



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
ENTRENAMIENTO PARA ROBÓTICA MÓVIL UTILIZANDO LA
PLATAFORMA PIONEER P3-DX**

AUTOR: Rueda López, Bryan Joshua

DIRECTOR: Ing. Orozco Brito, Luis Alberto MSc.

SANGOLQUÍ

2019



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA ROBÓTICA MÓVIL UTILIZANDO LA PLATAFORMA PIONEER P3-DX” fue realizado por el señor Rueda López, Bryan Joshua el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de enero del 2019

Ing. Orozco Brito, Luis Alberto MSc.



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Rueda López, Bryan Joshua, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA ROBÓTICA MÓVIL UTILIZANDO LA PLATAFORMA PIONEER P3-DX”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 25 de enero del 2019

Bryan Joshua Rueda López



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Yo, Rueda López, Bryan Joshua autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA ROBÓTICA MÓVIL UTILIZANDO LA PLATAFORMA PIONEER P3-DX**”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 25 de Enero del 2019

Bryan Joshua Rueda López

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico con mucho amor a mi familia que siempre estuvo a mi lado para prestarme un brazo amigo en los momentos difíciles, ellos fueron testigos del sacrificio y empeño que he dedicado a esta hermosa etapa de mi vida. A mis padres por todo el apoyo incondicional que me han brindado, a mi hermano Andrés y mi hermana Michelle por su cariño y buenos consejos. Sin pretender ser modelo ni ejemplo de nada, cito a continuación una frase de Isaac Newton para expresar de mejor manera a todos a quienes debo, mi gratitud.

“Si he visto más lejos es porque estoy sentado sobre los hombros de gigantes”

Isaac Newton

Bryan Rueda

AGRADECIMIENTO

A mí madre por su abnegación, cariño y amor que es la motivación que me impulsa a seguir adelante. El único amor incondicional en el mundo es el amor de una madre. A mi padre por ser mi compañero de batalla en todas mis guerras, por enseñarme, que todo es posible, que “el NO, no existe”, y “ ¡ Que el equipo funciona ! ”. A mi hermano Andrés por ser siempre mi referente a seguir y enseñarme el camino siempre con toda sinceridad. A mi hermana Michelle por su enorme cariño, que aunque partió en búsqueda de su historia personal, a la distancia siempre supo inyectarme buena energía y amor, para continuar mi sendero. A mi tutor y amigo del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, el Ing. Luis Orozco, por toda la ayuda, tiempo y conocimiento que me entrego no solo durante la realización de este proyecto sino en las aulas como docente. A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, porque a cambio de mucho sacrificio me brindó valiosas amistades, y hermosas experiencias. El deleite de dormir con sueño, comer con hambre y enorme satisfacción del deber cumplido.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Alcance	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivo Específico.....	5
CAPÍTULO II	6
2.1 Introducción a la robótica móvil.....	6
2.2 Componentes de la plataforma robótica Pioneer P3 - DX.....	6
2.2.1. Sistema Motriz.....	6
2.2.2. Sistema de Alimentación	8
2.2.3. Sistema de Sensorización.....	9
2.3 Representación Espacial	12
2.3.1. Representación Posición	13
2.3.2. Representación Orientación.....	14
2.3.3. Representación Vectorial.....	15
2.4 Modelado Cinemático.....	15
2.4.1. Preliminares	15
2.4.2. Cinemática Directa	17
2.4.3. Modelo Cinemático directo con punto de interés desplazado	22
2.4.4. Cinemática Inversa	22

	vii
2.4.5. Modelo cinemático inverso con punto de interés desplazado.....	25
2.5 Odometría	26
2.6 Control Cinemático de robots móviles	28
2.6.1. Control Proporcional de Posición	29
2.6.2. Control de Evasión de obstáculos	31
2.7 Generación de Trayectorias	35
CAPÍTULO III	37
3.1 Práctica 1: Caracterización, Guiado y Programación con Aria	39
3.1.1. Objetivo General.....	39
3.1.2. Objetivos Específicos	39
3.1.3. Alcance	39
3.1.4. Diseño	40
3.1.5. Resultados de aprendizaje esperados.....	42
3.2 Práctica 2: Modelado Cinemático.....	42
3.2.1. Objetivo General.....	42
3.2.2. Objetivos Específicos	42
3.2.3. Alcance	43
3.2.4. Diseño	43
3.2.5. Resultados de aprendizaje esperados.....	44
3.3 Práctica 3: Odometría	44
3.3.1. Objetivos General	44
3.3.2. Objetivo Específico.....	44
3.3.3. Alcance.....	44
3.3.4. Diseño	45
3.3.5. Resultados de Aprendizaje Esperados	45
3.4 Práctica 4: Seguimiento de Trayectorias y evasión de obstáculos.....	46
3.4.1. Objetivos General	46
3.4.2. Objetivos Específicos	46
3.4.3. Alcance	46
3.4.4. Diseño	46

	viii
3.4.5. Resultados de aprendizaje esperados	47
3.5 Práctica 5: Planificación de Trayectorias.....	48
3.6 Práctica 6: Aplicativo de planificación y control de trayectoria.....	49
CAPÍTULO IV	51
4.1 Análisis de Resultados	51
CAPÍTULO V	81
5.1 Conclusiones.....	81
5.2 Recomendaciones	83
BIBLIOGRAFÍA.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Plataforma robótica Pioneer P3 –DX.....	7
<i>Figura 2.</i> Tipos de sistemas de tracción diferencial.....	7
<i>Figura 3.</i> Motor PITTMAN de 12V, Gear Ratio 38.3:1.....	8
<i>Figura 4.</i> Baterías eléctricas recargables de Plomo Ácido	9
<i>Figura 5.</i> Sensores ultrasónicos SENSComp	10
<i>Figura 6.</i> Disposición física de los sensores ultrasónicos del SONAR.	11
<i>Figura 7.</i> Arreglo de bumpers trasero	12
<i>Figura 8.</i> Sistemas de referencia de un robot móvil	12
<i>Figura 9.</i> Posición de un cuerpo en el espacio.....	13
<i>Figura 10.</i> Representación de la posición.....	13
<i>Figura 11.</i> Representación de la orientación	14
<i>Figura 12.</i> Movimiento de la rodadura sin deslizamiento	16
<i>Figura 13.</i> Cinemática Directa.....	17
<i>Figura 14.</i> Velocidad traslacional v y velocidad angular ω	18
<i>Figura 15.</i> Velocidades independientes de las ruedas laterales. v_l y v_d	18
<i>Figura 16.</i> Modelo con punto de interés desplazado	22
<i>Figura 17.</i> Cinemática Inversa.....	22
<i>Figura 18.</i> Solución a la cinemática inversa Reorientación – Avance – Reorientación.....	25
<i>Figura 19.</i> Estructura de controlador proporcional cinemático	30
<i>Figura 20:</i> Plataforma equipada con Cámara, Scanner Laser y SONAR	31
<i>Figura 21.</i> Esquema del método de fuerza ficticia modificada	32
<i>Figura 22.</i> Distribución de los sensores ultrasónicos en el arreglo (SONAR)	33
<i>Figura 23.</i> Estructura de controlador con evasión de obstáculos	35
<i>Figura 24.</i> Planificación de caminos con Mapas Probabilísticos PRM.....	36
<i>Figura 25.</i> Toma de medida desde el sonar hasta superficie plana.....	41
<i>Figura 26.</i> Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo	53
<i>Figura 27.</i> Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en ensayos a) No.2 y b) No.3	54
<i>Figura 28.</i> Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en ensayos a) No.4, b) No.5 y c) No.6 ..	55
<i>Figura 29.</i> Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en el ensayo No.7.	57
<i>Figura 30.</i> Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en el ensayo No.8.	57
<i>Figura 31.</i> Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en el ensayo No.9.	58
<i>Figura 32.</i> Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en el ensayo No.10.	59
<i>Figura 33.</i> Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en el ensayo No.11.	59
<i>Figura 34.</i> Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en el ensayo No.12.	60
<i>Figura 35.</i> Trayectoria deseada del ensayo No.1	63
<i>Figura 36.</i> Error de posición en ensayo No. 1	64
<i>Figura 37.</i> Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 1	65
<i>Figura 38.</i> Trayectoria deseada del ensayo No.2.....	65
<i>Figura 39.</i> Error de posición en ensayo No. 2	66
<i>Figura 40.</i> Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 2	66
<i>Figura 41.</i> Trayectoria deseada del ensayo No.3.....	67
<i>Figura 42.</i> Error de posición en ensayo No. 3	68
<i>Figura 43.</i> Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 3	68

	x
<i>Figura 44.</i> Trayectoria deseada del ensayo No.4.....	69
<i>Figura 45.</i> Error de posición en ensayo No. 4	69
<i>Figura 46.</i> Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 4	70
<i>Figura 47.</i> Mapa del pasillo de la planta baja de los laboratorios del DEEE	71
<i>Figura 48.</i> Ensanchamiento de paredes Mapa	72
<i>Figura 49.</i> Caminos obtenidos del planificador de caminos.....	74
<i>Figura 50.</i> Resultado de la ejecución del seguimiento de la trayectoria.....	74
<i>Figura 51.</i> Error de posición vs tiempo durante la ejecución de la trayectoria	75
<i>Figura 52.</i> Trayectoria de partida del aplicativo.....	76
<i>Figura 53.</i> Trayectoria ejecutada durante la partida	77
<i>Figura 54.</i> Desplazamiento realizado durante la partida	77
<i>Figura 55.</i> Error de posición vs Tiempo durante la partida.....	78
<i>Figura 56.</i> Trayectoria de regreso del aplicativo	78
<i>Figura 57.</i> Trayectoria ejecutada durante el regreso al punto inicial.....	79
<i>Figura 58.</i> Desplazamiento realizado durante el proceso de regreso	79
<i>Figura 59.</i> Error de posición vs Tiempo durante el proceso de regreso	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Clasificación de robots por medio de transporte y sus mecanismos de locomoción</i>	6
Tabla 2: <i>Características Técnicas de los motores eléctricos</i>	8
Tabla 3: <i>Características de las baterías</i>	9
Tabla 4: <i>Características Técnicas de los sensores ultrasónicos</i>	11
Tabla 5: <i>Representación numérica de las activaciones de los bumpers</i>	41
Tabla 6: <i>Lecturas de distancia tomadas de los sensores ultrasónicos</i>	51
Tabla 7: <i>Estado de funcionamiento de cada uno de los bumpers</i>	51
Tabla 8: <i>Resultados de validación de modelo cinemático directo</i>	52
Tabla 9: <i>Resultados de validación de modelo cinemático inverso</i>	56
Tabla 10: <i>Resultados de traslación utilizando estimación odométrica de posición</i>	61
Tabla 11: <i>Resultados de traslación en lazo abierto</i>	61
Tabla 12: <i>Resultados de rotación utilizando estimación odométrica de posición</i>	61
Tabla 13: <i>Resultados de rotación en lazo abierto</i>	61
Tabla 14: <i>Resultados de algoritmo de seguimiento de trayectorias</i>	63
Tabla 15: <i>Resultados de traslación utilizando estimación odométrica de posición</i>	72

RESUMEN

El uso de la robótica móvil es cada vez más común en la industria de los países de primer mundo, esta permite mejorar el flujo de la producción e incrementar la productividad de las industrias y posibilita nuevos paradigmas de trabajo dentro de las plantas industriales, donde se aprovecha de mejor manera el trabajo de los operadores, puesto que las tareas más simples como el transporte de materia prima dentro de plantas industriales, que no aportan valor agregado al producto final, pasan a ser realizadas por robots autónomos, permitiendo que los operadores puedan dedicarse a tareas de mayor valor reduciendo así los tiempos de producción e incrementando la eficiencia del proceso productivo. Este proyecto tiene como finalidad diseñar y elaborar prácticas de laboratorio utilizando las plataformas móviles Pioneer P3 – DX para la asignatura de Robótica Industrial y Robótica Social, para acercar a los estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control a los conocimientos de navegación autónoma de robots móviles diferenciales. Se plantea una serie de prácticas ilustrativas, donde se instruye al estudiante sobre la programación de las plataformas móviles diferenciales para lo cual se utilizarán las plataformas móviles Pioneer, y sus componentes como sensores ultrasónicos y bumpers. Desarrollando temas como la planificación de trayectorias, navegación autónoma y prevención de colisiones.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBÓTICA MOVIL**
- **CINEMATICA DE ROBOTS MÓVILES DIFERENCIALES**
- **P IONEER P3 - DX**

ABSTRACT

The use of mobile robotics is increasingly common in the industry of the first world countries, this allows to improve the flow of production and increase the productivity of industries and enables new paradigms of work within industrial plants, since the simplest tasks such as the transport of raw material within industrial plants, which do not add value to the final product, are carried out by autonomous robots, allowing operators to dedicate themselves to tasks of greater value, thus reducing production times, and increasing the efficiency of the production process. The purpose of this project is to design and develop laboratory practices, using the Pioneer P3 - DX mobile platforms, for the subject of Industrial Robotics and Social Robotics, to bring the students of the Engineering Degree in Electronics, Automation and Control, to the knowledge of autonomous navigation of differential mobile robots. A series of illustrative practices is proposed, where the student is instructed on the programming of the differential mobile platforms, and their components as ultrasonic sensors and bumpers. Developing topics such as motion planning, autonomous navigation and collision prevention.

KEYWORDS:

- **MOBILE ROBOTICS**
- **CINEMATICS OF DIFFERENTIAL MOBILE ROBOTS**
- **PIONEER P3 - DX**

CAPÍTULO I

1.1 Antecedentes

El uso de la robótica móvil es cada vez más común en las grandes industrias del primer mundo, puesto que permite delegar a robots móviles autónomos, las tareas más simples, que no aportan valor agregado al producto final, como el transporte de materia prima dentro de plantas industriales, permitiendo que los operadores puedan dedicarse a tareas más importantes, reduciendo así los tiempos de producción e incrementando la eficiencia del proceso productivo.

La robótica móvil es parte de la industria 4.0, que está reinventando y revolucionando la industria a nivel mundial en campos como la agricultura, la limpieza, y la intralogística en plantas industriales. En el campo de la intralogística, los robots móviles ayudan a satisfacer con éxito la demanda de un flujo de material de una manera altamente flexible y transparente (Arnanz, Jorge Baliñas, & Sebastián Bronte, 2006).

Los robots móviles industriales se dividen en dos tipos según su navegación: Vehículos de Guiado Automático (AGV), y Sistemas Automatizados de Transporte de Material (AMTS). Los AGV's son sistemas que están diseñados, normalmente, para transportar grandes cargas (hasta varias toneladas). Existen varias tecnologías de guiado de vehículos: a) por seguimiento de rayas pintadas en el suelo; b) filo guiados por seguimiento del hilo enterrado en suelo y que irradia un campo magnético c) por balizas de radiofrecuencia, etc. Los AMTS's son el siguiente paso dentro de Industria 4.0 ya que no necesitan instalación de infraestructura para el movimiento del robot, reaccionan de forma inteligente a su entorno y pueden decidir qué movimientos efectuar de forma autónoma, eliminando costes de

instalación y configuración, además de la dificultad de `reprogramar en línea' la trayectoria del robot (Cook, 2012) .

La empresa SCAN A/S fabricantes de estufas de leña ha optado por los robots móviles autónomos de la empresa Mobile Industrial Robots, para el transporte de material dentro de sus instalaciones, ya que es muy costoso emplear horas de trabajo de operarios para dicha tarea, más allá de que es un trabajo aburrido y monótono. Con la utilización de los robots móviles MIR 100, se ha logrado ahorrar en costos aproximadamente la mitad de un puesto de tiempo completo mediante la automatización de este proceso, consiguiendo que los costos de la adquisición del robot se recuperen en menos de un año (International Federation of Robotics, 2015).

Otro gran ejemplo de la apuesta de la industria por los robots móviles, es la empresa Amazon, En 2014, la empresa comenzó a introducir robots en sus bodegas: máquinas que originalmente desarrolló Kiva Systems, una empresa que Amazon compró por 775 millones de dólares dos años antes y que renombró como Amazon Robotics. En este momento, Amazon tiene más de 100.000 robots en acción por todo el mundo y planea añadir más. “Los robots hacen que el trabajo en el almacén sea menos tedioso y demandante en el aspecto físico, al mismo tiempo que hacen posible el tipo de eficiencia que permite que el cliente pida hilo dental después del desayuno y lo reciba antes de la cena.” Amazon no podría funcionar con los costos que tiene y los precios que ofrece a sus clientes sin la automatización”, afirma Martin Ford (WINGFIELD, 17 de septiembre de 2017).

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, el Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones posee plataformas móviles rodantes para capacitar a los estudiantes en

lo que respecta a Robótica móvil. Se han desarrollado algunos trabajos de titulación para el desarrollo de aplicaciones de tele operación (Andrade, 2012) , control por comandos de voz (Diego, 2013) y control neuronal (Robalino, 2015) de robots móviles, haciendo uso de plataformas móviles Pioneer. Pero es menester hacer extensivo los conocimientos sobre Robótica Móvil hacia la comunidad de estudiantes de pregrado, familiarizándolos con estos conocimientos mediante prácticas de laboratorio.

1.2 Justificación

Los avances de la tecnología y la industria del mundo actual proponen nuevos retos por lo que es importante que los estudiantes desarrollen sus capacidades de tal manera que les permita enfrentar exitosamente las exigencias del mundo actual.

Con este proyecto se desarrolla una herramienta que le permite al estudiante relacionarse, adiestrarse y solventar dudas en la temática de robótica móvil.

La importancia de este proyecto radica en que al contar con guías de laboratorio que adiestren sólidamente al estudiante con prácticas, sobre la operación, programación y simulación de los robots móviles, se ofrece al estudiante la oportunidad de ampliar su panorama de conocimientos y capacidades que le provean herramientas para una mejor inserción en un futuro ámbito laboral.

Existen empresas dentro del Ecuador que se encuentran buscando alternativas económicas de apoyo robótico a los procesos de logística dentro de las plantas industriales. Al estar la robótica escasamente desarrollada en el país, y dado el alto costo que implica la importación de este tipo de maquinaria, se podría desarrollar nichos de trabajo en el ámbito de la robótica móvil, donde se desarrolle tecnología que responda a las necesidades específicas de la

realidad ecuatoriana aportando al desarrollo de la industria del país.

1.3 Alcance

Este proyecto tiene como finalidad diseñar y elaborar prácticas de laboratorio, utilizando las plataformas móviles Pioneer P3 – DX, que se encuentran a cargo del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la ESPE matriz, para las asignaturas de Robótica Industrial y Robótica Social de las carreras afines. Aunque en las prácticas se utilizan plataformas Pioneer, se persigue generalizar los conocimientos de los estudiantes a cualquier tipo de plataforma rodante.

