantas ayuda a evitar que el robot se atore dentro de la conexión.

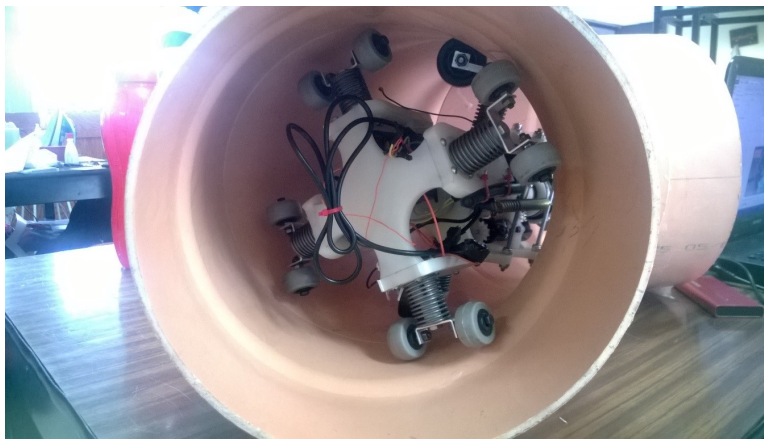


Figura 5.8: Prueba del robot después del cambio de bases y llantas.

5.3. Descripción del ensamblaje final

Con las modificaciones para la adaptación del prototipo a la plataforma real se obtuvo la última versión de la estructura mecánica que será descrita a continuación.

5.3.1. Sección 1

Esta sección soporta la parte central por un eje que se conecta al rotor por medio de rodamientos. Este eje central se conecta al rotor por medio de rodamientos axiales para generar el movimiento de rotación. Los rodamientos se sujetan por retenes para evitar el desplazamiento del rotor. El rotor cuenta con una geometría especial para enroscar tres brazos en sus extremos. La Figura 5.9 muestra este ensamblaje:

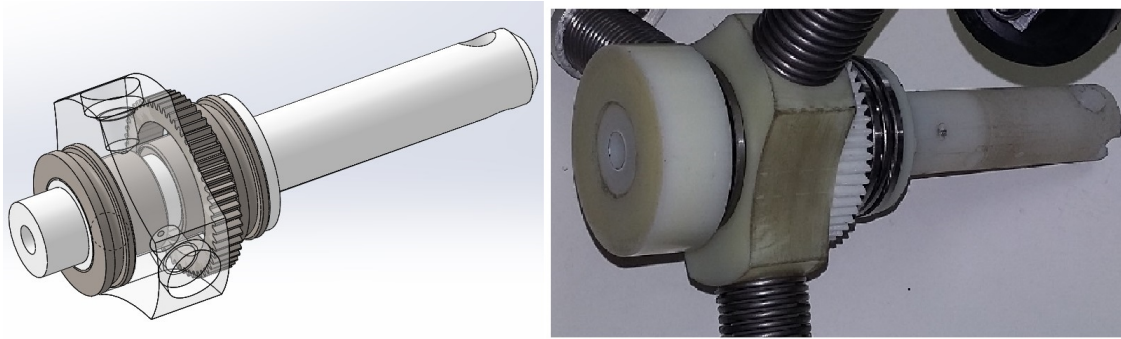


Figura 5.9: Ensamblaje de la parte central.

Cada uno de los brazos delanteros del dispositivo se conecta a el rotor por medio de un roscado y cada brazo contiene 5 piezas principales: la botella, el embolo, la llanta, la base de la llanta y el resorte de compresión, en la Figura 5.10 se observan estas piezas.

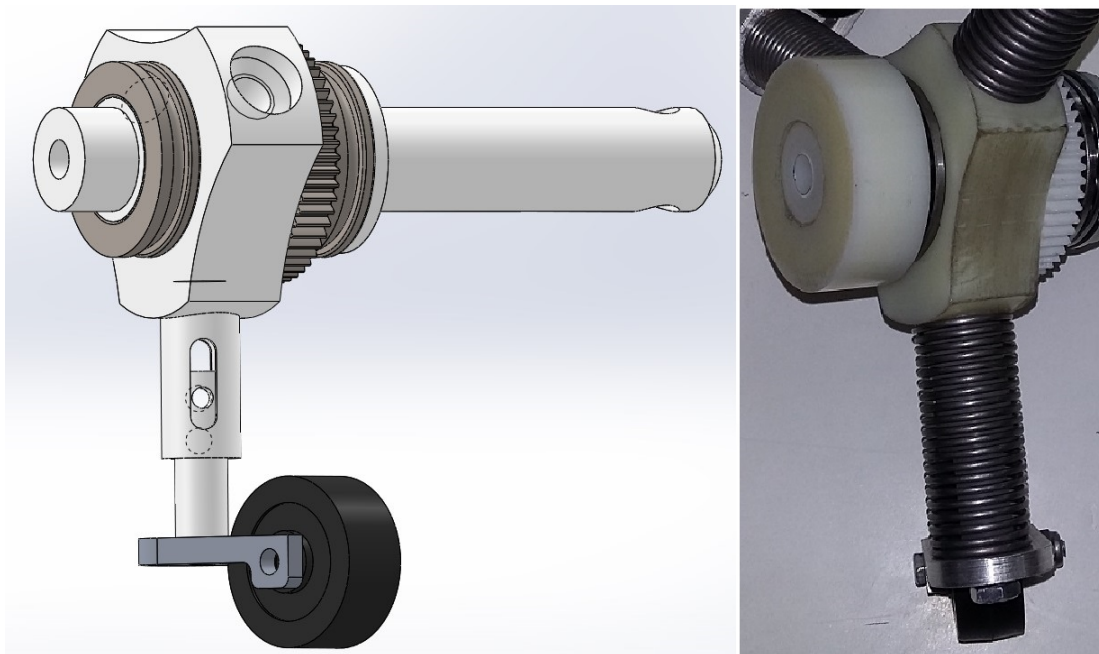


Figura 5.10: Brazo conectado al rotor.

Para evitar que la conexión entre la botella y el buje este rotando sobre su centro se colocó una ranura en la botella y un barreno para un prisionero en el buje, de esta manera al colocar el prisionero de largo igual a el diametro de la botella se evita que el buje junto con el resto de el brazo rote.

La base de la llanta se conectó al buje con un tornillo y una rondana de presión para poder colocar la base en la dirección específica de las llantas y asi asegurar el avance en forma de tornillo. Las llantas y sus bases se conectaron con tornillos y tuercas.

En la parte delantera se colocó una pieza con roscado interior como una tuerca pero sin acabado hexagonal para poder dar soporte a los rodamientos axiales del rotor.

En esta pieza se fija la cámara y el sensor infrarrojo con la ayuda de una pieza diseñada para sujecion de estos dos elementos, esto como se observa en la Figura 5.11.

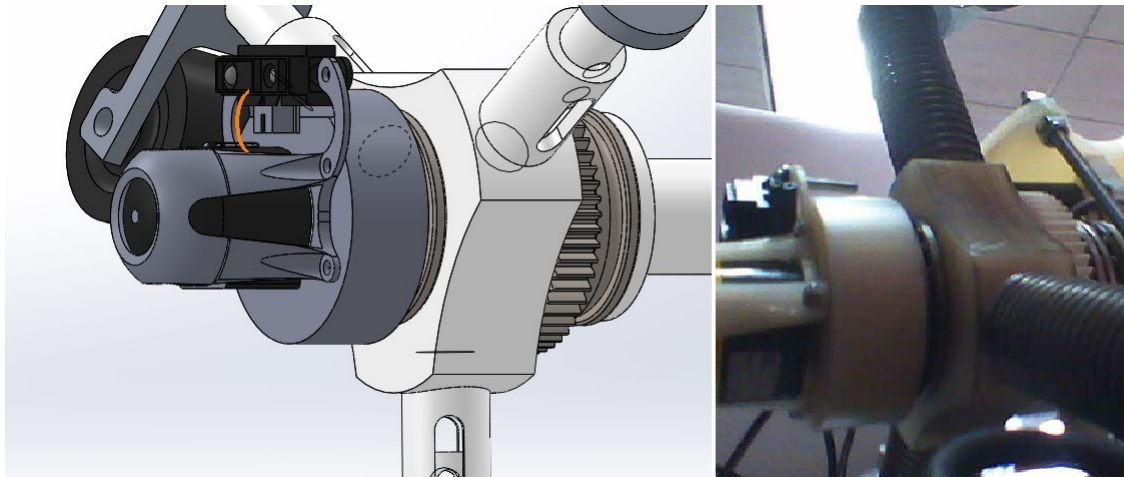


Figura 5.11: Pieza tipo tuerca y base para camara y sensor infrarrojo.

