

**UNIVERSIDA PRIVADA ANTENOR ORREGO**

**ESCUELA DE POSTGRADO**



**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS  
CON MENCIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN**

---

**“Algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias en la plataforma de sistema operativo robot (ros) para la navegación autónoma de un robot en fundos agroindustriales de la Región La Libertad”**

---

**Área de Investigación:**  
Sistemas Inteligentes

**AUTOR:**

Herrera German, Julio Cesar

**Jurado evaluador:**

**Presidente** : Urrelo Huiman, Luis Vladimir  
**Secretario** : Miranda Robles, Juan Carlos  
**Vocal** : Cerna Sánchez, Eduardo Elmer

**Asesor:**

Prado Gardini, Sixto Ricardo

**Código Orcid:** <https://orcid.org/0000-0002-9135-2663>

**TRUJILLO - PERÚ  
2024**

Fecha de sustentación: 09-05-2024

# ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN Y SEGUIMIENTOS DE TRAYECTORIA EN LA PLATAFORMA DE SISTEMA OPERATIVO ROBOT (ROS) PARA LA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE UN ROBOT EN FUNDOS AGROINDUSTRIALES DE LA REGIÓN LA LIBERTAD

## INFORME DE ORIGINALIDAD

2 %

2%

2%

1%

INDICE DE SIMILITUD

FUENTES DE INTERNET

PUBLICACIONES

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1 Rossomando, Francisco Guido. "Adaptive Neural Dynamic Compensator for Mobile Robots in Trajectory tracking control", IEEE Latin America Transactions, 2011.

Publicación

[cybertesis.unmsm.edu.pe](http://cybertesis.unmsm.edu.pe)

2 Fuente de Internet

[hdl.handle.net](http://hdl.handle.net)

3 Fuente de Internet



Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini  
Investigador Principal

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

## **Declaración de originalidad**

Yo, *Sixto Ricardo Prado Gardini*, docente investigador de la Universidad Privada Antenor Orrego, asesor de la tesis de investigación titulada "Algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias en la plataforma de sistema operativo robot (ros) para la navegación autónoma de un robot en fundos agroindustriales de la región la libertad", autor *Julio Cesar Herrera German.*, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 2%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 13 de mayo del 2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las normas establecidas por la Universidad.

Lugar y fecha: Trujillo, 13 de mayo del 2024.



Asesor  
Prado Gardini, Sixto Ricardo  
DNI: 18099692  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9135-2663>



Autor  
Herrera German, Julio Cesar  
DNI: 72890847

## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres, por ser los pilares de mi vida profesional al darme la oportunidad de estudiar y crecer como persona.

## AGRADECIMIENTO

Al Dr. Ing. Sixto Prado, investigador del Labinm, al que expreso mi profundidad gratitud por su colaboración y apoyo incondicional para el desarrollo del presente trabajo y darme la oportunidad de pertenecer a tan prestigioso grupo de investigación, donde logre ampliar y mejorar mis capacidades profesionales.

Ing. Julio Herrera reconoce el apoyo financiero de **Concytec-Prociencia** mediante el **proyecto con código 171-2020-FONDECYT** de título “Desarrollo de un sistema robótico autolocalizable con capacidad de mapeo de su entorno y procesamiento de data mediante inteligencia artificial para mejorar la exactitud de las proyecciones agrícolas de arándanos en agroindustrias de la Región La Libertad-Perú”, que se desarrolló en el laboratorio de investigación multidisciplinario (Labinm) de la Universidad Privada Antenor Orrego.



## RESUMEN

La presente investigación desarrolla algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias para la navegación de un robot móvil en un entorno urbano como de fundo agrícola. Primero, se modela la cinemática del robot móvil para parametrizar su posición y orientación (localización del robot móvil) en función de las velocidades de sus ruedas y con ello planificar trayectorias de trabajo deseadas del robot. Segundo, se diseñan los algoritmos de planificación y seguimientos de trayectorias deseadas tal que el movimiento del robot minimice el error entre la trayectoria deseada y la real. Tercero en un entorno virtual basado en ROS y el software Gazebo se valida el movimiento del robot móvil gobernado por los algoritmos previamente desarrollados. Finalmente, se presentan diferentes resultados de las validaciones sobre terrenos simulados con diferentes características de la trayectoria deseada a seguir.

**Palabras Claves:** robot móvil, cinemática, algoritmo, planificación de trayectorias, seguimientos de trayectorias.

## ABSTRACT

The present research develops trajectory planning and tracking algorithms for the navigation of a mobile robot in an urban environment such as an agricultural field. First, the kinematics of the mobile robot is modeled to parameterize its position and orientation (location of the mobile robot) based on the speeds of its wheels and thereby plan desired work trajectories of the robot. Second, the planning and tracking algorithms for desired trajectories are designed such that the robot's movement minimizes the error between the desired trajectory and the real one. Third, in a virtual environment based on ROS and the Gazebo software, the movement of the mobile robot governed by the previously developed algorithms is validated. Finally, different results of the validations on simulated terrain with different characteristics of the desired trajectory to follow are presented.

**Keywords:** mobile robot, kinematics, algorithm, trajectory planning, trajectory tracking.

## DECLARATION

Por el presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto y agradecimientos.

Este trabajo de tesis basado en los siguientes artículos científicos publicados que son de mi autoría:

- **Kinematic Modeling of a Mobile Robot with Four Tractor-Type Wheels with Independent Electric Drive.** Noviembre del 2023, IEEE XXX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON). Julio Herrera and Sixto Prado.
- **Modelamiento Cinemático de un Robot Móvil con Cuatro Llantas tipo Tractor de Accionamiento Eléctrico Independiente.** Agosto del 2023, XXIX Congreso Nacional y Exposición Internacional de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica, Eléctrica, Electrónica y Ramas Afines (CONEIMERA). Julio Herrera.

Este trabajo fue realizado desde el 2022 al 2023 bajo la supervisión del Dr. Ing. Sixto Ricardo Prado Gardini en el laboratorio de investigación multidisciplinario (LABIMN) - línea automatización y robótica de la Universidad Privada Antenor Orrego.

Julio Cesar Herrera German  
12 noviembre del 2023



## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DECLARATION.....	v
ÍNDICE DE FIGURA.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	2
I.1. Realidad problemática.....	2
I.1.1. Enunciado del Problema.....	5
I.2. Justificación.....	5
I.2.1. Conveniencia.....	5
I.2.2. Relevancia Social.....	5
I.2.3. Implicancias prácticas.....	6
I.2.4. Utilidad metodológica.....	6
I.3. Objetivos.....	6
I.3.1. Objetivo General:.....	6
I.3.2. Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	9
II.1. Antecedentes.....	9
II.2. Marco teórico.....	15
II.2.1. Robots móviles terrestres:.....	15
II.2.2. Robots móviles terrestres con ruedas.....	16
II.2.3. Modelamiento cinemático.....	19
II.2.4. Control PID.....	20
II.2.5. Modelo de control predictivo (MPC).....	21
II.2.6. Mapeo y Localización simultanea (SLAM).....	22
II.2.7. Sistema Operativo Robot (ROS).....	22
II.2.8. LIDAR (Light detection and ranging).....	23
II.2.9. Distribución del cultivo de arándano.....	23
II.3. Marco Conceptual.....	24
CAPÍTULO III. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	26
III.1.1. Dominio Mecánico.....	26

III.1.2.	Dominio eléctrico y electrónico.....	31
III.2.	Población.....	36
III.3.	Muestra.....	36
III.4.	Técnicas e instrumentación de recolección de datos.....	36
III.5.	Procedimiento .....	37
III.6.	Diseño de constatación.....	38
III.7.	Procedimiento y análisis de datos .....	38
CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....		41
IV.1.	Modelar la cinemática del robot móvil .....	41
IV.2.	Transferir modelo mecánico y cinemático del robot móvil al entorno ROS y Gazebo 45	
IV.3.	Determinar el algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria .....	46
IV.3.1.	Algoritmo de planificación de trayectoria .....	46
IV.3.2.	Algoritmo de seguimiento de trayectoria.....	50
IV.4.	Validar algoritmos de planificación y seguimientos de trayectorias .....	51
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN .....		63
V.1.	Modelo cinemático del robot móvil.....	63
V.2.	Transferencia del modelo mecánico y la cinemática del robot móvil al entorno ROS y Gazebo .....	64
V.3.	Algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria.....	65
V.4.	Validación de los algoritmos de planificación y seguimiento de trayectoria ...	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		67
REFERENCIAS .....		69

## ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA I.1. ROBOT MÓVIL, DESARROLLADO EN EL MARCO DEL PROYECTO 171-2020-FONDECYT, EN MOVIMIENTO EN UN ENTORNO DE LABORATORIO Y EN UN ENTORNO SIMILAR A UN FUNDO AGRÍCOLA.....	4
FIGURA II.1. ROBOTS CON: (A) PATAS, (B) RUEDAS Y (C) ORUGAS. FUENTE: BAMBINO, 2008 .....	16
FIGURA II.2.MOVIMIENTOS DEL ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL .....	17
FIGURA II.3. ROBOT MÓVIL TERRESTRE CON RUEDAS TIPO UNICICLO. FUENTE: YANDÚN TORRES, 2011.....	17
FIGURA II.4. SISTEMA DE DIRECCIÓN ACKERMAN. FUENTE: BAMBINO, 2008 .....	18
FIGURA II.5. BASE DE ROBOT MÓVIL OMNIDIRECCIONAL DE 4 RUEDAS .....	18
FIGURA II.6. ROBOT MÓVIL TIPO OMNIDIRECCIONAL CON TRES RUEDAS (WANG ET AL., 2018).....	19
FIGURA II.7. MODELO CINEMÁTICO DE ROBOT MÓVIL TIPO DIFERENCIAL.....	19
FIGURA II.8. MODELO CINEMÁTICO DE ROBOT MÓVIL TIPO BICICLETA (HERNÁNDEZ LEDESMA, 2022) .....	20
FIGURA II.9. MODELO CINEMÁTICO DE ROBOT MÓVIL TIPO OMNIDIRECCIONAL (HAN Y ZHU, 2019).....	20
FIGURA II.10. CAMELLONES PARA EL CULTIVO DE ARÁNDANO (REDAGRÍCOLA, 2020)...	23
FIGURA III.1. MODELO VIRTUAL EN SOLIDWORKS DE LA MORFOLOGÍA DEL ROBOT MÓVIL DEL PROYECTO 171-FONDECYT .....	26
FIGURA III.2. MODELO VIRTUAL DEL ARMAZÓN DEL ROBOT MÓVIL EN SOLIDWORKS. ...	27
FIGURA III.3. DIFERENTES ESCENARIOS EN EL QUE ROBOT MÓVIL MANTIENE EL CONTACTO RUEDA-TERRENO. ....	28
FIGURA III.4. SISTEMA DE AMORTIGUACIÓN ACTIVA DEL ROBOT (EN CADA LLANTA) MODELADO EN SOLIDWORKS. ....	28
FIGURA III.5. RUEDA TIPO TRACTOR CON ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO INCORPORADO... 29	
FIGURA III.6. ACTUADOR LINEAL GLIDEFORGE. ....	30
FIGURA III.7. AMORTIGUADOR MECÁNICO .....	30
FIGURA III.8. INTEGRACIÓN DE LAS PLACAS ELECTRÓNICAS QUE CONFORMAN EL ROBOT MÓVIL.....	31
FIGURA III.9. RASPBERRY PI 4B (NAYLAMP MECHATRONICS,2022).....	32
FIGURA III.10 PLACA JRK G2 .....	33
FIGURA III.11. PLACA ODRIVE V3.6 .....	33
FIGURA III.12. JETSON AGX JAVIER .....	35
FIGURA III.13 LIDAR OS1-32 .....	35
FIGURA III.14. SENSOR DE POSICIÓN LINEAL ARTICULADO CON CONECTOR OCULAR.....	36
FIGURA III.15. CURVA COMPARATIVA DE LA POSICIÓN DE REFERENCIA Y POSICIÓN DEL ROBOT MÓVIL EN LA LÍNEA DE TIEMPO. ....	39
FIGURA IV.1. MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL RESPECTO A SU CENTRO DE MASA. ....	41
FIGURA IV.2. ANÁLISIS DE MOVIMIENTO RELATIVO DE VELOCIDADES APLICADOS AL MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL. ....	42
FIGURA IV.3. MODELO CINEMÁTICO DEL ROBOT MÓVIL RESPECTO A UN SISTEMA DE REFERENCIA GLOBAL EN EL PLANO XY .....	44
FIGURA IV.4. MODELO 3D DEL ROBOT MÓVIL EN GAZEBO (RVIZ).....	46
FIGURA IV.5. BLOQUE PLANIFICADOR DE TRAYECTORIA.....	46

FIGURA IV.6. MODELO VIRTUAL DE LOS CAMELONES DE LOS FUNDOS AGROINDUSTRIALES. .....	49
FIGURA IV.7. SEGUIDOR DE TRAYECTORIA .....	51
FIGURA IV.8. DIAGRAMA COMPLETO DE BLOQUES PARA EL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS DESEADAS DEL ROBOT MÓVIL .....	51
FIGURA IV.9. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA RECTA CON UNA INCLINACIÓN DE 20° Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 0T$ . .....	53
FIGURA IV.10. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA RECTA CON UNA INCLINACIÓN DE 45° Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 0T$ . .....	54
FIGURA IV.11. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA RECTA CON UNA INCLINACIÓN DE 70° Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 0T$ . .....	55
FIGURA IV.12. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA RECTA CON UNA INCLINACIÓN DE 45° Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, -90 \circ T$ .....	56
FIGURA IV.13. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA RECTA CON UNA INCLINACIÓN DE 45° Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 45 \circ T$ .....	57
FIGURA IV.14. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA CURVA DE 2M DE RADIO Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 0 \circ T$ .....	58
FIGURA IV.15. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA CURVA DE 3M DE RADIO Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 0 \circ T$ .....	58
FIGURA IV.16. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA CURVA DE 4M DE RADIO Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $-2, 0, 0 \circ T$ .....	59
FIGURA IV.17. CURVA COMPARATIVA DE LA TRAYECTORIA DE REFERENCIA Y LA TRAYECTORIA DEL ROBOT EN UNA LÍNEA CURVA DE 4M DE RADIO Y UNA POSE INICIAL DEL ROBOT DE $6, 0, 180 \circ T$ .....	60
FIGURA IV.17. TRAYECTORIA REAL DE TRABAJO .....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA III.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA RUEDA TIPO TRACTOR CON ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO. ....	29
TABLA III.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACTUADOR LINEAL GLIDEFORGE .....	30
TABLA III.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA RASPBERRY PI 4B UTILIZADO EN ESTE PROYECTO. ....	32
TABLA III.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLACA JRK G2 24V13 .....	33
TABLA III.5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ODRIVE USADO EN LA PRESENTE TESIS.	34
TABLA III.6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA JETSON AGX JAVIER.....	34
TABLA IV.1. RESUMEN DE LAS 10 SIMULACIONES REALIZADAS .....	61

# CAPÍTULO I

## Introducción

*“la educación es el arma más poderosa que puedes usar  
para cambiar el mundo”*

**Nelson Mandela**

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## I.1. Realidad problemática

La agroindustria es una actividad fundamental para el desarrollo sostenible de los países en vías de desarrollo, debido a que provee una gran variedad de productos alimenticios. El crecimiento constante de la demanda de estos productos genera la necesidad de mejorar algunas de las etapas de la producción, para ello, se utiliza máquinas automáticas o robots móviles como herramientas tecnológicas para regar, controlar o monitorear los cultivos (Hernández Ledesma, 2022)

En los últimos años, los robots móviles terrestres surgen como una alternativa tecnológica para mejorar la gestión de insumos y aumentar la producción. Debido a que pueden realizar operaciones repetitivas durante varias horas al día, lo que permite aumentar la sostenibilidad de la producción en comparación de maquinaria operada por un recurso humano (Pitla et al, 2020).

En esa línea en el Perú, en la última década se han desarrollado diferentes prototipos de vehículos autónomos terrestres aplicables al sector agroindustrial, como por ejemplo el robot móvil llamado Berry-bot que realiza control de malezas, monitoreo de producción y verifica el nivel de los parámetros fitosanitarios del cultivo (Universidad Nacional de Ingeniería, 2021). Otra inventiva robótica nacional es el Agrobot que integra un sistema de visión computacional, realidad aumentada e intercambiador herramientas que le permite realizar siembra, riego, podado, cosecha, electro nebulización y fumigación de cultivos (Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021). Sin embargo, en ninguno de los dos casos mencionados

previamente se menciona o especifica el uso de estrategias de planificación y seguimiento de trayectorias aseguren alcanzar el camino deseado para cumplir con precisión un trabajo dado es especial cuando se requiere que el robot realice navegación autónoma.