Se planteará una serie de prácticas ilustrativas (se prevé 6 prácticas) que serán previamente probadas para garantizar su óptimo funcionamiento, donde se instruya al estudiante sobre la programación de plataformas móviles Pioneer, y sus componentes como sensores ultrasónicos y bumpers.

Se prevé capacitar al estudiante en temas como: El guiado y odometría, el control cinemático de los robots, la planificación de trayectorias, navegación autónoma y prevención de colisiones. Para cada una de las prácticas se diseñará una guía que contiene la siguiente información: tema, objetivos, resultados de aprendizaje esperados, marco teórico, materiales/recursos y equipos, procedimiento, formato de presentación de resultados y sugerencias para análisis de resultados.

Además, se diseñará guías preparatorias que cuenten con preguntas referentes al tema de la práctica que permiten ejercitar e involucrar al estudiante en el desarrollo de la misma.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de formación en robótica móvil, para ingenieros mediante software de simulación y el uso de plataformas móviles rodantes P3 –DX.

1.4.2. Objetivo Específico

- Aportar a los estudiantes de las asignaturas de Robótica Industrial y Robótica Social, con conocimientos de Robótica móvil mediante guías de prácticas de laboratorio.
- Implementar algoritmos de control de robots móviles rodantes diferenciales, haciendo uso de plataformas Pioneer P3 – DX y software especializado.
- Fomentar el desarrollo de algoritmos de planificación y control de trayectorias de plataformas móviles rodantes diferenciales, mediante las guías de laboratorio.

CAPÍTULO II

2.1 Introducción a la robótica móvil

Los robots móviles son máquinas con capacidad de transporte automático, es decir, plataformas mecánicas dotadas de un sistema de locomoción capaz de navegar a través de un determinado ambiente de trabajo, dotado de cierto nivel de autonomía para su desplazamiento portando cargas (Cruz, 2008).

2.2 Componentes de la plataforma robótica Pioneer P3 - DX

(Ollero Baturone & González Jiménez, 2015) Define a los robots móviles como sistemas formados por diversos subsistemas de percepción, planificación, control de movimientos y locomoción que interaccionan entre sí.

2.2.1. Sistema Motriz

El sistema motriz o de locomoción es el que dota al robot con la capacidad de moverse de un lugar a otro. Existen algunos tipos de sistemas motrices para los robots móviles, su utilización depende del tipo de aplicación para el que está diseñado el robot, y del medio por el que este va a transportarse. La clasificación de los robots considerando el medio por el cual se transportan es:

Tabla 1:

Clasificación de robots por medio de transporte y sus mecanismos de locomoción

Medio	Denominación	Mecanismos de Locomoción
Aire	Robots Aéreos	Hélices
Tierra	Robots Terrestres	Ruedas, Patas, otros mecanismos bioinspirados
Agua	Robots Acuáticos	Hélices, Aletas

Fuente: (Ramos, Cinemática de Robots Mviles, 2016)

La plataforma robótica Pioneer 3 – DX, véase la *Figura 1*, es un robot móvil terrestre con un sistema de locomoción por ruedas, con un sistema de tracción diferencial.



Figura 1. Plataforma robótica Pioneer P3 –DX
Fuente: (MobileRobots Inc., 2006)

El sistema de tracción diferencial, como se define en (Ollero Baturone & González Jiménez, 2015), consiste en dos ruedas fijas actuadas, y adicionalmente se utiliza una o más ruedas orientables no actuadas, para brindar soporte, dispuestas como se muestra en la *Figura 2*.

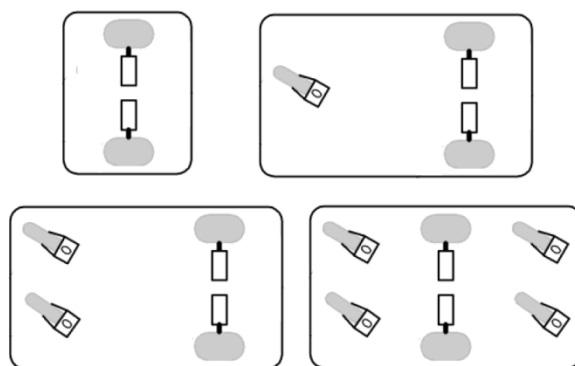


Figura 2. Tipos de sistemas de tracción diferencial
Fuente: (Ramos, FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA, 2017)

El direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas actuadas. La tracción se consigue también con estas mismas ruedas. Esto se logra con motores independientes en las ruedas actuadas. Este modelo es de construcción sencilla y permite rotación del robot sobre su propio eje.

Los motores que utiliza la plataforma móvil P3 – DX se encuentran directamente acoplados a las ruedas del robot, véase la *Figura 3*, estos poseen cajas de engranajes reductoras para reducir las revoluciones del motor transformándolas en un mayor torque en las ruedas del robot, las características de dichos motores se muestran en la Tabla 2.

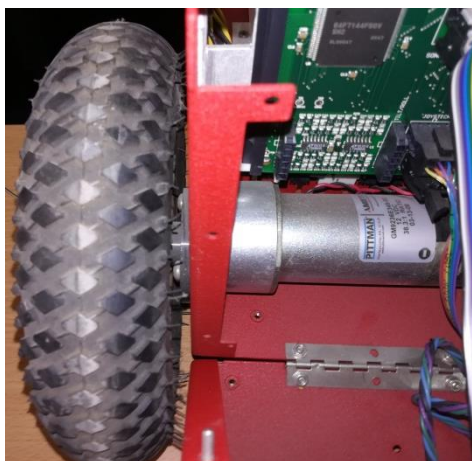


Figura 3. Motor PITTMAN de 12V, Gear Ratio 38.3:1

Tabla 2:

Características Técnicas de los motores eléctricos

Característica	Descripción
Marca	PITTMAN
Modelo	GM9236E349-R2
Voltaje	12V
Radio de reducción	38.3:1

Fuente: (Ramos, Cinemática de Robots Moviles, 2016)

2.2.2. Sistema de Alimentación

La plataforma robótica Pioneer P3 – DX utilizada en la elaboración del presente trabajo cuenta con 3 baterías eléctricas recargables, véase la *Figura 4*, cuyas características se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3:
Características de las baterías

Característica	Descripción
Cantidad	Hasta 3 a la vez
Voltaje	12V
Corriente	7.2Ah cada una
Química	Plomo-ácido
Tiempo de Duración	8 – 10 horas con 3 baterías
Intercambiables en caliente	Si

Fuente: (MobileRobots Inc., 2006)



Figura 4. Baterías eléctricas recargables de Plomo Ácido

2.2.3. Sistema de Sensorización

Los sistemas de sensorización se dividen en:

- **Sensores Propioceptivos**

Son sensores internos de los robots que permiten estimar el estado del robot, entre los sensores propioceptivos se encuentran los sistemas de medición inercial y los encoders. La plataforma Pioneer P3 –DX usada para el desarrollo del presente trabajo se encuentra equipada con los siguientes elementos de sensorización propioceptiva:

Encoders

Las plataformas robóticas Pioneer P3 – DX utilizan encoders rotativos incrementales de dos canales, de 500 CPR, los encoders vienen incluidos en los motores.

Nota: Algunas plataformas Pioneer P3 – DX poseen sensores inerciales como giroscopios e inclinometro, y magnetómetro, sin embargo la plataforma utilizada no posee dichos sensores.

- **Sensores Extereceptivos**

Son sensores externos de los robots que permiten conocer el estado del entorno del robot, los sensores extereoreceptivos con los que cuenta la plataforma Pioneer P3 –DX usada para el desarrollo del presente trabajo son un conjunto de 8 sensores ultrasónicos en el anillo frontal del robot, uno cada 20°, también dispone de 2 arreglos de 5 bumpers, en los anillos frontal y trasero del robot.

Sensores Ultrasónicos

La plataforma robótica Pioneer P3 –DX posee un arreglo de 8 sensores ultrasónicos que le permiten obtener información de su entorno, y así evitar obstáculos, los sensores que utiliza son los sensores ultrasónicos OpenFace Series 600 de SENSCOMP véase la *Figura 5*, cuyas características técnicas se muestran en la **Tabla 4**.



Figura 5. Sensores ultrasónicos SENSCOMP

Tabla 4:
Características Técnicas de los sensores ultrasónicos

Característica	Descripción
Rango útil de frecuencias	50KHz – 60KHz
Patrón del haz	15° a -6dB
Sensibilidad de Transmisión	110dB
Sensibilidad de Recepción	-42dB
Rango de distancia	0.15m a 10.7m
Resolución	±3mm a 3m

Fuente: (SensCom, 2004)

El arreglo de sensores ultrasónicos se encuentra dispuesto físicamente como se muestra en la *Figura 6*.

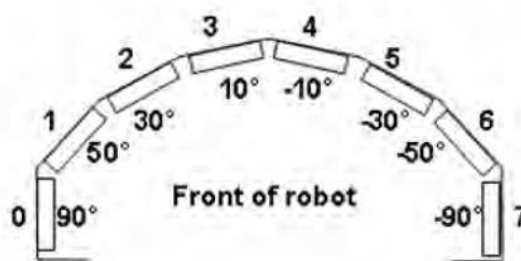


Figura 6. Disposición física de los sensores ultrasónicos del SONAR.
Fuente: (Whitbrook, 2010)

Bumpers

La plataforma robótica Pioneer P3 –DX posee dos arreglos, uno en la parte frontal y uno en la parte trasera, cada uno con 5 sensores finales de carrera, que actúan como sensores de contacto que le permiten obtener información de su entorno, y así en caso de choque con algún obstáculo, conocer la ubicación donde se produjo el choque y poder en base a dicha información tomar una decisión para corregir la trayectoria de desplazamiento. La disposición física en la que se ubica el arreglo de bumpers trasero se muestra en la *Figura 7*.

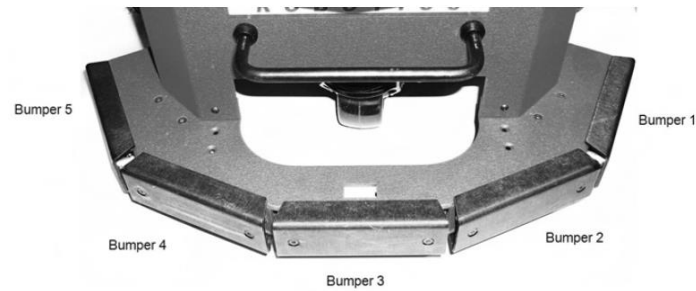


Figura 7. Arreglo de bumpers trasero

Fuente: (Whitbrook, 2010)

2.3 Representación Espacial

Para poder ubicar un robot móvil en el espacio se comienza asignando un sistema de coordenadas móvil $\{\mathbf{R}\}$ sobre el robot, y también se asigna un sistema de coordenadas inercial $\{\mathbf{I}\}$ en algún punto específico del entorno del robot, como se muestra en la *Figura 8*. Al sistema inercial también se lo conoce como sistema global, absoluto o fijo, ya que su origen suele definirse por lo general en el punto de partida del robot. La representación espacial del robot quedará definida cuando se describa la posición y la orientación del robot.

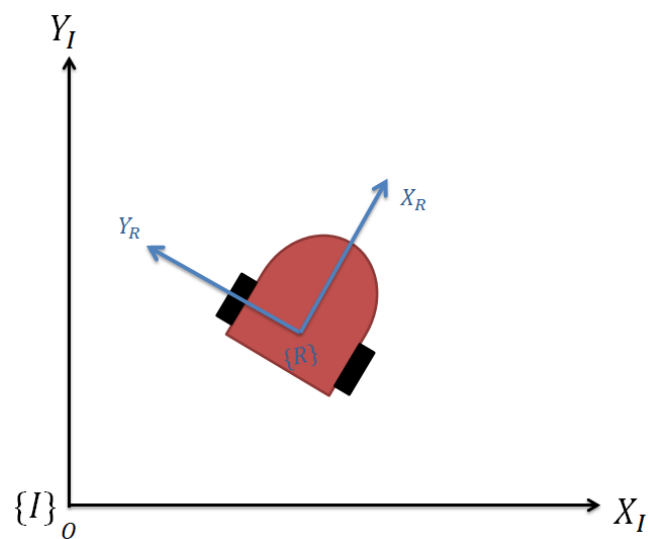


Figura 8. Sistemas de referencia de un robot móvil

2.3.1. Representación Posición

La posición es la ubicación de un punto en el espacio con respecto a un sistema de referencia, como se ilustra en la *Figura 9*. Para representar la posición de un robot móvil se establece un punto fijo al cuerpo del robot móvil, generalmente el centro de masas del mismo.

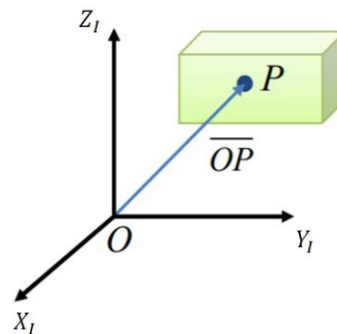


Figura 9. Posición de un cuerpo en el espacio

El empleo de plataformas robóticas móviles de ruedas generalmente se realiza en ambientes planos y sin inclinaciones, dado que los movimientos de dichos robots se realizan en un plano para facilitar su representación espacial y simplificar la matemática de la cinemática, se representa la posición de dichos robots móviles en dos dimensiones, generalmente se hace uso de coordenadas cartesianas, dada la naturaleza de los movimientos de la mayoría de los robots con ruedas.

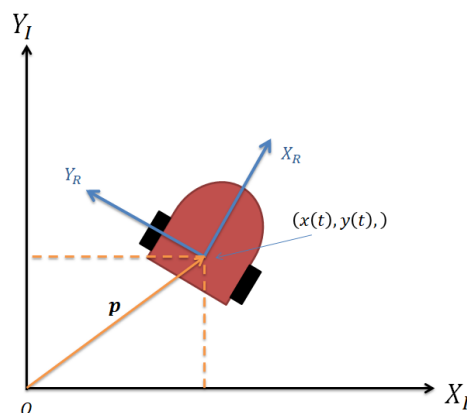


Figura 10. Representación de la posición

Para representar la posición del robot de la *Figura 10* se utiliza el vector \mathbf{p} de la forma:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dónde:

x : Coordenada de posición en el eje X

y : Coordenada de posición en el eje Y

2.3.2. Representación Orientación

La orientación es la dirección en la que se ubica un sistema de referencia respecto de otro.

Para representar la orientación de un robot móvil se establece un sistema de referencia móvil

sobre el cuerpo del robot móvil con su eje X_R perpendicular al lado frontal del robot y el eje

Y_R perpendicular al costado del robot, y su origen sobre el centro de masas del mismo. La

orientación queda definida por el ángulo comprendido entre los ejes X_I y X_R de los sistemas

inercial y móvil respectivamente como se ilustra en la *Figura 11*.

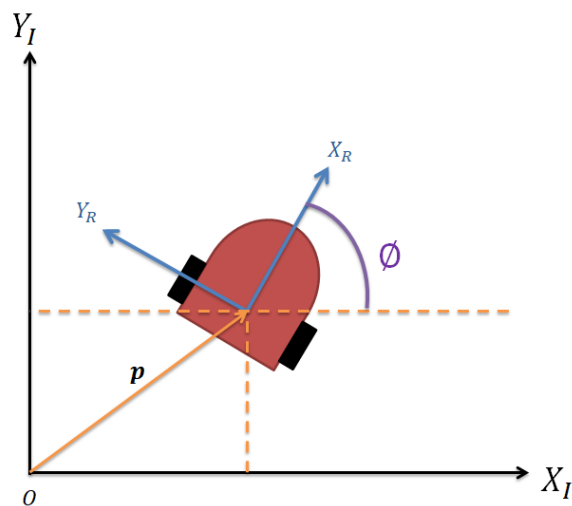


Figura 11. Representación de la orientación

La orientación finalmente queda representada en un escalar ϕ .

2.3.3. Representación Vectorial

Para facilitar los cálculos matemáticos, se realiza una representación vectorial de la posición y de la orientación en un solo vector p .

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dónde:

x : Coordenada de posición en el eje X
 y : Coordenada de posición en el eje Y
 θ : Ángulo de orientación

2.4 Modelado Cinemático

El modelado cinemático del robot móvil es la obtención de un modelo matemático de su locomoción considerando su geometría. La locomoción representa la habilidad del robot para moverse de un lugar a otro. Es imprescindible contar con un modelo del robot, antes de realizar el diseño de un controlador.

2.4.1. Preliminares

Para el análisis de los robots móviles bajo estudio se adoptan algunas hipótesis simplificadoras.

- a) El robot se mueve sobre una superficie plana.
- b) Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.
- c) Se supone que las ruedas se mueven con rodadura pura; es decir, el deslizamiento es depreciable en el periodo de control.
- d) El robot no tiene partes flexibles.

- e) Durante un periodo de tiempo suficientemente pequeño en el que se mantiene constante la consigna de dirección, el vehículo se moverá de un punto al siguiente a lo largo de un arco de curvatura.
- f) El robot se comporta como un sólido rígido, de forma que si existen partes móviles (ruedas de dirección), éstas se situarán en la posición adecuada mediante el sistema de control.

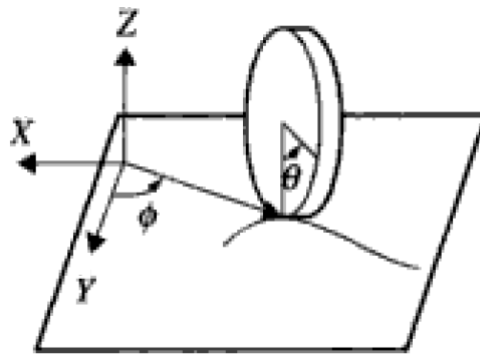


Figura 12. Movimiento de la rodadura sin deslizamiento
Fuente: (Ollero Baturone & González Jiménez, 2015)

La condición de rodadura sin deslizamiento de la *Figura 12*, introduce dos restricciones, dado que la distancia recorrida por el punto de contacto sobre el borde de la rueda es igual a la distancia que recorre la rueda sobre el plano. Por consiguiente, proyectando la velocidad del punto de contacto en el plano, paralela y perpendicularmente al disco, se obtiene:

$$-\dot{x} \sin \varnothing + \dot{y} \cos \varnothing = \dot{\theta} c \quad (3)$$

$$-\dot{x} \cos \varnothing + \dot{y} \sin \varnothing = 0 \quad (4)$$

Dónde:

\dot{x} : Es la componente de velocidad de la rueda en el eje X

\dot{y} : Es la componente de velocidad de la rueda en el eje Y

$\dot{\theta}$: Es la velocidad angular de rotación de la rueda

\varnothing : Es el ángulo de orientación de la rueda sobre el plano

Estas son restricciones no-holonómicas ya que se involucran relaciones no integrables entre coordenadas diferenciales. Lo que quiere decir que para que el robot pueda moverse desde unas condiciones iniciales $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \boldsymbol{\theta}_0, \phi_0)$, hasta unas condiciones finales $(\mathbf{x}_f, \mathbf{y}_f, \boldsymbol{\theta}_f, \phi_f)$, el robot debe seguir una trayectoria que cumpla con dichas restricciones, a diferencia de un robot omnidireccional que tiene la capacidad de desplazarse en cualquier dirección.