En la parte trasera se colocó una pieza “Reloj de arena” para poder fijar ambos motores con respecto al eje central, dos tapas para dar firmeza y estabilidad a dicha parte y soportes para la parte delantera de los motores con respecto a la pieza “Reloj de arena”, esto como se observa en la Figura 5.12.

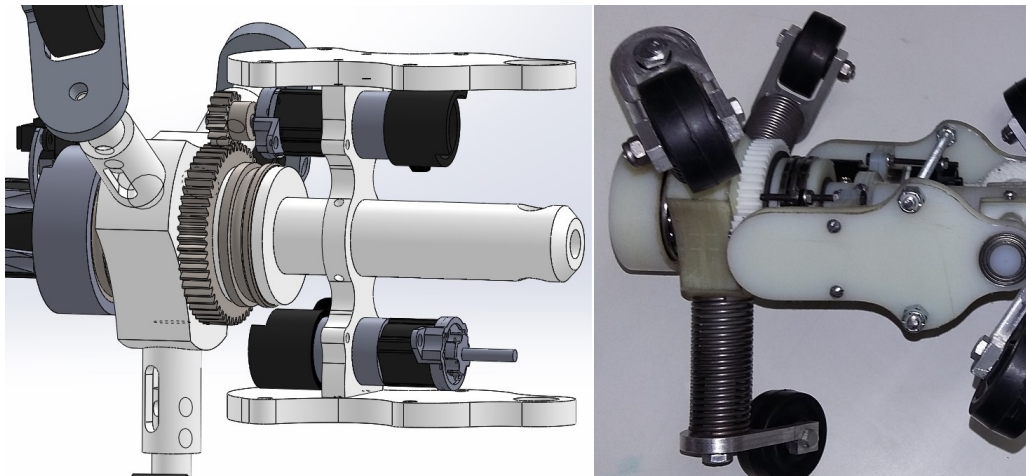


Figura 5.12: Anclaje de motores al eje central .

En la figura anterior también se observa el piñón que se conecta con el motor y la pieza rotor, este juego de engranes son los encargados de transmitir el movimiento del motor a dicha pieza y generan la tracción del dispositivo.

Paralelo a la pieza “Reloj de arena” se colocaron los ejes transversales por donde rota toda la sección 1 al llegar a una conexión (Figura 5.13), se colocaron rodamientos en la conexión de estos ejes transversales con las tapas laterales, y un par de engranes cónicos los cuales harán girar la sección 1.

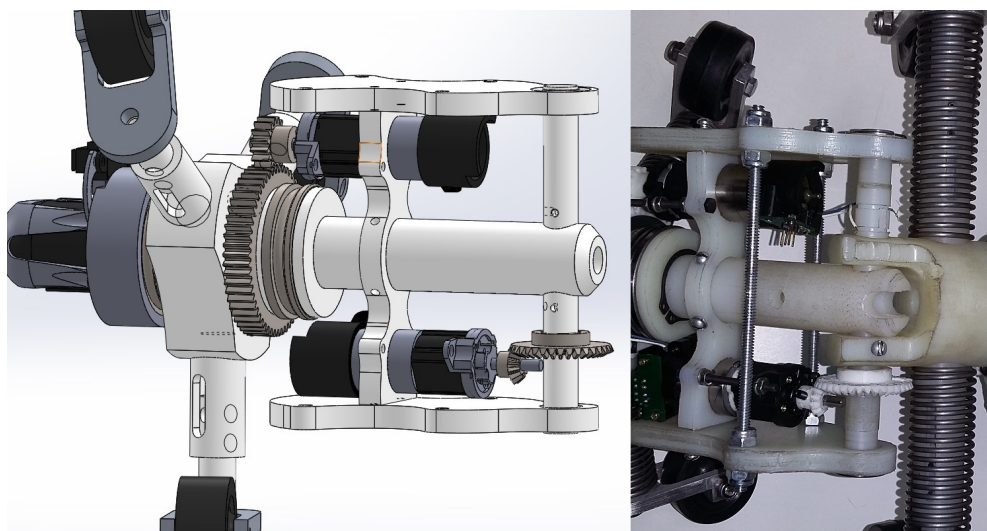


Figura 5.13: Anclaje de motores al eje central.

5.3.2. Sección 2 y su conexión con la sección 1

La sección 2 tiene dos brazos que sujetan unas bases para ruedas locas, por lo que no se utiliza una rondana de seguridad para su ensamblaje, y al igual que los embolos de la sección 1, estos se enroscan con la ayuda de dos barrenos roscados en la pieza “C de rotación,” (Figura 5.14).

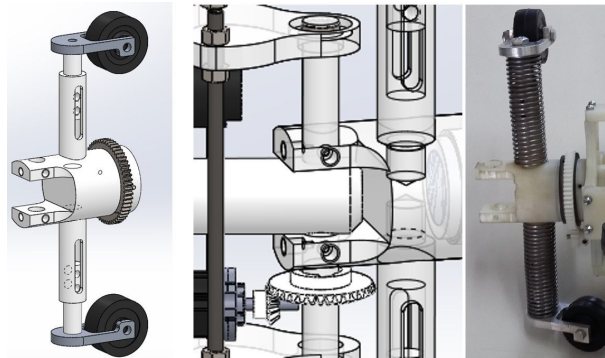


Figura 5.14: Brazos de la sección 2 anclados a la pieza “C de rotación,”.

5.3.3. Conexión entre sección 2 y 3

La sección dos y tres se conectan por medio de un buje y un rodamiento. El movimiento de las dos secciones delanteras es realizado con un motor anclado en la sección tres por medio de un par de engranes, donde el engrane mayor está fijo en la sección 2 (Figura 5.15).

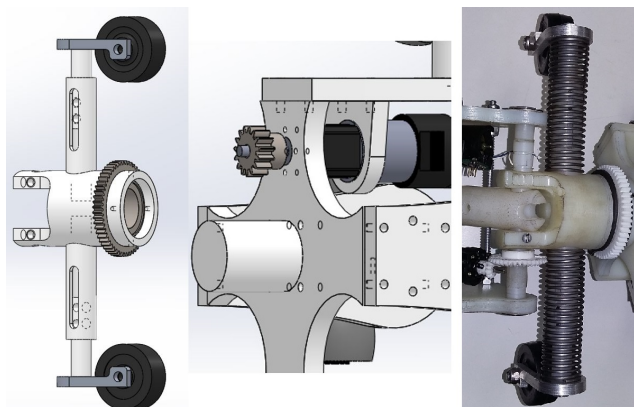


Figura 5.15: Conexión entre la sección 1 y sección 2.

La sección tres tiene cuatro tapas laterales y dos opuestas, en una de estas últimas se fija el buje para la sección 2, y con la ayuda de un pieza de apoyo conectado a una tapa lateral se sostiene último motor, este espacio está vacío, ya que en este se colocan los circuitos de control (Figura 5.16).

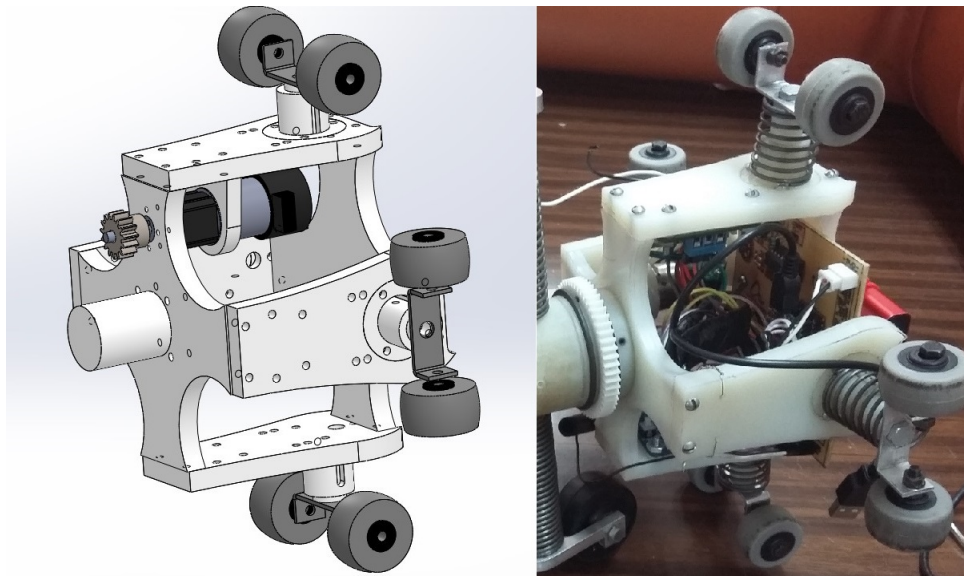


Figura 5.16: Conexión entre la sección 1 y sección 2.

