

**SISTEMA DE NAVEGACIÓN EN VEHÍCULOS
AUTÓNOMOS A PARTIR DEL CONTROL PREDICTIVO
POR MODELO EN UN ESCENARIO CON OBSTÁCULOS**

**JORGE LUIS CORREDOR CELY
JUAN CAMILO GARCÍA CARRILLO**

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C
2023



**SISTEMA DE NAVEGACIÓN EN VEHÍCULOS
AUTÓNOMOS A PARTIR DEL CONTROL PREDICTIVO
POR MODELO EN UN ESCENARIO CON OBSTÁCULOS**

**JORGE LUIS CORREDOR CELY
JUAN CAMILO GARCÍA CARRILLO**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**DIRECTOR: JUAN MANUEL CALDERÓN CHÁVEZ
CODIRECTOR: SINDY PAOLA AMAYA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C**

2023

Autoridades de la Universidad

RECTOR GENERAL

Fray José Gabriel Mesa Angulo.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL

Fray Wilson Fernando Mendoza Rivera.

VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL

Fray Eduardo González Gil.

SECRETARIO GENERAL

Ingrid Lorena Campos Vargas

DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Fray Javier Antonio Hincapié Ardila

SECRETARIA DE DIVISIÓN

Luz Patricia Rocha Caicedo

DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Carlos Enrique Montenegro Narváez

Nota de aceptación

Firma del tutor

Firma del jurado

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C _____ DE 2023

ADVERTENCIA

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.

Dedicatoria

A mis padres, Carmen y Jorge, por su amor, paciencia y apoyo para llegar hasta este punto, a mi hermana Mónica por su guía para aprovechar todas mis fortalezas personales y profesionales. Sin ellos nada de esto sería posible

Jorge Luis Corredor Cely

A mi mamá, Ana, que me enseñó a ser la persona que soy y quien me ha acompañado y apoyado durante toda mi vida, a mi sobrino Felipe que no deja olvidar los motivos por los cuales inicié mi formación, los cuales obedecen a los sueños del niño que alguna vez fui y que aún vive en mí.

Juan Camilo García Carrillo

Agradecimientos

Le agradezco primero a Dios por brindarme salud y fortaleza, a mis padres Carmen y Jorge por todo su apoyo durante estos años para alcanzar todos mis objetivos y enseñarme a perseguir mis sueños. A mis profesores por su guía y orientación para llegar hasta acá, a mis compañeros, en particular a Juan Camilo García, Daniel Ardila y Bryan Lopez por su apoyo durante este arduo viaje. Finalmente a todos aquellos que influyeron en mi crecimiento en estos años.

Jorge Luis Corredor Cely

En primer lugar agradezco a mis padres Epifanio y Ana por brindarme apoyo material y emocional para poder cumplir mis objetivos personales y académicos. A mis compañeros a los que me conocieron y acompañaron en esta extraña etapa de mi vida, con mención a Jorge Luis Corredor, Daniel Ardila y Alexa Escalante por ser las personas que me apoyaron cuando sufría y que me ayudaron a no sentirme tan solo, por ser las personas con las quería estar y por crear una casa en mi corazón. A mis docentes, en especial a mis directores, por no solo enseñarme y guiarme sino aún más importante por no dejar morir mi curiosidad. Por último a Dios, porque gracias a el todo es posible.

Juan Camilo Garcia Carrillo

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Lista de Tablas	II
Lista de Figuras	V
Glosario	XII
1. Introducción	1
1.1. Problema	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Justificación	3
1.4. Impacto social	4
2. Antecedentes	6
2.1. Optimización de trayectoria	7
2.2. Control predictivo por modelo	8
3. Marco teórico	10
3.1. Cinemática directa	10
3.1.1. Modelo cinemático no lineal (Modelo bicicleta)	10
3.1.2. Cinemática inversa	14
3.2. Control MPC	16
3.3. Optimización matemática [31, 32, 33]	18
3.3.1. Solución al problema de optimización no lineal convexo	19
3.4. Planificador de rutas	20
3.4.1. Método de campos de fuerza virtual	20
3.4.2. Método “Follow the gap”	21
3.5. Sistema de localización global	21