2.4.2. Cinemática Directa

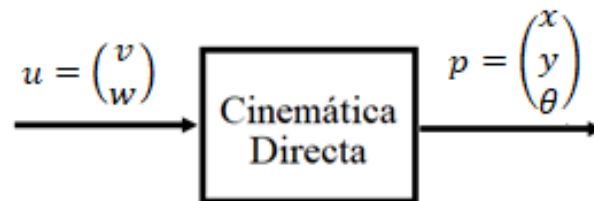


Figura 13. Cinemática Directa

La cinemática directa de los robots móviles es un modelo de la locomoción del robot. Uno de los enfoques que tiene es de calcular la velocidad del robot a partir de la velocidad angular y de rotación de sus ruedas. Otro enfoque que posee la cinemática directa de robots móviles es el de calcular la posición final del robot y su orientación, a partir de la posición inicial y las velocidades de las ruedas del robot.

Se parte definiendo los sistemas de referencia inercial $\{\mathbf{I}\}$ en el entorno de la plataforma robótica y el sistema de referencia móvil $\{\mathbf{R}\}$ situado sobre el punto central de la tracción diferencial, cuyo movimiento es gobernado por la acción combinada de la velocidad angular $\boldsymbol{\omega}$, y la velocidad lineal \mathbf{v} siempre dirigida sobre uno de los ejes del sistema de referencia móvil como se describe en la *Figura 14*.

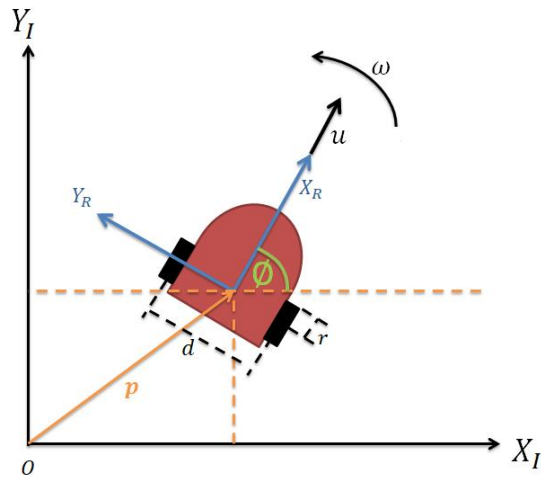


Figura 14. Velocidad translacional v y velocidad angular ω

Las coordenadas que representan la posición cartesiana del vehículo, x e y , y su orientación ϕ . Y las variables de actuación que se tiene del robot v y ω , siendo estas las velocidades translacional y rotacional del robot respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

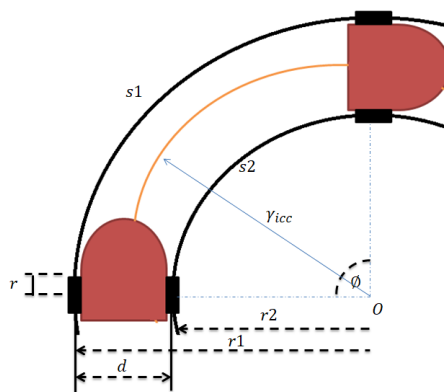


Figura 15. Velocidades independientes de las ruedas laterales. v_i y v_d

Las variables de control son las velocidades de giro de la rueda izquierda y derecha

respectivamente v_i y v_d . Como se muestra en la *Figura 15*, cuando el robot móvil realiza una trayectoria cualquiera, describe una circunferencia de radio r_{icc} , denominado radio del centro de curvatura instantánea ICC, que está dado por:

$$r_{icc} = \frac{v}{\omega} \quad (6)$$

Por tanto, si el robot solamente posee velocidad lineal, la velocidad angular ω es nula, y por tanto el radio r_{icc} sería infinito, dando lugar a una trayectoria recta.

También se muestran las trayectorias seguidas por las ruedas del robot diferencial cuando se produce un desplazamiento del mismo. La rueda izquierda realiza una trayectoria de longitud:

$$s_1 = r_1 \cdot \emptyset \quad (7)$$

Para tiempos de muestreo lo suficientemente pequeños la velocidad de la rueda izquierda puede expresarse como:

$$v_i = r_1 \cdot \omega_i \quad (8)$$

De la misma forma la rueda derecha describe una trayectoria de longitud:

$$s_2 = r_2 \cdot \emptyset \quad (9)$$

Para tiempos de muestreo lo suficientemente pequeños la velocidad de la rueda derecha puede expresarse como:

$$v_d = r_2 \cdot \omega_d \quad (10)$$

De tal forma que la velocidad del robot será igual a la semisuma de las dos velocidades de sus ruedas.

$$v = \frac{v_i + v_d}{2} \quad (11)$$

Y la velocidad angular del robot se obtendrá a partir de la resta de las dos trayectorias y de la

separación entre las ruedas.

$$\omega = \frac{(v_d - v_i)}{(r_1 - r_2)} = \frac{(v_d - v_i)}{d} \quad (12)$$

Dónde:

r : Radio de las ruedas del robot

d : Distancia entre las ruedas

Si se desea expresar las ecuaciones en función de las velocidades traslacionales de cada una de las ruedas individualmente, el sistema se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 \\ \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{v_i + v_d}{2} \\ \frac{v_d - v_i}{d} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sabiendo que:

$$\omega_i = \frac{v - \left(\frac{d}{2}\right) \omega}{r} \quad (14)$$

$$\omega_d = \frac{v + \left(\frac{d}{2}\right) \omega}{r} \quad (15)$$

Se puede expresar las ecuaciones en función de las velocidades angulares de cada una de las ruedas individualmente, el sistema se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r \sin \phi}{2} & \frac{-r \sin \phi}{2} \\ r \cos \phi & r \cos \phi \\ \frac{2}{r} & \frac{2}{r} \\ -\frac{1}{d} & \frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (16)$$

La ecuación (16) constituye el jacobiano de direccionamiento diferencial, también conocida

como cinemática diferencial directa.

Suele usarse al igual que en cinemática directa de robots manipuladores, la matriz del jacobiano, de forma que el vector p representa la posición del robot en el espacio, y el vector q representa las variables de actuación, el modelo directo se expresa como:

$$\dot{p} = J_p \dot{q} \quad (17)$$

Para estimar la posición y orientación final del robot, se hace necesaria la integración de las ecuaciones del vector \dot{p} , y será necesario también conocer la posición y orientación inicial p_0 , de coordenadas x_0, y_0, ϕ_0 . Así el modelo se expresa como:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \phi_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_0^{\Delta t} v \cos \phi \, d\tau \\ \int_0^{\Delta t} v \sin \phi \, d\tau \\ \int_0^{\Delta t} \omega \, d\tau \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \phi_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v \Delta t \cos \phi \\ v \Delta t \sin \phi \\ \omega \Delta t \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sin embargo, es necesario señalar que la estimación de la posición mediante las ecuaciones (18) y (19) es una aproximación válida sólo para periodos de tiempo suficientemente pequeños, ya que en caso contrario se produce una acumulación de error debido a inevitables deslizamientos y otros efectos provocados por comportamientos dinámicos, relacionados fundamentalmente con la interacción entre el vehículo y el terreno, que no están contemplados en el modelo.

2.4.3. Modelo Cinemático directo con punto de interés desplazado

Por motivos de control de la plataforma en ocasiones es deseable expresar el modelo cinemático en función de un punto de interés diferente al punto medio entre las 2 ruedas, es por ello que se usa un modelo cinemático con un punto de interés desplazado una distancia a , como se muestra en la *Figura 16*. Dicho modelo se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -a \sin \phi \\ \sin \phi & a \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (20)$$

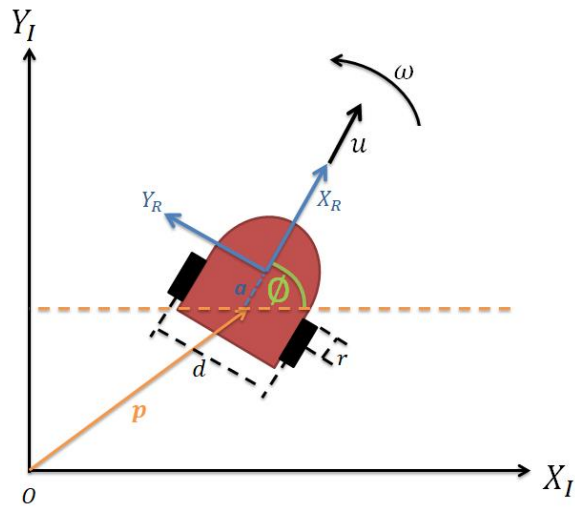


Figura 16. Modelo con punto de interés desplazado

2.4.4. Cinemática Inversa

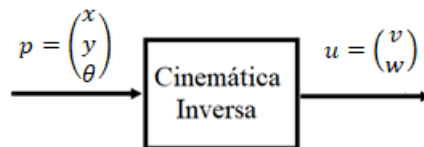


Figura 17. Cinemática Inversa

La cinemática inversa de los robots móviles es un modelo de la locomoción del robot. Un enfoque que posee es el de calcular las velocidades rotacional y de giro de las ruedas, a partir de la velocidad del robot. Otro enfoque que posee la cinemática inversa de los robots móviles es el de determinar las velocidades que se debe imprimir sobre las ruedas; es decir las variables de actuación durante un tiempo t , a partir de la posición inicial y posición a la que se desea alcanzar.

El modelo de cinemática inversa, tal como el que suele usarse para robots manipuladores involucra la inversa de la matriz del jacobiano. Para resolverlo de una forma general sería necesario invertir el jacobiano. Cuando el jacobiano no es cuadrado, es necesario emplear la pseudo inversa de la siguiente forma:

$$\dot{p} = J_p \dot{q} \quad (21)$$

$$[J_p]^T \dot{p} = [J_p]^T J_p \dot{q} \quad (22)$$

$$[[J_p]^T J_p]^{-1} [J_p]^T \dot{p} = \dot{q} \quad (23)$$

$$\dot{q} = [[J_p]^T J_p]^{-1} [J_p]^T \dot{p} \quad (24)$$

Así se obtiene:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Que también puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varnothing & \sin \varnothing & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{x - x_0}{dt} \\ \frac{y - y_0}{dt} \\ \frac{\varnothing - \varnothing_0}{dt} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Si se desea conocer las velocidades traslacionales individuales de las ruedas que se deben aplicar se tiene:

$$\begin{bmatrix} v_i \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varnothing & \sin \varnothing & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varnothing} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Si se desea conocer las velocidades angulares de las ruedas que se deben aplicar se tiene:

$$\begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{d}{2r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{d}{2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varnothing & \sin \varnothing & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varnothing} \end{bmatrix} \quad (28)$$

La cinemática inversa pretende calcular las velocidades necesarias para ir desde un punto de inicio hasta una meta en un tiempo dado, esto la vuelve más compleja que la cinemática directa ya que posee infinitas soluciones y múltiples estrategias de resolución.

Una de las soluciones más sencillas consiste en la descomposición del alcance del punto objetivo en tres movimientos: Reorientación, Avance y Reorientación final como se muestra en la *Figura 18*.

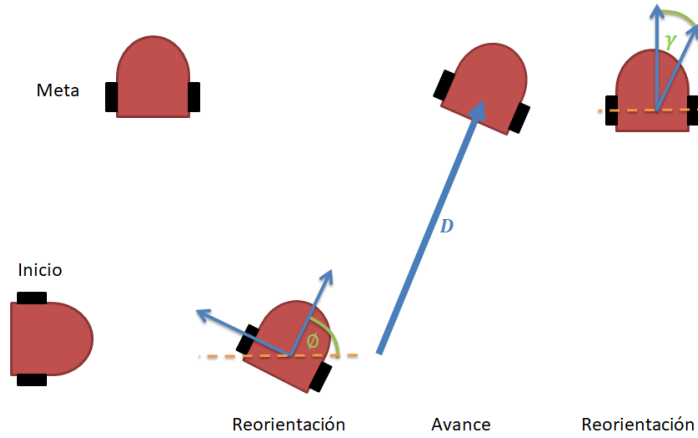


Figura 18. Solución a la cinemática inversa Reorientación – Avance – Reorientación

Dónde:

θ : Es el ángulo de reorientación inicial,

D : Es la distancia de avance

γ : Es el ángulo de reorientación final.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y_f - Y_o}{X_f - X_o} \right) \quad (29)$$

$$D = \sqrt{(X_f - X_o)^2 + (Y_f - Y_o)^2} \quad (30)$$

$$\gamma = \theta_{META} - \theta \quad (31)$$

2.4.5. Modelo cinemático inverso con punto de interés desplazado

Asumiendo un modelo con el punto de interés desplazado como se muestra en la *Figura 16*,

el modelo cinemático inverso se expresa como:

$$\dot{q} = \left[[J_p]^T J_p \right]^{-1} [J_p]^T \dot{p} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \left[[J_p]^T J_p \right]^{-1} [J_p]^T \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Dónde:

$$J_p = \begin{bmatrix} \cos \phi & -a \sin \phi \\ \sin \phi & a \cos \phi \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

2.5 Odometría

La odometría es una técnica empleada en robótica móvil para estimar la posición y orientación del robot, con respecto a su posición y orientación inicial, usando para ello el número de vueltas dadas por sus ruedas y traduciéndolo en desplazamiento lineal relativo al suelo, es decir se obtiene la velocidad de sus ruedas mediante el uso de alguna instrumentación y se aplica cinemática directa para así estimar la actual posición del robot. La odometría es una técnica ampliamente utilizada ya que es bastante simple, es de bajo costo y permite tasas de muestreo muy altas, sin embargo la idea fundamental de la esta técnica es la integración temporal del movimiento, lo cual lleva inevitablemente a la acumulación de algunos errores, que pueden ser clasificados de la siguiente manera:

Errores sistemáticos

- Los diámetros de las ruedas no son iguales.
- La media de los diámetros de las ruedas difieren del diámetro de fábrica de las ruedas.
- Mal alineamiento de las ruedas.
- Resolución discreta (no continua) del encoder.
- La tasa de muestreo del encoder es discreta.

Errores no sistemáticos:

- Desplazamiento en suelos desnivelados.
- Desplazamiento sobre objetos inesperados que se encuentren en el suelo.
- Patinaje de las ruedas debido a:
 - Suelos resbaladizos.
 - Sobre-aceleración.
 - Derrapes (debidos a una rotación excesivamente rápida).
 - Fuerzas externas (interacción con cuerpos externos).
 - No hay ningún punto de contacto con el suelo.

Las plataformas robóticas Pioneer P3 – DX utilizan encoders rotativos incrementales de dos canales, los cuales entregan un número de pulsos n que dependerá de la distancia recorrida por las ruedas.

Asumiendo que cada rueda posee un número de pulsos por revolución N , se muestrea el acumulador del encoder para obtener el diferencial del número de pulsos como:

$$\Delta n = n_i - n_{i-1} \quad (35)$$

Ahora la velocidad individual de cada rueda para tiempos cortos de muestreo, tanto para la rueda izquierda como para la derecha puede estimarse como:

$$v_i = 2\pi r \frac{\Delta n_i}{N} \quad (36)$$

$$v_d = 2\pi r \frac{\Delta n_d}{N} \quad (37)$$

Dónde:

r = Radio de las ruedas

Δn_i = diferencial de numero de pulsos de la rueda izquierda durante un tiempo de muestreo

Δn_d = diferencial de numero de pulsos de la rueda derecha durante un tiempo de muestreo

En el robot Pioneer P3 – DX el número de pulsos por revolución N es de 76600 pulsos.

$$N = 76600 \text{pulsos} \quad (38)$$

Por último se tiene que:

$$v = \frac{v_i + v_d}{2} \quad (39)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_i}{d} \quad (40)$$

Una vez obtenidas las velocidades traslacional y angular del robot, se estima la posición del robot aplicando la ecuación (19) empleando una tasa de muestreo lo suficientemente pequeña.

2.6 Control Cinemático de robots móviles

El objetivo del desarrollo de un controlador es que el robot realice de forma autónoma movimientos previamente planificados, para ello será necesario planificar una trayectoria a partir de mapas o planos del entorno, esta aproximación de control es aplicada, siempre que el entorno por el cual se desplazará el robot sea conocido, y se pueda considerar como

invariable en el tiempo. Este problema puede formularse como la obtención de leyes de control que permitan estabilizar las acciones de control del robot para que realice el seguimiento de una trayectoria.

Dada una estructura particular (robot móvil diferencial), será necesario determinar los movimientos requeridos por cada rueda del robot (dichas ruedas son controladas por los motores), para que pueda ser llevado a una posición y orientación requeridas en el espacio de trabajo. La ley de control tiene como objetivo procurar que las trayectorias seguidas por el robot sean lo más parecidas a las que el control de movimiento propone como trayectoria deseada (Yang et al., 2010).

Para controlar el vehículo sobre la trayectoria se necesita estimar su posición. Como se sabe, el método más simple es mediante odometría, empleando las medidas de los codificadores ópticos en los ejes de las ruedas.

Para el desarrollo de este proyecto de titulación se realizará un acercamiento al control autónomo de robots móviles, utilizando un controlador proporcional de posición cinemático.

2.6.1. Control Proporcional de Posición

Para el desarrollo de un controlador proporcional de posición, se hará uso del modelo cinemático con el punto de interés desplazado descrito en el apartado 2.4.3. Puesto que se desarrolla un control para seguimiento de una trayectoria conocida, se utiliza el modelo cinemático inverso del robot móvil con el punto de interés desplazado una distancia \mathbf{a} , del eje del centro de las ruedas. Dado que este control realiza únicamente seguimiento de una trayectoria mas no involucra la orientación, no se considerará la orientación para el cálculo de las velocidades.

El modelo cinemático directo está dado por

$$\dot{p} = J_p \dot{q}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -a \sin \phi \\ \sin \phi & a \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

Considerando el modelo inverso

$$\dot{q} = \left[[J_p]^T J_p \right]^{-1} [J_p]^T \dot{p}$$

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\frac{\sin \phi}{a} & \frac{\cos \phi}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}$$

La estructura del controlador que se propone es la que se muestra en la *Figura 19*.