Los brazos de la sección 3 se sujetan a las bases mediante tornillo y tuerca a diferencia de las demás brazos que están sujetos por una base roscada. Las llantas de esta sección son de un diámetro menor al de las demás llantas del robot. En la Figura 5.17 se observa el detalle de las bases y las llantas traseras.

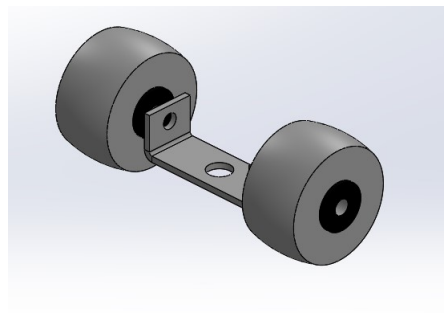


Figura 5.17: Base y llantas de la sección 3.

5.3 Descripción del ensamblaje final

La estructura mecánica final del prototipo se observa en la figura 5.18.

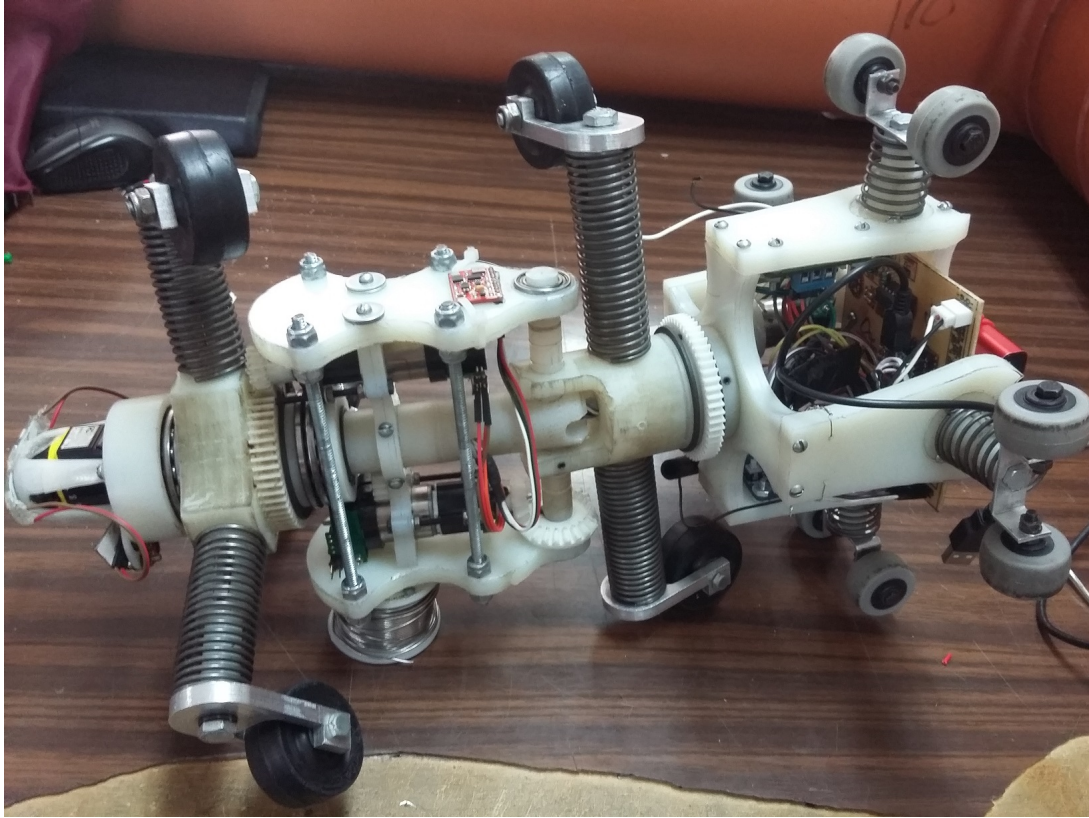


Figura 5.18: Estructura mecánica final.

6.1. Modelado Matemático

Con la intención de analizar el modelo matemático del robot se propuso utilizar la metodología Denavit-Harterberg, considerando que la base inicial es móvil, y que dicho movimiento depende de la variable de estado del último eslabón, de acuerdo a la ecuación de odometría que relaciona la trayectoria helicoidal de las llantas delanteras con el avance lineal de todo el robot. La Figura 6.1 muestra las consideraciones de los marcos de referencia y algunos parámetros para la metodología antes mencionada.

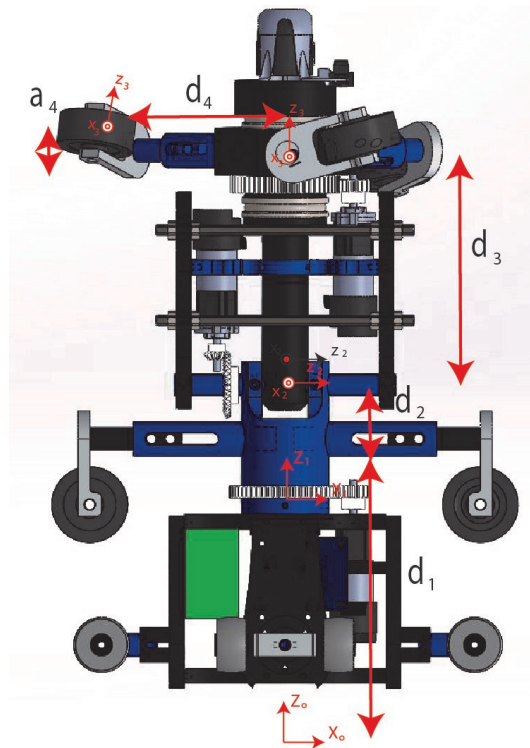


Figura 6.1: Marcos de referencias y parámetros longitudinales para el método Denavit-Harterberg.

A continuación se tabulan en la Tabla 6.1 los valores de las articulaciones para obtener la cinemática directa por medio de las ecuaciones homogéneas.

Tabla 6.1: Parámetros D.H. para cada eslabón.

Eslabón/Parámetros	θ	d	a	α
Eslabón 1	0	$\alpha_r q_4 R_{int}$	0	0
Eslabón 2	q_2	d2	0	$\pi/2$
Eslabón 3	q_3	d3	0	$-\pi/2$
Eslabón 4	q_4	d4	a4	α_r

Donde los valores d2, d3, d4, a4 son las distancias físicas observadas en la figura anterior, α_r es el ángulo de inclinación de las llantas (15 grados) y R_{int} es el radio interior de la tubería. Por lo que las matrices homogéneas quedan de la siguiente manera:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_r q_4 R_{int} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\text{sen}(q_2) & \text{sen}(q_2) & 0 \\ \text{sen}(q_2) & 0 & -\cos(q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & 0 & -\text{sen}(q_2) & 0 \\ \text{sen}(q_3) & 0 & \cos(q_3) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4) & -\text{sen}(q_4)\cos(\alpha_r) & \text{sen}(q_4)\text{sen}(\alpha_r) & a_4 * \cos(q_4) \\ \text{sen}(q_4) & \cos(q_4)\cos(\alpha_r) & -\cos(q_4)\text{sen}(\alpha_r) & a_4 * \text{sen}(q_4) \\ 0 & \text{sen}(\alpha_r) & \cos(\alpha_r) & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Al contar con las matrices que representan las transformaciones de cada eslabón, se apoya en un programa de cálculo numérico para poder obtener las matrices T^i y las jacobianas, las cuales de acuerdo con la ecuación 3.64 queda de la siguiente manera:

$$J^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$J^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(q_2)\text{sen}(q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$J^3 = \begin{bmatrix} \frac{4\cos(q_2)\text{sen}(q_2)}{25} & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(q_2)\text{sen}(q_2) & 0 \\ 1 & 0 & -\cos(q_3)\text{sen}(q_3) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$$J^4 = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ B & -\cos(q_2)\text{sen}(q_2) & 0 \\ 1 & 0 & -\cos(q_3)\text{sen}(q_3) \\ 0 & \cos(q_2)\cos(q_3)\text{sen}(q_4)C & 0 \\ 0 & \cos(q_3)\text{sen}(q_4)\text{sen}(q_2)C - \cos(q_2)\cos(q_4)\text{sen}(q_2)\text{sen}(q_4) & 0 \\ 1 & (\text{sen}(q_3)\text{sen}(q_4) - \cos(q_3)\text{sen}(q_3))C & 0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Donde:

$$A = \frac{4\cos(q_2)\sin(q_2)}{25} - \frac{\cos(q_3)\cos(q_4)\sin(q_2)}{25} - \frac{\cos(q_2)\cos(q_2)\sin(q_4)}{25} \quad (6.9)$$

$$B = \frac{\cos(q_2)\cos(q_3)\cos(q_4)}{25} \quad (6.10)$$

$$C = \frac{\sqrt{2} + \sqrt{6}}{4} \quad (6.11)$$

Este programa puede encontrarse en el Apéndice 1.