4. Diseño e implementación	24
4.1. Descripción mecánica	24
4.1.1. Descripción electrónica	26
4.2. Configuración de software	28
4.2.1. Configuración VESC	28
4.2.2. Configuración del espacio de trabajo y modo de navegación autónoma . .	30
4.2.2.1. ROS Setup	30
4.2.2.2. Udev rules	30
5. Diseño y metodología	33
5.1. Algoritmo de navegación	33
5.1.1. Planeador de rutas	34
5.1.2. Restricciones de funcionamiento	36
5.1.3. Diseño de la estrategia control MPC	37
5.1.4. Implementación con ROS	40
5.1.4.1. ROS API	40
5.1.4.2. Configuración parámetros del vehículo	42
5.1.4.3. Escenarios de prueba	42
5.1.5. Guía de laboratorio	44
6. Resultados y Discusión	45
6.1. Vehículo en lazo abierto	45
6.2. Vehículo en lazo cerrado con MPC implementado	46
6.2.1. Resultados variación de coeficientes Mapa 1	46
6.2.2. Resultados variación de coeficientes Mapa 2	51
6.2.3. Resultados variación de coeficientes Mapa 3	56
6.2.4. Resumen de resultados	61
6.2.4.1. Mapa 1	61
6.2.4.2. Mapa 2	62
6.2.4.3. Mapa 3	63
7. Conclusiones y Trabajos Futuros	66
7.1. Conclusiones	66
7.2. Trabajos futuros	67
Bibliografía	68
Anexos	72
7.3. Anexo A:	72
7.4. Anexo B:	72
7.4.1. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	72
7.4.1.1. Mapa 1	72
7.4.1.2. Mapa 2	74
7.4.1.3. Mapa 3	76
7.4.2. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	78

7.4.2.1.	Mapa 1	78
7.4.2.2.	Mapa 2	80
7.4.2.3.	Mapa 3	82
7.4.3.	Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	84
7.4.3.1.	Mapa 1	84
7.4.3.2.	Mapa 2	86
7.4.3.3.	Mapa 3	88
7.4.4.	Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	90
7.4.4.1.	Mapa 1	90
7.4.4.2.	Mapa 2	92
7.4.4.3.	Mapa 3	94
7.4.5.	Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	96
7.4.5.1.	Mapa 1	96
7.4.5.2.	Mapa 2	98
7.4.5.3.	Mapa 3	100
7.4.6.	Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	102
7.4.6.1.	Mapa 2	102
7.4.6.2.	Mapa 3	104

Resumen

El presente proyecto de grado se enfoca en el diseño de un sistema de navegación para un vehículo autónomo utilizando el enfoque de Control predictivo por modelo en un ambiente de simulación. El MPC es una técnica de control avanzada que utiliza un modelo matemático del sistema y un horizonte de predicción para calcular y aplicar de manera óptima las acciones de control. El objetivo principal de este proyecto es diseñar y evaluar un sistema de navegación utilizando MPC en un entorno simulado para un vehículo autónomo. Si bien la implementación en el mundo real conlleva desafíos prácticos adicionales, la simulación ofrece un entorno seguro y controlado para probar y perfeccionar el sistema antes de considerar su implementación práctica.

El sistema de navegación propuesto se basará en una combinación de sensores avanzados proveídos por el ambiente integrado de simulación, como cámaras, LiDAR y radar, para obtener información precisa sobre el entorno circundante. Esta información se fusionará y procesará utilizando algoritmos de percepción y localización, permitiendo al sistema construir un modelo dinámico del entorno y tomar decisiones informadas en función de los objetivos y las restricciones definidas. El diseño del sistema de navegación se llevará a cabo utilizando herramientas y lenguajes de programación adecuados. Se considerarán aspectos de seguridad, rendimiento y eficiencia para garantizar la viabilidad y la aplicabilidad práctica del sistema, incluso en un ambiente simulado.

Abstract

This degree project focuses on the design of a navigation system for an autonomous vehicle using the Model Predictive Control approach in a simulation environment. MPC is an advanced control technique that uses a mathematical model of the system and a prediction horizon to compute and optimally apply control actions. The main objective of this project is to design and evaluate a navigation system using MPC in a simulated environment for an autonomous vehicle. While real-world implementation brings additional practical challenges, the simulation provides a safe and controlled environment to test and refine the system before considering practical implementation.

The proposed navigation system will rely on a combination of advanced sensors provided by the integrated simulation environment, such as cameras, LiDAR and radar, to obtain accurate information about the surrounding environment. This information will be fused and processed using perception and localization algorithms, allowing the system to build a dynamic model of the environment and make informed decisions based on the defined objectives and constraints. The design of the navigation system will be carried out using appropriate tools and programming languages. Safety, performance and efficiency aspects will be considered to ensure the feasibility and practical applicability of the system, including in a simulated environment.