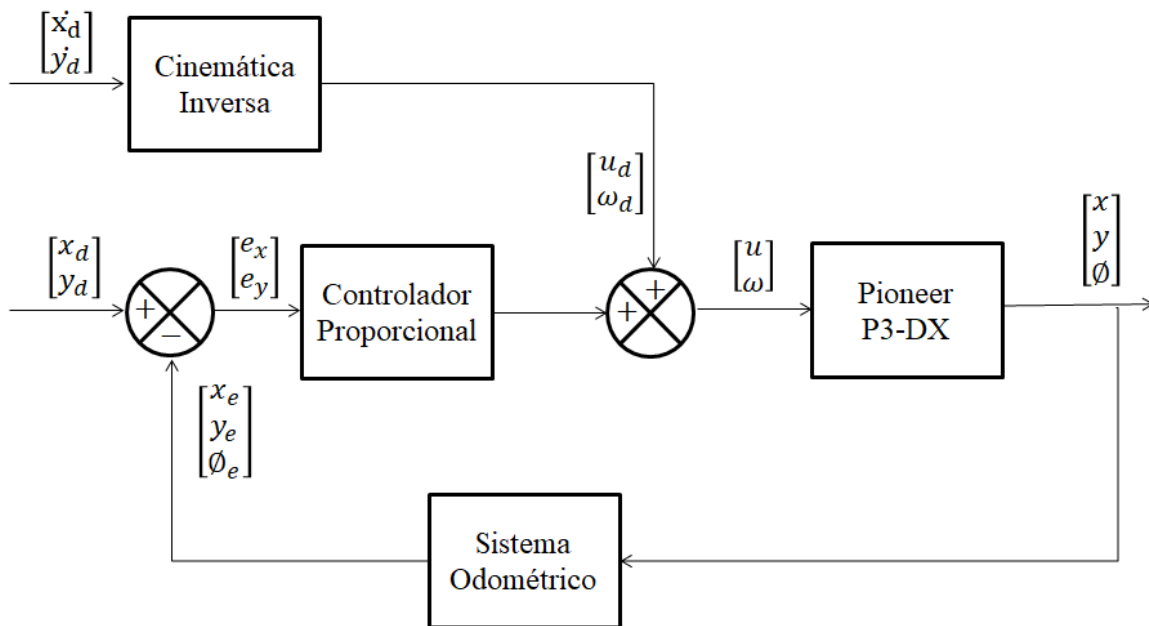


Figura 19. Estructura de controlador proporcional cinemático

La ley de control propuesta está dada por:

$$\dot{q} = \left[[J_p]^T J_p \right]^{-1} [J_p]^T \cdot \begin{pmatrix} v_{dx} + K e_x \\ v_{dy} + K e_y \end{pmatrix} \quad (41)$$

Dado que la velocidad del robot no es ilimitada si el error es muy grande, los términos $K e_x$ y $K e_y$ podrían dispararse, para evitarlo se ha incorporado la función tangente hiperbólica del error para así evitar la saturación de las velocidades del vehículo.

$$\dot{q} = \left[[J_p]^T J_p \right]^{-1} [J_p]^T \cdot \begin{pmatrix} v_{dx} + K \tanh(e_x) \\ v_{dy} + K \tanh(e_y) \end{pmatrix} \quad (42)$$

2.6.2. Control de Evasión de obstáculos

Para el diseño del controlador de evasión de obstáculos se debe partir considerando cuales son los sensores exteroceptivos que posee el robot, estos nos permitirán adquirir información del mundo exterior y conocer la ubicación de cualquier obstáculo que se presente en la trayectoria a seguir. Los sensores exteroceptivos más usados para realizar evasión de obstáculos suelen ser los arreglos de sensores ultrasónicos y los scanner laser de dos dimensiones. La plataforma robótica Pioneer 3- DX utilizada para este trabajo de titulación cuenta con un arreglo de sensores ultrasónicos (SONAR) frontal.



Figura 20: Plataforma equipada con Cámara, Scanner Laser y SONAR

Fuente: (Inc., Pioneer 3 Operators Manual, 2006)

El control de evasión de colisiones se basa en el método de fuerza ficticia. El concepto consiste en cubrir un entorno de trabajo con una fuerza artificial, mediante la cual el robot es atraído por la meta y repelido por los obstáculos. Dicho campo de fuerza es variable y es una función de la distancia censada hacia el obstáculo. (Borenstein & Koren, 1991)

La fuerza se define como:

$$|\vec{F}_{(k)}| = \begin{cases} 0 & \text{si } d_k > d_{max} \\ f(k) & d_k \leq d_{max} \end{cases}$$

Donde d_k es la distancia sensada entre el robot y el obstáculo, d_{max} se define como la distancia donde empieza el campo repulsivo y se activa la estrategia de evasión, d_{min} es la distancia mínima de no contacto del robot con el obstáculo, véase la *Figura 21*.

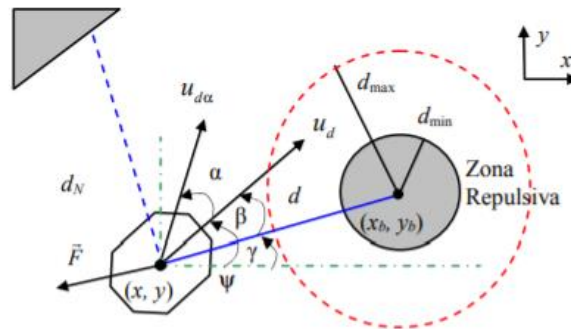


Figura 21. Esquema del método de fuerza ficticia modificada

Fuente: (Rosales, Scaglia, Mut, & F, 2009)

El arreglo está compuesto por 8 sensores, en MATLAB dichos sensores se encuentran numerados como se muestra en la *Figura 22*.

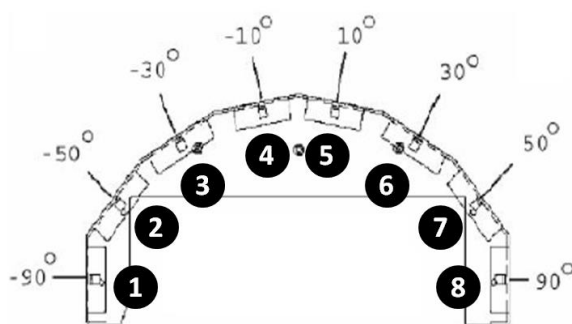


Figura 22. Distribución de los sensores ultrasónicos en el arreglo (SONAR)

Fuente: (MobileRobots Inc., 2006)

La forma más eficaz de evadir una colisión es actuando sobre la velocidad angular del robot, causando que este gire y evitando de esta manera la colisión, adicionalmente se debe variar la velocidad transnacional del robot en algunos casos reduciéndola para sortear los obstáculos con mayor facilidad.

- Si el sensor uno detecta un objeto en una posición menor a los 10cm se realizará un giro en sentido anti – horario, de 10°
- Si el sensor dos detecta un objeto en una posición menor a los 25cm se realizará un giro en sentido anti – horario, de 40°
- Si el sensor tres detecta un objeto en una posición menor a los 40cm se realizará un giro en sentido anti – horario, de 60°
- Si el sensor cuatro detecta un objeto en una posición menor a los 60cm se realizará un giro en sentido anti – horario, de 80°
- Si el sensor cinco detecta un objeto en una posición menor a los 60cm se realizará un giro en sentido horario, de 80°
- Si el sensor seis detecta un objeto en una posición menor a los 40cm se realizará un giro en sentido horario, de 40°

- Si el sensor siete detecta un objeto en una posición menor a los 25cm se realizará un giro en sentido horario, de 60°
- Si el sensor ocho detecta un objeto en una posición menor a los 10cm se realizará un giro en sentido horario, de 10°

Convirtiendo estas reglas a una ecuación, esta se expresaría de la siguiente manera:

$$\omega_f = \omega + 10^\circ \left(\frac{10\text{cm}}{s(1)} \right) + 40^\circ \left(\frac{25\text{cm}}{s(1)} \right) + 60^\circ \left(\frac{40\text{cm}}{s(1)} \right) + 80^\circ \left(\frac{60\text{cm}}{s(1)} \right) + 80^\circ \left(\frac{60\text{cm}}{s(1)} \right) + 60^\circ \left(\frac{40\text{cm}}{s(1)} \right) + 40^\circ \left(\frac{25\text{cm}}{s(1)} \right) + 10^\circ \left(\frac{10\text{cm}}{s(1)} \right) \quad (43)$$

Las reglas para la velocidad traslacional serían:

- Si el sensor cuatro detecta un objeto en una posición menor a los 50cm se reducirá un giro la velocidad traslacional a la mitad.
- Si el sensor cinco detecta un objeto en una posición menor a los 50cm se reducirá un giro la velocidad traslacional a la mitad.

Convirtiendo estas reglas a una ecuación, esta se expresaría de la siguiente manera:

$$u_f = u - \left(\frac{u}{2} \right) \left(\frac{50\text{cm}}{s(4)} \right) - \left(\frac{u}{2} \right) \left(\frac{50\text{cm}}{s(5)} \right) \quad (44)$$

Se realiza una sumatoria de los pesos y se obtienen las acciones de control finales. La estructura del controlador que se propone es la que se muestra en la *Figura 23*. El controlador de evasión de colisiones posee prioridad sobre el controlador proporcional de seguimiento de trayectoria, es por esto que la salida del control de evasión de colisiones es sumada a la salida del controlador de seguimiento de trayectorias.

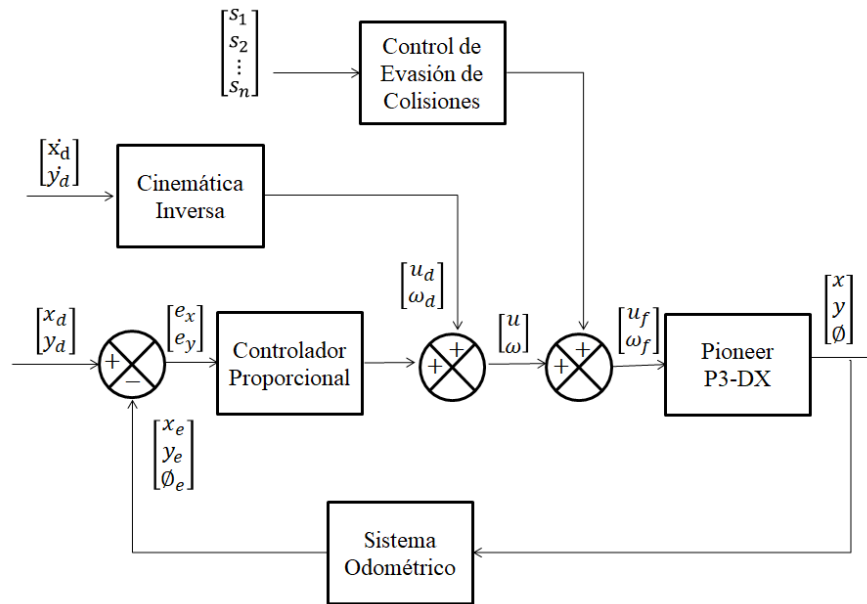


Figura 23. Estructura de controlador con evasión de obstáculos

2.7 Generación de Trayectorias

Para acercamiento que se realizará a la planificación de trayectorias, en este trabajo de titulación se usará la técnica de planificación de caminos en mapas conocidos y estáticos, llamada Técnica de Mapas Probabilísticos PRM.

El algoritmo PRM funciona de la siguiente manera, antes de comenzar es necesario crear un mapa del entorno de trabajo donde se represente gráficamente todos los elementos físicos que podrían causar una colisión con el robot, el algoritmo consta de dos fases: una fase de construcción y una de consulta. La primera fase de construcción consiste en la colocación de puntos aleatoriamente a lo largo del espacio de trabajo del robot, verificando si están en el espacio libre, en caso de no estarlo se vuelve a generar otro punto de manera aleatoria, creando un número N de puntos o nodos determinado, y se establece conexiones entre los

nodos vecinos, tomando en cuenta una distancia máxima d determinada, posteriormente se pasa a la fase de consulta, donde se agregan los puntos de inicio y final al gráfico y se busca el nodo aleatorio más cercano a los puntos de partida y fin, después se obtiene la ruta más corta entre las conexiones establecidas.

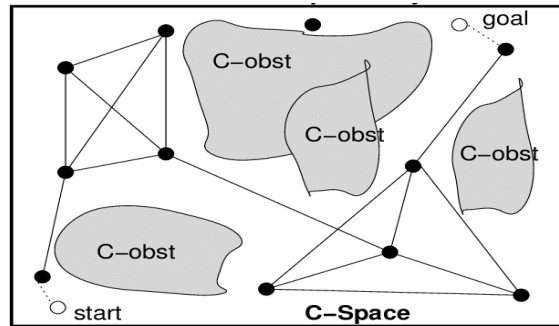


Figura 24. Planificación de caminos con Mapas Probabilísticos PRM

La probabilidad de que el algoritmo no encuentre una ruta, si existe se acerca a cero a medida que el número de nodos o puntos muestreados aumenta. La tasa de convergencia depende de ciertas propiedades de visibilidad del espacio libre, donde la visibilidad está determinada por el planificador local. A grandes rasgos, si cada punto puede "ver" una gran fracción del espacio, y también si una gran fracción de cada subconjunto del espacio puede "ver" una gran fracción de su complemento, entonces el planificador encontrará un camino rápidamente.

CAPÍTULO III

El diseño de las prácticas de laboratorio motivo de este proyecto de titulación, tiene como propósito acercar a los estudiantes a los conceptos básicos sobre navegación de robots móviles autónomos. Se pretende entrenar a los estudiantes en dichos conceptos haciendo uso de una metodología inductiva; partiendo desde las etapas más básicas, como son el modelamiento cinemático del robot, el control cinemático realimentado del mismo para mejorar la precisión de los movimientos, y la planificación de trayectorias, para finalmente llegar a etapas más elaboradas como seguimiento de trayectorias y la evasión de obstáculos. Para ello se utilizan las plataformas robóticas móviles de desarrollo Pioneer P3 – DX, construyendo algoritmos que doten a dicha plataforma de la capacidad navegación autónoma. El software que se emplea para la programación de las algoritmos es ARIA; que es una interfaz de programación de aplicaciones de control de los robots de Pioneer, escrita en C++, permite al programador el acceso a diferentes niveles del robot, desde simples comandos directos con el microcontrolador interno del robot, hasta la implementación de comportamientos inteligentes de alto nivel. Se ha utilizado dos entornos de desarrollo para la programación de las aplicaciones; inicialmente se utiliza Visual Studio como entorno de desarrollo ya que el lenguaje C++ es nativo para este entorno de desarrollo, adicionalmente se utiliza el entorno de programación matemático Matlab ya que este ofrece características que simplifican la programación de los modelos matemáticos y operaciones con matrices, necesarios para la implementación de las algoritmos de cinemática y control.

Las prácticas constan de 3 etapas; La primera de ellas es un trabajo preparatorio, el cual involucra la realización de simulaciones y ejecución de algoritmos que le permitan al

estudiante comprender los conceptos teóricos y capacitarse en las técnicas a ser utilizadas en la práctica de laboratorio, la segunda etapa son las prácticas de laboratorio donde se trabaja con el robot físico tomando mediciones del desempeño de los algoritmos desarrollados para su posterior análisis, que viene a formar parte de la etapa final en la cual se plantea un formato de resultados que el estudiante debe entregar en un informe de laboratorio donde se plasmen los datos obtenidos en la ejecución de los algoritmos sobre la plataforma robótica. Las temáticas para el desarrollo de esta serie de prácticas de laboratorio han sido escogidas de la siguiente manera:

Primeramente es necesario conocer las características físicas, y constructivas del robot, conocer su instrumentación, sus sensores, los dispositivos con los que cuenta, y así poder delimitar sus capacidades. Toda vez que se tenga bien definida su caracterización, construcción física, medidas e instrumentación, se puede pasar a desarrollar un modelamiento cinemático de la plataforma. El modelo cinemático ofrece la posibilidad de estimar la posición del robot, a partir de sus velocidades en un momento dado, o viceversa, permitiendo calcular las velocidades que deben aplicarse a las ruedas de la plataforma para llegar a un punto B desde un punto A en un tiempo dado. Una vez planteado el modelo cinemático, es necesario diseñar un controlador de posición ya que el modelo cinemático presenta errores causados por la aceleración de los motores del robot, deslizamientos, y otros, la implementación de dicho controlador, sienta las bases necesarias para desarrollar la capacidad de seguimiento de trayectorias. Una vez alcanzado el seguimiento de trayectorias, se plantea la cuestión de planificar autónomamente la trayectoria a seguir. (Planificación off line).

Finalmente habiendo examinado todos los temas anteriormente descritos se plantea realizar un aplicativo que unifique todos los conocimientos adquiridos. A continuación se describe la forma en la que se ha abarcado cada tema.

3.1 Práctica 1: Caracterización, Guiado y Programación con Aria

3.1.1. Objetivo General

Relacionar al estudiante a las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX, su programación y sus características de hardware y software.

3.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar los componentes que forman parte del hardware de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX.
- Comprobar las especificaciones técnicas de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX
- Relacionar al estudiante con el firmware ARCOS, de la plataforma P3 – DX.
- Relacionar al estudiante con las librerías de ARIA y su programación en C++.
- Obtener lecturas de los dispositivos periféricos del robot como el sonar y los bumpers.
- Conocer algunos de los comandos de programación de la plataforma móvil.

3.1.3. Alcance

El desarrollo de la práctica 1 busca que el estudiante se relacione con las plataformas de robótica móvil y sus los subsistemas de la misma, como son los sistemas: Mecánico, de sensado, de actuación y de control. Se pretende también dar un primer acercamiento al

estudiante a las librerías de la API de ARIA, que es el software necesario para poder comunicarse con el microcontrolador interno de las plataformas robóticas.

3.1.4. Diseño

La práctica No.1 consta de una guía preparatoria donde se explica las bases del manejo y programación de la plataforma de robótica móvil Pioneer P3 -DX, y se plantean actividades introductorias al manejo de software de simulación de la plataforma (Mobilesim) y de programación de la misma (ARIA).

La guía de laboratorio plantea actividades que tienen como fin acercar al estudiante a la programación de aplicaciones para la plataforma móvil, en lenguaje C++ utilizando el entorno de desarrollo Visual Studio 2017, Se presenta al estudiante 3 aplicaciones. La primera de ellas sirve para demostrar al estudiante el proceso de establecimiento de la conexión tipo cliente – servidor entre la PC y el microcontrolador interno del robot móvil. Las otras dos aplicaciones se orientan a exponer los comandos básicos de programación para obtener datos desde los sensores exteroceptivos de la plataforma robótica Pioneer P3 – DX, como el sonar y los bumpers.