6.1.1. Validación por software del modelo matemático.

Con la ayuda del toolbox Robotics de Matlab® se pudo comprobar que el modelo antes desarrollado describe al robot, para esto se definieron cada uno de los eslabones del mismo, se construyó el robot y se creó una matriz que representa las trayectorias de cada una de las variables de estado del sistema, el resultado final fue el que se aprecia a continuación en la Figura 6.2:

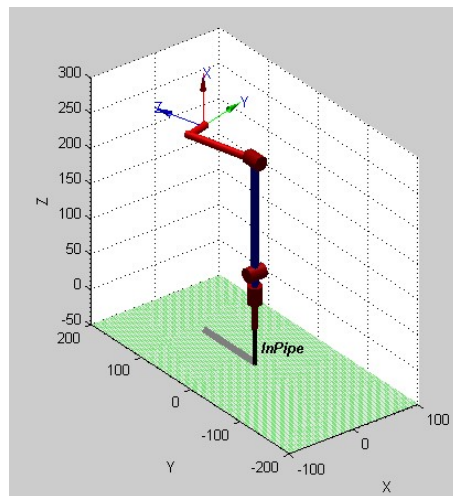


Figura 6.2: Representación esquemática del robot con la ayuda de Robotics de Matlab®.

Con la ayuda de esta herramienta se puede animar el dibujo, con la intención de probar las diferentes configuraciones geométricas del mismo.

Parte III

Validación

Después de ensamblar el dispositivo se comprobó su funcionamiento mecánico mediante las pruebas mostradas a continuación.

7.1. Pruebas del mecanismo

Se realizaron pruebas en las partes importantes del mecanismo para observar si se cumple con el objetivo para el que fueron diseñadas.

7.1.1. Movimiento del rotor

Durante esta prueba se comprobó la movilidad de la parte responsable de la tracción. En primera instancia de manera manual y posteriormente con la ayuda de un motor y el par de engranes correspondientes. Previamente se revisó que no existiera algún elemento que evitara el movimiento (Figura 7.1).



Figura 7.1: Movimiento del rotor

7.1.2. Movimiento para el direccionamiento

Para este movimiento se comprobó que toda la sección uno fuera capaz de moverse en un rango de 180 ° como mínimo, esto con la intención de poder direccionar el dispositivo cuando se encuentre una conexión (Figura 7.2).

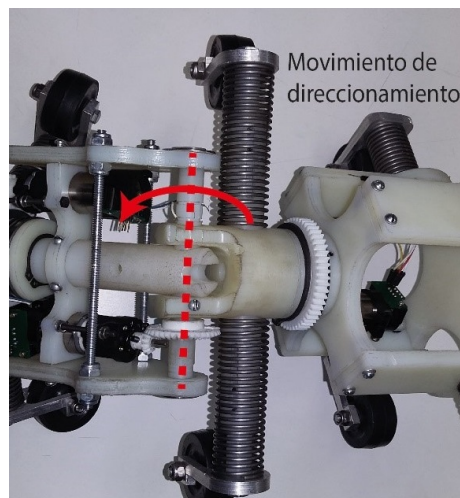


Figura 7.2: Movimiento para direccionar la sección uno

7.2. Pruebas electrónicas y de comunicación

Se realizaron pruebas sobre los elementos de comunicación elegidos y sobre los circuitos electrónicos diseñados.

7.2.1. Prueba de los módulos WIFI

Estos módulos trabajan a una velocidad de 802.11b/g 2.4GHz en el protocolo WIFI. La conversión hacia protocolo serial trabaja a todas las velocidades estándar del protocolo serial desde 9600 hasta 256200 baudios. Para justificar el alcance y velocidad de los módulos se realizaron mediciones punto a punto entre los módulos en diferentes distancias (Figura 7.3).

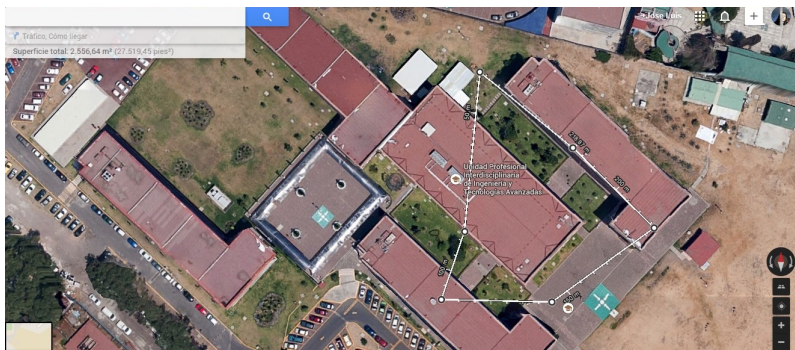


Figura 7.3: Área de alcance de comunicación.

En la imagen anterior (Figura 8.3) se observan los puntos de medición en donde la comunicación aún existía. El limite mostrado rodea un área de $2556.64 m^2$. Se observa en la medición que existen materiales que pueden llegar a obstruir la comunicación pero en promedio se tiene un radio de 216 metros de alcance de comunicación lineal. Se midió sobre un área en donde hubiera elementos que interfirieran en la comunicación para justificar que los módulos de comunicación pudieran llegar a obstruirse debido a la tubería.

Tomando los valores máximos y mínimos de alcance se puede dibujar el espectro de comunicación total de los módulos, como se observa en la Figura 7.4.



Figura 7.4: Espectro total de comunicación.

Se observa que la distancia máxima es cuando los módulos se encuentran en línea recta. El espectro medido para la comunicación con la interfaz de monitoreo predice que no existirán problemas en la comunicación.

7.2.2. Prueba de comunicación dentro de la tubería

Para probar el funcionamiento y la comunicación del robot dentro de la plataforma experimental se conectaron inalámbricamente los módulos WIFI como en la prueba de distancia para asegurar la comunicación exitosa entre el robot y la interfaz de monitoreo (Figura 7.5).

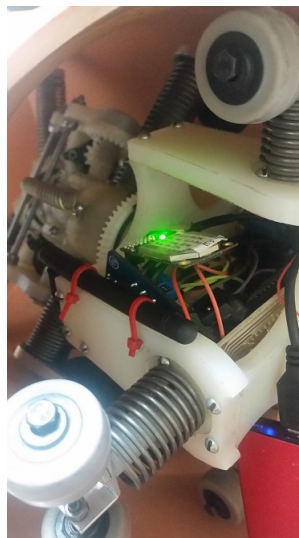


Figura 7.5: Módulo WIFI montado en el robot dentro de la tubería.

A través de la conexión de los pines de salida del módulo Wi-Fi con el microcontrolador, es posible establecer un canal de comunicación inalámbrico para realizar la emisión y recepción de datos.

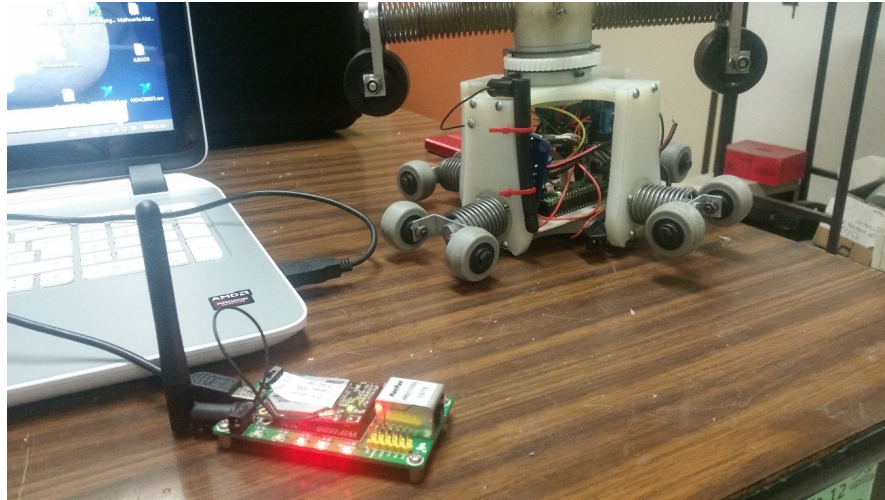


Figura 7.6: Conexión inalámbrica entre el módulo Wi-Fi emisor del robot y el receptor.