En la ciudad de Trujillo-Perú, en el laboratorio de investigación multidisciplinario (Labinm) línea Robótica de la Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO) se está desarrollando un proyecto de investigación con código 171-2020-Fondecyt financiado por Concytec y que tiene como principal objetivo desarrollar un robot móvil con capacidad para navegar autónomamente por fundos agrícolas a fin de aplicar técnicas de muestreo que permitan proyectar la cantidad de arándanos y su correspondiente grado de madurez tal que sirva para estimar de forma más precisa el inicio de cosecha masiva y activar así toda la logística que ello conlleva.

En ese contexto el robot móvil desarrollo en el marco proyecto 171-2020-Fondecyt, tiene capacidad desde el punto de vista motriz de generar movimientos robustos lineales y rotacionales los que han sido validados tanto en entorno de laboratorio como en uno similar al entorno agrícola (Figura I.1). La comunicación entre sus diferentes módulos se realiza mediante comandos que se ejecutan en ROS (García Gómez, 2022 y Regidor Vallcanero, 2021) y tiene capacidad de mapear su entorno (fundamental para la navegación autónoma) mediante el uso de un sensor LIDAR 3D (García Gómez, 2022 y Regidor Vallcanero, 2021).





Figura I.1. Robot móvil, desarrollado en el marco del Proyecto 171-2020-Fondecyt, en movimiento en un entorno de laboratorio y en un entorno similar a un fundo agrícola

Además, dispone de una configuración no-holonómica en el movimiento de sus ruedas lo que le hace sensible a perturbaciones, que se producen por ejemplo cuando el robot se mueve en superficies irregulares, que inducen pequeños deslizamientos lineales y/o angulares no deseados que al acumularse en el tiempo generan una notoria desviación del robot con respecto a una trayectoria deseada (Gao et al, 2021 y Hernández, 2022). Este efecto negativo en el comportamiento del movimiento del robot se vuelve más notorio si es que no se dispone de una adecuada planificación de trayectorias continuas y seguimiento de las mismas a fin de realizar las correcciones a las desviaciones previamente mencionadas. Asimismo, sin esta planificación y seguimiento de trayectorias no se puede generar movimientos continuos con restricciones (por ejemplo, que cumplan con una geometría determinada, lineal o circular) previamente definidas que a su vez cumplan con una precisión deseada. Lo que afectaría el resultado deseado del movimiento en navegación autónoma del robot.

### I.1.1. Enunciado del Problema

¿Cómo el desarrollo de algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias en la plataforma de sistema operativo robot (ROS) permite la navegación autónoma de un robot móvil en fundos agroindustriales de la región la libertad?

### I.2. Justificación

La investigación que se propone en este proyecto está dirigida a analizar y sintetizar algoritmos de planificación y seguimientos de trayectorias ejecutables en tiempo real a fin de realizar navegación autónoma con alta precisión de vehículos o robots móviles en fundos agroindustriales. Los algoritmos resultantes de la investigación se validan tanto en un entorno simulado como experimental aplicándose al robot móvil que se construye en el marco del proyecto 171-2020-FONDECYT.

#### I.2.1. Conveniencia

Los algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias permiten realizar navegación autónoma de robots móviles que cumplan un trabajo deseado o productivo tal que el error o diferencia entre la trayectoria planificada y la trayectoria realmente alcanzada por el robot sea nula o mínima.

#### I.2.2. Relevancia Social

Desarrollar un robot móvil propio con capacidad de navegación autónoma de alta precisión permitirá dar un salto tecnológico en el desarrollo tecnológico local que tendrá un impacto positivo en la sociedad al potenciar la colaboración Industria-Academia, fomentará la continua capacitación del personal sobre tecnologías de

avanzada y permitirá a las agroindustrias tener una estrategia tecnología para mejorar las proyecciones agrícolas anuales.

### I.2.3. Implicancias prácticas

El desarrollo de robots móviles es muy amplio mundialmente y cada uno de ellos se enfrentan con diversos problemas que surgen durante la navegación en diferentes entornos. Por consiguiente, la presente investigación proporciona un soporte algorítmico que permite navegar automáticamente un robot móvil tipo diferencial en superficies no uniformes.

### I.2.4. Utilidad metodológica

La presente investigación describe un método para desarrollar algoritmos de planificación y seguimiento de trayectoria utilizando información que se integran a unas provenientes técnicas SLAM, sensor Lidar 3D, sensor IMU y cámara ZED a fin de que un robot móvil ejecute trayectorias similares a unas deseadas.

## I.3. Objetivos

### I.3.1. Objetivo General:

Desarrollar algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias en la plataforma de sistema operativo robot (ros) para la navegación autónoma de un robot en fundos agroindustriales de la región la libertad.

### I.3.2. Objetivos Específicos

- Modelar la cinemática del robot móvil desarrollado en el proyecto 171-2020-FONDECYT para obtener las direcciones y rangos de movimientos permitidos (desplazamientos, velocidades y aceleraciones) según la estructura mecánica del robot.
- Transferir el modelo mecánico y la cinemática del robot móvil al entorno ROS y GAZEBO para disponer de un escenario virtual de validación de los algoritmos a desarrollar.
- Determinar el algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria que genere la mejor respuesta del robot móvil en el entorno ROS y GAZEBO a fin de seleccionarlo para la validación experimental.
- Validar el algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria en un entorno Gazebo.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

*“comienza haciendo lo que es necesario, después lo que es posible y de repente  
estarás haciendo lo imposible”*

**San Agustín.**

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### II.1. Antecedentes

Aquí se describen algunos trabajos relevantes relacionados al tema de investigación del presente trabajo.

Jian Zhuozhu et al (2023) en su artículo “Dynamic control barrier function-based model predictive control to safety-critical obstacle-avoidance of mobile robot”, lograron implementar un método eficiente y seguro para evitar obstáculos estáticos y dinámicos mediante el sensor LIDAR. Los algoritmos desarrollados permiten mapear su entorno, delimitar los obstáculos en elipses delimitadores mínimas, estimar y predecir los estados de movimiento del obstáculo. Estos algoritmos son combinados para generar una trayectoria segura y libre de colisiones para la navegación del robot en entornos dinámicos. Los resultados obtenidos muestran que su método propuesto es más seguro y eficiente que otros métodos en el proceso de evitar obstáculos.

Hernández Ledesma (2022) en su tesis “Control de vehículo terrestre en maniobras de posicionamiento autónomo de precisión”, logró controlar y seguir trayectorias programadas punto a punto de manera autónoma en un vehículo tipo Rover. Para ello, el algoritmo de control actúa sobre la velocidad y dirección del vehículo, las que son parametrizadas mediante un modelo cinemático por modos deslizantes. Los resultados obtenidos validan el trabajo propuesto en cuando alcanzar el seguimiento de trayectorias programadas en las herramientas informáticas Mission Planner y

QGroundControl según las mediciones obtenidas por el GPS SE 100 (siempre y cuando las condiciones climáticas sean favorables).

Ji Wenkang et al (2022) en su artículo científico “Application of model predictive control to trajectory tracking of mecanum wheels”, logro construir un entorno de simulación gazebo basado en ROS y mediante el paquete de función move-base se envía la información de la trayectoria de referencia y la posición del vehículo al controlador MPC (control predictivo del modelo) que se encarga de calcular una serie de información de velocidad optima futura y publica la velocidad optima actual en el controlador PID. Con ello corrige la información de velocidad del vehículo para garantizar que la carrocería del vehículo alcance con precisión la velocidad requerida.

Wang Choahun et al (2022) en su artículo científico “Chase and Track: Towards Safe and Smooth Trajectory Planning for Robotic Navigation in Dynamic Environments”, logró la planificación de trayectorias para un movimiento seguro y suave en entornos dinámicos. El planificador de trayectorias genera el camino más corto entre la posición actual del robot y el objetivo de navegación siguiendo la trayectoria global previamente definida. al nivel local el robot persigue la trayectoria global a través del entono dinámico mediante la ejecución del control predictivo del modelo (MPC) para generar rutas locales y con ello cambiar adaptativamente la trayectoria del robot con respecto a la distancia entre la posición actual del robot y el objetivo de navegación. Finalmente, se valida el trabajo a través de extensos experimentos en entornos dinámicos, demostrando que el robot puede

alcanzar el objetivo más rápido y mostrar una trayectoria más segura y fluida en la navegación.

Valdepeña Rivera (2022) en su tesis “Navegación de un robot omnidireccional basado en lógica difusa tipo-2”, logró desarrollar un algoritmo de control difuso para el seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos. Para ello, se modeló la cinemática del robot con la finalidad de comprender la matemática de cada desplazamiento; se realizó la odometría mediante el sensado de un sensor tipo inercial y visión estéreo para generar el control de navegación; y se desarrolló un algoritmo planificación de trayectorias. El resultado relevante del trabajo es la navegación exitosa del robot en un entorno con obstáculos estáticos y dinámicos con un error cuadrático máximo de 0.0894 y 0.9037 entre la trayectoria definida y ejecutada en la realidad respectivamente.

Gonzales y Scaglia (2021) en su artículo “Control predictivo aplicado a un buque marino”, lograron simular un modelo de control predictivo para el seguimiento de trayectoria en un buque marino. Para ello, utilizo el modelo cinemático de un buque marino que posteriormente será linealizado mediante la serie de Taylor y discretizado mediante el algoritmo de Euler, y con ello formular la ley de control. El controlador diseñado se probó en tres tipos de trayectorias: cuadrada, circular y lemniscata, y en los tres escenarios propuestos logro seguir la trayectoria deseada durante su recorrido (siempre y cuando la curvatura no sea brusca).

Rozo Manrique y Pallares Olivares (2021) en su tesis “Diseño y construcción de un robot móvil autónomo para la localización y mapeo simultáneos (SLAM) en ambientes cerrados domésticos”, lograron implementar un robot móvil con ruedas



omnidireccionales de accionamiento independiente con la capacidad de navegar autónomamente. Para ello, se diseñó e implementó su estructura mecánica con elementos comerciales de fácil acceso. Se modeló la cinemática directa e inversa del robot móvil para validar el comportamiento del robot y el algoritmo de control. Se sintonizó los parámetros de control PID de velocidades de cada llanta. Finalmente, se logró un error promedio 0.033 metros entre la trayectoria deseada y la trayectoria medida.

Salazar Hidalgo (2021) en su tesis “Control MPC de un cuadricóptero para el seguimiento de trayectorias basados en odometría visual”, logró implementar un control MPC al control interno de un cuadricóptero para seguimiento de trayectorias. Para ello, se analizó el comportamiento cinemático del robot para obtener el modelo del sistema que es muy importante para el funcionamiento del control MPC. El resultado relevante es correcto seguimiento de las trayectorias planificadas.

Gao et al (2021) en su artículo “A hybrid tracking control strategy for nonholonomic wheeled mobile robot incorporating deep reinforcement learning approach”, logró desarrollar un control de seguimiento de NWMR (nonholonomic wheeled mobile robot) con restricciones e incertidumbre mediante un control híbrido basado en método de aprendizaje de refuerzos profundos. Para ello, el control se aplica a las variables de velocidad lineal (velocidades en dirección x e y) y velocidad angular, las cuales son parametrizadas según el desarrollo cinemático del robot móvil empleado.

Han y Zhu (2019) en su artículo “Robust optimal control of omni-directional mobile robot using model predictive control method”, logro desarrollar un algoritmo de control MPC robusto para el seguimiento de trayectoria. Para ello, modelo la cinemática y dinámica de un vehículo con llantas omni-direccional, y sobre ellos aplicar el control MPC. Finalmente, en el trabajo se comparó los resultados obtenidos con un control tradicional PID y el control propuesto MPC, dando como resultado relevante que el control MPC disminuye el error tanto en la dirección X e Y del vehículo al realizar una trayectoria circular.

Wang et al (2018) en su artículo “Trajectory tracking of an omnidirectional wheeled mobile robot using a model predictive control strategy”, lograron implementar un modelo de control predictivo para el seguimiento de trayectorias de un robot móvil con tres ruedas omnidireccional distribuidas simétricamente. Para ello, se realiza el análisis cinemático del robot y se establece su modelo, y con ello establecer la estrategia del modelo de control predictivo y diseñar el controlador. Para validar su trabajo, se realizó una prueba de estabilización de puntos, donde el robot se mueve hasta un punto objetivo y cambia su orientación en el proceso de movimiento; y la prueba de seguimiento de trayectoria, donde el robot se mueve a lo largo de una trayectoria de pulso conocidos con diferentes orientaciones del objetivo en diferentes nodos. Finalmente, en ambas pruebas se logró llegar satisfactoriamente al objetivo deseado.

Diaz Tenorio (2017) en su tesis “Diseño e implementación de un sistema para el mapeo y navegación de un robot móvil”, logró la navegación autónoma de un robot móvil mediante métodos probabilísticos incorporados en el software libre Robot

Operative System (ROS). En este trabajo, se evidencio la importancia de la cinemática directa e inversa de los robots móviles mostrados para obtener una mejor respuesta en la navegación. Por otro lado, se describe los algoritmos empleados para lograr la navegación autónoma del robot.

Sharma et al (2017) en su artículo “Comparitive study of predictive controllers for trayctory tracking of non-holonomic mobile robot”, lograron desarrollar diversos enfoques para implementar un modelo de control predictivo para el seguimiento de trayectorias de un robot móvil tipo diferencial no holonómica. Para ello, se desarrolla la cinemática del robot móvil, la que se linealiza mediante un modelo lineal sucesivo y modelo lineal basado en errores. Luego, estos modelos son discretizados y en base a ello se diseñar el modelo de control predictivo con criterios que penalizan los errores de seguimientos de estados y esfuerzo de control. Los resultados obtenidos son validados con dos enfoques de última generación.

Lins Barreto et al (2013) en su artículo “Design and implementation of model predictive control with friction compensation on an omnidirectional mobile robot”, lograron implementar un modelo de control predictivo con compensación de fricción para el seguimiento de trayectoria de un robot móvil de tres ruedas omnidireccionales. Para ello, se modela la cinemática y dinámica del robot móvil para calcular las referencias de velocidades a partir de información sobre la posición del robot y la trayectoria deseada. Se utilizo una estructura en cascada que consta de tres partes: el primer bloque denominado Outer-loop se encarga de calcular las velocidades de referencia en función de la posición de referencia y posición real, el segundo bloque denominada Inner-loop se encarga de calcular las señales de control

para cada llanta en función de las velocidades de referencias obtenidas en el primer bloque, y el tercer bloque denominado Robot-Model es la representación de la respuesta del robot físico. Los resultados obtenidos son validados en comparación a otros trabajos, logrando compensar los efectos de la fricción y seguir una trayectoria deseada.

Kuhne et al (2004) en su artículo “Model predictive control of a mobile robot using linearization”, lograron desarrollar un modelo de control predictivo para el problema de seguimiento de trayectorias de un robot móvil con ruedas no holonómico. Para ello, describe brevemente el modelo cinemático del robot y posteriormente lo linealiza mediante la serie de Taylor. Luego, mediante un método estándar de programación cuadrática (QP) logró solucionar exitosamente el problema de optimización del control MPC y seguir la trayectoria en forma de ocho.

## II.2. Marco teórico

### II.2.1. Robots móviles terrestres:

Son máquinas automáticas que realizan tareas repetitivas al igual que los robots industriales convencionales. No obstante, la principal característica de los robots móviles es su capacidad de trasladarse en diferentes superficies y entornos.

Existen una gran variedad de robots móviles terrestres, cuyo diseño se alinean a los requerimientos técnicos de la superficie y entorno de trabajo. Estos robots móviles son clasificados (según su morfología) en: robots con patas, robots orugas y robots con llantas (Figura II.1). Siendo este último, los más empleados en la agroindustria debido a que son más sencillos y fáciles de adquirir y reponer. Además, son menos

complejos en el control de estabilidad y menos pesados para un diseño de similar carga útil (Paniagua Jaramillo, 2014; Yandún Torres, 2011; y Bambino, 2008).

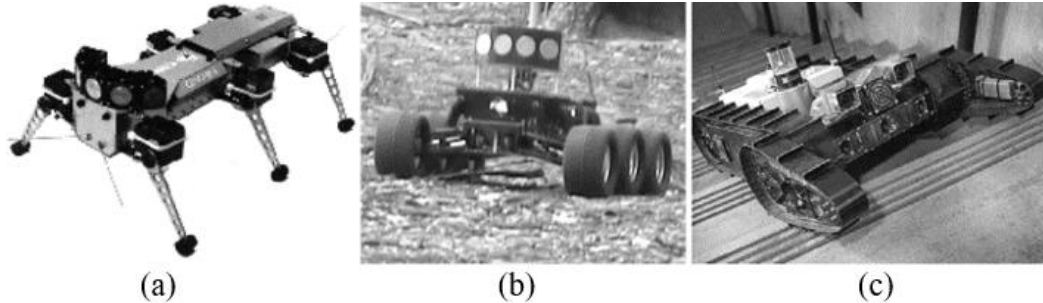


Figura II.1. Robots con: (a) patas, (b) ruedas y (c) orugas. Fuente: Bambino, 2008

## II.2.2. Robots móviles terrestres con ruedas

Estos robots tienen acoplados a su estructura 2 o más ruedas o llantas, y según el tipo de rueda y disposición sobre la estructura mecánica son categorizados de diferentes maneras (Siegwart et al, 2011; y Bambino, 2008). A continuación, se describen los tipos de robot móviles terrestre con ruedas más comunes en la actualidad.