Para obtener la información de los sensores ultrasónicos se ha propuesto colocar uno por uno los sensores del SONAR paralelos a una superficie a una distancia de 20 cm, como se muestra en la *Figura 25* y obtener las mediciones de distancia respecto de la superficie, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de los sensores del SONAR y aprender los comandos de programación necesarios para realizar la adquisición de los datos.



Figura 25. Toma de medida desde el sonar hasta superficie plana

La siguiente actividad que se propone es comprobar el correcto funcionamiento y aprender los comandos de programación necesarios para realizar la adquisición de los datos de los bumpers de la plataforma robótica Pioneer P3-DX, recibiendo un dato del registro de entradas de los Bumpers y codificando el dato en las respectivas activaciones, según se muestra en la Tabla 5, tomando como referencia la numeración descrita en la *Figura 7*.

Tabla 5:

Representación numérica de las activaciones de los bumpers

	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	Bumpers delanteros					Bumpers Traseros								
Bumper number	5	4	3	2	1	Llanta derecha atascada	-	-	5	4	3	2	1	Llanta izquierda atascada
Componente Decimal	8192	4096	2048	1024	521	256	128	64	32	16	8	4	2	1

Al final de la práctica el estudiante deberá realizar un informe donde se evidencie la obtención de información a partir de los sensores, y un cuestionario que evidencie el aprendizaje de algunos comandos básicos de programación.

3.1.5. Resultados de aprendizaje esperados

- Identifica los componentes que forman parte del hardware de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX.
- Maneja el software de simulación de las plataformas robóticas Pioneer.
- Desarrolla aplicaciones básicas de programación de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX.

3.2 Práctica 2: Modelado Cinemático

3.2.1. Objetivo General

Presentar al estudiante el modelo cinemático para las plataformas robóticas móviles en configuración diferencial.

3.2.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar el modelo cinemático directo e inverso de las plataformas robóticas móviles en configuración diferencial.
- Explicar el uso de archivos .mex para implementación de aplicaciones para la plataforma robótica usando la librería ARIA desde Matlab.
- Validar los modelos cinemáticos directo e inverso mediante una aplicación desarrollada en Matlab, usando las librerías de ARIA.
- Validar los modelos cinemáticos directo e inverso mediante un programa en C++, usando las librerías de ARIA.
- Examinar los errores que presentan los modelos cinemáticos directo e inverso.

3.2.3. Alcance

La práctica No. 2 tiene como propósito relacionar al estudiante con los modelos matemáticos de la cinemática directa e inversa de las plataformas de robótica móvil, validar dichos modelos y verificar los errores que estos presentan, se pretende también mostrar al estudiante el procedimiento para vincular las librerías de ARIA a Matlab, y de esa manera conseguir una herramienta algebraica computacional que facilite el desarrollo de aplicaciones y la programación de los modelos matemáticos.

3.2.4. Diseño

La guía preparatoria de la práctica No. 2 detalla la teoría de la cinemática directa e inversa de los robots en configuración diferencial, tales como la plataforma robótica móvil Pioneer P3 - DX, y se plantean actividades previas de simulación; implementando aplicaciones para la plataforma móvil desde Matlab y también usando el IDE Visual Studio para aplicaciones en lenguaje C++. Dichas actividades tienen como fin comprobar la validez del modelo cinemático presentado.

Se divide las pruebas en movimientos de traslación y de rotación. Los movimientos propuestos para la toma de datos son: desplazamientos rectos de 1 metro, 5 metros y 10 metros; y giros sobre el propio eje de 45° , 90° y 180°

Al final de la práctica el estudiante deberá realizar un informe donde se compare la información calculada mediante los modelos cinemáticos y la información obtenida físicamente tomando mediciones de los desplazamientos realizados por el robot.

3.2.5. Resultados de aprendizaje esperados

- Conoce el modelo cinemático directo para un robot en configuración diferencial.
- Conoce el modelo cinemático inverso para un robot en configuración diferencial.
- Ejecuta con éxito simulaciones de los modelos cinemáticos.
- Identifica errores que presentan los modelos cinemáticos implementados.

3.3 Práctica 3: Odometría

3.3.1. Objetivos General

Desarrollar un algoritmo que reduzca los errores de desplazamiento de los modelos cinemáticos mediante el uso de odometría.

3.3.2. Objetivo Específico

- Desarrollar u algoritmo de estimación de posición mediante odometría para las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX.
- Validar el algoritmo de estimación de posición implementado y probarlo con el modelo de Cinemática Directa de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX.
- Contrastar el desempeño que presenta el modelo Cinemático con un estimador odométrico de posición frente a un modelo cinemático en lazo abierto.

3.3.3. Alcance

La práctica No. 3 tiene como propósito demostrar al estudiante la diferencia de error que existe entre la ejecución de movimientos con el robot móvil empleando el modelo cinemático en lazo abierto, y la ejecución de movimientos con el robot móvil realizando una estimación de la posición mediante odometría.

3.3.4. Diseño

La guía preparatoria de la práctica No. 3 presenta la teoría de la estimación de la posición mediante la aplicación de odometría y el modelo cinemático directo de las plataformas robóticas móviles de configuración diferencial. Plantea actividades de simulación; implementando una aplicación para realizar desplazamientos de traslación y rotación con la plataforma móvil usando estimadores odométricos y comparándolos con los resultados de realizar los mismos desplazamientos sin estimar la posición, sino simplemente ejecutando las acciones durante un tiempo determinado. Dichas actividades tienen como fin entender la estimación de posición mediante odometría e identificarla como un modo de reducir el error que poseen los modelos cinemáticos.

Los movimientos propuestos para la toma de datos en la práctica No.3 son: desplazamientos rectos de 1 metro, 5 metros y 10 metros; y giros sobre el propio eje de 45° , 90° y 180° .

Usando odometría y también empleando el modelo cinemático en lazo abierto, a fin verificar si se presenta alguna diferencia entre los dos algoritmos. Al final de la práctica el estudiante deberá realizar un informe donde se compare información obtenida, tomando mediciones de los desplazamientos realizados por el robot, con las 2 técnicas anteriormente descritas y evaluar cuál es la que presenta menor error.

3.3.5. Resultados de Aprendizaje Esperados

- Conoce el algoritmo de estimación odométrica de la posición.

3.4 Práctica 4: Seguimiento de Trayectorias y evasión de obstáculos

3.4.1. Objetivos General

Implementar un controlador para el seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos. con la plataforma robótica Pioneer P3-DX

3.4.2. Objetivos Específicos

- Implementar un controlador cinemático proporcional que permita seguir una trayectoria previamente establecida.
- Implementar un controlador de evasión de colisiones mediante el método de fuerzas ficticias.
- Validar el controlador cinemático proporcional implementado.
- Validar el controlador controlador de evasión de colisiones implementado.

3.4.3. Alcance

La práctica No. 4 tiene como propósito mostrar al estudiante un algoritmo que emplea un controlador proporcional retroalimentado para realizar el seguimiento de trayectorias, adicionalmente se pretende presentar el método de fuerzas ficticias para la implementación de controlador de evasión de colisiones.

3.4.4. Diseño

La guía preparatoria de la práctica No. 4 presenta la teoría para la implementación de un controlador cinemático proporcional retroalimentado de posición, para la realización de seguimiento de trayectorias con plataformas robóticas diferenciales. También se presenta al

estudiante el algoritmo de fuerzas ficticias, que se emplea para la implementación de un controlador de evasión de obstáculos. Plantea actividades de simulación; donde se ilustra cómo obtener los valores de las constantes del controlador proporcional, y validando el controlador implementado mediante simulaciones en MobileSim. Dichas actividades pretenden que el estudiante sea capaz de implementar el controlador propuesto.

La guía de laboratorio de la práctica No.4 propone 4 ensayos donde se validará el controlador proporcional implementado en el preparatorio, para ello el robot debe partir desde una posición que tenga un error respecto de la trayectoria planteada, y de esa manera observar que en el tiempo el controlador hace que el error se reduzca hasta tender asintóticamente a cero. En los ensayos No.1 y No.2 la trayectoria a describir será una línea recta, y en los ensayos No.3 y No.4 la trayectoria a describir es una circunferencia con la diferencia, variando la posición inicial, respecto de la trayectoria. Para verificar el controlador de evasión de obstáculos se utiliza una trayectoria recta y se interpone un obstáculo en la trayectoria directamente de frente al robot. Al final de la práctica el estudiante deberá realizar un informe donde analice los errores y los tiempos de establecimiento, y evidenciar físicamente que el robot describe las trayectorias planteadas.

3.4.5. Resultados de aprendizaje esperados

- Conoce la ley de control propuesta para la implementación del controlador proporcional de posición.
- Conoce el método de las fuerzas ficticias para la implementación de un control de evasión de obstáculos.

3.5 Práctica 5: Planificación de Trayectorias

3.5.1. Objetivos General

Desarrollar un algoritmo que permita planificar una trayectoria de manera off line para el desplazamiento de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX, a partir de un de mapa conocido en ambientes estáticos, por el método de mapas probabilísticos.

3.5.2. Objetivos Específicos

- Implementar un algoritmo de planificación de trayectorias de manera off line, a partir de un mapa para el desplazamiento de las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX en ambientes en ambientes conocidos y estáticos.
- Validar el algoritmo de seguimiento de trayectorias implementado en la práctica No. 4.

3.5.3. Alcance

La práctica No. 5 tiene como propósito presentar al estudiante un algoritmo para la planificación de trayectorias, a partir de un de mapa conocido en ambientes estáticos, utilizando la técnica Mapas Probabilísticos PRM.

3.5.4. Diseño

La guía preparatoria de la práctica No. 5 presenta la técnica para la planificación de trayectorias: Mapas Probabilísticos. Se propone la creación de un mapa del ambiente de trabajo en el Software Mapper3Basic, para trabajar con este mapa tanto en la simulación en MobileSim, como en la aplicación de planificación de trayectorias que se ejecuta desde Matlab.

La guía de laboratorio de la práctica No.5 propone actividades donde se validará el controlador de seguimiento de trayectorias implementado en la práctica No.4, realizando trayectorias definidas dentro del mapa graficado en Mapper3Basic . Al final de la práctica el estudiante deberá realizar un informe donde analice los errores de la posición final respecto de la deseada y las colisiones obtenidas evidenciar físicamente que el robot describe las trayectorias planteadas.

3.5.5. Resultados de aprendizaje esperados

- Implementa un algoritmo que realiza la planificación de trayectorias de manera off line, a partir de un mapa del entorno de trabajo.
- Observa la validez del algoritmo de seguimiento de trayectorias implementado en la práctica No. 4.

3.6 Práctica 6: Aplicativo de planificación y control de trayectoria

3.6.1. Objetivos General

Desarrollar un algoritmo donde se aplique los conocimientos obtenidos a partir de esta serie de prácticas de laboratorio, cumpliendo con alguna tarea que sea aplicable a la industria en el mundo real. Las plataformas robóticas móviles Pioneer P3 – DX.

3.6.2. Objetivos Específicos

- Implementar un algoritmo aplicativo de los conceptos teóricos tratados sobre navegación autónoma de robots móviles.

3.6.3. Alcance

La práctica No. 6 tiene como propósito ilustrar al estudiante el potencial de las aplicaciones que es capaz de implementar utilizando los conceptos teóricos y prácticos desarrollados durante las prácticas anteriores.

3.6.4. Diseño

La guía de laboratorio de la práctica No.6 documenta el diseño e implementación de un aplicativo escalable a la industria real, donde se ponga en práctica los conceptos teóricos tratados en las prácticas anteriores como el control de seguimiento de trayectorias, la planificación de trayectorias. Se propone una aplicación en la que el usuario ingrese un punto de partida y un punto final, se debe realizar la planificación de la trayectoria para llegar al punto deseado en base a un mapa, el robot debe partir hacia dicho punto; después de llegar a la meta esperar 10 segundos y regresar al punto de partida.

3.6.5. Resultados de aprendizaje esperados

- Aplica los conceptos tratados a lo largo de la serie de prácticas de laboratorio sobre técnicas de desarrollo de robots móviles de navegación autónoma.

4.1.2. Modelamiento Cinemático

4.1.2.1. Cinemática Directa

Se implementó un algoritmo para validar el modelo cinemático directo de la plataforma móvil. La toma de datos para la validación de dicho algoritmo se resume en la Tabla 8. Se dividieron las pruebas en movimientos de traslación y de rotación. Los movimientos propuestos para la toma de datos son: desplazamientos rectos de 1,5 y 10 metros a una velocidad de 250mm/s, y giros sobre el propio eje de 45°, 90° y 180°, a una velocidad de 10°/s.

Tabla 8:
Resultados de validación de modelo cinemático directo

Ensayo	Características	Posición Final Deseada	Posición Final Medida	Error	Porcentaje
Movimientos de Traslación					
No.1	v=250mm/s t=4s	1m	0.83m	0.17m	17%
No.2	v=250mm/s t=20s	5m	4.78m	0.22m	4.4%
No.3	v=250mm/s T=40s	10m	9.79m	0.21m	2.1%
Movimientos de Rotación					
No.4	w=10°/s t=4.5s	45°	41.7°	3.3°	7.33%
No.5	w=10°/s t=9s	90°	86.3°	3.7°	4.11%
No.6	w=10°/s T=18s	180°	176.4°	3.6°	2.0%

Análisis

Movimientos de Traslación

En la Tabla 8 en los movimientos traslacionales se puede apreciar que en el ensayo No.1 el error porcentual es muy alto, sin embargo conforme crece la distancia de desplazamiento el

error porcentual disminuye, pero el error de desplazamiento se mantiene en un promedio de 0.22 metros. Para encontrar una explicación a este error nos remitimos a las gráficas de las gráficas de velocidad vs tiempo.

En la *Figura 26* se presenta la gráfica de velocidad traslacional durante la ejecución del ensayo No.1, se puede ver que la velocidad traslacional es igual a cero durante los primeros 0.25 segundos y no alcanza los 250m/s hasta los 1.1 segundos, es decir que de 4 segundos que duró la ejecución de la aplicación, el robot comenzó a moverse a los 0.25 segundos y alcanzó la velocidad deseada a los 1.1 segundos, de donde podemos deducir que la causante del error es la aceleración durante el arranque de los motores.

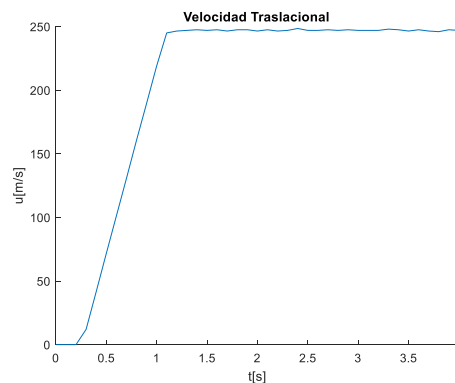


Figura 26. Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo

En la *Figura 27* se presenta la gráfica de velocidad traslacional vs tiempo durante la ejecución de los ensayos No.2 y No.3, se puede ver que la velocidad traslacional es igual a cero durante los primeros 0.25 segundos y no alcanza los 250m/s hasta los 1.1 segundos.

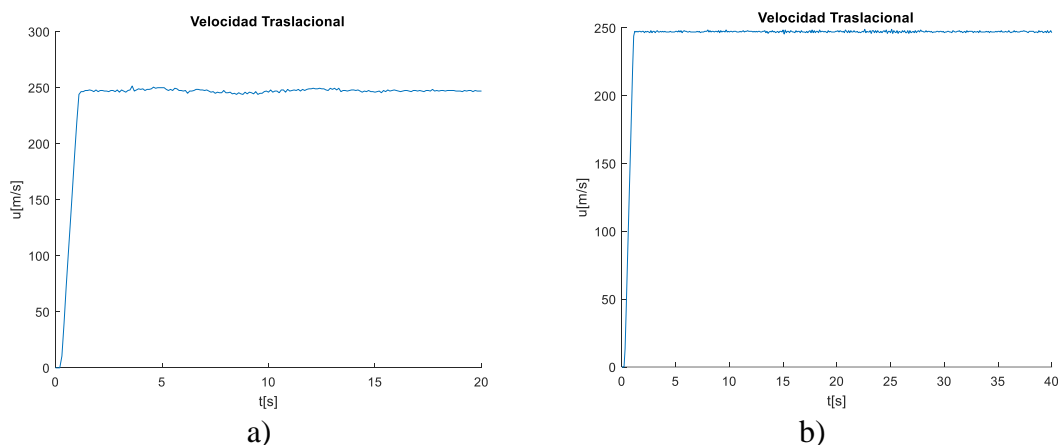
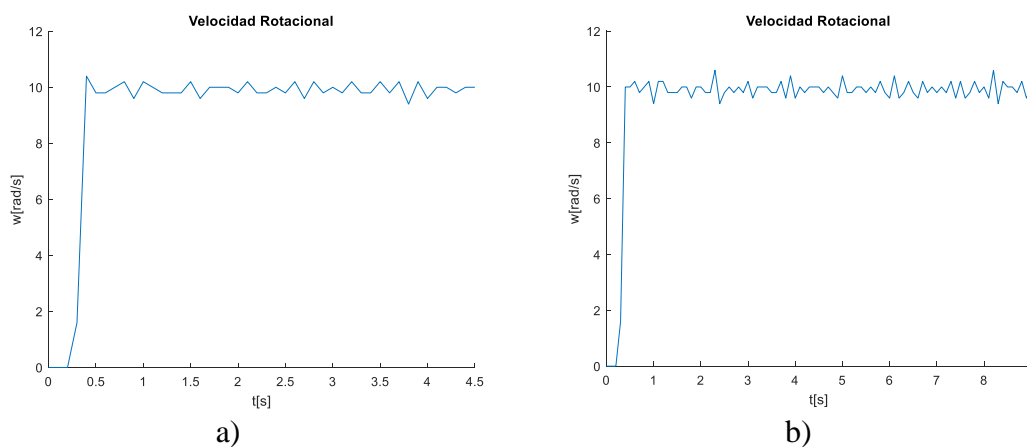


Figura 27. Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en ensayos a) No.2 y b) No.3

Movimientos de Rotación

En la *Figura 28* se presenta las gráficas de velocidad rotacional vs tiempo durante la ejecución de los ensayos No.4, No.5, y No.6 se puede ver que la velocidad rotacional es igual a cero durante los primeros 0.25 segundos y no alcanza los 10°m/s hasta los 0.4 segundos, es decir que existen 0.4 segundos donde el movimiento del robot es casi nulo, siendo la aceleración durante el arranque de los motores la causante del error.