Se programa al microcontrolador de tal forma que pueda emitir un mensaje de “Hola Mundo” a la computadora donde se encuentra el modulo receptor, el resultado es el mostrado en la Figura 7.7.



Figura 7.7: Recepción de “Hola Mundo” en la PC.

7.2.3. Prueba de las entradas digitales del circuito

Para probar las entradas digitales se conecta el generador de señales al circuito, simulando el nivel de tensión que genera cada “encoder” se establece una frecuencia de entrada y el microcontrolador la lee, codifica y envía mediante los módulos Wi-Fi a la computadora la frecuencia de cada entrada. El resultado se muestra en las Figuras 7.8 y 7.9.

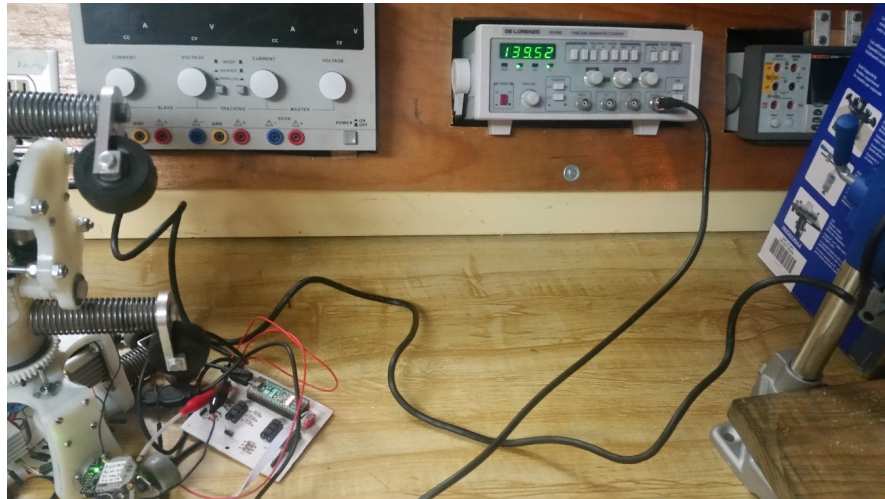


Figura 7.8: Frecuencia de prueba de entrada.

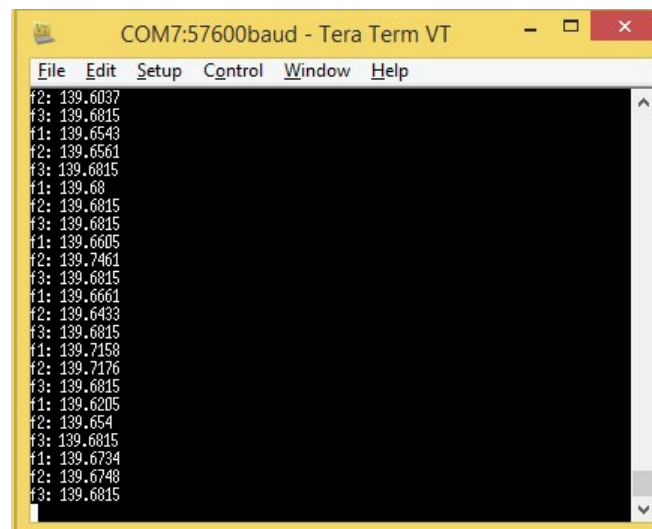


Figura 7.9: Recepción de la frecuencia de entrada en la computadora.

7.2.4. Prueba de la entrada analógica del circuito

Para corroborar el funcionamiento de dicha ecuación, se coloca un objeto frente al sensor a una distancia establecida y mediante el módulo Wi-Fi se envía la distancia a la computadora (Figuras 7.10 y 7.11):



Figura 7.10: Objeto frente al sensor.

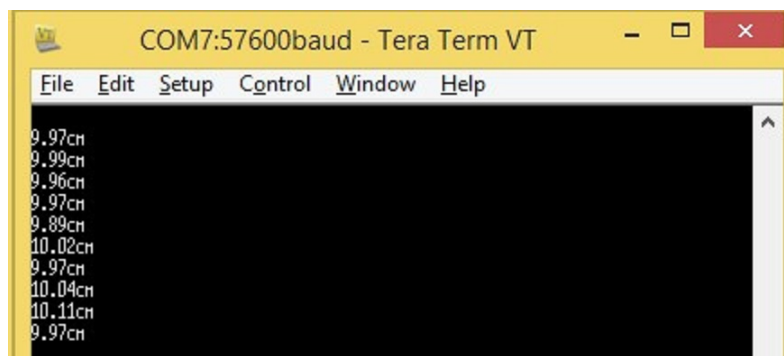


Figura 7.11: Distancia medida por el sensor entregada a la computadora.

7.2.5. Prueba de las salidas digitales del circuito

Para activar los actuadores del dispositivo es necesario generar señales digitales, las cuales están conectadas a la etapa de potencia de un circuito “puente H” a través del circuito integrado L298. El principio de funcionamiento y activación de dicha etapa requiere la generación de señales PWM complementarias, con el propósito de realizar variación de velocidad de los actuadores así como cambio de sentido. Para generar la detención total del actuador, ambas señales deben tener el periodo de la señal en un 50 % de manera complementaria. Para comprobar el funcionamiento de las salidas, se envía mediante la computadora la orden de alto, giro en sentido izquierdo y giro en sentido derecho del actuador. Los resultados se muestran en las Figuras 7.12 a 7.14.

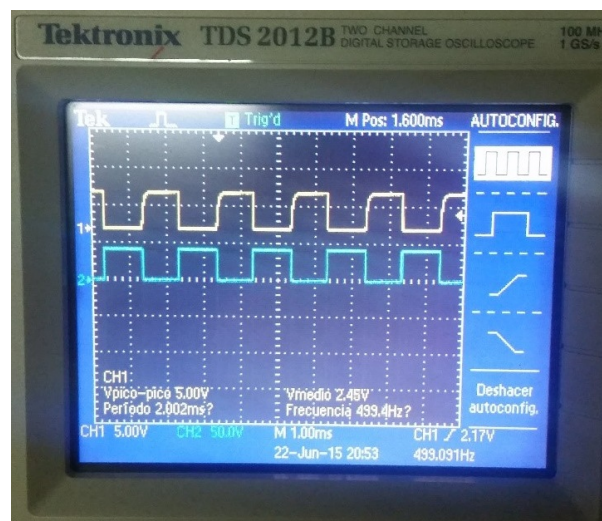


Figura 7.12: Señales al 50 %.

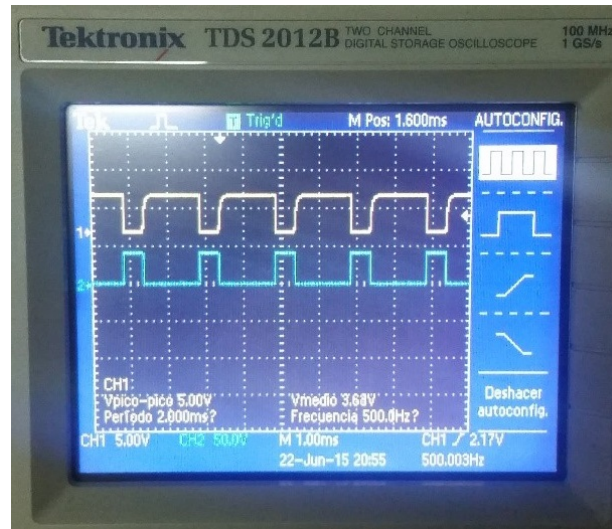


Figura 7.13: Señales al 25% dirección izquierda.

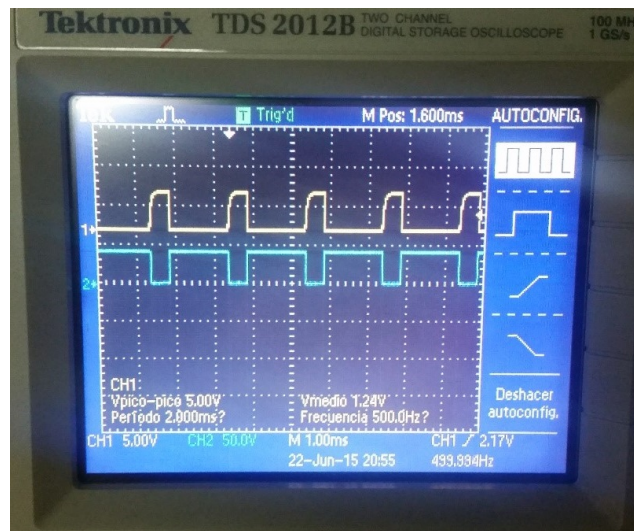


Figura 7.14: Señales al 25% dirección derecha.