### A. Robot móvil tipo diferencial

Cuentan con dos ruedas, una izquierda y una derecha, y sus ejes de rotación con colineales y contiene el centro de masa del robot. Cada rueda tiene incorporado internamente un motor eléctrico que impulsa al robot para moverse de una posición a otra (Diaz Tenorio, 2017; Soloque Guzman et al, 2014; y Siegwart et al, 2011). En la Figura II.2, se muestra los diferentes movimientos permitidos por el robot tipo diferencial.

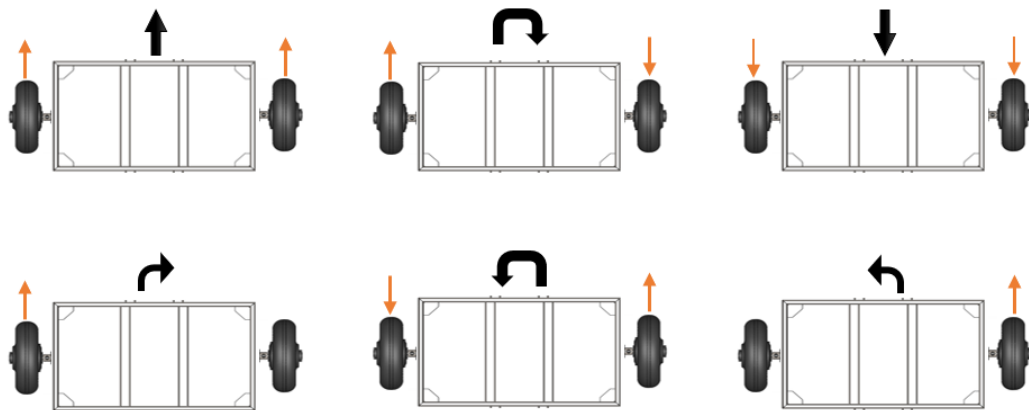


Figura II.2.movimientos del robot móvil tipo diferencial

### B. Robot móvil tipo unicycle

Este tipo de robot al igual que el robot tipo diferencial cuenta con dos ruedas motrices, pero la diferencia radica en la incorporación de una tercera rueda a la estructura (Figura II.3) que gira libremente con la finalidad de mejorar la estabilidad al momento de realizar sus movimientos (Diaz Tenorio, 2017; Soloque Guzmán et al, 2014; y Siegwart et al, 2011).

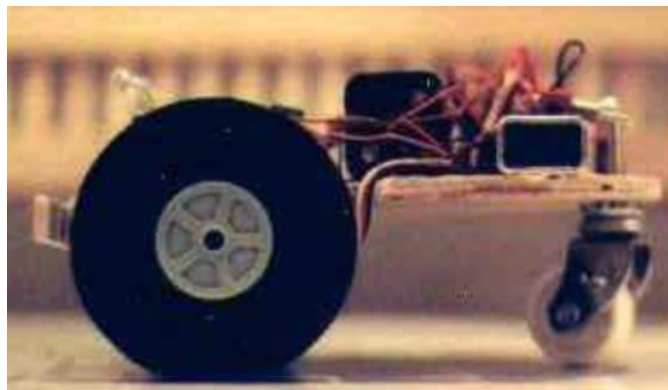


Figura II.3. Robot móvil Terrestre con ruedas tipo unicycle. Fuente: Yandún Torres, 2011

### C. Robot móvil tipo bicicleta

También conocido como sistema de dirección Ackerman (Figura II.4), cuenta con una o dos ruedas delanteras que dirige al robot y una rueda o dos traseras de tracción que impulsas al robot a avanzar o retroceder (Diaz Tenorio, 2017).



Figura II.4. Sistema de dirección Ackerman. Fuente: Bambino, 2008

### D. Robot móvil tipo omnidireccional

Este tipo de robot tiene la particularidad de emplear ruedas tipos omnidireccionales. Estas ruedas están conformadas por diversos rodillos que giran libremente y están dispuesto a cierto ángulo respecto a la rueda principal. Por ejemplo, la Figura II.5 muestra la estructura base de un robot móvil tipo omnidireccional de 4 ruedas con rodillos dispuestos a 45°.



Figura II.5. Base de robot móvil omnidireccional de 4 ruedas

Por otro lado, la Figura II.6 muestra la estructura de un robot móvil omnidireccional de tres ruedas con una disposición circular simétrica y los rodillos de la rueda están dispuesto a  $90^\circ$  respecto a la rueda principal.

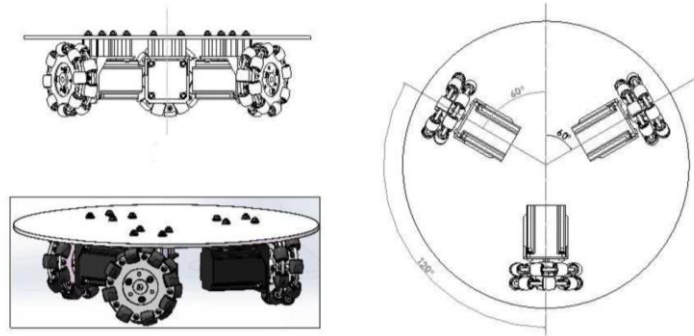


Figura II.6. Robot móvil tipo omnidireccional con tres ruedas (Wang et al., 2018)

### II.2.3. Modelamiento cinemático

Es un análisis que proporciona una descripción matemática del movimiento del robot móvil, permitiendo conocer la relación entre las velocidades de las llantas y el movimiento del robot móvil (Figura II.9). Asimismo, permite conocer la posición y orientación del robot (Sánchez Padilla, 2022 y Bambino, 2008). Por último, los modelos cinemáticos más comunes son:

- Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial (Figura II.7)

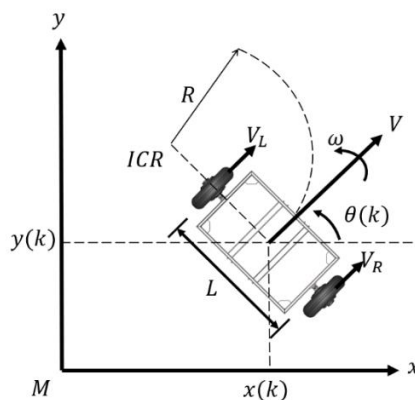


Figura II.7. Modelo cinemático de robot móvil tipo diferencial



- Modelo cinemático de robot móvil tipo bicicleta (Figura II.8)

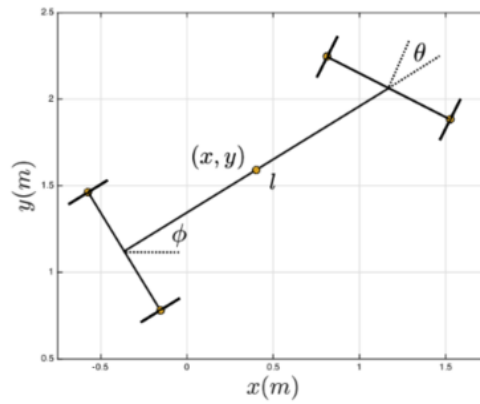


Figura II.8. Modelo cinemático de robot móvil tipo bicicleta (Hernández Ledesma, 2022)

- Robot móvil tipo omnidireccional con 4 ruedas (Figura II.9)

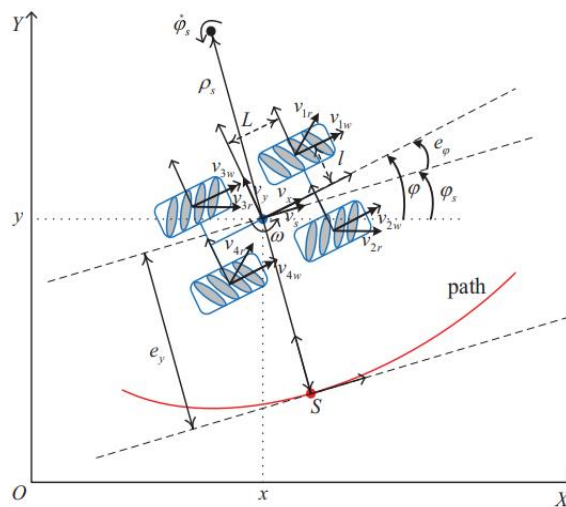


Figura II.9. Modelo cinemático de robot móvil tipo omnidireccional (Han y Zhu, 2019)

#### II.2.4. Control PID

Es un control de lazo cerrado (retroalimentado) que regula una variable física (velocidad, temperatura, presión, flujo, etc), calculando el error (diferencia) entre el valor medido de la variable física y el valor deseado de la misma (set point). El control PID tienen tres parámetros principales: Proporcional (P) cuyo valor depende

del error actual, integral (I) cuyo valor depende de los errores pasados, y derivativo que es una predicción de los errores futuros. Las acciones sincronizadas sobre estos tres parámetros permiten ajustar la variable medida con respecto a un comportamiento deseado según un elemento controlado (Visioli, 2006).

#### II.2.5. Modelo de control predictivo (MPC)

Es un conjunto de métodos de control que utilizan las mismas ideas comunes: la utilización de un modelo explícito para predecir comportamientos futuros del sistema, la minimización de una función de costo sujeto a restricciones de estados y entradas de control, y la utilización de una estrategia de horizonte deslizante. No obstante, la diferencia entre los diversos algoritmos de control predictivo radica en el tipo de modelo utilizado para representar el sistema, las perturbaciones y la función de costo considerado (Salazar Hidalgo, 2021 y Hebe, 2015).

La estrategia del MPC determina las salidas futuras del modelo del robot móvil en cada intervalo de tiempo discreto, para ello depende de valores conocidos y de las señales de control. Las señales de control futuras se calculan minimizando un criterio para mantener al proceso lo más cercano posible a la trayectoria de referencia. Dicho criterio representa la función cuadrática de error entre la salida predicha y la trayectoria de referencia (Salazar Hidalgo, 2021)

En el seguimiento de trayectorias, la estrategia del MPC calcula el error entre la posición actual del robot y la posición en la trayectoria previamente planificada, siendo este el parámetro de entrada para calcular el error futuro y posteriormente realizar las correcciones cinemáticas del robot (Ji et al, 2022).

### II.2.6. Mapeo y Localización simultanea (SLAM)

SLAM (por sus siglas en inglés) es una técnica de navegación que permite al robot móvil construir un mapa del entorno y navegar sobre ella al mismo tiempo. Esto se logra gracias a los algoritmos especializados implementados y la información obtenidas online de los sensores del robot. Su objetivo principal es conocer la posición y orientación del robot móvil durante su navegación (Lagos Rodríguez, 2021).

### II.2.7. Sistema Operativo Robot (ROS)

ROS (por sus siglas en inglés) es un sistema con una amplia colección de herramientas y librerías que tienen como objetivo facilitar el desarrollo de sistemas robótico permitiendo crear robots complejos. Su principal atributo es que la codificación o algoritmos desarrollados son reproducibles, modificables y escalables, de tal manera que pueden ser utilizadas en otra plataforma robótica. Este sistema está basado en una arquitectura de nodos con una topología centralizado, un equipo maestro y los restantes esclavos. La comunicación de los nodos se establece utilizando tópicos que se encarga de transportar los mensajes entre nodos (Valdepeña Rivero, 2022).

Un nodo es un programa ejecutable que realiza una tarea asignada. En ROS, el nodo necesita registrarse ante el maestro para iniciar su transmisión informática por medios de tópicos, servicios o acciones (Salazar Hidalgo, 2021).

### II.2.8. LIDAR (Light detection and ranging)

Es un instrumento de medición que permite medir la distancia entre el sensor y un objeto mediante un rayo de luz laser. La gran ventaja del sensor es su campo de visión de 360° (Level Five Supplies, 2022).

### II.2.9. Distribución del cultivo de arándano

Los cultivos de arándanos están distribuidos sobre camellones (Fig II.7) similar a una hidroponía. Esta técnica de distribución no permite la saturación del cultivo mejorando su oxigenación en suelos arenosos (arena fina) (Redagrícola, 2020).

El camellón tiene un ancho de 0.7 a 0.1m y un alto de 0.35 a 0.45m. La separación entre línea debe ser de 3m y la separación entre las plantas de 1.5m para arándanos Rabbiteye (Proyectos Peruanos, 2020), por consiguiente, en un camellón de 150 metros se cultivan 100 plantas de arándanos.



Figura II.10. Camellones para el cultivo de arándano (Redagrícola, 2020)

### II.3. Marco Conceptual

- IMU (Inertail Measurement Unit): es un conjunto de sensores que permite medir la aceleración, velocidad angular y el campo magnético para dar una referencia de posición y orientación.
- Trayectoria: conjunto de puntos que siguen un cuerpo en movimiento.
- Fundo agroindustrial: superficie de terreno donde se cultivan diversos cultivos.
- Algoritmo: secuencia de pasos codificados en un lenguaje de programación.
- Planificador de trayectorias: es un conjunto de técnicas que se utilizan para encontrar una ruta entre la posición de origen y una posición objetivo.
- Cinemática: es el estudio de movimiento de una partícula o cuerpo sólido y su trayectoria en función del tiempo, sin tomar en consideración las fuerzas con las que interactúan.
- Cinemática directa: es una formula matricial que calcular la velocidad global del robot móvil en función de las velocidades de sus llantas.
- Cinemática inversa: es una formula matricial resultante de aplicar cinemática directa y técnicas matriciales, a fin de obtener las velocidades de las llantas en función de la velocidad de trabajo del robot móvil.
- Pseudo inversa: es una técnica matemática que permite calcular la inversa de una matriz no cuadrada.

# CAPÍTULO III

## Materiales y Metodología

*“la verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia”*

**Sócrates.**

## CAPÍTULO III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En este capítulo se indican las técnicas, métodos e instrumentos que se utilizan en el desarrollo del proyecto.

### III.1 Materiales

Aquí se utiliza principalmente el modelo del robot móvil diseñado e implementado en el Labinm de la UPAO en el marco del Proyecto 171-2020-Fondecyt (ver Figura I.1). El que integra diversos elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y programación. Todo ello le da capacidad de movimiento tanto en modo teledirigido (control remoto) como en modo navegación autónoma (SLAM), es decir sin presencia de operario. A su vez, su arquitectura mecatrónica permite definir los siguientes dominios de actuación:

#### III.1.1. Dominio Mecánico

Este dominio abarca la morfología, los materiales de fabricación y las características técnicas de los elementos mecánicos, estructuras mecánicas y equipos electromecánicos (actuadores eléctricos) del robot móvil (Figura III.1).

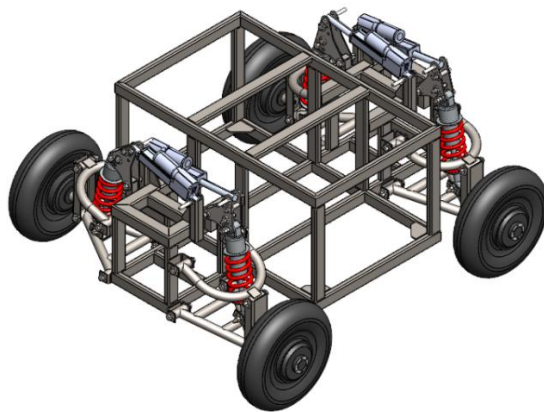


Figura III.1. Modelo virtual en SolidWorks de la morfología del robot móvil del proyecto 171-Fondecyt

### A. Armazón del robot móvil

Es la estructura mecánica principal del robot móvil (Figura III.2) que da soporte a todos los demás componentes que la conforman. Está constituido por tubos cuadrados y rectangulares de acero ASTM A500 de 40mmx40mm y 20mmx40mm respectivamente. Tiene una morfología compacta, con densidad uniforme y simétrica que genera un centro de masa en el punto central del cuerpo principal del robot.

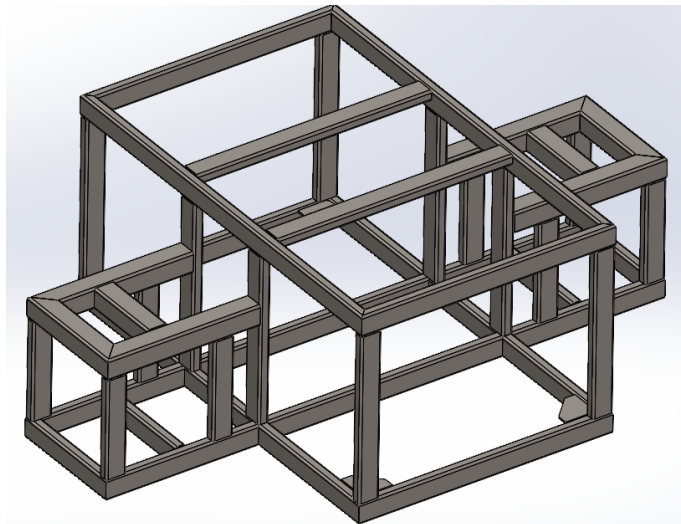


Figura III.2. Modelo virtual del armazón del robot móvil en SolidWorks.