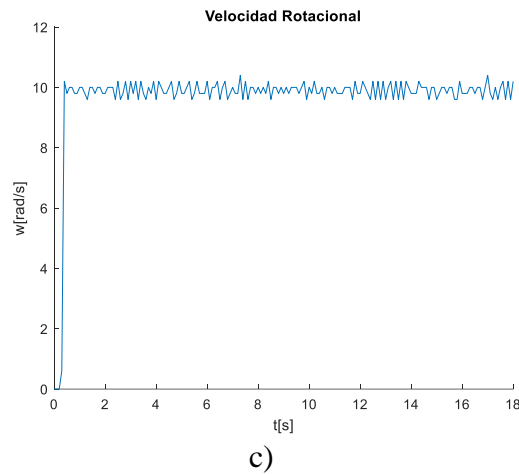


Figura 28. Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en ensayos a) No.4, b) No.5 y c) No.6

Después de analizar los resultados obtenidos se puede deducir que el error se debe a el retardo que tiene el robot en la aceleración durante el arranque de los motores, demostrando que el error se debe a un error sistemático, y no a fallas en el ensayo o en el modelo cinemático.

Se concluye que si se desea hacer estos movimientos con mayor precisión se tienen 2 opciones, En caso de implementar la aplicación para la realización del movimiento en un lazo abierto simplemente se debe adicionar 1.1 segundos más a la ejecución del movimiento de traslación, la segunda opción sería modificar al algoritmo incluyendo un estimador odométrico de posición, para ejecutar el movimiento hasta que se alcance el desplazamiento deseado.

4.1.2.2. Cinemática Inversa

Se implementó un algoritmo para validar el modelo cinemático inverso de la plataforma móvil, los datos obtenidos para la validación de dicho algoritmo se resumen en la Tabla 9. Se

dividieron las pruebas en movimientos de traslación y de rotación. Los movimientos propuestos para la toma de datos son: desplazamientos rectos de 5 metros utilizando diferentes velocidades traslacionales; y giros de 180° sobre el propio eje a diferentes velocidades angulares.

Tabla 9:

Resultados de validación de modelo cinemático inverso

Ensayo	Posición Objetivo	Velocidad Deseada	Desplazamiento deseado	Desplazamiento medido	Error	Porcentaje
Movimientos de Traslación						
No.7	[5m, 0m, 0° t=20s	250 mm/s	5m	4.81m	0.19m	1.8%
No.8	[5m, 0m, 0° t=10s	500 mm/s	5m	4.56m	0.44m	8.8%
No.9	[5m, 0m, 0° t=5s	1000 mm/s	5m	2.76m	2.24m	44.8%
Movimientos de Rotación						
No.10	[0m, 0m, 180°] t=18s	$10^\circ/s$	180°	178.4°	1.6°	0.8%
No.11	[0m, 0m, 180°] t=4s	$45^\circ/s$	180°	166.5°	13.5°	7.5%
No.12	[0m, 0m, 180°] t=2s	$90^\circ/s$	180°	134.56°	45.5°	25%

Análisis

Movimientos de Traslación

En la *Figura 29*, se presenta las gráficas de velocidad traslacional vs tiempo durante la ejecución del ensayo No.7, se puede ver que la velocidad traslacional es igual a cero durante los primeros 0.25 segundos y no alcanza los 250 mm/s hasta los 1.1 segundos, es decir que existen 1.1 segundos donde el movimiento del robot es casi nulo, siendo la aceleración durante el arranque de los motores la causante del error.

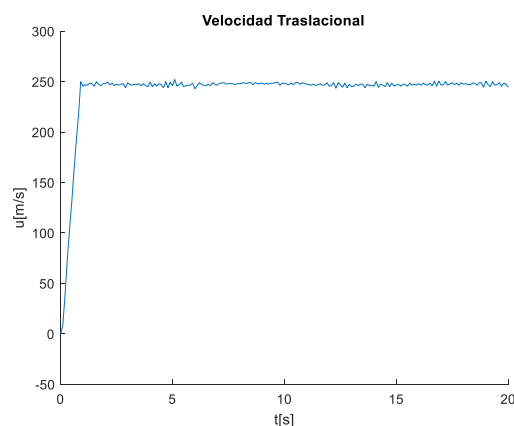


Figura 29. Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en el ensayo No.7.

En la *Figura 30* , se presenta las gráficas de velocidad traslacional vs tiempo durante la ejecución del ensayo No.8, se puede ver que la velocidad traslacional es igual a cero durante los primeros 0.25 segundos y no alcanza los 500 mm/s hasta los 2 segundos aproximadamente, es decir que durante 2 segundos la velocidad del robot no es la nominal, esto es de nuevo una consecuencia de la aceleración durante el arranque de los motores, y esta vez al aumentar el tiempo en que el motor no posee la velocidad deseada, acarrea consigo un aumento del error con respecto al ensayo No. 7 como se evidencia en la Tabla 9.

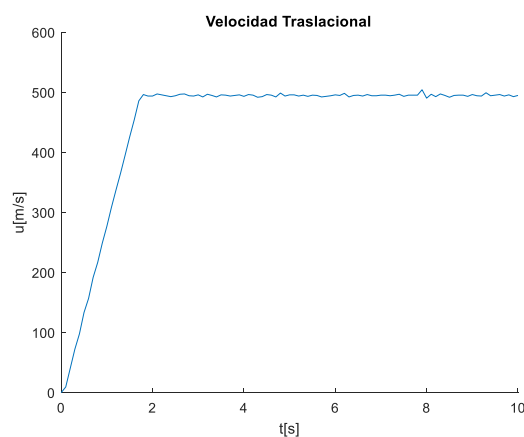


Figura 30. Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en el ensayo No.8.

El ensayo No.9 posee un error porcentual de 44.85% que resulta demasiado alto, sin embargo se puede deducir sus causas si se analiza la gráfica de velocidad traslacional vs tiempo. En la *Figura 31*, se presenta la gráfica de velocidad traslacional vs tiempo durante la ejecución del ensayo No.9. Se puede evidenciar que la velocidad máxima alcanzada es de 750 mm/s, sin embargo de la Tabla 9, se puede ver que la velocidad deseada del ensayo No.9 es de 1000 mm/s, esto se debe a que la velocidad traslacional máxima de la plataforma robótica Pioneer P3 – DX es de 750 mm/s, con lo que es imposible llegar a cubrir la distancia de desplazamiento deseada de 5m en 5 segundos.

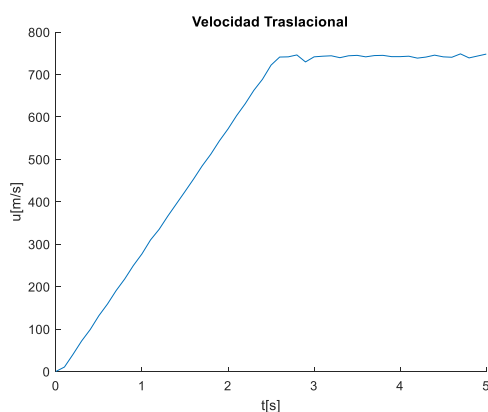


Figura 31. Velocidad Traslacional [m/s] vs Tiempo en el ensayo No.9.

Movimientos de Rotación

El ensayo No.10 posee un error menor a 1%, de la *Figura 32*, puede observarse que el tiempo en el robot alcanza la velocidad angular deseada es casi inmediato, por ello el error es muy pequeño.

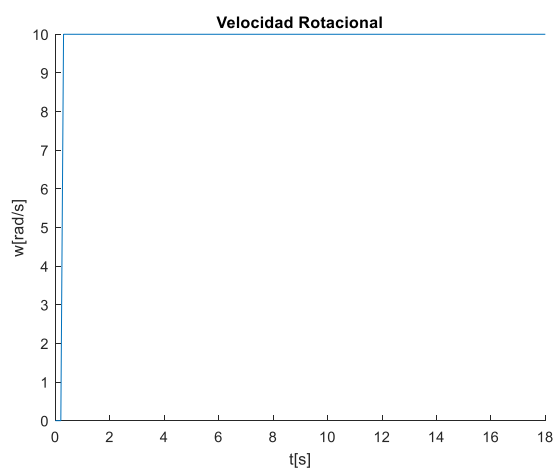


Figura 32. Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en el ensayo No.10.

El ensayo No.11 posee un error de 7.5%, de la *Figura 33*, puede observarse que el tiempo en el robot alcanza la velocidad angular deseada es a los 0.7 segundos, puede notarse claramente el causante del aumento en el error es el retardo en la aceleración de los motores ya que les toma 0.7 segundos aproximadamente alcanzar una velocidad angular de $45^\circ/s$.

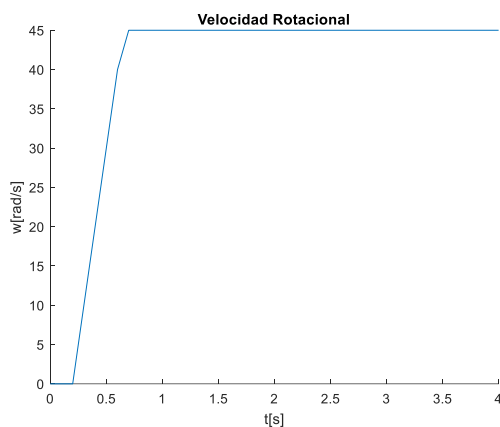


Figura 33. Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en el ensayo No.11.

El ensayo No.12 posee un error muy grande de 25%, , para conocer sus causas nos remitimos a analizar la *Figura 34*. Puede observarse que al robot le toma 1.1 segundos el alcanzar la velocidad angular deseada, siendo el retardo en la aceleración de los motores el causante del aumento en el error.

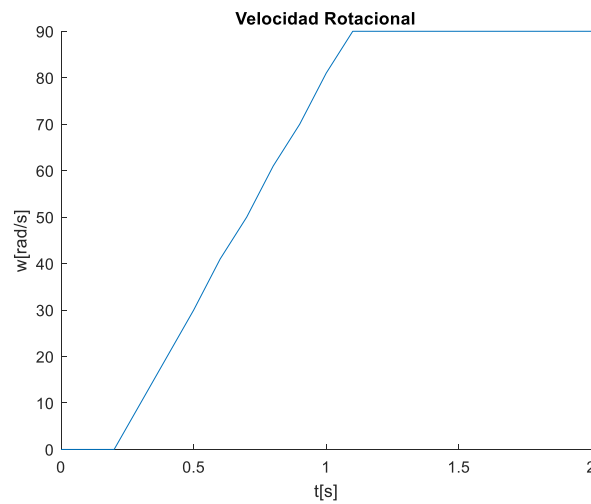


Figura 34. Velocidad Rotacional [grados/s] vs Tiempo en el ensayo No.12.

4.1.3. Odometría

La práctica No. 3 propone la implementación de estimadores odométricos para verificar si la inclusión de estos puede mejorar la precisión de los movimientos. Frente al algoritmo implementado en la práctica No2.

Tabla 10:

Resultados de traslación utilizando estimación odométrica de posición

Distancia	250m/s	error	500m/s	error	700m/s	error
1m	1.03	0.03m	1.05	0.05m	1.13	0.13m
5m	5.05	0.05m	5.04	0.06m	5.11	0.11m
10m	10.06	0.06m	10.05	0.05m	10.12	0.12m

Tabla 11:

Resultados de traslación en lazo abierto

Distancia	250m/s	error	500m/s	error	700m/s	error
1m	0.91	0.09m	1.12	0.12m	1.15	0.15
5m	4.91	0.09m	5.1	0.13m	5.19	0.19
10m	9.85	0.15m	10.12	0.12m	10.17	0.17

Tabla 12:

Resultados de rotación utilizando estimación odométrica de posición

Distancia	10°/s	error	45°/s	error	90°/s	error
45°	44.7°	0.3°	45.3°	0.3°	45.6°	0.6°
90°	89.6°	0.4°	90.5°	0.5°	91.1°	1.1°
180°	179.4°	0.6°	181.0°	1°	181.0°	1.0°

Tabla 13:

Resultados de rotación en lazo abierto

Distancia	10°/s	error	45°/s	error	90°/s	error
45°	42.3°	2.7°	46.3°	1.3°	46.2°	1.2°
90°	87.3°	2.7°	93.2°	3.2°	93.1°	3.1°
180°	175.2°	4.8°	182.5°	2.5°	182.0°	2.0°

Análisis

Movimientos Traslacionales

Si comparamos los datos obtenidos y los errores de la

Tabla 10 con la

Tabla 11, podemos observar que los errores obtenidos con la ejecución de las traslaciones con el algoritmo que implementa odometría tienen un menor error con respecto a los datos obtenidos con el algoritmo que ejecuta el movimiento en lazo abierto.

Movimientos Rotacionales

Si comparamos los datos obtenidos y los errores de la Tabla 12 con la Tabla 13, podemos observar que los errores obtenidos con la ejecución de las traslaciones con el algoritmo que implementa odometría tienen un menor error con respecto a los datos obtenidos con el algoritmo que ejecuta el movimiento en lazo abierto.

4.1.4. Seguimiento de trayectorias y Evasión de Obstáculos

Para verificar el funcionamiento del controlador proporcional implementado en la guía preparatoria, se debe partir desde una posición que tenga un error respecto de la trayectoria planteada, y de esa manera observar que en el tiempo el controlador hace que el error se reduzca hasta tender asintóticamente a cero. Para validar el controlador proporcional implementado se realizaron 4 ensayos, cuyos resultados se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14:

Resultados de algoritmo de seguimiento de trayectorias

Ensayo	Punto final deseado	Punto final estimado
No. 1	[6, 0, 0°]	[6.03, 0, 0°]
No. 2	[6, 1, 0°]	[6, 0.99, 0°]
No. 3	[1.25, 0, 90°]	[1.2, 0, 61.79°]
No. 4	[2, 0, 90°]	[1.99, 0, 85.94°]

Ensayo No.1

Se planteó realizar una línea recta de 5 metros, comenzando con un error de un metro, partiendo de la posición y orientación inicial [0, 0, 0], como se muestra en la *Figura 35*, es decir la trayectoria comienza en el punto [1, 0, 0] y termina en el punto [6, 0, 0].

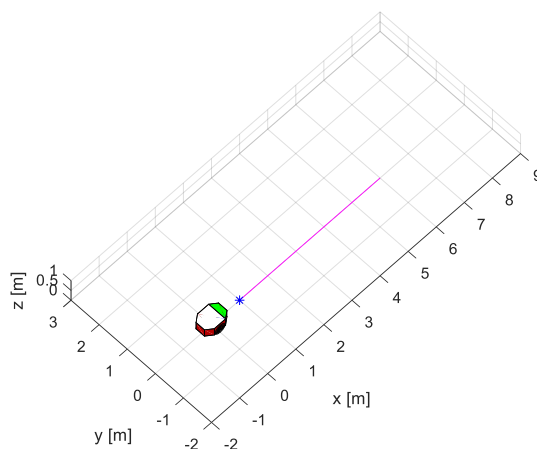


Figura 35. Trayectoria deseada del ensayo No.1

En la *Figura 36* se muestra la variación del error de posición vs tiempo, la ejecución del seguimiento de trayectorias se implementó con el modelo cinemático inverso con el punto de interés desplazado 0.2m hacia la parte frontal del robot, es por ello que el error no comienza en un metro, sino en 0.80m, se aprecia que el error descende, volviéndose casi 0 en aproximadamente 4.9 segundos.

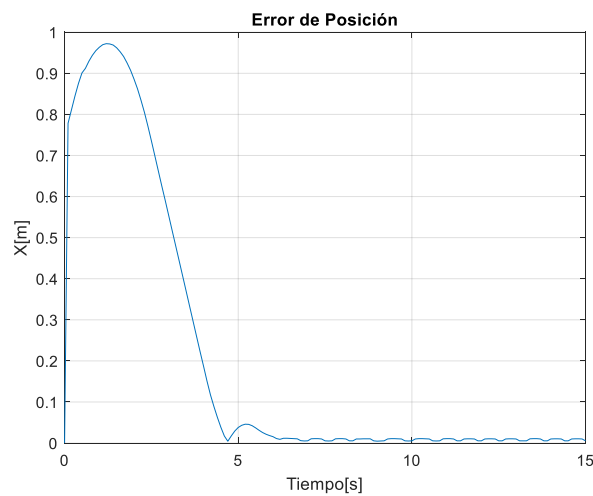


Figura 36. Error de posición en ensayo No. 1

De la *Figura 37*, se puede concluir que a pesar de que sería deseable reducir el tiempo de establecimiento aumentando las constantes de ganancia del controlador proporcional, esto no ayudaría debido a que la acción de control traslacional está saturada durante los primeros 4.5 segundos, aproximadamente, el mismo tiempo que le toma al controlador llevar el error a cero. Se puede apreciar que una vez que el error es reducido, la velocidad traslacional se estabiliza en 300mm/s aproximadamente. En la Tabla 14 se puede observar que el error de desplazamiento del punto final medido respecto del deseado es muy cercano a cero.

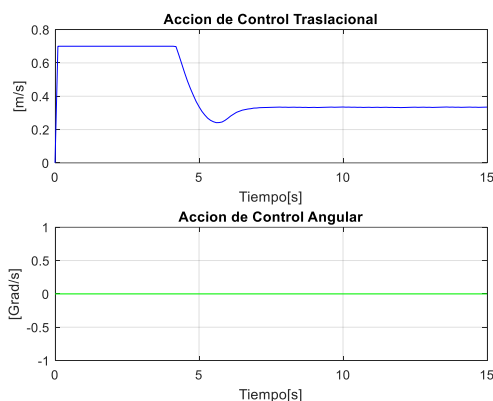


Figura 37. Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 1

Ensayo No.2

Se planteó realizar una línea recta de 5 metros, comenzando con un error de un metro, en el eje de avance del robot y desplazando la línea un metro en el eje perpendicular al eje de avance del robot, partiendo de la posición y orientación inicial $[0, 0, 0]$, como se muestra en la *Figura 38*; es decir la trayectoria comienza en el punto $[1, 1, 0]$ y termina en el punto $[6, 1, 0]$.