7.3. Prueba de la ley de control en tiempo discreto

A través de la programación de la función discreta obtenida por el método trapezoidal de Tustin y su transformación en ecuación en diferencias, el microcontrolador fue puesto a prueba con dicha ley de control bajo el muestreo de un milisegundo (1 ms).

Los valores obtenidos para el control basados en simulaciones y los valores establecidos en el programa para el funcionamiento correcto del control se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Parámetros de control

Parámetros	Simulación	Reales
k_p	0.0139	3.7
k_d	0	0.0000008
k_i	27.8342	25

Después de la sintonización de los valores se realiza una prueba de control manipulando el valor deseado de control (o referencia) de la velocidad del motor. Utilizando un instrumento virtual en el software Labview®), se modifica dicho valor y se obtiene el gráfico del control contra la referencia. El resultado se muestra en la Figura 7.15.

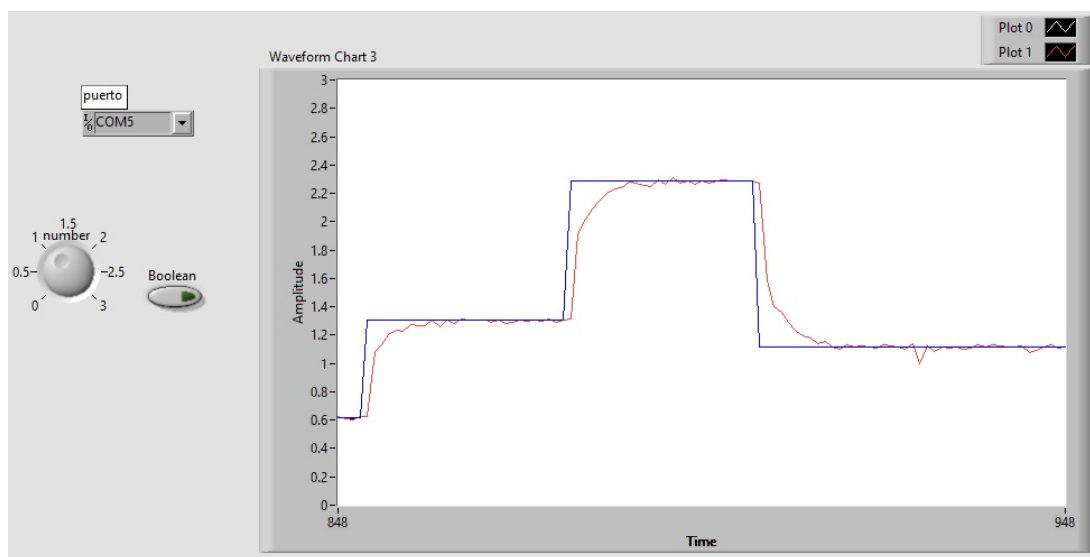


Figura 7.15: Respuesta del control a varios valores, valor mínimo estable de 0.6 rad/s.

Como se observa en la figura anterior, el control tiene una respuesta estable y suave para alcanzar el valor deseado de control. La respuesta se logra en aproximadamente 200 ms debido al valor alto de la constante k_i . Las oscilaciones son mínimas debido al valor pequeño de la constante k_d y la respuesta sin sobre impulso es debido a la constante k_p . El valor mínimo de velocidad estable para el control es de 0.6 rad/s y el valor máximo estable es de 2.8 rad/s como se muestra en la Figura 7.16.

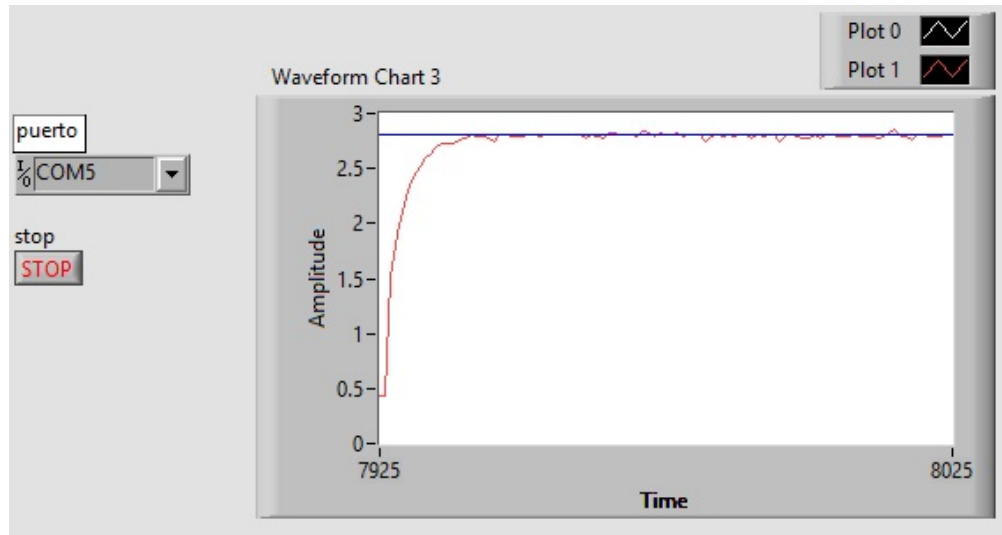


Figura 7.16: Valor máximo de control: 2.8 rad/s.

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos de la operación del prototipo en la plataforma experimental. Para realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo, se asignaron comandos para el dispositivo para que se pudiera controlar de forma manual por un operador mediante la conexión vía WI-FI con la computadora.

8.1. Tubería recta

La prueba consistió en introducir el robot en la tubería recta, y asegurar que el robot permaneciera en constante movimiento en la misma.

Para esto se utilizó principalmente el motor conectado a la sección 1 y cada determinado tiempo de manera conjunta la sección 3 para girar las primeras secciones y orientarlas a su posición, esto debido a que estas partes rotan respecto a la vertical (debido a la inercia que se transmite) y cuando se orientan a 90° respecto a la vertical la sección 2 cae debido a la gravedad, lo cual evita que las llantas de la sección 1 tengan contacto con la pared interna de la tubería y que el dispositivo deje de avanzar.

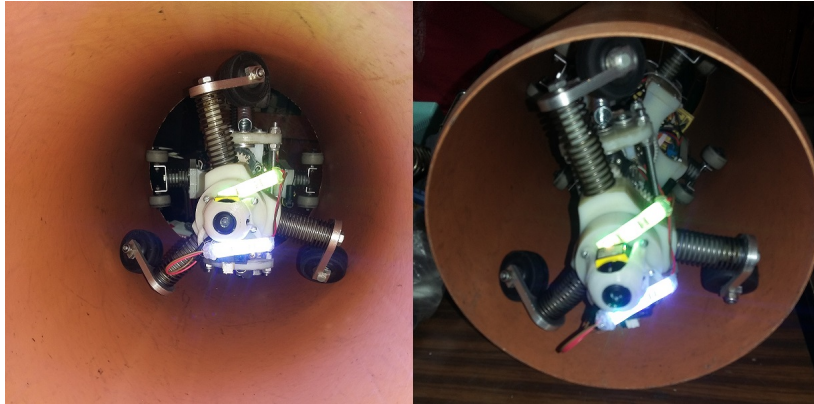


Figura 8.1: Recorrido del prototipo en tubo recto.

Los resultados de la prueba mostraron que el prototipo logró permanecer en movimiento dentro de la tubería, tomando las consideraciones antes señaladas (Figura 8.1).

8.2. Conexión Tee

Esta prueba consistió en probar que el dispositivo sea capaz de girar dentro de una conexión Tee y siguiera avanzando en el siguiente tubo recto. Se utilizaron todos los actuadores, al llegar a la conexión se orientó la sección 2 hacia la dirección a girar, después se gira la sección 1 con la ayuda del actuador de la sección 2 para introducir las llantas de la sección 1 en el siguiente tramo recto. Después se giró el rotor y se compensó las dos primeras secciones, esto el número de veces suficiente para que el rotor y la sección 3 quedaran orientados correctamente.