### B. Sistema de amortiguación activa

Da estabilidad al robot ante terrenos irregulares (Figura III.3) al mantener el contacto rueda-terreno (dentro de un rango permisible) mediante la acción coordinada de un amortiguador y un actuador lineal eléctrico. En la Figura III.4 se muestra al sistema de amortiguación activa (actuador lineal y amortiguador) acoplada a la estructura del robot móvil (balancín de acero inoxidable y trapecios móviles de tubos de acero ASTM A500).



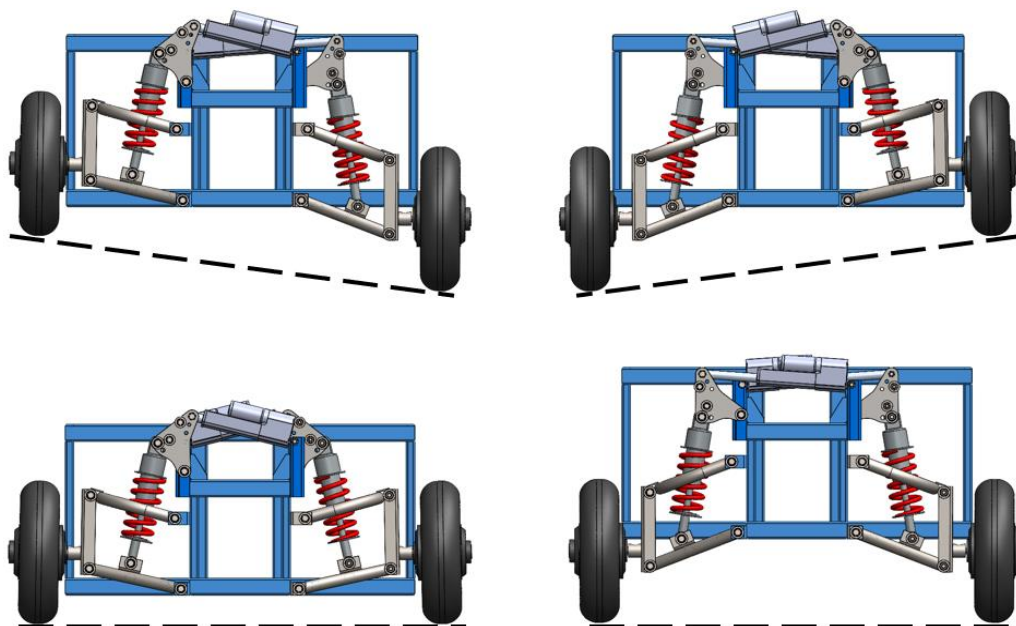


Figura III.3. Diferentes escenarios en el que robot móvil mantiene el contacto rueda-terreno.

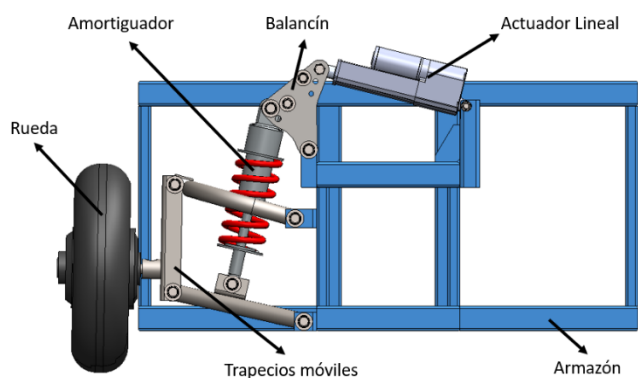


Figura III.4. Sistema de amortiguación activa del robot (en cada llanta) modelado en SolidWorks.

### C. Rueda tipo tractor de accionamiento eléctrico

Es una rueda de caucho de diámetro externo de 13 pulgadas con un motor eléctrico de corriente continua Brushless (BLDC) incorporado en su interior (Figura III.5). La fuerza y torque que genera cada rueda permite mover al robot móvil. Por sus características constructivas (Tabla III.1) es ideal para desplazarse en suelos agrícolas y agroindustriales.



Figura III.5. Rueda tipo tractor con accionamiento eléctrico incorporado.

Tabla III.1. Características técnicas de la rueda tipo tractor con accionamiento eléctrico.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Torque de operación	[N.m]	59
Potencia	[W]	500
Tensión nominal	[V]	24-26
Corriente sin carga	[A]	1.5
Carga de operación	[kg]	100-150
Velocidad de operación	[km/h]	7-15
Relación de transmisión de la reducción interna	[-]	5:1

#### D. Actuador Lineal Glideforce MD122004-P

Dispositivo de accionamiento eléctrico (Figura III.6) con realimentación de la posición actual de su eje (elemento móvil del actuador que se desplaza linealmente hacia adentro o hacia afuera de su cuerpo). La fuerza generada por el actuador lineal (Tabla III 2) al mover su eje se trasmite hacia el amortiguador que al estar acoplado mecánicamente con la rueda desplaza a esta tal que mantenga contacto con el suelo (ver Figura III.3).



Figura III.6. Actuador Lineal Glideforge.

Tabla III.2. Características técnicas del actuador lineal Glideforge

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Corriente sin carga / con carga	[A]	1.1 / 4.6
Voltaje de operación	[V]	12
Carga dinámica máxima	[kgf]	100
Velocidad lineal de salida sin carga / con carga	[mm/s]	15 / 10
Temperatura de operación	[°C]	-25 – 65
Relación de transmisión de la reducción interna	[-]	20:1
IP protección	[-]	IP65
Longitud retraída	[mm]	242
Longitud extendida	[mm]	324

#### E. Amortiguador mecánico

Elemento del sistema de suspensión activa que absorbe los impactos entre el robot móvil y el terreno sobre el que se desplaza (Figura III.7Figura III.7. Amortiguador mecánico).



Figura III.7. Amortiguador mecánico

### III.1.2. Dominio eléctrico y electrónico

Aquí se mencionan los elementos de control electrónico (Figura III.8) más importantes que gobiernan el movimiento del robot móvil (sea del tipo teledirigido o de navegación autónoma).

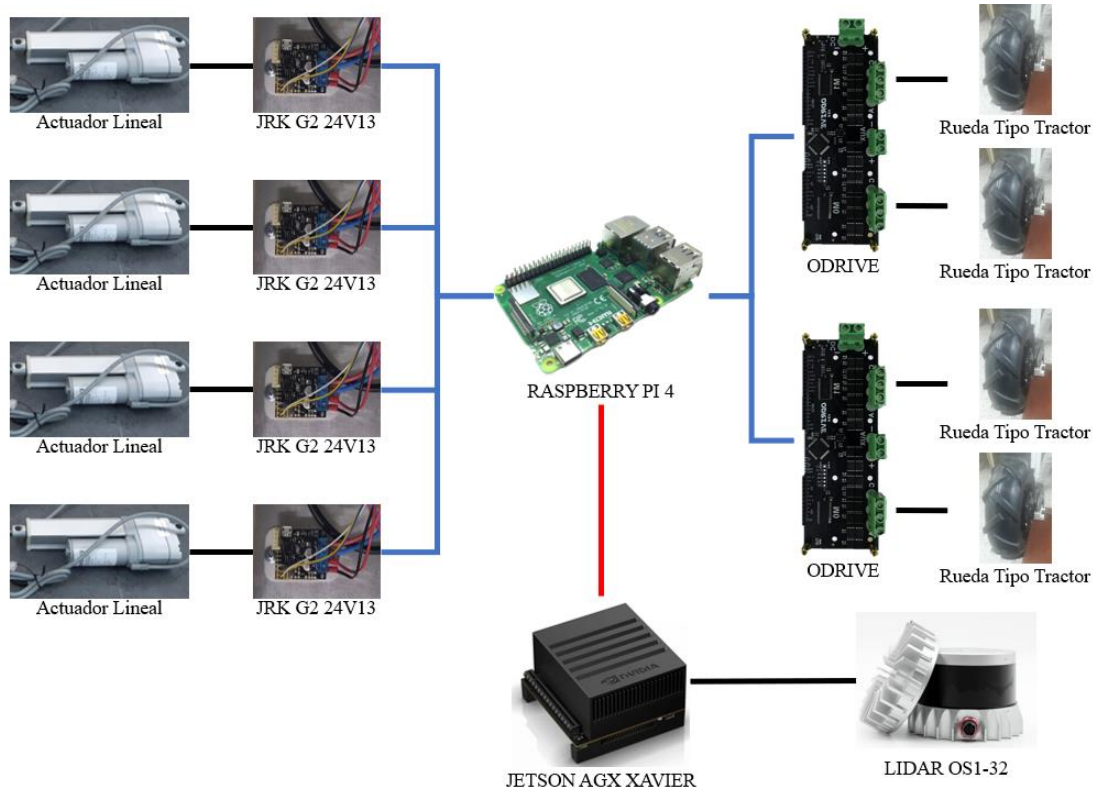


Figura III.8. Integración de las placas electrónicas que conforman el robot móvil.

#### A. Raspberry Pi 4B

Controlador electrónico (Figura III.9) que genera los comandos de control hacia los diferentes actuadores del robot móvil. Además, mantiene comunicación con el otro controlador principal la **JETSON AGX Xavier** encargado de obtener data del entorno donde se moverá el robot móvil. En la Tabla III.3, se muestra las características técnicas de la Raspberry Pi 4B.



Figura III.9. Raspberry Pi 4B (Naylamp Mechatronics,2022)

Tabla III.3. Características técnicas de la Raspberry Pi 4B utilizado en este proyecto.

DESCRIPCIÓN	
Procesador	ARMv8
Numero de núcleos de 64 bit	4
Frecuencia	1.5GHz
GPU	Broadcom video Coré VI
Memoria RAM	8GB LPDDR4

#### B. JRK G2 24V13

Es un controlador de motor USB Pololu JRK G2 24V13 con retroalimentación (Figura III.10). Esta placa facilita el control de posición y de velocidad (pero no ambas al mismo tiempo) de un motor DC en lazo cerrado. Tiene la capacidad de admitir cinco interfaces de control: USB, TTL, I2C, señales analógicas de voltaje y PWM. Aquí se utiliza la interfaz USB para la comunicación con la Raspberry Pi 4B y las cuatro placas JRK G2 24V13(ver Figura III.8). En la Tabla III.4 se muestra las características técnicas de la placa JRK G2 24V13.

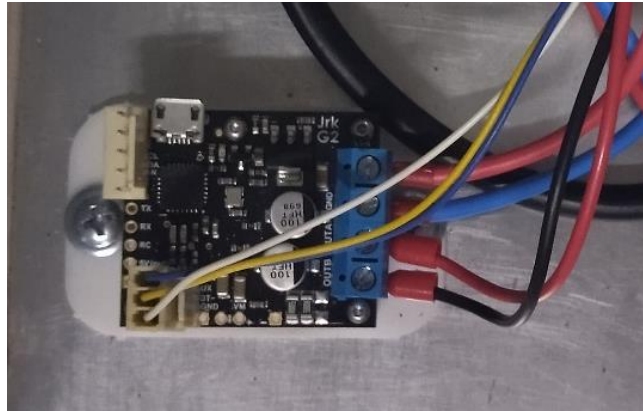


Figura III.10 Placa JRK G2

Tabla III.4. Características técnicas de la placa JRK G2 24V13

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Voltaje de operación mínimo/máximo	[V]	6.5 / 34
Corriente de salida	[A]	13
Frecuencia PWM operación	[kHz]	5/10

### C. ODRIVE V3.6

Es una tarjeta electrónica controladora de dos motores BLDC (Figura III.11). Tiene la capacidad de admitir 5 interfaces de control: USB, serial TTL, comunicación CAN, señales pulso/dirección y señales PWM. Aquí se utiliza USB para comunicarse con la Raspberry Pi 4B (ver Figura III.8). En la Tabla III.5, se muestra las características técnicas del ODRIVE utilizado en este proyecto.

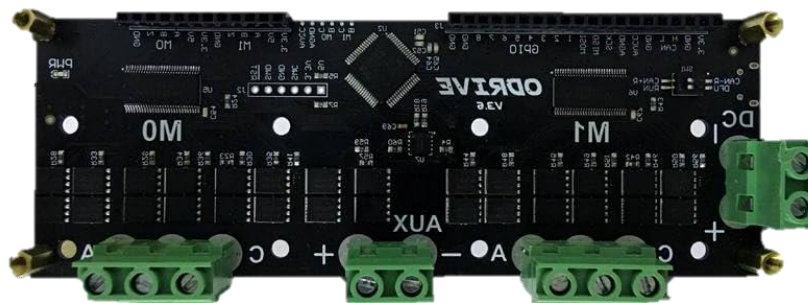


Figura III.11. Placa ODRIVE V3.6

Tabla III.5. Características técnicas del ODRIVE usado en la presente tesis.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Voltaje de operación mínimo/máximo	[V]	12 / 56
Corriente pico de salida	[A]	120
Frecuencia PWM operación	[kHz]	5/10

#### D. JETSON AGX JAVIER

Es una computadora diseñada específicamente para maquinas autónomas y es capaz de procesar algoritmos de odometría visual, localización y mapeo, detección de obstáculos y planificación de trayectorias (Figura III.12). Esta PC se comunica con la Raspberry Pi 4B mediante comunicación Ethernet (ver Figura III.8), y se encarga de procesar la información sensorica obtenida desde el LIDAR y la cámara ZED2 con ello determina la pose del robot móvil en un entorno virtual asociado al real. En la Tabla III.6, se muestra las características técnicas de la JETSON AGX JAVIER.

Tabla III.6. Características técnicas de la JETSON AGX JAVIER

DESCRIPCIÓN	
GPU	512-core
CPU	ARM v8.2 64bit
RAM	32GB LPDDR4
Almacenamiento Flash	32GB
Potencia (configurable)	10W/15W/30W
PCIe	X8 PCIe Gen4
Salida de video	HDMI 2.0 tipo A, eDP 1.2 <sup>a</sup>
Conectividad	RJ45 Gigabit Ethernet



Figura III.12. JETSON AGX JAVIER

### E. LIDAR OS1-32

Es un sensor óptico activo que permite medir la distancia entre el dispositivo y su entorno y en ese proceso construye un entorno virtual de la realidad que detecta. Para ello emite haz de luz pulsados y tiene la capacidad de suprimir la luz ambiental para brindar una virtualidad 3D más nítida (Figura III.13). Tiene una resolución visual vertical de 32 canales, resolución horizontal de 1024, alcance de 120 metros, precisión de  $\pm 1.5-10\text{cm}$  y grado de protección IP68 (Level Five Supplies, 2022). Además, este sensor se utiliza para mapear el entorno de trabajo del robot móvil.



Figura III.13 LIDAR OS1-32



#### F. Transductor KPC

Es un sensor de posición lineal articulado con conector ocular (Figura III.14). Tiene un rango de medición de 50mm a 1500mm. Y se utiliza para conocer la deformación positiva o negativa del amortiguador mecánico al accionarse el actuador lineal Glideforce MD122004-P.



Figura III.14. Sensor de posición lineal articulado con conector ocular.

#### III.2. Población

Modelos de robots móviles con capacidad de moverse en fundos agroindustriales.

#### III.3. Muestra

Por conveniencia y accesibilidad la unidad de análisis es el modelo de robot móvil construido en el marco del proyecto 171-2020-Fondecyt.

#### III.4. Técnicas e instrumentación de recolección de datos

Se define la trayectoria a realizar mediante el algoritmo de planificación sobre el mapa establecido durante la fase de mapeo. El robot móvil se ubica en la posición de partida (uno de los extremos de la cama de cultivos) para posteriormente

desplazarse linealmente y en paralelo a la cama de cultivo hasta llegar a la posición final (el extremo opuesto de la cama de cultivo). Durante este desplazamiento, el algoritmo SLAM mediante el sensor LIDAR y sensor IMU sensa la posición y orientación actual del robot móvil y con ello el algoritmo de seguimiento de trayectoria establece la desviación de la trayectoria (error) para realizar las correcciones del movimiento. Los datos recolectados durante la prueba es la desviación del robot móvil sobre la trayectoria definida inicialmente durante todo el movimiento.

### III.5. Procedimiento

Aquí se desarrollan las siguientes etapas:

- Etapa de identificación: Mediante el análisis de la morfología del robot móvil se obtiene la cinemática del robot para modelar el comportamiento de sus movimientos. La finalidad es conocer cómo se desplaza el robot móvil en función a las velocidades aplicadas a sus llantas.
- Etapa de desarrollo algorítmico: Dado un punto de inicio, un punto final y un requerimiento de geometría de movimiento, se diseña un planificador de trayectoria y un seguidor de la trayectoria planificada tal que se alcance el trabajo deseado tanto en camino como en velocidad.
- Etapa de pruebas preliminar: los algoritmos son evaluados con respecto al tiempo de estabilización (tiempo en alcanzar a la trayectoria deseada) y al tiempo de ejecución (tiempo en realizar toda la trayectoria deseada). En base a ello, se realizan modificaciones correctivas.