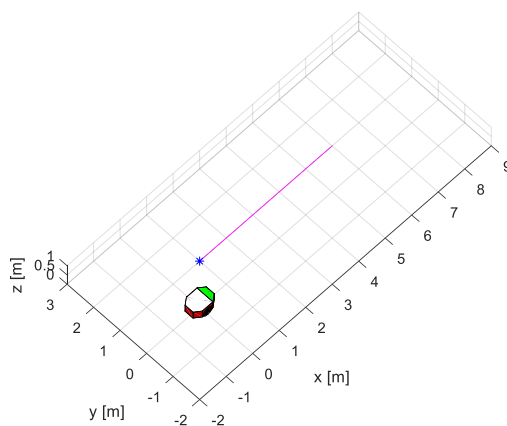


Figura 38. Trayectoria deseada del ensayo No.2

En la *Figura 39* se muestra la variación del error vs tiempo, la ejecución del seguimiento de trayectorias se implementó con el modelo cinemático inverso con el punto de interés desplazado 0.2m hacia la parte frontal del robot, es por ello que el error no comienza en 1.40m, sino en 1.20m, se aprecia que el error descende, volviéndose casi 0 en aproximadamente 10 segundos.

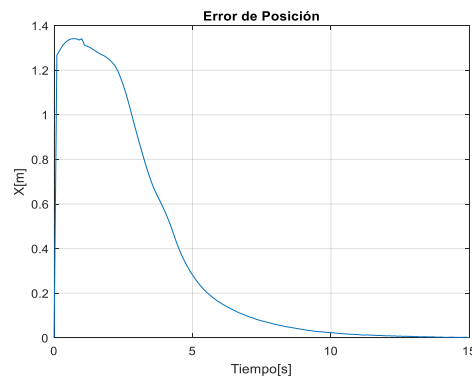


Figura 39. Error de posición en ensayo No. 2

De la *Figura 40*, se puede concluir que durante los primeros 5 segundos la velocidad traslacional está saturada y es aquí cuando el error se reduce drásticamente, posterior a eso la pendiente de la curva cambia y el error decrece de manera más lenta, aumentar las ganancias del controlador proporcional no ayudaría a disminuir este error debido a que la acción de control se encuentra saturada.

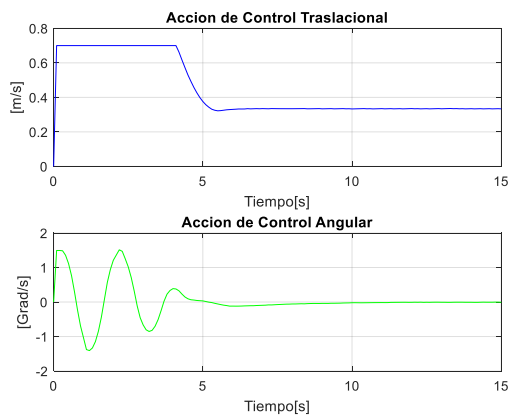


Figura 40. Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 2

Ensayo No.3

Se planteó realizar una circunferencia con un radio de giro de 1.25metros, comenzando con un error de 1.25 metros, partiendo de la posición y orientación inicial $[0, 0, 0]$, como se muestra en la *Figura 41*, es decir se pretende trazar una circunferencia centrada en el origen y con un radio de 1.25 metros; la trayectoria comienza en el punto $[1.25, 0, 90^\circ]$ y termina en el mismo punto.

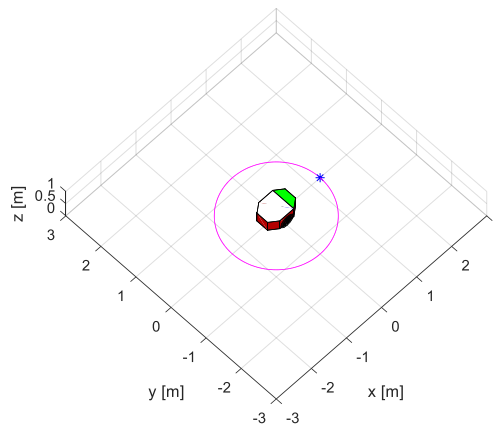


Figura 41. Trayectoria deseada del ensayo No.3

En la *Figura 42* se muestra la variación del error vs tiempo, la ejecución del seguimiento de trayectorias se implementó con el modelo cinemático inverso con el punto de interés desplazado 0.2m hacia la parte frontal del robot, es por ello que el error no comienza en 1.25 metros, sino en 1.05m, se aprecia que el error desciende, volviéndose casi 0 en aproximadamente 4.7 segundos.

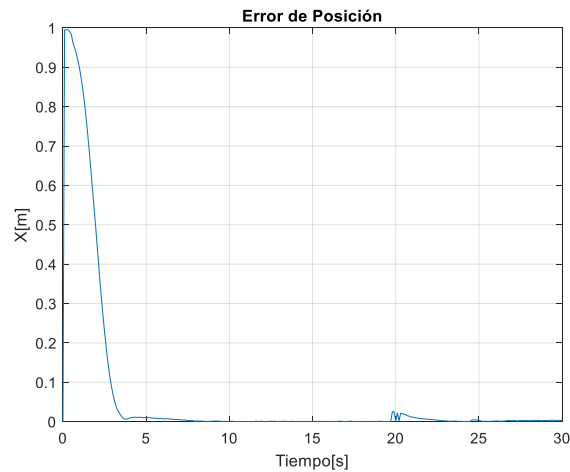


Figura 42. Error de posición en ensayo No. 3

De la *Figura 43*, se observa que las acciones de control se estabilizan aproximadamente a los 5 segundos, lo que concuerda con el tiempo que le toma al controlador llevar al error a cero.

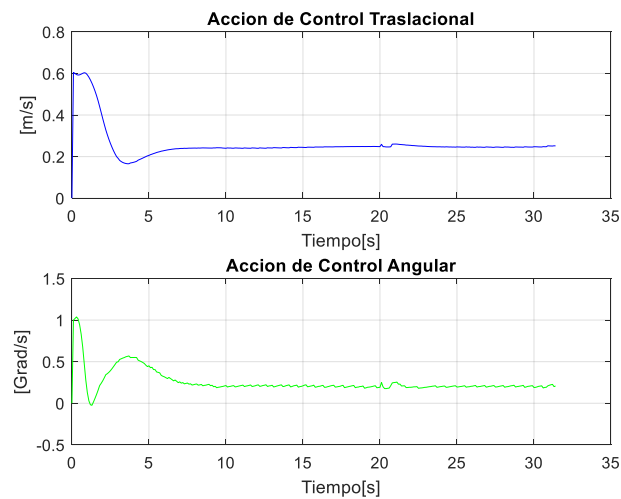


Figura 43. Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 3

Ensayo No.4

Se planteó realizar una circunferencia con un radio de giro de 2 metros, comenzando con un error de 2 metros, partiendo de la posición y orientación inicial $[0, 0, 0]$, como se muestra en la *Figura 44*, es decir se pretende trazar una circunferencia centrada en el origen y con un

radio de 2 metros; la trayectoria comienza en el punto $[2, 0, 90^\circ]$ y termina en el mismo punto.

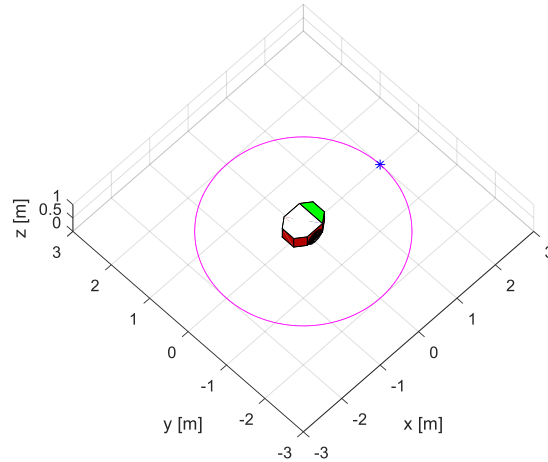


Figura 44. Trayectoria deseada del ensayo No.4

En la *Figura 45* se muestra la variación del error vs tiempo, la ejecución del seguimiento de trayectorias se implementó con el modelo cinemático inverso con el punto de interés desplazado 0.2m hacia la parte frontal del robot, es por ello que el error no comienza en 2 metros, sino en 1.80 metros, se aprecia que el error descende drásticamente durante los primeros 5 segundos, posterior a ello la pendiente varía y el error se reduce de una manera más lenta volviéndose casi 0 en aproximadamente 20 segundos.

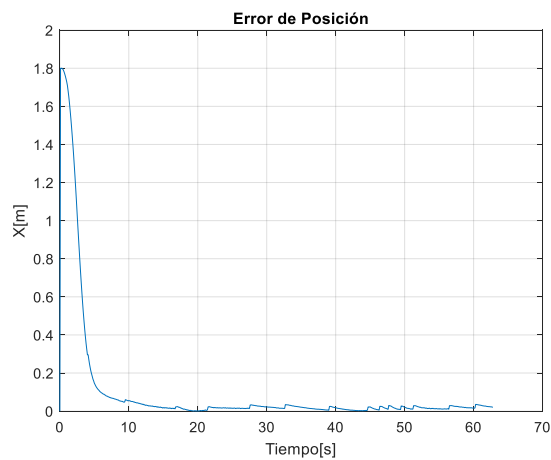


Figura 45. Error de posición en ensayo No. 4

De la *Figura 46*, se observa que las acciones de control se estabilizan a los 10 segundos, lo que concuerda con el descenso del error en la *Figura 45*, sin embargo el tiempo de estabilización es muy alto, es cercano a los 10 segundos, pero podemos concluir que esto se debe a que es difícil para la plataforma recuperarse de un error tan grande como el error de 2 metros que se tiene al inicio del ensayo No. 4, debido a la limitante que poseen las acciones de control. A diferencia del ensayo No.3 donde el error inicial era de aproximadamente 1 metro y el tiempo de estabilización fue de 4.9 segundos.

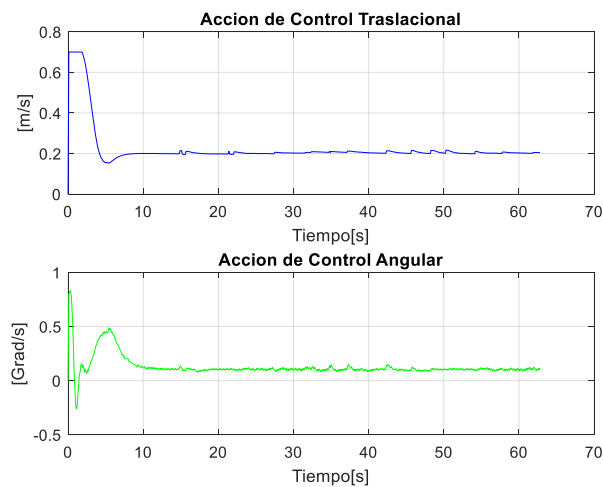


Figura 46. Acciones de control traslacional y angular durante la ejecución del ensayo No. 4

Análisis

De los resultados obtenidos con los 4 ensayos se observa que el controlador implementado le permite a la plataforma robótica Pioneer P3 – DX un control rápido y estable cuando los errores son menores a 1 metro, sin embargo cuando estos son mayores el tiempo de estabilización crece demasiado debido a las limitaciones de velocidad que poseen los motores.

4.1.5. Planificación de Trayectorias

Para verificar el funcionamiento del algoritmo de planificación de trayectorias implementado se realizó un mapa del entorno de trabajo del robot, para ello se empleó el software Mapper3Basic, dicho mapa se creó basado en medidas reales del pasillo de la planta baja de los laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, véase la *Figura 47*.

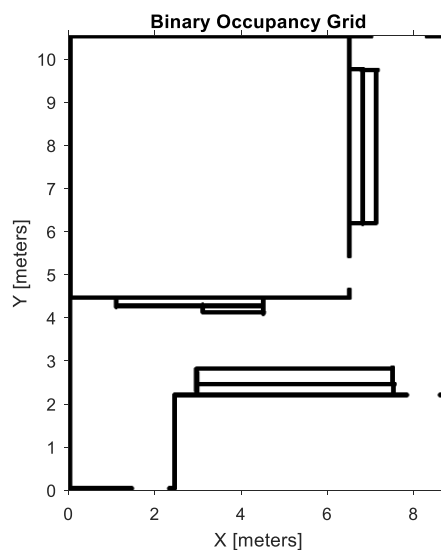


Figura 47. Mapa del pasillo de la planta baja de los laboratorios del DEEE

Antes de generar el camino es necesario realizar un ensanchamiento de las paredes y los posibles obstáculos se los ensanchará una distancia igual al radio del cuerpo del robot de esta forma se aleja a la trayectoria generada de las paredes para evitar posibles colisiones.

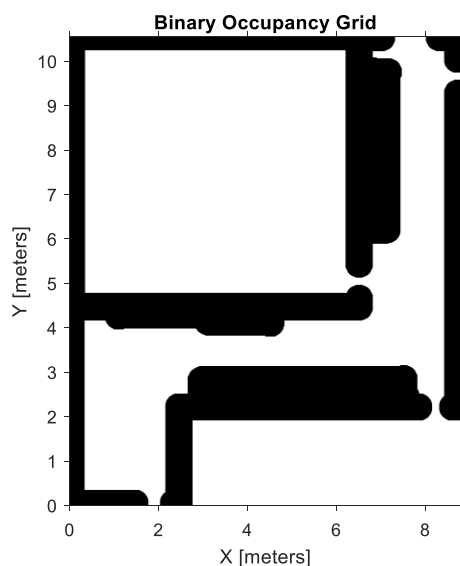


Figura 48. Ensanchamiento de paredes Mapa

Para la planificación de los caminos, se realizó pruebas variando la distancia mínima entre nodos, para así observar cual es el camino con menos curvas y con menor número de nodos, la Tabla 15 resume los resultados obtenidos.

Tabla 15:

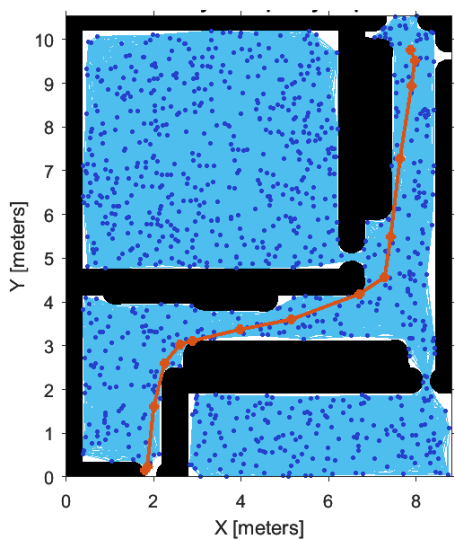
Resultados de traslación utilizando estimación odométrica de posición

Ensayo	Distancia mínima	Número de nodos en el camino
No .1	2 m	15 nodos
No .2	1m	21 nodos
No .3	0.5m	38 nodos
No .4	0.25m	No se encontró un camino

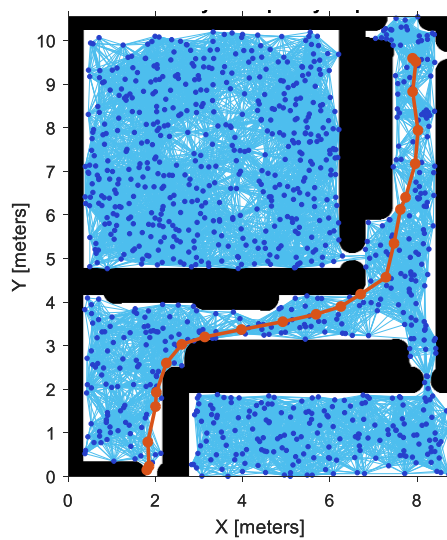
Los resultados de los caminos obtenidos del algoritmo se muestran en la **Figura 49**.

El resultado a) corresponde al ensayo No. 1, ha sido generado con una distancia mínima de 2 metros ente los nodos, se puede observar que 15 nodos forman parte de este camino, la trayectoria no es errática, sin embargo, el camino pasa demasiado cercano a las paredes del

pasillo, y podría haber riesgo de una colisión. El resultado b) corresponde al ensayo No. 2, ha sido generado con una distancia mínima entre nodos de 1 metro, se observa que 21 nodos forman parte de este camino, la trayectoria no es errática, y no posee tanto riesgo de colisión. El resultado c) corresponde al ensayo No. 3, ha sido generado con una distancia mínima entre nodos de 0.5 metros, se observa que 38 nodos forman parte de este camino, la trayectoria es bastante errática, sin embargo no posee mucho riesgo de colisión. El resultado d) corresponde al ensayo No. 4, ha sido generado con una distancia mínima entre nodos de 0.25 metros, se observa que no se logró obtener ningún camino para este ensayo.



a)



b)

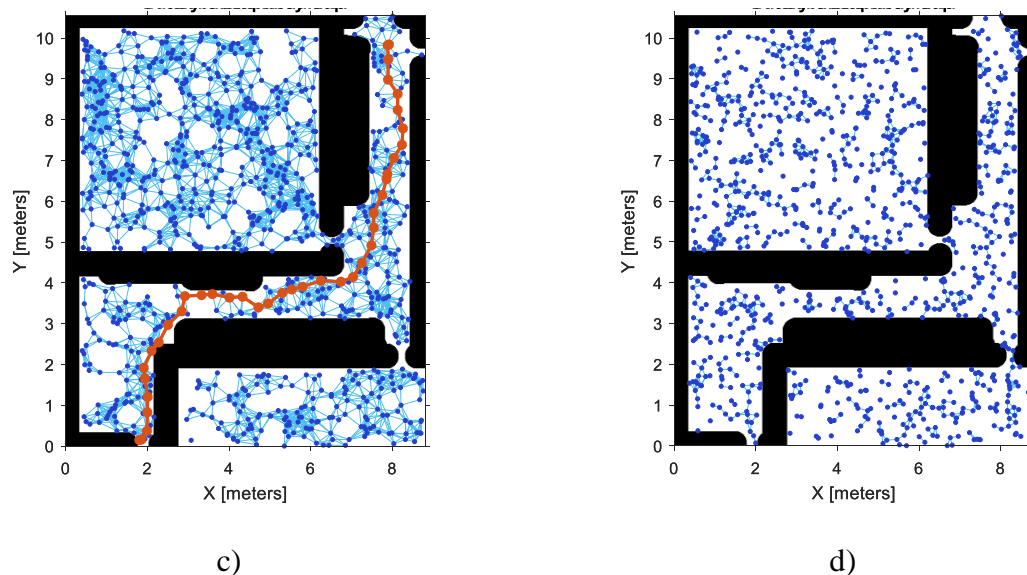


Figura 49. Caminos obtenidos del planificador de caminos

Para la ejecución del seguimiento de la trayectoria sobre el camino planificado, se ha escogido el camino generado en el ensayo No. 2.

En la *Figura 50* se muestra la trayectoria ejecutada por el robot, (verde) y la trayectoria planificada (magenta).