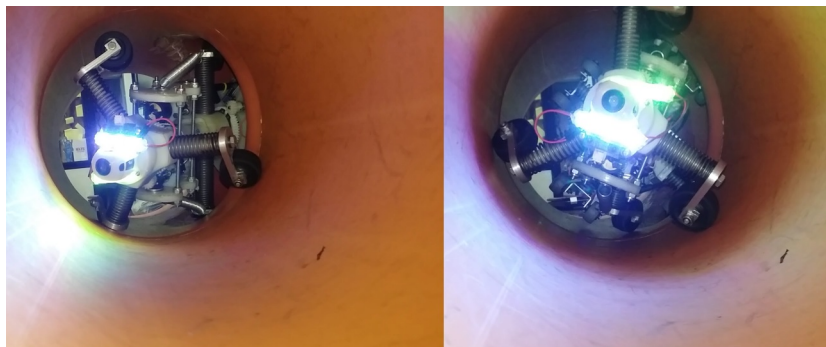


Figura 8.2: Vuelta del prototipo en una conexión tipo Tee.

Aunque se tuvo una dificultad mayor en esta conexión, después de diferentes pruebas se tuvo un porcentaje de éxito de un 70 %.

8.3. Conexión Codo

Esta prueba consistió en verificar que el dispositivo pudiera viajar por la conexión en codo hacia ambas direcciones y que el robot pueda avanzar en el siguiente tramo recto de la red. Para esta prueba se utilizan los tres actuadores, ya que fue necesario avanzar con la ayuda del motor de la sección 1 y cuando se llegó a la conexión esta sección se roto con ayuda del motor de la sección 2 y se compensó, esto también permitió orientar las primeras secciones de forma vertical con la ayuda de los motores de la sección 1 y 3.

El resultado de los movimientos realizados logró que el prototipo atravesará la conexión en codo y se que este se volviera a orientar para continuar el movimiento en el siguiente tramo recto.

8.4. Tubería recta de forma autónomo

El objetivo de la prueba era comprobar que el controlador del prototipo fuera capaz de realizar los movimientos de avance en la tubería recta y que conociera su posición relativa respecto al inicio de la tubería.

Se utilizaron dos actuadores para el movimiento en el tubo recto (sección 1 y 3), se hizo uso de la IMU para saber la orientación de la sección 2 del dispositivo para conocer cuando era necesario compensar esta sección y llevarla a la vertical. Para saber la posición relativa del dispositivo se utilizó el encoder del motor de la sección 1 en conjunto con el sistema de odometría .

El avance autónomo presento los mismos resultados que cuando se avanza de forma manual y el sistema de odometría mostro un error del 10 %.

8.5. Prueba en plataforma inclinada

Para probar el funcionamiento del prototipo en ascenso vertical o inclinada se realizaron varias pruebas de funcionamiento inclinando un cierto ángulo la plataforma experimental. Se colocaron apoyos en el medio de la tubería y se probó que el prototipo fuera capaz de iniciar el recorrido. El objetivo de esta prueba fue identificar cual es la mayor pendiente que el dispositivo puede subir dentro de la tubería.

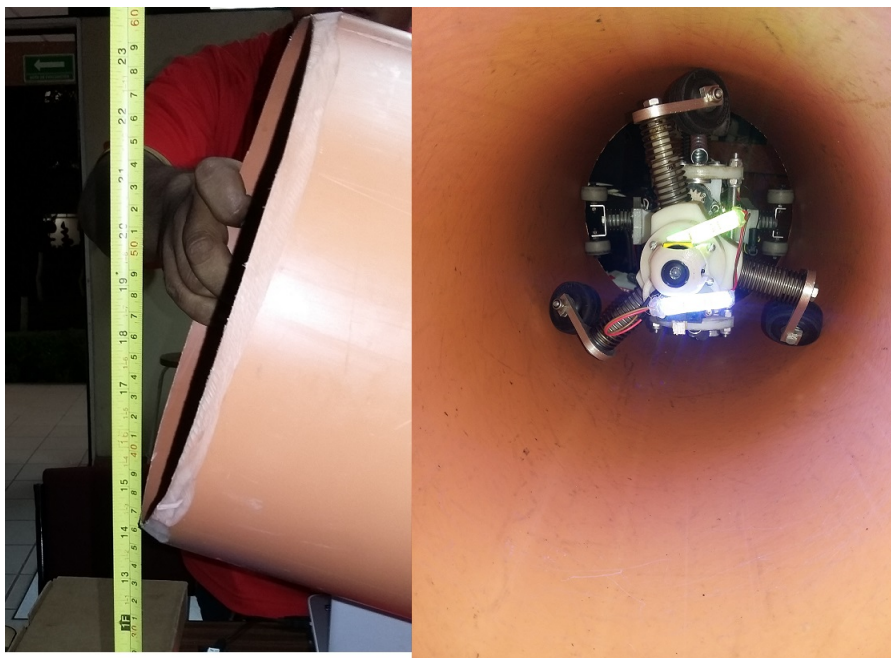


Figura 8.3: Recorrido del robot sobre tubo recto inclinado.

En esta prueba se utilizaron los dos primeros actuadores como en las pruebas en tubo recto normal. Los resultados se encontraron dentro de 15° y 20° . Después de este límite el prototipo no continuaba con el avance. Cabe señalar que debido al efecto adverso sobre la articulación media, al peso del robot y a que esta posición afectaba la medición del acelerómetro antes mencionado, se obtuvo un error en la odometría superior, de cerca de 40% de la trayectoria propuesta en 1.2 m.

Conclusiones

Los objetivos planteados en el presente trabajo desarrollados a través de la investigación e implementación de la metodología basada en el diseño mecatrónico a través de áreas funcionales permitió construir un prototipo funcional para la exploración interna de tuberías. Dicho prototipo fue diseñado con base en los prototipos existentes tomando sus principales deficiencias con el fin de implementar y desarrollar características innovadoras para que el prototipo fuera funcional, la aportación de este trabajo es que puede ser utilizado como base para el diseño y desarrollo de futuros robots “in-pipe”.

Al iniciar el proyecto, se diseñó la estructura mecánica del prototipo, ya que las dimensiones espaciales del prototipo y características de los materiales seleccionados debieron ser ajustadas debido a las dimensiones de la plataforma experimental sobre la cual se demostró el funcionamiento del prototipo. El resultado, con apoyo de software CAD y de análisis estructural de elemento finito, fue un prototipo con dimensiones y propiedades físicas capaz de desplazarse con libertad en tuberías rectas así como en conexiones codo y tee rectas, es decir en 90 y 45 grados respectivamente, sin embargo, después de su construcción, fue necesario el rediseño de algunos elementos, debido a las condiciones y configuraciones geométricas de las conexiones. Los resultados del rediseño basado en la primera propuesta para la estructura permitieron realizar las maniobras de giros, adaptación y movilidad en una tubería con conexiones codo y tee, tal como lo plantea uno de los objetivos particulares.

En la etapa de movimiento, se propuso que el controlador de los movimientos mecánicos estuviera basado en un sistema electrónico digital y un sistema de potencia con motores eléctricos de corriente directa, dichos elementos fueron seleccionados con base en la relación

de mayor potencia a menor tamaño. Durante las pruebas del prototipo, el comportamiento de estos actuadores no permitía al prototipo moverse libremente sin un consumo alto de corriente, por lo cual se descartó el uso de baterías y se implementó una fuente externa a través de cables para la alimentación del prototipo.

Los elementos de suspensión fueron diseñados basándose en las características físicas resultantes del diseño CAD y de simulación. Estas características se obtuvieron del análisis de fuerzas y condiciones críticas de movimiento del prototipo como: fricción, peso, fuerzas de inercia, número de actuadores utilizados y puntos de apoyo, pues influyen en el libre movimiento de cada elemento de suspensión mecánica de resorte. El acoplamiento de estos elementos al prototipo después de su fabricación y la realización de numerosas pruebas, permitieron determinar sus dimensiones reales para que el prototipo tuviera un desplazamiento pleno. La aproximación del modelo cinemático se realizó con la metodología de análisis para robots seriales Denavit Hartenberg. Los parámetros obtenidos después del análisis en software especializado permitieron observar mediante simulación que los movimientos virtuales coincidían con los movimientos reales del prototipo. Dicha aproximación fue suficiente para describir el desplazamiento (necesario para la medición de su trayectoria) y obtener las ecuaciones que describen el comportamiento cinemático del prototipo.

La implementación de control embebido se realizó con cálculos y análisis basados en el método de Tustin a través del método trapezoidal en un microcontrolador. Para el prototipo este método establece condiciones sencillas para realizar el control sobre los actuadores del dispositivo. Las características de este control incluyeron una programación de alto nivel con algoritmos planteados para la recopilación de datos de entrada y salida. El controlador propuesto está limitado por la cantidad de tareas que realiza de manera simultánea, pues depende de la cantidad de memoria, periféricos, interfaces y velocidad de procesamiento. Los resultados obtenidos marcaron que el error de su implementación fue de un 5% entre los resultados finales reales y de simulación, lo que da la capacidad al prototipo de controlar la velocidad de avance.