- Etapa de pruebas finales: consiste en validar los algoritmos mejorados y posteriormente discutir los resultados obtenidos.

### III.6. Diseño de constatación

- Tipo: explicativo
- Diseño de estudio: pre – experimental

### III.7. Procedimiento y análisis de datos

Para cuantificar la funcionalidad de algoritmo de seguimiento de trayectoria, se debe conocer la posición de referencia y la posición del robot móvil, y con ello calcular error promedio absoluto (EPA) a partir del tiempo de estabilización hacia adelante (Figura III.15), según:

$$EPA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \sqrt{(x_r(i) - x(i))^2 + (y_r(i) - y(i))^2} \right] \quad (1)$$

Donde:

- $x_r$ : posición de referencia respecto al eje X.
- $y_r$ : posición de referencia respecto al eje Y.
- $x$ : posición del robot móvil respecto al eje X.
- $y$ : posición del robot móvil respecto al eje Y.
- $n$ : el número de datos obtenidos.

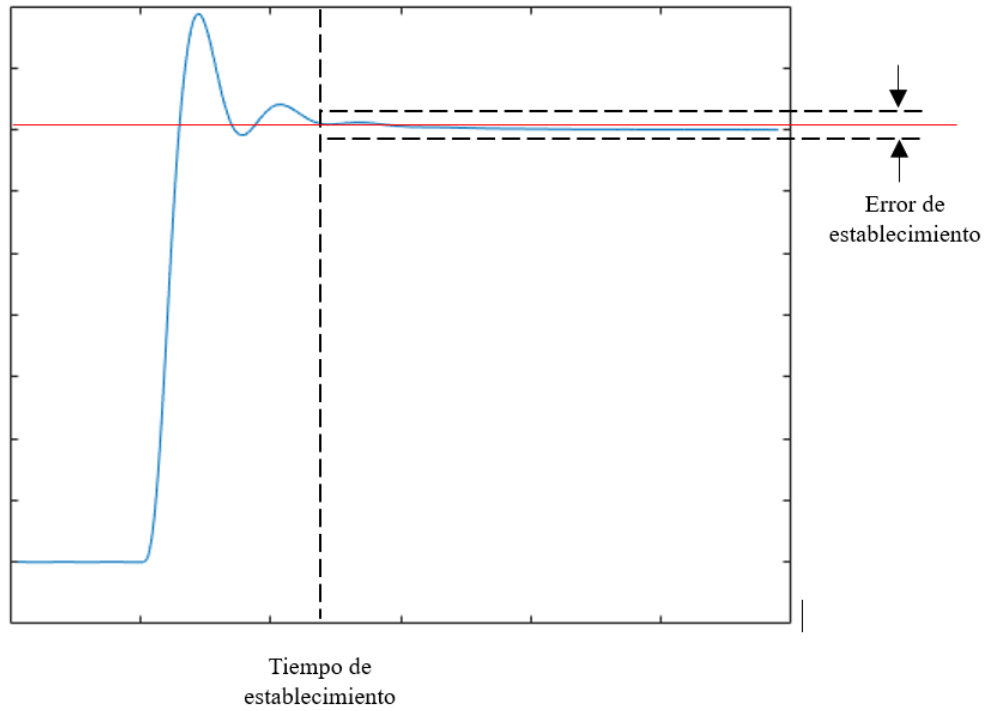


Figura III.15. Curva comparativa de la posición de referencia y posición del robot móvil en la línea de tiempo.

Este valor calculado permite saber que tan alejado está el robot móvil respecto a la trayectoria objetiva y con ella discutir si el error obtenido es o no aceptable en las condiciones de trabajo a las que se afronta el robot.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS

*“el que aprende y aprende y no practica lo que sabe, es como el que  
ara y ara y no siembra”*

**Platón.**

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos al ejecutar los algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias desarrollados previamente.

### IV.1. Modelar la cinemática del robot móvil

Aquí se determina la cinemática del robot móvil (ver Figura I.1), considerando su morfología mecánica y los modelos cinemáticos mostrados en la Sección II.2.3. En la Figura IV.1 se muestra la distribución (con respecto al centro de masa del robot) de diferentes parámetros y variables usados para determinar el modelo cinemático.

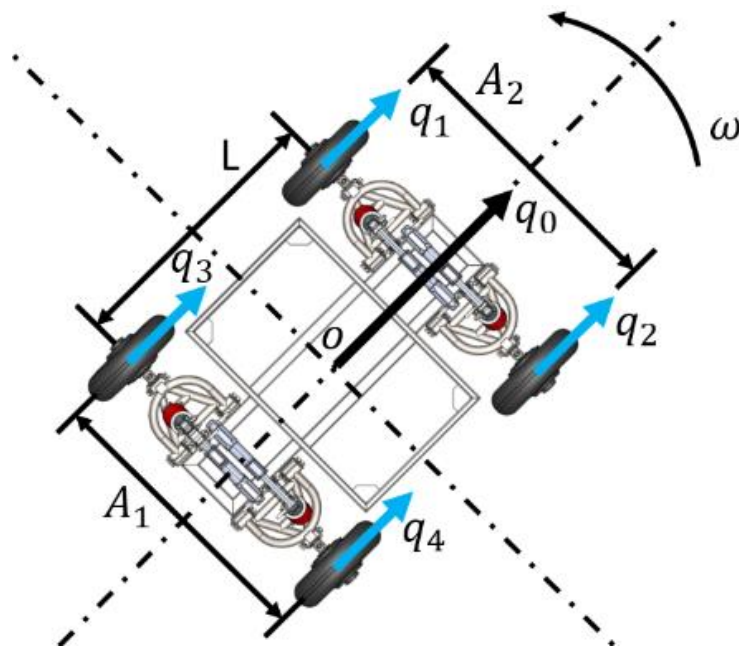


Figura IV.1. Modelo Cinemático del robot móvil respecto a su centro de masa.

Donde:

- $q_0$ : velocidad lineal del robot móvil.
- $q_1$ : velocidad lineal de la rueda  $i, i \in \{1,2,3,4\}$ .

- $\omega$ : velocidad angular del robot móvil.
- $L$ : mínima distancia entre la rueda trasera y delantera medido desde los centroides de las ruedas.
- $A_1$  : distancia entre los centroides de las ruedas traseras.
- $A_2$  : distancia entre los centroides de las ruedas delanteras.

Adicionalmente, se debe considerar el movimiento relativo permitido a cada rueda tipo tractor (Figura IV.2). En base a lo descrito previamente se obtiene la relación entre la velocidad lineal de cada rueda tipo tractor con la velocidad lineal y angular del robot móvil mediante las ecuaciones:

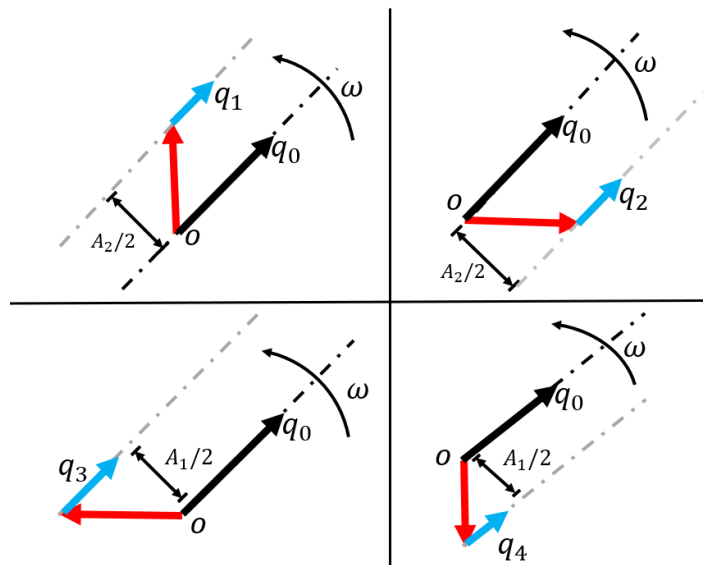


Figura IV.2. Análisis de movimiento relativo de velocidades aplicados al modelo cinemático del robot móvil.

$$q_1 = q_0 - \omega \left( \frac{A_2}{2} \right) \quad (2)$$

$$q_2 = q_0 + \omega \left( \frac{A_2}{2} \right) \quad (3)$$

$$q_3 = q_0 - \omega \left( \frac{A_1}{2} \right) \quad (4)$$

$$q_4 = q_0 + \omega \left( \frac{A_1}{2} \right) \quad (5)$$

Manipulando convenientemente las ecuaciones (2) al (5), se obtiene la velocidad lineal y angular del robot móvil en función de las velocidades lineales de sus ruedas, según:

$$q_0 = \frac{(q_1 + q_3) + (q_2 + q_4)}{4} \quad (6)$$

$$\omega = \left( \frac{(q_2 + q_4) - (q_1 + q_3)}{A_1 + A_2} \right) \quad (7)$$

Sin embargo, las ecuaciones (6) y (7) están definidas respecto al centro de masa del robot, es necesario expresarlas en función de un sistema de referencia global contenido en el plano XY (Figura IV.3). Realizando las transformaciones correspondientes se obtiene:

$$\dot{x} = q_0 \cos\theta \quad (8)$$

$$\dot{y} = q_0 \sin\theta \quad (9)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (10)$$

Donde  $\theta$  es la orientación del robot móvil respecto al sistema de referencia global.



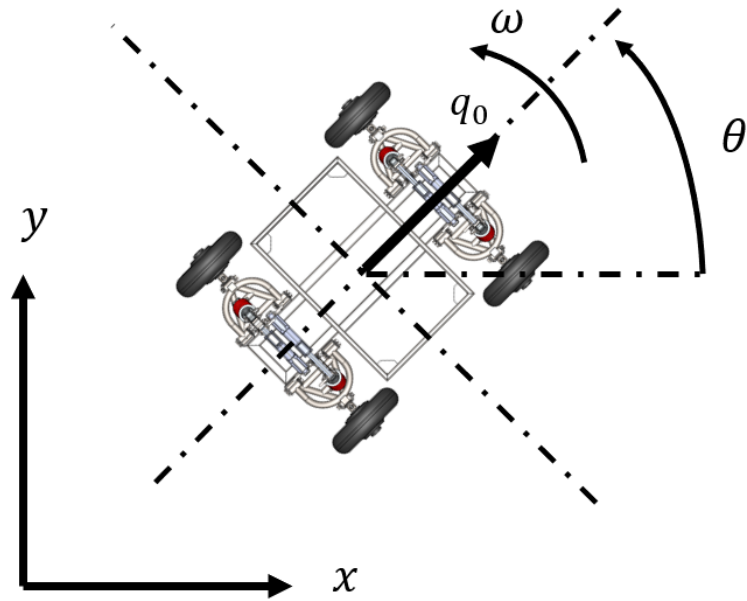


Figura IV.3. Modelo Cinemático del robot móvil respecto a un sistema de referencia global en el plano XY

Manipulando las ecuaciones (6) al (10), se obtiene la cinemática directa del robot móvil según:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{4} & \frac{\cos\theta}{4} & \frac{\cos\theta}{4} & \frac{\cos\theta}{4} \\ \frac{\sin\theta}{4} & \frac{\sin\theta}{4} & \frac{\sin\theta}{4} & \frac{\sin\theta}{4} \\ \frac{-1}{A_1 + A_2} & \frac{1}{A_1 + A_2} & \frac{-1}{A_1 + A_2} & \frac{1}{A_1 + A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Finalmente, se calcula la cinemática inversa del robot móvil. Para ello, se utiliza la pseudo inversa de Moore-Penrose que permite calcular la matriz inversa de una matriz no cuadrada se obtiene:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -\frac{(A_1 + A_2)}{2} \\ \cos \theta & \sin \theta & \frac{(A_1 + A_2)}{2} \\ \cos \theta & \sin \theta & -\frac{(A_1 + A_2)}{2} \\ \cos \theta & \sin \theta & \frac{(A_1 + A_2)}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

#### IV.2. Transferir modelo mecánico y cinemático del robot móvil al entorno ROS y Gazebo

El desarrollo e implementación física del robot móvil implica, en una de sus etapas intermedias, modelar virtualmente (SolidWorks) cada parte del robot a fin de asegurar (una vez construidos físicamente) que sus correspondientes acoplamientos minimicen los esfuerzos de inercia, vibraciones, fricciones, juegos y deslizamientos.

Aquí se usa este modelo virtual para migrarlo al entorno Gazebo (Figura IV.4), el que permite simular diferentes tipos de terrenos, entre ellos los agrícolas. Cabe mencionar que Gazebo (código abierto) y ROS en general se utilizan juntas para desarrollar y simular, en tiempo real, sistemas robóticos en entornos complejos. Lo que es posible dado que Gazebo ofrece representaciones precisas de sensores, actuadores, física y dinámica de robots. Es decir, se pueden crear modelos de robots y escenarios en Gazebo, y luego utilizar ROS para desarrollar y probar algoritmos de control, percepción y planificación en estos entornos simulados. ROS proporciona las interfaces y herramientas necesarias para conectar y controlar los robots virtuales en Gazebo, lo que facilita el desarrollo y la depuración de aplicaciones robóticas antes de implementarlas en hardware real.

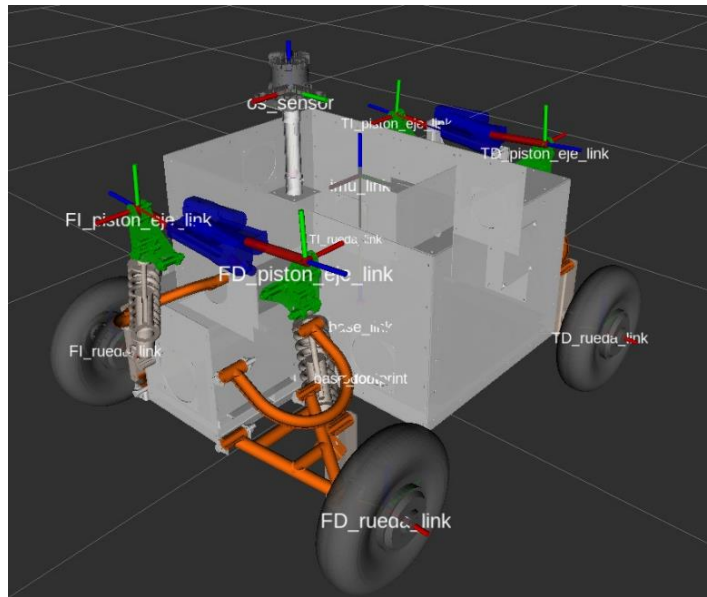


Figura IV.4. Modelo 3D del robot móvil en Gazebo (Rviz)

### IV.3. Determinar el algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria

#### IV.3.1. Algoritmo de planificación de trayectoria

Genera una secuencia de puntos de referencia por donde el robot móvil real debe desplazarse en cada iteración (Figura IV.5) y esta secuencia de puntos es una representación discreta de la trayectoria deseada a seguir.

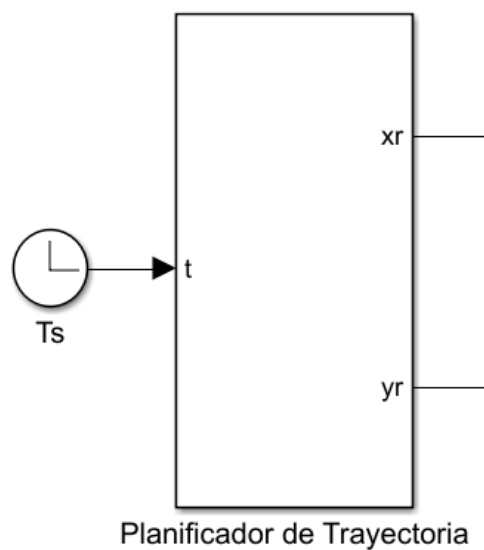


Figura IV.5. Bloque Planificador de Trayectoria

A continuación, se muestran las ecuaciones discretas de la recta, circunferencia y la lemniscata.

- La recta

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_r \cos \theta_0)T_s + x_0 \\ (v_r \sin \theta_0)T_s + y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

- Circunferencia

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r[\cos(\omega_r T_s + \theta_0)] + C_x \\ r[\sin(\omega_r T_s + \theta_0)] + C_y \\ \omega_r T_s + \theta_0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

- Lemniscata

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \cos(\omega_r T_s) \\ 4 \cos(\omega_r T_s) \sin(\omega_r T_s) \\ \omega_r T_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde:

- $x_r$ : Posición de referencia respecto al eje X.
- $y_r$ : Posición de referencia respecto al eje Y.
- $\theta_r$ : orientación de referencia.
- $x_0$ : Posición inicial de la recta respecto al eje X.
- $y_0$ : Posición inicial de la recta respecto al eje Y.