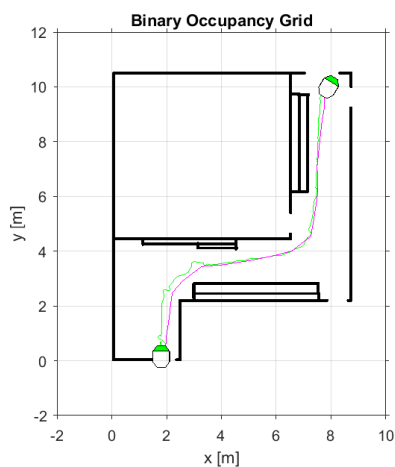


Figura 50. Resultado de la ejecución del seguimiento de la trayectoria

En la *Figura 51* se muestra el error de posición que se obtuvo durante la ejecución de la trayectoria planificada, llegando al punto final con un error de 15 cm.

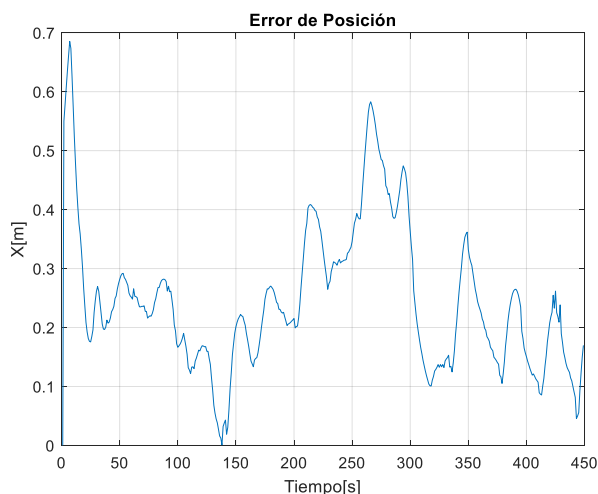


Figura 51. Error de posición vs tiempo durante la ejecución de la trayectoria

Análisis

El seguimiento de la trayectoria se ejecutó con éxito, sin colisiones y con un error de posición final de 15 cm. Dentro de robótica móvil generalmente se consideran aceptables los errores de hasta 10cm, por lo cual todavía se podrían hacer optimizaciones en el algoritmo.

4.1.6. Aplicativo de control de plataformas de robótica móvil Pioneer P3 – DX

Como se mencionó en el apartado 1.1, en la industria actual muchas de las empresas de mensajería y correo han adoptado las tecnologías de la robótica móvil, para realizar el transporte de los paquetes dentro de sus plantas y evitar de esas formas errores humanos. Se implementó un script que permite verificar si los algoritmos de seguimiento de trayectorias y planificación de caminos implementados facultan al robot para simular con éxito, una aplicación en la que el usuario ingrese un punto de partida y un punto final; se debe realizar la planificación de la trayectoria para llegar al punto deseado en base a un mapa, el robot debe partir hacia dicho punto;

después de llegar a la meta esperar 10 segundos y regresar al punto de partida. Se verificará el error de posición en el punto final de la trayectoria de regreso, para analizar la acumulación de errores que se obtiene con el algoritmo implementado.

Se utilizó como mapa base el mapa del pasillo de la planta baja de los laboratorios del DEEE, creado en la práctica No 5, que se muestra en la *Figura 47*.

La trayectoria de partida, se muestra en la *Figura 52*, se creó con una distancia mínima entre nodos de 1 metro. La misma consta de 21 nodos y no presentó probabilidades de colisión.

Proceso de Partida

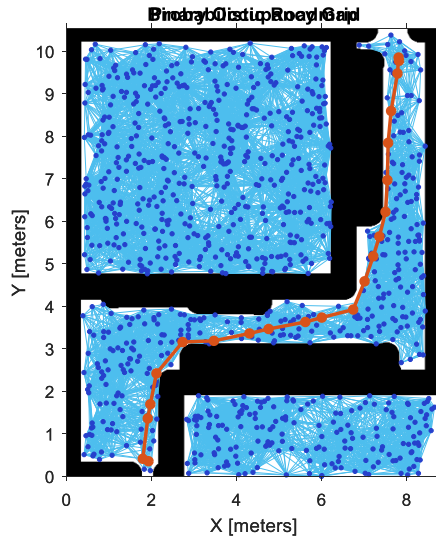


Figura 52. Trayectoria de partida del aplicativo

En la *Figura 53* se muestra la trayectoria ejecutada durante la partida hacia el punto deseado.

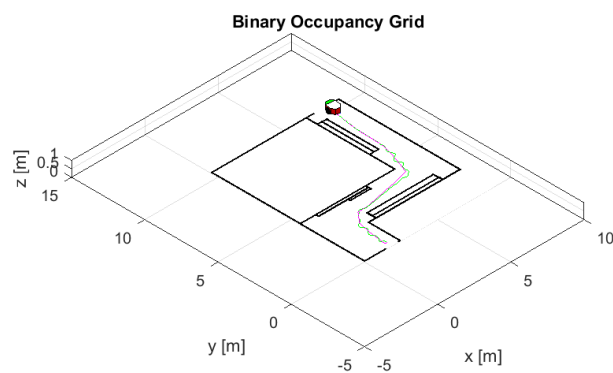


Figura 53. Trayectoria ejecutada durante la partida

En la *Figura 54* se muestra el desplazamiento realizado durante la partida en el plano X- Y.

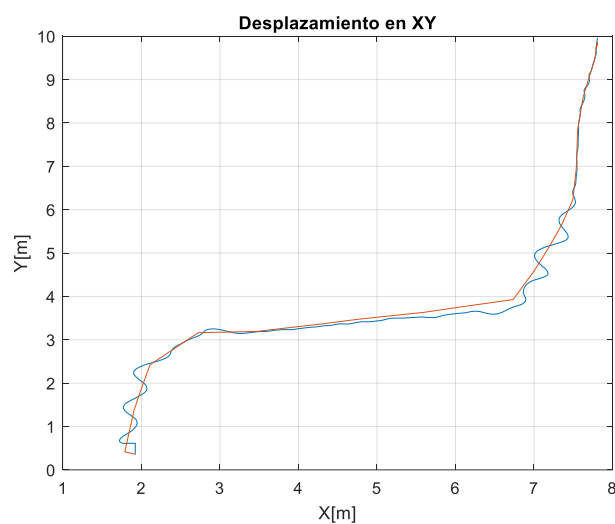


Figura 54. Desplazamiento realizado durante la partida

En la *Figura 55*, se muestra el error de posición vs tiempo, de donde podemos visualizar que al final de la trayectoria de partida se tiene un error de posición de 20cm aproximadamente.

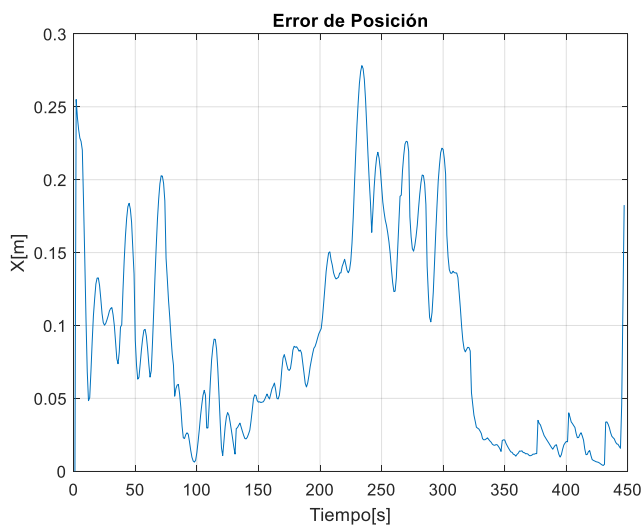


Figura 55. Error de posición vs Tiempo durante la partida

Proceso de Regreso

En la *Figura 56* se muestra la trayectoria planificada para el regreso al punto inicial.

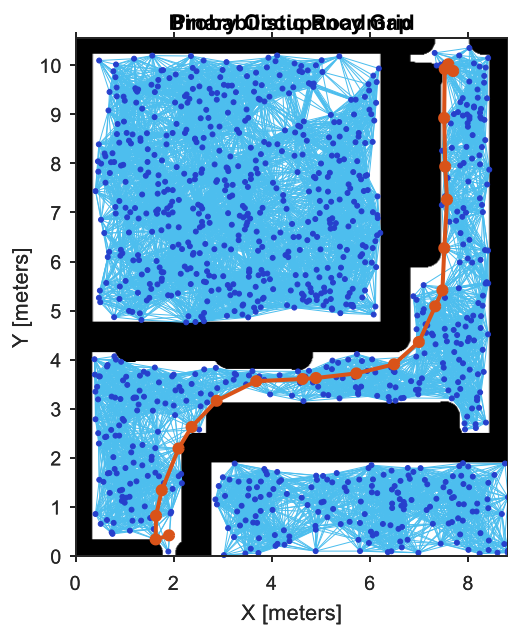


Figura 56. Trayectoria de regreso del aplicativo

En la *Figura 57* se muestra la trayectoria ejecutada durante el proceso de retorno hacia el punto deseado.

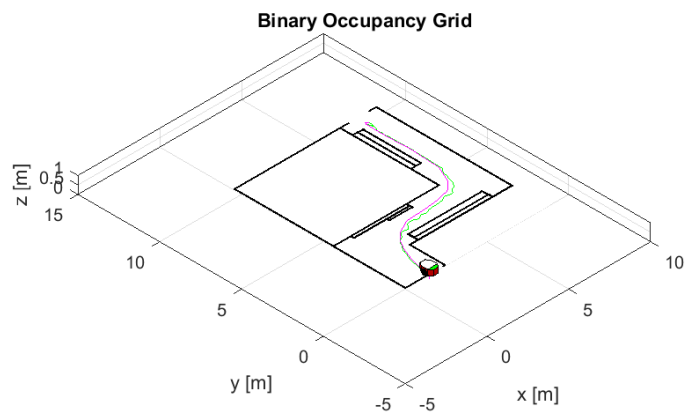


Figura 57. Trayectoria ejecutada durante el regreso al punto inicial

En la *Figura 58* se muestra el desplazamiento realizado durante la partida en el plano X- Y.

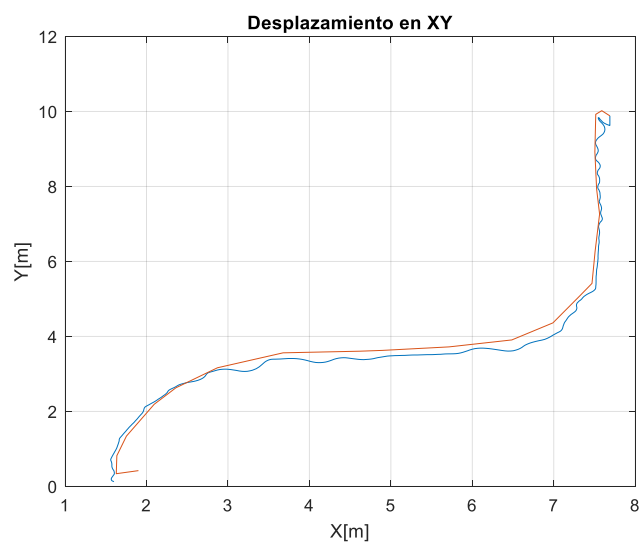


Figura 58. Desplazamiento realizado durante el proceso de regreso

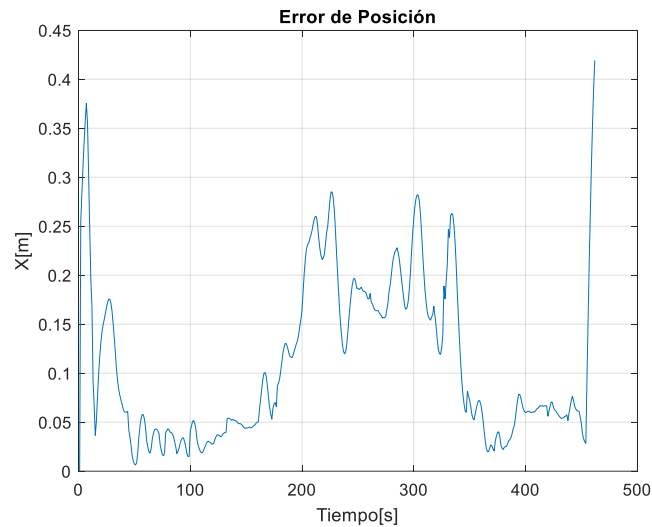


Figura 59. Error de posición vs Tiempo durante el proceso de regreso

En la *Figura 59*, se muestra el error de posición vs tiempo, de donde podemos visualizar que al final de la trayectoria se tiene un error de posición de 40cm aproximadamente.

Análisis

Al final de la ejecución del aplicativo se obtuvo un error de posición de 40cm, lo que concuerda con el resultado obtenido al final del proceso de partida, donde se obtuvo un error de posición de 20cm, lo que quiere decir que en cada iteración el robot estaría acumulando un error de posición de 20cm.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

- Se implementó un sistema de formación en robótica móvil, para ingenieros mediante un conjunto de prácticas de laboratorio donde se ilustra el uso software especializado para la programación y control de plataformas móviles rodantes P3 –DX.
- Se diseñó una serie de seis guías de laboratorio donde se lega a los estudiantes de las asignaturas de Robótica Industrial y Robótica Social, guías prácticas con actividades que adiestran y ejercitan los conceptos introductorios de navegación autónoma de robots móviles.
- Se implementaron las guías de laboratorio desarrollando un temario que apunta al desarrollo de algoritmos de navegación autónoma, planificación de trayectorias y control de plataformas robóticas móviles rodantes diferenciales.
- Se implementó un algoritmo aplicativo que reúne todas las temáticas abarcadas en la serie de prácticas, el mismo permite planificar las trayectorias a realizar en base a mapas del entorno de trabajo del robot y ejecutarlas usando un controlador de posición.

- El algoritmo de seguimiento de trayectorias implementado consigue reducir el error de posición a cero en aproximadamente 4 segundos, cuando el error inicial es menor o igual a un metro.
- Se concluye a partir de los datos obtenidos en el apartado 4.1.2 que la aceleración traslacional, así como la aceleración rotacional que posee el robot puede generar errores en la ejecución de desplazamientos.
- A partir de los datos obtenidos en el apartado 4.1.3, se deduce que los errores tanto de traslación como de rotación aumentan de manera directamente proporcional a velocidad utilizada, es decir a mayor velocidad de desplazamiento mayor error de desplazamiento se obtendrá, llegando a errores de hasta 20 cm cuando se realizan desplazamientos a máxima velocidad.
- A partir de los datos obtenidos en el apartado 4.1.3 se concluye que la inclusión de un estimador odométrico redujo los errores de desplazamiento con respecto a los errores obtenidos con la ejecución de movimientos en lazo abierto .
- Se concluye que la distancia mínima óptima para la conexión de nodos en el algoritmo de planificación de trayectorias implementado en el apartado 4.1.5 es de 1m entre nodos.

5.2 Recomendaciones

- Los errores obtenidos al final del aplicativo demuestran que los algoritmos de control implementados no facultan a la plataforma móvil para ser utilizada en ámbitos industriales, se recomienda analizar la inclusión de un algoritmo que utilice visión artificial, o instrumentación como GPS e IMU's para la reducción de errores acumulativos.
- Se recomienda no trabajar al robot en sus velocidades máximas, ya que estas producen el aumento de los errores de posición.
- Se recomienda hacer uso de la interfaz que posee ARIA para conectarse con Matlab, ya que dicho entorno computacional algebraico ofrece una gama de facilidades para la programación e implementación de algoritmos complejas.

BIBLIOGRAFÍA

- Adrián, G. (2011). *Planificación de movimiento en robótica móvil*. Universidade de santiago de compostela escola técnica superior de enxeñaría.
- Andrade, R. (2012). *Teleoperación de una plataforma móvil asistida mediante el uso de un sistema de visión artificial*. Sangolquí, Ecuador.
- Arnanz, Á., Jorge Baliñas, & Sebastián Bronte. (2006). *Aplicaciones de robots móviles*. Alcalá.
- Borenstein, J., & Koren, Y. (1991). *The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots*. Michigan: IEEE Journal of Robotics and Automation Vol 7, No 3.
- Cook, J. (2012). *Diseño e implementación de un sistema de generación de trayectorias para un robot móvil utilizando control odométrico*. Lima: pontificia universidad católica del Perú.
- Cruz, H. (2008). *Una introducción a los Robots Móviles*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- Daniel, G., & Vásconez, D. (2012). *Mapas de entornos mediante navegación difusa y sistemas de teleoperación de una plataforma Pioneer P3 - DX*. Sangolquí, Ecuador.
- Diego, G. (2013). *Control remoto por voz del robot móvil Pioneer PD -X3*. Sangolquí - Ecuador
- E, R. O. (2017). *Fundamentos de robótica*. Lima, Perú.
- Eduardo, P. (2015). *Control del Robot Pioneer 3d Utilizando una FPGA RIO*. Sangolquí, Ecuador.
- Inc., M. (2006). *Pioneer 3 Operators Manual*.
- Inc., M. (s.f.). *MobileSim, The MobileRobots Simulator*.
- International Federation of Robotics. (2015). Mobile Robot Replaces Half of Full-Time Position at Scan A/S. Frankfurt, Germany: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/mobile-robot-replaces-half-of-full-time-position>.
- Martin, M. (2008). *Robots Moviles*. Valencia, España: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática Universidad Politécnica de Valencia.
- MobileRobots Inc. (2006). *Pioneer 3 Operations Manual*.
- MobileRobots, I. (s.f.). *MobileSim, The MobileRobots Simulator*.
- Ollero Baturone, A., & González Jiménez, J. (2015). *Estimación de la Posición de un Robot Móvil*. Málaga: Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga.
- Ramos, O. (2016). *Cinemática de Robots Moviles*. Stockholm, Sweden: IEEE International Conference on Robotics and Automation.
- Ramos, O. (2017). *Fundamentos de robótica*. Lima, Perú.
- Robalino, D. (2015). *Control Neuronal del robot móvil PD - X3 mediante un perceptrón muticapa implementado en MATLAB*. Sangolquí, Ecuador.
- Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V., & F, S. (2009). *Navegación de robots móviles en entornos no estructurados utilizando álgebra lineal*. San Juan, Argentina: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial.
- SensCom, I. (2004). *Series 600 Openface ultrasonic sensor*. Miami, USA: SensComp, Inc.
- Whitbrook, A. (2010). *Programming Mobile Robots with Aria and Player: A Guide to C++ Object-Oriented Control*. 10.1007/978-1-84882-864-3.
- WINGFIELD, N. (17 de septiembre de 2017). As Amazon Pushes Forward With Robots, Workers Find New Roles. *The New York Times*.