El sistema de navegación se basó en el uso de un sistema absoluto de coordenadas tridimensionales, el cual recopila la información necesaria y la codifica para que el prototipo realice los movimientos necesarios al seguir una trayectoria programada. Para la medición del desplazamiento del robot, basada en la odometría, se programaron algoritmos para la

medición de desplazamiento y comparación entre la trayectoria programada y la realizada por el prototipo. A través del uso del robot en la plataforma experimental, se comprobó el funcionamiento de dicho sistema de navegación autónomo.

La interfaz de usuario fue realizada en software para instrumentación virtual, la cual, permite enviar y recibir información entre el usuario y el prototipo. Los datos que se reciben son el video y el desplazamiento descrito por el robot. Para decodificar los datos y mostrarlos en la interfaz se utilizaron drivers de comunicación IP y de comunicación serial que fungen como transmisor y receptor entre el sistema embebido y la interfaz con lo cual, se logra visualizar la posición actual del prototipo en el plano tridimensional y la imagen del interior de la tubería. El uso de la interfaz es indispensable para el funcionamiento del prototipo.

La plataforma experimental se construyó con tramos de tubos rectos y de conexiones codo y tee en posición horizontal debido a que el robot era capaz de desplazarse en ángulos de hasta 20.º a causa de su propio peso.

Parte IV

Apéndices

.1. Obtención del modelo cinemático

El modelo cinemático del dispositivo se obtiene al utilizar la representación de Denavit-Hartenberg con la ayuda del software de calculo numérico Matlab, se elaboró un programa en el cual se utilizaron los valores geométricos que definen al dispositivo en cada uno de los eslabones y se crearon las diferentes matrices homogéneas de transformación, posteriormente se utilizaron estas matrices para crear los jacobianos de cada uno de las variables de estado. Se observa el programa comentado, el cual da como resultado las matrices de transformación y los jacobianos.

```

function [] = modelo1()
clear all
clc
%%valores del rotor
ang1=15*(pi/180); %% angulo de las llantas delanteras
Rint=(240.2/2)*e-3; % radio interno de la tuberia
d2v=30e-3;%% distancia del primer M.R. al segundo en el robot.
d3v=160e-3;%% distancia del segundo M.R. al tercero en el robot.
d4v=Rint -(5/8)*(25.4e-3); %% distancia del tercer M.R. al cuarto en el robot.
a4v=40e-3; %% offset del cuarto M.R. del sistema con respecto al tercero
%% variables de estado
syms q2 q3 q4
%% valores para crear las matrices homogeneas
syms a1 d1 alfa1 teta1 a2 d2 alfa2 teta2 a3 d3 alfa3 teta3 a4 d4 alfa4 teta4

%% matrices homogeneas
A1=[cos(teta1) -sin(teta1)*cos(alfa1) sin(teta1)*cos(alfa1) a1*cos(teta1);
    sin(teta1) cos(teta1)*cos(alfa1) -cos(teta1)*sin(teta1) a1*sin(teta1);
    0 sin(alfa1) cos(alfa1) d1;
    0 0 0 1];
A2=[cos(teta2) -sin(teta2)*cos(alfa2) sin(teta2)*cos(alfa2) a2*cos(teta2);
    sin(teta2) cos(teta2)*cos(alfa2) -cos(teta2)*sin(teta2) a2*sin(teta2);
    0 sin(alfa2) cos(alfa2) d2;
    0 0 0 1];
A3=[cos(teta3) -sin(teta3)*cos(alfa3) sin(teta3)*cos(alfa3) a3*cos(teta3);
    sin(teta3) cos(teta3)*cos(alfa3) -cos(teta3)*sin(teta3) a3*sin(teta3);
    0 sin(alfa3) cos(alfa3) d3;
    0 0 0 1];
A4=[cos(teta4) -sin(teta4)*cos(alfa4) sin(teta4)*cos(alfa4) a4*cos(teta4);
    sin(teta4) cos(teta4)*cos(alfa4) -cos(teta4)*sin(teta4) a4*sin(teta4);
    0 sin(alfa4) cos(alfa4) d4;
    0 0 0 1];

%% Substitución de los valores numericos en las matrices
Asol1=subs(A1,{a1,d1,alfa1,teta1},{0,ang1*Rint*q4,0,0}); %% desplazamiento del sistema de referencia
%% igual a D=R*alfa*teta3 convencion de avance del robot
Asol2=subs(A2,{a2,d2,alfa2,teta2},{0,d2v,90*(pi/180),q2}); %% demas sistemas de referencia
Asol3=subs(A3,{a3,d3,alfa3,teta3},{0,d3v,-90*(pi/180),q3});
Asol4=subs(A4,{a4,d4,alfa4,teta4},{a4v,d4v,15*(pi/180),q4});

%% Matricces homogeneas de transformación respecto al origen
T1=Asol1;
T2=Asol1*Asol2;
T3=Asol1*Asol2*Asol3;
T4=Asol1*Asol2*Asol3*Asol4;
%% Mostrar matrices
pretty(T1)
pretty(T2)
pretty(T3)
pretty(T4)

%% Submatrices para obtener jacobianos correspondientes
O0=[ 0; 0; 0;];
Z0=[T1(1,3); T1(2,3);T1(3,3)];
O1=[T1(1,4); T1(2,4);T1(3,4)];
Z1=[T2(1,3); T2(2,3);T2(3,3)];
O2=[T2(1,4); T2(2,4);T2(3,4)];
Z2=[T3(1,3); T3(2,3);T3(3,3)];
O3=[T3(1,4); T3(2,4);T3(3,4)];
Z3=[T4(1,3); T4(2,3);T4(3,3)];
O4=[T4(1,4); T4(2,4);T4(3,4)];

%% Obtener jacobianos
J1=[Z0 O0 O0;
    O0 O0 O0]
J2=[cross(Z0,(O2-O0)) Z1 O0;
    Z0 O0 O0]
J3=[cross(Z0,(O3-O0)) Z1 Z2;
    Z0 O0 O0]
J4=[cross(Z0,(O4-O0)) Z1 Z2;
    Z0 Z3 O0]
pretty(J4)

end

```

Bibliografía

- [1] D. T. Atul Gargade and G. Thokal. Modelling and analysis of pipe inspection robot. 2013.
- [2] T. V. D. Boom. Discrete-time systems analysis. 2006.
- [3] D. H. G. Y. Dongwoo Lee, Jungwan Park and H. seok Yang. Novel mechanisms and simple locomotion strategies for an in-pipe robot that can inspect various pipe types. 2012.
- [4] R. C. Dorf. Sistemas de control moderno. 2005.
- [5] J. M. D. V. Havo. Tustin's method for time discretization of conservative dynamical systems. 2011.
- [6] T. N. A. Kakogawal. Development of a screw drive in-pipe robot for passing through bent and branch pipes. 2007.
- [7] A. Kelly. General solution for linearized error propagation in vehicle odometry.
- [8] B. C. Kuo. Sistemas de control automático. 1996.
- [9] J. R. L. M. Di Matteo C. Verrastro. Robot para exploración de tuberías de diseño compacto, modular, estanco y de seguridad intrínseca. 2003.
- [10] R. R. Lara. Sistemas digitales de control en tiempo discreto. 2007.

- [11] LEVINSON. Nylamid principales propiedades, 2010. [En línea]. Available: http://www.aceroslevinson.com/wp-content/uploads/2012/10/Levinson_Nylamid.pdf. [Último acceso: Junio 2015].
- [12] R. L. Norton. Diseño de máquinas. 2006.
- [13] K. Ogata. Sistemas de control en tiempo discreto. 1996.
- [14] K. Ogata. Ingeniería de control moderna. 2005.
- [15] B. L. Y. W. Peng Li, Shugen Ma and C. Ye. An in-pipe inspection robot based on adaptive mobile mechanism: Mechanical design and basic experiments. 2007.
- [16] H. V. M. Ramirez. Análisis, modelado y simulación en computadora del motor de corriente directa tipo serie. 2009.
- [17] H. ryeol Choi and S. gon Roh. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. 2005.
- [18] P. Semiconductors. Motor control power semiconductor applications.
- [19] E. Universal. Neza tiene robot para monitorear red de agua, 29 Noviembre 2013. Available: <http://m.eluniversal.com.mx/notas/estado-de-mexico/neza-tiene-robot-para-monitorear-red-de-agua-.html>. [Último acceso: Agosto 2014].