- $\theta_0$ : orientación inicial.
- $C_x$ : Posición del centro de la circunferencia respecto al eje X.
- $C_y$ : Posición del centro de la circunferencia respecto al eje Y.
- $v_r$ : Velocidad lineal de referencia del robot móvil.
- $\omega_r$ : Velocidad angular de referencia del robot móvil.
- $T_s$ : Tiempo de muestreo.
- $r$ : Radio de la circunferencia.

Por otro lado, los camellones de los fundos agroindustriales están distribuidos en filas cuya longitud es variable según la agroindustria y la especie a producir. Aquí se usa una longitud representativa de 9.98m de largo y una separación (ancho) entre camellones de 1.4m (Figura IV.6). El robot móvil se desplaza de forma lineal entre camellones y una vez finalizada este camino entonces el robot debe realizar una trayectoria curva (2m de radio) para ingresar a otro camino diferente también limitada entre camellones y desplazarse nuevamente de forma lineal.

Al acoplarse los dos movimientos (lineal y circular) se genera una trayectoria representativa del trabajo del robot móvil en fundos agroindustriales y su ecuación discreta se obtiene al utilizar y manipular las ecuaciones (13) y (14). Al manipular las ecuaciones se debe tener en cuenta lo siguiente:

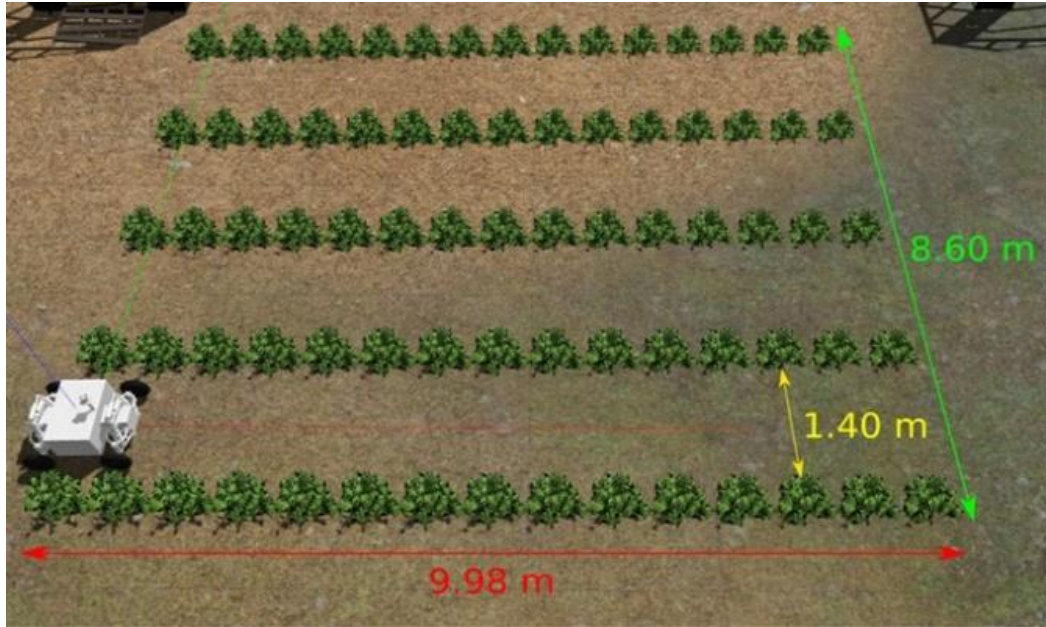


Figura IV.6. Modelo virtual de los camellones de los fundos agroindustriales.

- La trayectoria de trabajo está compuesta por dos tramos: una recta y una circunferencia.
- El primer tramo correspondiente a la recta con una pose inicial  $([x_0, y_0, \theta_0]^T)$  de  $[0, 0, 0]^T$ . El intervalo de tiempo utilizado para desarrollar los 9.98m del camellón es de  $[0, T_0)$ . El valor de  $T_0$  depende de la velocidad de referencia ( $v_r$ ) aplicado. Al culminar el tramo, la pose final alcanzada es igual a  $[9.98, 0, 0]^T$ .
- El segundo tramo correspondiente a la circunferencia con una pose inicial de  $[9.98, 0, -\pi/2]^T$  y una posición del centro  $(C_x, C_y)$  de  $(9.98, 2)$  que son obtenidos al trasladar y acomodar la pose final del primer tramo. El intervalo de tiempo utilizado para desarrollar la mitad de la circunferencia (semicircunferencia) es de  $[T_0, T_1]$ , permitiendo con ello trasladarse de un camino a otro para procesar el siguiente camellón. El valor de  $T_1$  depende

de la velocidad angular de referencia ( $\omega_r$ ) aplicado. Por otro lado, la semicircunferencia ha desarrollado esta comprendida entre el primer y cuarto cuadrante, por lo que el ángulo de trabajo está comprendido entre  $-\frac{\pi}{2}$  y  $\frac{\pi}{2}$ . Siendo  $-\frac{\pi}{2}$  la orientación inicial ( $\theta_0$ ).

Considerando lo descrito, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (v_r \cos 0)T_s \\ (v_r \sin 0)T_s \\ 0 \end{bmatrix} \dots \text{para } T_s = [0, T_0] \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r[\cos(\omega_r (T_s - T_0) - \pi/2)] + 9.98 \\ r[\sin(\omega_r (T_s - T_0) - \pi/2)] + 2 \\ \omega_r(T_s - T_0) - \pi/2 \end{bmatrix} \dots \text{para } T_s = [T_0, T_1] \quad (17)$$

Finalmente, Estas ecuaciones discretas son trasladadas al bloque planificador de trayectoria (ver Figura IV.5) para generar las posiciones de referencia en cada tiempo de muestro ( $T_s$ ) que son los objetivos de control del seguidor de trayectorias.

#### IV.3.2. Algoritmo de seguimiento de trayectoria

Determina las velocidades de las llantas del robot móvil a fin de cumplir con la geometría de la trayectoria en particular en un tiempo preestablecido. Este algoritmo se implementa mediante dos funciones (Figura IV.7). La primera función (bloque izquierdo de la Figura IV.7) es el control y calcula las velocidades lineales y angulares del robot móvil respecto a un sistema de referencia global. La segunda función (bloque derecho) es la cinemática inversa y transforma, mediante la ecuación (12), las velocidades lineales y angulares globales a velocidades lineales de cada llanta del robot móvil.

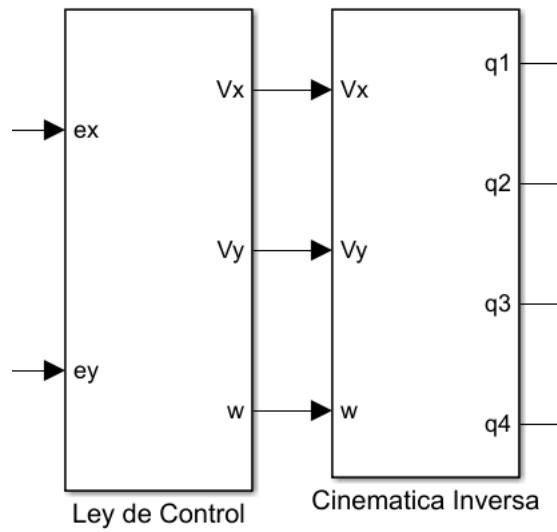


Figura IV.7. Seguidor de trayectoria

#### IV.4. Validar algoritmos de planificación y seguimientos de trayectorias

En la Figura IV.8, se muestra el diagrama de bloques implementado para el seguimiento de trayectorias deseadas (definido antes de que el robot realice cualquier movimiento). Los tres primeros bloques corresponden al planificador y seguidor de trayectoria previamente descritos, y el ultimo bloque (robot móvil) proporciona la respuesta del robot mediante la cinemática directa (Ecuación (11)).

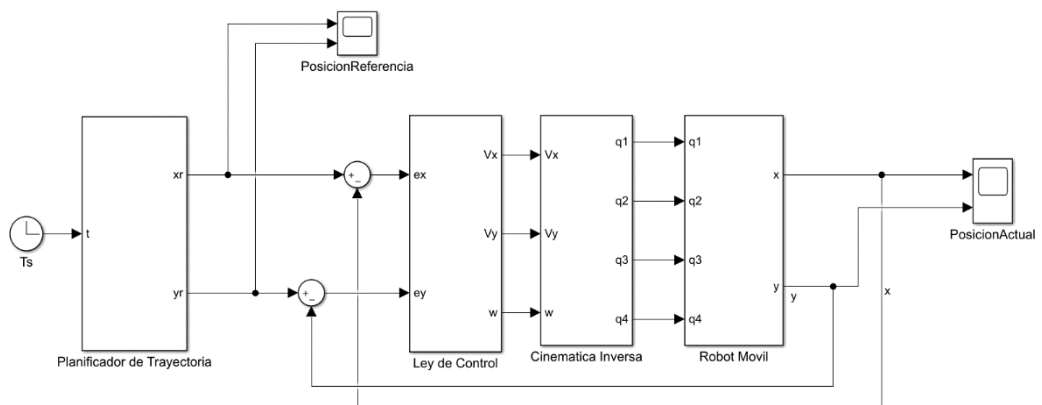


Figura IV.8. Diagrama completo de bloques para el seguimiento de trayectorias deseadas del robot móvil



Aquí se utiliza un CPU i7-11700k y previo a las simulaciones se configura lo siguiente:

- La pose (posición y orientación) inicial del robot móvil en el sistema de referencia global.
- El valor máximo de la velocidad lineal y angular permitido al movimiento del robot móvil.
- los parámetros geométricos de la trayectoria deseada, y el tiempo de simulación.

Una vez establecidas las configuraciones previas, se realizan 10 simulaciones con diferente escenario entre sí. Los que proporcionan la siguiente información:

- Movimiento global del robot móvil con respecto a la trayectoria deseada.
- Tiempo de establecimiento y el error promedio absoluto.

**Simulación 1** (Figura IV.9): Trayectoria deseada en línea recta con una inclinación de  $20^\circ$  y una pose inicial de  $[-2, 0, 0]^T$ . La velocidad de máxima se limita a 0.5 m/s y el tiempo de simulación aplicado es de 100s. Al realizar la simulación, se obtiene un recorrido de referencia de 10m, un recorrido real (recorrido realizado por el robot móvil) de 11.9976m, un tiempo de establecimiento de 4.7367s, el vector de posición de referencia y el vector de la posición del robot móvil.

Finalmente, se calcula el error promedio absoluto mediante la Ecuación 1, para ello se utiliza el vector de la posición de referencia y la posición del robot a partir del

tiempo de establecimiento 4.7367s hacia adelante. Obteniendo un valor de 0.0309m (3.09cm), siendo un valor aceptable con respecto al recorrido del robot.

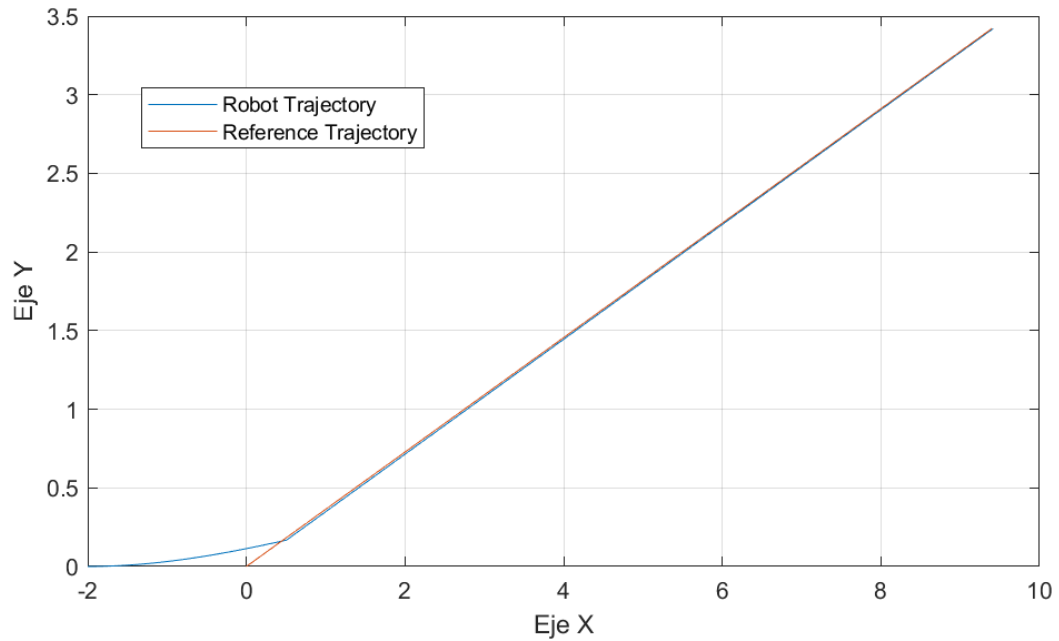


Figura IV.9. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea recta con una inclinación de  $20^\circ$  y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 0]^T$ .

**Simulación 2** (Figura IV.10): Trayectoria deseada en línea recta con una inclinación de  $45^\circ$  y la pose inicial, el límite máximo de velocidad y el tiempo de simulación tienen el mismo valor que la simulación 1. Aquí, se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 10m y 11.9192m respectivamente, un tiempo de establecimiento de 4.4051s y un error promedio absoluto de 0.0287m (calculado siguiendo el procedimiento explicado en la simulación 1).

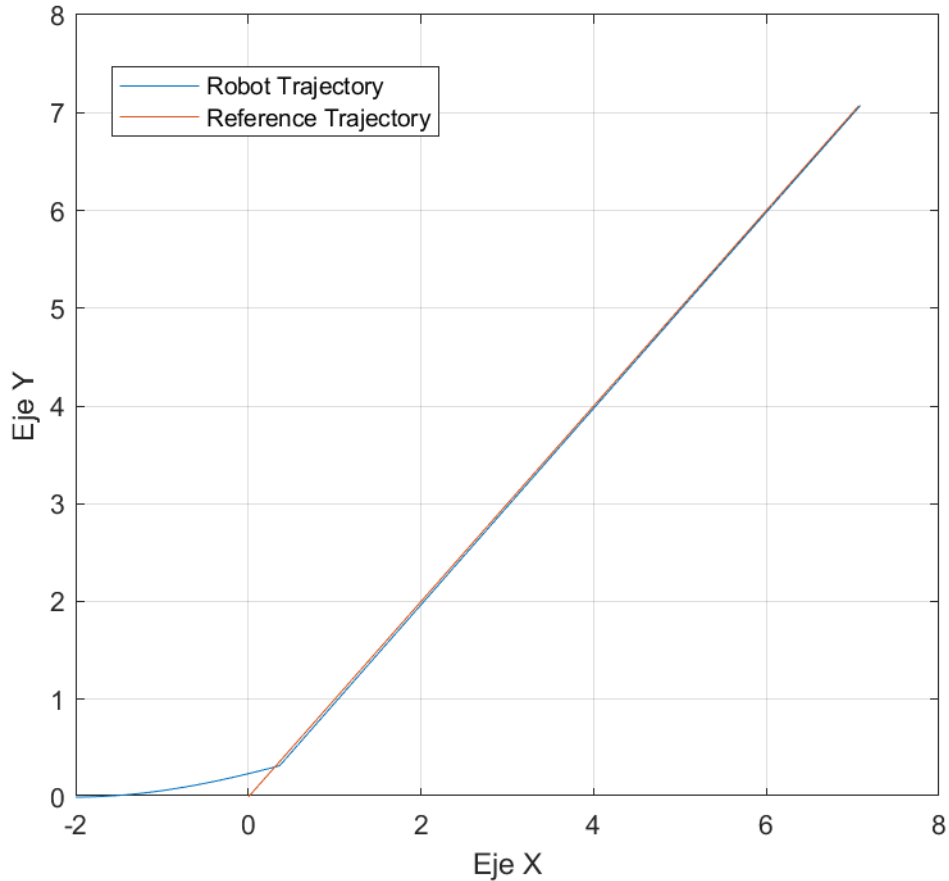


Figura IV.10. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea recta con una inclinación de  $45^\circ$  y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 0]^T$ .

**Simulación 3** (Figura IV.11): Trayectoria deseada en línea recta con una inclinación de  $70^\circ$ , con los parámetros de configuración iguales a las dos simulaciones previas. Al realizar la simulación, se obtiene el recorrido de referencia y el real igual a 10m y 11.8027m respectivamente, el tiempo de establecimiento igual a 4.0400s y un error promedio absoluto de 0.0263m.

Al comparar las simulaciones 1,2 y 3, se observa que el tiempo de establecimiento y el recorrido real del robot varía según la orientación objetivo (inclinación de la recta). No obstante, el error promedio absoluto en cada simulación es inferior a 5.00cm (valor de referencia establecido bajo criterio propio), demostrando con ello que el seguidor de trayectorias persigue una trayectoria en un rango de error

aceptable y estable. Ahora, las siguientes simulaciones planteados permiten reforzar la robustez del seguidor de trayectorias al modificar la orientación de inicio del robot móvil.

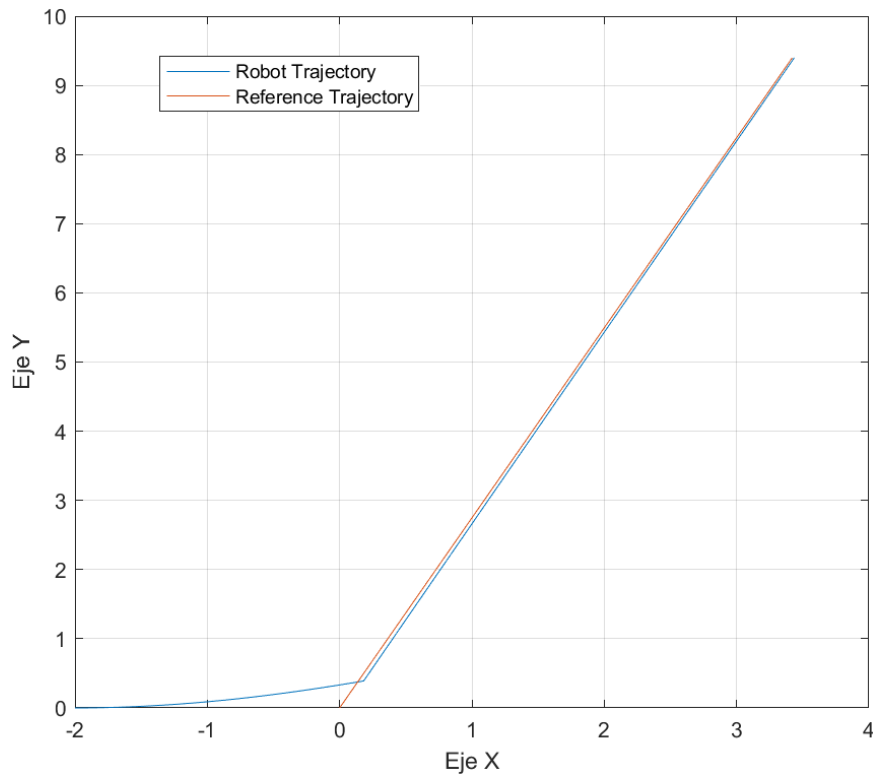


Figura IV.11. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea recta con una inclinación de  $70^\circ$  y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 0]^T$ .

**Simulación 4** (Figura IV.12): Trayectoria deseada en línea recta con una inclinación de  $45^\circ$  y una pose inicial de  $[-2, 0, -90^\circ]^T$ . El límite máximo de velocidad y tiempo de simulación son iguales a las simulaciones previas. Y aquí se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 10m y 13.1401m respectivamente, un tiempo de establecimiento de 5.8304 y un error promedio absoluto de 0.0443.

El resultado nos indica que cuando el robot móvil se desplaza con una orientación distante a la orientación objetiva, el tiempo de estabilización aumenta y aun que el error promedio absoluto se incrementa, sigue estando en un rango aceptable.

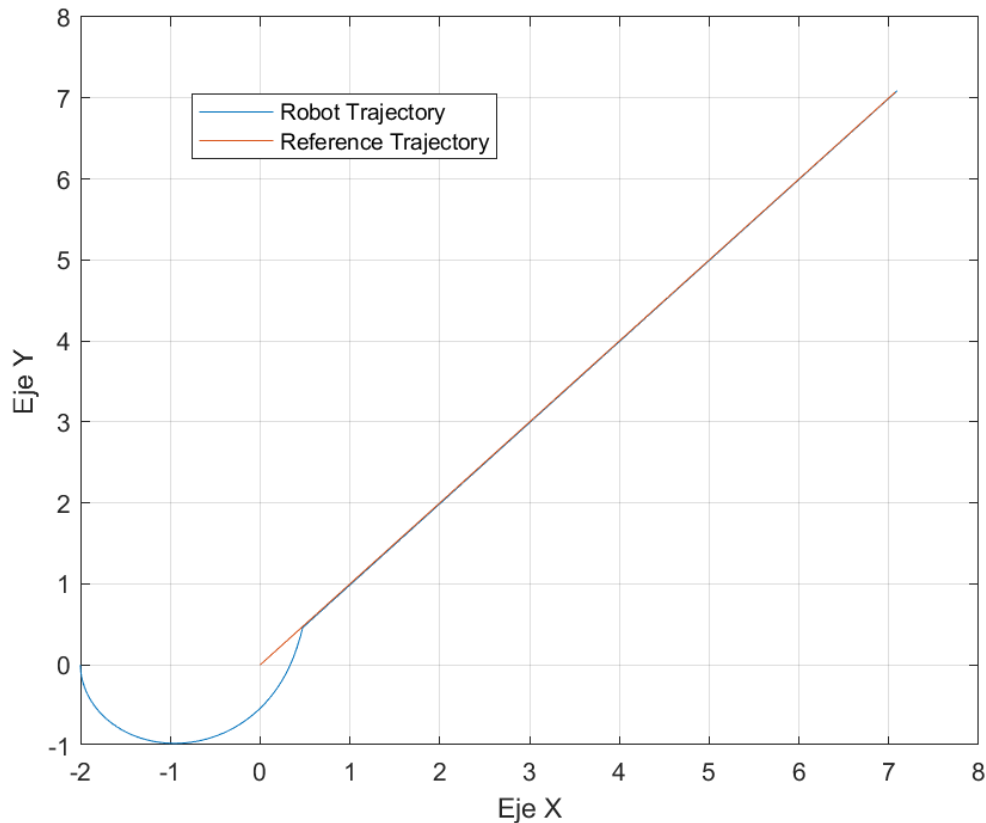


Figura IV.12. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea recta con una inclinación de  $45^\circ$  y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, -90^\circ]^T$

**Simulación 5** (Figura IV.13): Trayectoria deseada en línea recta con una inclinación de  $45^\circ$  y una pose inicial de  $[-2, 0, 45^\circ]^T$ . Los parámetros de velocidad y tiempo de simulación son iguales a las simulaciones previas. Aquí se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 10m y 12.0925m respectivamente, el tiempo de establecimiento de 4.0033 y un error promedio absoluto de 0.0288m.

Al comparar con las simulaciones previas, se confirma que el seguidor de trayectorias en líneas rectas (independiente a su inclinación) sigue a la trayectoria deseada manteniendo un error promedio absoluto de 5cm. También, lo que se considera aceptable. También, se afirma que, al colocar el robot móvil en una orientación muy alejada a la orientación objetiva, el tiempo de estabilización es mayor.

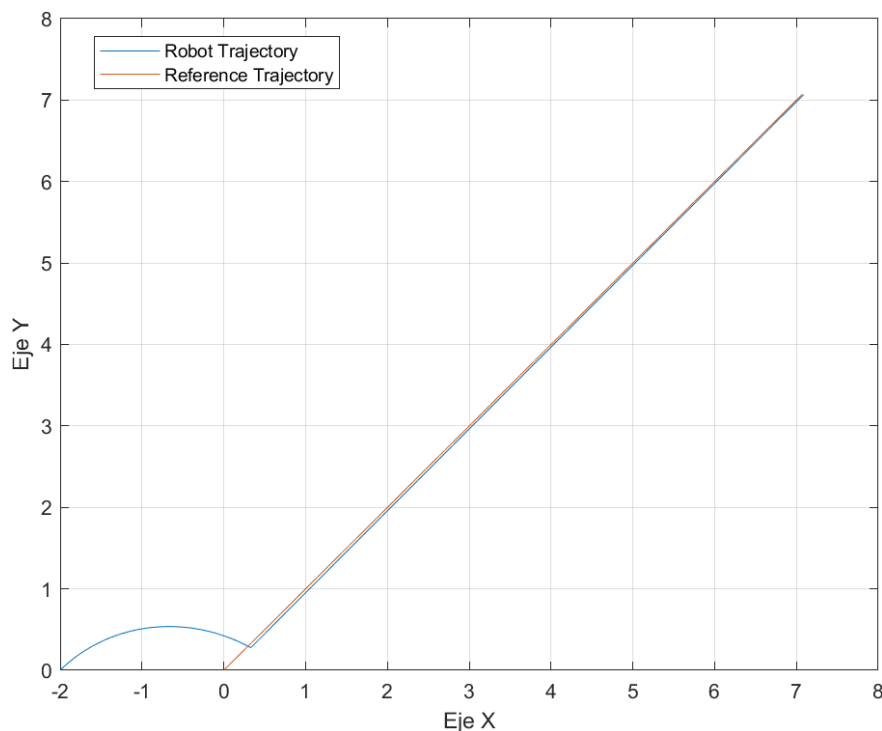


Figura IV.13. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea recta con una inclinación de  $45^\circ$  y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 45^\circ]^T$

**Simulación 6** (Figura IV.14): Trayectoria de referencia en línea circular con pose inicial de  $[-2, 0, 0^\circ]^T$ , tiempo de simulación de 32s, ángulo de trabajo comprendido entre 0 y pi, radio de la circunferencia de 2m, centroide en (2,0) y una velocidad angular de referencia negativa a fin de conseguir un movimiento en sentido horario. Al simular, se obtiene un recorrido de referencia es de 6.2832m. Al realizar la simulación, se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 6.4m y 7.9478m respectivamente, un tiempo de establecimiento de 4.0559s y error promedio absoluto de 0.0349m. Al igual que en las simulaciones previas de línea recta, el seguidor de trayectoria en trayectorias circulares mantiene un error aceptable.

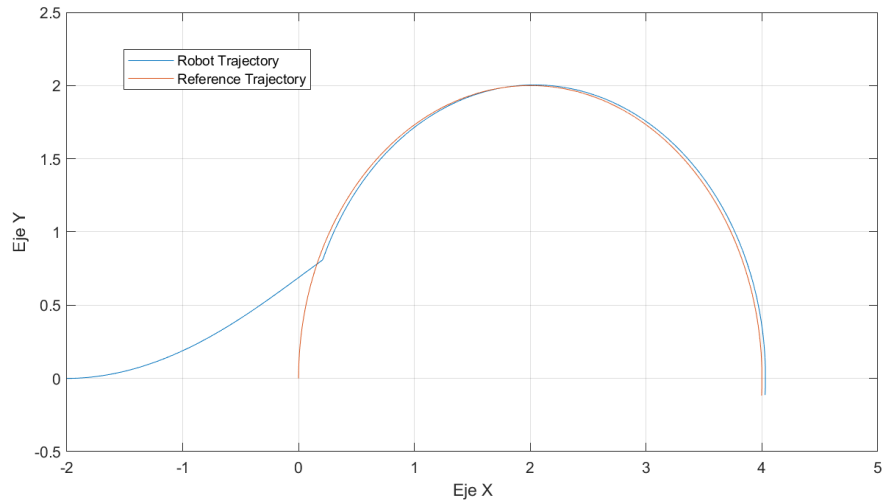


Figura IV.14. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea curva de 2m de radio y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 0]^T$

**Simulación 7** (Figura IV.15): Al igual que en el caso previo, aquí se mantiene igual: la trayectoria de referencia, pose inicial, velocidad de operación y tiempo de simulación. Sin embargo, el radio de la circunferencia es de 3m con centroide  $(3, 0)$ . Aquí se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 9.60m y 10.9833m respectivamente, un tiempo de estabilización de 4.4739s y un error promedio de 0.0369m. Al comparar los resultados con las obtenidas en la simulación 6, se observa que el error promedio absoluto tiene un ligero incremento.

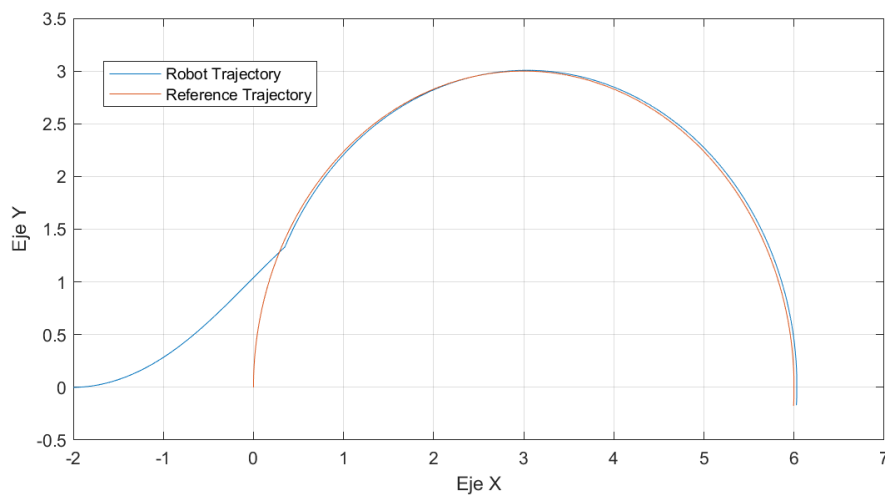


Figura IV.15. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea curva de 3m de radio y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 0]^T$

**Simulación 8** (Figura IV.16): Al igual que la simulación 6 y 7 se mantiene igual: la trayectoria circular, pose inicial, velocidad de operación y tiempo de simulación. El radio de la circunferencia es de 4m con centroide (4, 0).

Aquí se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 12.5664m y 14.0585m respectivamente, un tiempo de establecimiento de 5.3552s y un error promedio absoluto de 0.0416m.

Analizando las simulaciones 6, 7 y 8, se concluye que el seguidor de trayectorias puede seguir una trayectoria circular manteniendo el error promedio absoluto dentro del rango aceptable y que al aumentar el radio de la circunferencia el error promedio absoluto tiene un pequeño aumento que no afecta considerablemente el comportamiento del seguidor de trayectorias.

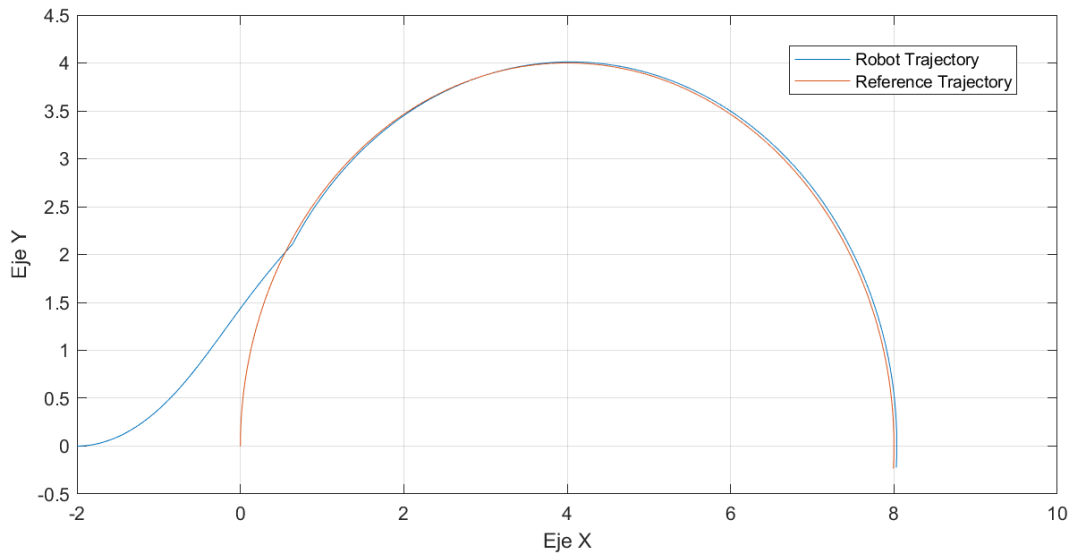


Figura IV.16. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea curva de 4m de radio y una pose inicial del robot de  $[-2, 0, 0]^T$

**Simulación 9** (Figura IV.17): Trayectoria deseada es una curva Lemniscata con una pose de inicio de  $[6, 0, 180^\circ]^T$ , un tiempo de simulación de 63s, una velocidad angular de referencia positiva para que el movimiento se desarrolle en sentido



horario. Esta trayectoria permite probar la respuesta del seguidor de trayectoria frente a curvas suaves y continuas. Al realizar la simulación, se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 24.4561m y 25.7794m respectivamente, un tiempo de estabilización de 4.9425s y un error promedio absoluto de 0.0367m. Al igual que todas las simulaciones realizadas hasta el momento, el error promedio absoluto no supera los 5cm manteniéndose en un valor aceptable.

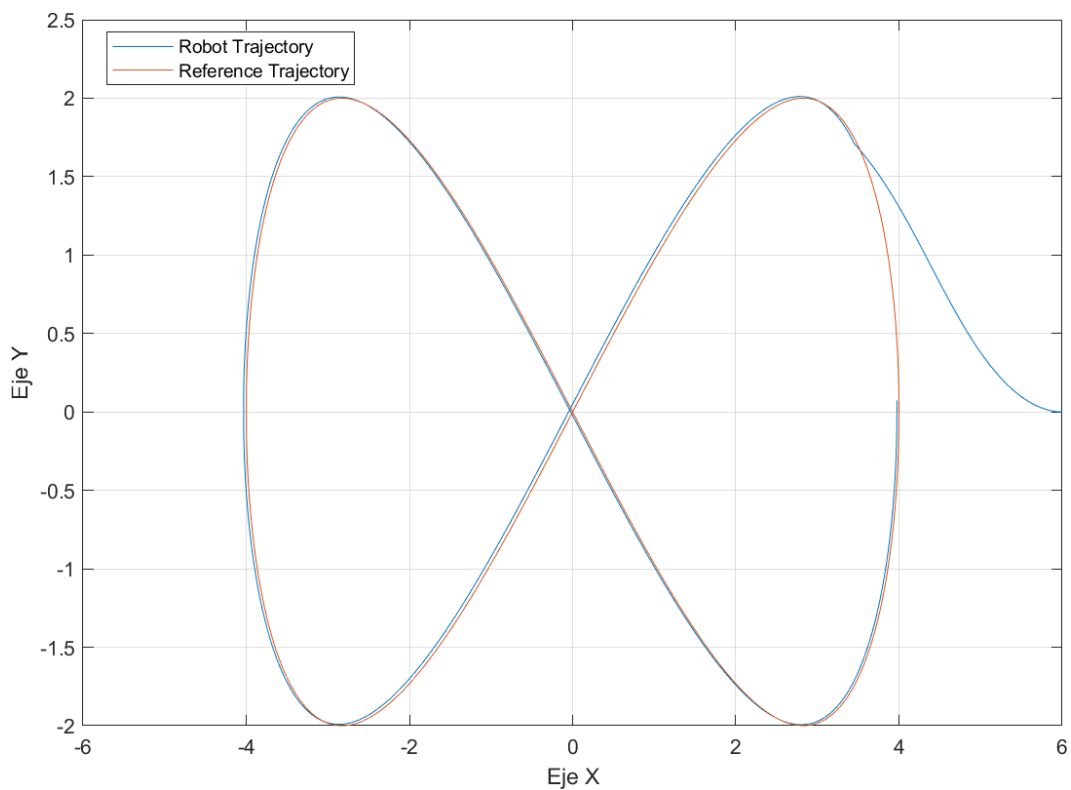


Figura IV.17. Curva comparativa de la trayectoria de referencia y la trayectoria del robot en una línea curva de 4m de radio y una pose inicial del robot de  $[6, 0, 180]^T$

**Simulación 10** (Figura IV.18): Trayectoria de trabajo deseado con una pose inicial de  $[-2, -2, 90]^T$ , un tiempo de simulación de 132s y una velocidad limitada a 0.5m/s. Aquí se obtiene un recorrido de referencia y uno real de 16.2632m y 19.5263m respectivamente, un tiempo de establecimiento de 6.0441s y un error promedio absoluto de 0.0413m (manteniendo un error aceptable).

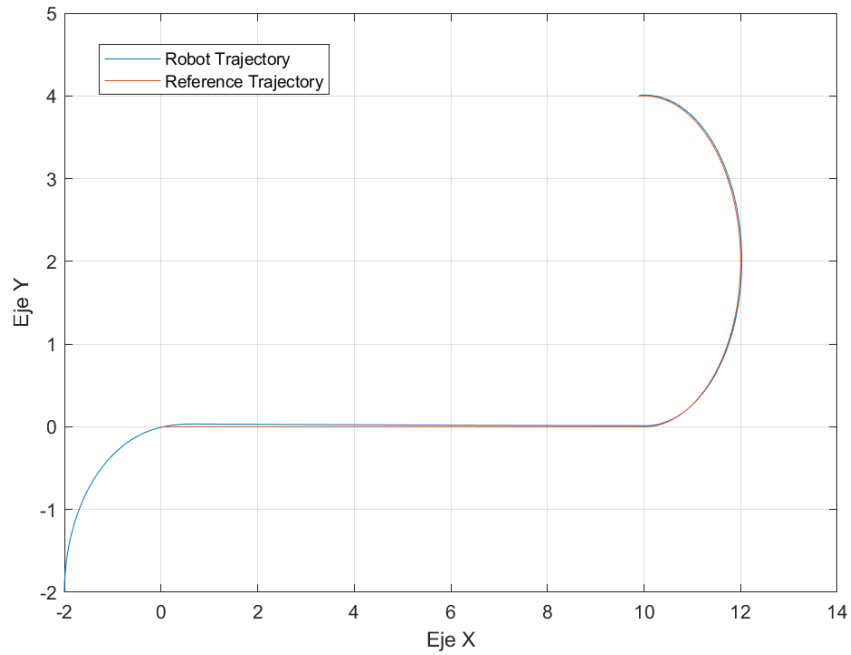


Figura IV.18. Trayectoria real de trabajo

Finalmente, Analizando los resultados de las 10 simulaciones, se concluye que el robot móvil tiene la capacidad de seguir una trayectoria lineal, circular o combinada manteniendo un error estable de movimiento. En la Tabla IV.1, se muestran los resultados relevantes obtenidos de las simulaciones realizadas.

Tabla IV.1. Resumen de las 10 simulaciones realizadas

Simulación	Recorrido real	Tiempo de simulación	Error promedio absoluto	Tiempo de estabilización
1	10.0000m	100s	0.0309m	4.7367s
2	10.0000m	100s	0.0287m	4.4051s
3	10.0000m	100s	0.0263m	4.0400s
4	10.0000m	100s	0.0443m	5.8304s
5	10.0000m	100s	0.0288m	4.0033s
6	6.2832m	32s	0.0349m	4.0559s
7	9.4248m	32s	0.0369m	4.4739s
8	12.5664m	32s	0.0416m	5.3552s
9	24.4561m	63s	0.0367m	4.9425s
10	16.2632m	132s	0.0413m	6.0441s

# Capítulo V

## Discusiones

*“el hombre más poderoso es aquel que es  
totalmente dueño de sí mismo”*

**Aristóteles.**

## CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

Aquí se interpretan los resultados obtenidos en base a las metas alcanzadas según objetivos específicos declarados en la presente investigación.

### V.1. Modelo cinemático del robot móvil

En la bibliográfica especializada existen diferentes modelos aplicados a robots móviles del tipo diferencial. Los que difieren por su complejidad al asumir o no determinadas condiciones iniciales, tanto de la morfología del robot móvil como del entorno donde se desplazara.

En este trabajo se analizó y estudio diferentes modelos cinemáticos aplicables a robot móviles para determinar aquel que mejor se ajuste al robot móvil de 110cm de ancho, 140cm de largo y 80cm de alto; construido en el marco del proyecto 171-2020-Fondecyt. Y obtener el modelo cinemático definitivo se basó en el siguiente procedimiento:

- Modelamiento del robot móvil respecto a su centro de masa (referencia local) para relacionar las velocidades lineales de las ruedas con la velocidad lineal y angular del robot mediante un análisis de movimiento relativo.
- Modelamiento del robot móvil respecto a un sistema de referencia global (XY) para descomponer la velocidad lineal del robot móvil en coordenadas X e Y, según la orientación actual del robot respecto al eje X.
- Integración de los dos modelos previos mediante las ecuaciones (11) y (12) respectivamente para obtener la cinemática directa e inversa del robot.

Por otro lado, el modelo cinemático desarrollado en este trabajo no asume que las distancias entre los centroides de las ruedas delanteras y traseras deban ser iguales y constantes (como la mayoría de modelos cinemáticos de la bibliografía especializada). En decir en el modelo obtenido aquí, la distancia entre centroides pueden ser diferentes y variantes en el tiempo, dado que se dispone de un sistema de amortiguación activa (utilizados para mantener el contacto de cada rueda con el suelo, ver Figura III.4). Cabe precisar que el presente trabajo no controla los pistones lineales eléctricos de los sistemas de amortiguación activa, pero mediante los sensores de posición lineal articulado (ver Figura III.14) instalados en cada amortiguador, se obtiene indirectamente la distancia entre centroides de las ruedas traseras y delanteras.

## V.2. Transferencia del modelo mecánico y la cinemática del robot móvil al entorno ROS y Gazebo

Ros y Gazebo son plataformas de código abierto que se emplean frecuentemente para simular robots móviles comerciales en entornos similares a los fondos agroindustriales (gracias a sus librerías preestablecidas), los que los convierte en una herramienta útil para validar en virtual el performance de algoritmos de planificación y seguimiento de trayectorias.

Gazebo permite trabajar eficientemente con el modelo mecánico del robot móvil que se usa en esta investigación, dado que su entorno virtual puede ser parametrizado tal que emule un escenario de fondo agrícola. Además permite modificar por ejemplo la distancia entre los centroides de las ruedas delanteras y traseras al mover los pistones lineales eléctricos del sistema de amortiguación

activa, y de esta manera observar los cambios del movimiento curvilíneo al modificar esta distancia en cada simulación. No obstante, la plataforma no permite cambiar esta distancia dinámicamente, ya que no está codificada en una ley de control en ROS, sino que hay que ajustar el valor antes de cada simulación.

### V.3. Algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria

El objetivo de los algoritmos de planificación es trazar una trayectoria segura en tiempo real que evite los obstáculos estáticos y dinámicos, para que el robot móvil se mueva de forma segura en un mapa determinado. Sin embargo, en este trabajo se asume que el robot móvil tiene tareas propias de fondo agrícola, los que imponen determinadas trayectorias de forma continua. Por lo tanto, el algoritmo planificador de trayectoria genera una trayectorias constantes y continuas basadas en ecuaciones matemáticas que describen la geometría de la trayectoria deseada, y así el robot móvil sigue dicha trayectoria.

Por otro lado, el seguidor de trayectoria hace que el robot móvil siga la trayectoria proporcionada por el planificador de trayectorias, siempre que no haya un obstáculo delante del robot. Si hay un obstáculo, el robot se detiene hasta que el obstáculo desaparezca.

### V.4. Validación de los algoritmos de planificación y seguimiento de trayectoria

Caracterizar la robustez del robot móvil para seguir una trayectoria es un proceso importante que asegura que el algoritmo funciona correctamente en diferentes escenarios. Para ello, se calcula el error promedio absoluto entre la trayectoria de referencia y la trayectoria real del robot móvil a partir del tiempo de estabilización.

El error promedio absoluto de nuestro seguidor de trayectoria es menor a 5cm, siendo un resultado más satisfactorio que los obtenidos por Diaz Tenorio (EPA igual a 0.0710m) y por Rozo y Pallares (EPA igual a 0.052m).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo, se desarrolló un algoritmo de planificación y seguimiento de trayectoria para la navegación del robot móvil desarrollado en el marco del proyecto 171-2020-FONDECYT aplicable en fundos agroindustriales de la región La Libertad.

En la presente investigación se consideran las características de los elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y sensóricos que componen el robot móvil en particular. En especial los actuadores eléctricos que generan la fuerza y torque para el movimiento del robot móvil, los que son gobernados por un sistema de control que a su vez requieren de referencias deseadas resultantes de planificadores y seguidores de trayectoria como el desarrollado en este trabajo.

El modelo cinemático (directa, inversa y velocidad) obtenido en este trabajo considera la morfología del robot móvil construido en el marco del proyecto 171-2020-FONDECYT, por lo que tienen características propias que no se encuentran en otros modelos de la bibliografía especializada.

El planificador de trayectorias desarrollado en este trabajo genera trayectorias de referencia mediante ecuaciones matemáticas discretas de la recta, la circunferencia y la curva Lemniscata. En este contexto se determinó matemáticamente la trayectoria de trabajo del robot móvil en fundo agrícola, mediante una juntura de una recta y la mitad de una circunferencia.

El seguidor de trayectoria desarrollado aquí transforma el error de posición en comandos de velocidad lineal y angular global y mediante la cinemática inversa



estos comandos globales son transformados en comandos de velocidad lineal para cada rueda.

El modelo mecánico y cinemático del robot móvil del proyecto 171-2020-FONDECYT se migro a la plataforma gazebo y ROS para validar su desempeño en diferentes escenarios de terrenos agrícolas simulados, dado que en gazebo se puede parametrizar los terrenos a desplazarse por el robot (la parametrización permite emular en virtual, terrenos con diferentes características técnicas).

Finalmente, se describen los resultados de validar el robot móvil en trayectorias lineales y curvas sobre terrenos simulados en gazebo, en los que se obtuvo un error promedio absoluto menor a 5cm. Este error es compatible con las características técnicas de precisión y repetibilidad que se exigen en actividades de fundo agrícola relacionadas por ejemplo a la evaluación del desarrollo de los frutos en pre-cosecha.

## REFERENCIAS

- Bambino. (2008). *Una introducción a los robots móviles*. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36815262/monografia\\_robot\\_movil-libre.pdf?1425224436=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMonografia\\_robot\\_movil.pdf&Expires=1694421275&Signature=ffKh9D~iOuP~vGjVxAUAWpN2bqfCjxjDU1TkrXrb2xTkH0OzOUiITUbqK](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36815262/monografia_robot_movil-libre.pdf?1425224436=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DMonografia_robot_movil.pdf&Expires=1694421275&Signature=ffKh9D~iOuP~vGjVxAUAWpN2bqfCjxjDU1TkrXrb2xTkH0OzOUiITUbqK)
- Diaz Tenorio, D. (2017). *Diseño e implementación de un sistema para el mapeo y navegación de un robot móvil*. Santiago de Cali.
- Gao, X., Gao, R., Liang, P., Zhang, Q., Deng, R., y Zhu, W. (2021). *A hybrid tracking control strategy for nonholonomic wheeled mobile robot incorporating deep reinforcement learning approach*. IEEE Access.
- Gonzales, Oscar, y Scaglia, Gustavo. (2017). *Control Predictivo Aplicado a un Buque Marino*. Revista Politécnica.
- Han, Yu y Zhu Qidan. (2019). *Robust Optimal Control of Omni-directional Mobile Robot using Model Predictive Control Method*. Guangzhou-China: Chinese Control Conference.
- Hebe Murillo, M. (2015). *Diseño de sistemas de control y navegacion para vehículos aérios no tripulados mediante simulacion virtual*.
- Hernández Ledesma, C. (2022). *Control de vehículo terrestre en maniobras de posicionamiento autónomo de precisión*. Durango-Mexico.
- Ji, W., Luo, Y., Chen, Y., Yan, Q., Liu, Y., & Chen, X. (2022). *Application of Model Predictive Control to Trajectory Tracking of Mecanum Wheels*. Changchun, China: IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI) .
- Jian, Z., Yan, Z., Lei, X., Lu, Z., Lan, B., Wang, X., y Liang, B. (2023). *Dynamic control barrier function-based model predictive control to safety-critical obstacle-avoidance of mobile robot*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).
- Kuhne, F. (2004). *Model predictive control of a mobile robot using linearization*. Proceedings of mechatronics and robotics.
- Lagos Rodríguez, M. (2021). *SLAM y navegación de un Turtlebot3 en el contexto de un robot asistente para tareas de rehabilitación*.
- Lins Barreto, Julio; Scolari Conceicao, André; Dórea, Carlos; Martinez, Luciana; y de Pieri, Edson. (2013). *Design and implementation of model predictive control with friction compensation on an omnidirectional mobile robot*. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics.
- Paniagua Jaramillo, J. (2014). *Diseño e implementacion de un sistema de control que permita integrarse con diferentes tipos de robot moviles terrestres*. Santiago de Cali.

- Proyectos Peruanos. (Junio de 2020). Obtenido de [https://proyectosperuanos.com/cultivo\\_de\\_arandanos/](https://proyectosperuanos.com/cultivo_de_arandanos/)
- Redagrícola. (Mayo de 2020). *Redagrícola*. Obtenido de Redagrícola
- Rozo Manrique, Tatiana y Pallares Olivares, Brayan. (2021). *Diseño y construcción de un robot móvil autónomo para localización y mapeo simultáneos (SLAM) en ambientes cerrados domésticos*. Bogota.
- Salazar Hidalgo, E. (2021). *Control MPC de un cuadricóptero para el seguimiento de trayectorias basados en odometría visual*. Puebla-Mexico.
- Sharma, K. R., Dušek, F., y Honc, D. (2017). *Comparitive study of predictive controllers for trajectory tracking of non-holonomic mobile robot*. Slovakia: 21st International Conference on Process Control.
- Siegwart, Roland; Nourbakhsh, Illah; y Scaramuzza Davide. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots Second Edition*. London-England: The MIT press.
- Soloque Guzmán, Leonardo; Molina Villa, Manuel; y Rodríguez Vásquez, Edgar. (2014). *Seguimiento de trayectorias con un robot móvil de configuración diferencial*. Ingenierías USBMed.
- Valdepeña Rivero, F. (2022). *Navegación de un robot omnidireccional basado en lógica difusa tipo-2*. Mexico.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID Control*. Springer Science & Business Media.
- Wang, C., Chen, X., Li, C., Song, R., Li, Y., & Meng, M. Q. H. (2022). *Chase and track: Toward safe and smooth trajectory planning for robotic navigation in dynamic environments*. IEEE Transactions on Industrial Electronics,.
- Wang, C., Liu, X., Yang, X., Hu, F., Jiang, A., y Yang, C. (2018). *Trajectory tracking of an omnidirectional wheeled mobile robot using a model predictive control strategy*. Applied Sciences.
- Yandún Torres, A. (2011). *Planificación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil*. Quito.