Índice de Tablas

1.	Especificaciones LightHouse Base Station 2.0	22
2.	Características mecánicas de la plataforma TRAXXAS slash 4x4 [35]	25
3.	Configuración del control PID. Fuente: Autor	29
4.	Configuración APP. Fuente: Autor	29
5.	Configuración RPM. Fuente: Autor	29
6.	Tópicos del nodo de navegación. Fuente: Autor	31
7.	Restricciones y tipo de restricción. Fuente: Autor	36
8.	Tópicos de la simulación del control de navegación. Fuente: Autor	41
9.	Parámetros del vehículo en simulación. Fuente: Autor	42
10.	Características de los mapas. Fuente: Autor	43
11.	Intervalos de variación para las pruebas. Fuente: Autor	43
12.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	50
13.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	51
14.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	51
15.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	55
16.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	56
17.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	56
18.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	60
19.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	61
20.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	61
21.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	74

22.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	76
23.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	78
24.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	80
25.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	82
26.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	84
27.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	86
28.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	88
29.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	90
30.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	92
31.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	94
32.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	96
33.	Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	98
34.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	100
35.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	102
36.	Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	104
37.	Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	106

Índice de Figuras

1.	Esquemático del modelo cinemático del vehículo [13]	11
2.	Modelo 4 ruedas [30]	15
3.	Montaje crazyflie con LightHouse Deck	22
4.	Distribución estructural de la plataforma [35]	24
5.	TRAXXAS slash 4x4 construido. Fuente: Autor	25
6.	Diagrama de bloques componentes TRAXXAS slash 4x4. Fuente: Autor	26
7.	Cámara Intel® D435, Adaptado de [36].	27
8.	Controlador de velocidad VESC 6MkV, Adaptado de [37].	27
9.	Computador Embebido Intel® NUC [38].	28
10.	Página inicial VESC Tool. Fuente: Autor	28
11.	Diagrama de nodos para navegación. Fuente: Autor	32
12.	Diagrama de bloques arquitectura MPC. Fuente: Autor	33
13.	Ejemplo campos de fuerza. Fuente: Autor	35
14.	Ejemplo obtención posición objetivo. Fuente: Autor	35
15.	Estado inicial. Fuente: Autor.	38
	(a). Variables de estado y control	38
	(b). Horizonte de predicciones	38
16.	Estado final. Fuente: Autor.	39
	(a). Variables de estado y control	39
	(b). Horizonte de predicciones	39
17.	Diagrama de nodos. Fuente: Autor	41
18.	Mapas de simulación.	42
	(a). Mapa 1	42
	(b). Mapa 2	42
	(c). Mapa 3	42
19.	Simulación vehículo en lazo abierto. Fuente: Autor.	45
	(a). Trayectoria vehículo	45
	(b). Ángulo de dirección del vehículo	45
20.	Ángulo de dirección $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	46
21.	Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$	47

22.	Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$	48
23.	Distancia a los muros derecha y izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	49
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	49
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	49
24.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$. Fuente: Autor.	49
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$	49
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$	49
25.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1, 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	50
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1, 1$ y $F_{ct} = 1$	50
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1, 1$ y $F_{ct} = 1$	50
26.	Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$	52
27.	Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$	53
28.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	54
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	54
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	54
29.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$. Fuente: Autor.	54
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$	54
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$	54
30.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1, 3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	55
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1, 3$ y $F_{ct} = 1$	55
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1, 3$ y $F_{ct} = 1$	55
31.	Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$	57

32.	Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$	58
33.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	59
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	59
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	59
34.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$. Fuente: Autor.	59
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$	59
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3, 5$	59
35.	Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1, 3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	60
(a).	Distancia a los muros de la derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1, 3$ y $F_{ct} = 1$	60
(b).	Distancia a los muros de la izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1, 3$ y $F_{ct} = 1$	60
36.	F_{ct}/F_{cr} vs Distancia muros mapa 1. Fuente: Autor.	62
(a).	F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro derecha mapa 1	62
(b).	F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro izquierda mapa 1	62
37.	F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo y velocidad promedio mapa 1. Fuente: Autor.	62
(a).	F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo mapa 1	62
(b).	F_{ct}/F_{cr} vs Velocidad promedio mapa 1	62
38.	F_{ct}/F_{cr} vs Distancia muros mapa 1. Fuente: Autor.	63
(a).	F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro derecha mapa 2	63
(b).	F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro izquierda mapa 2	63
39.	F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo y velocidad promedio mapa 2. Fuente: Autor.	63
(a).	F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo mapa 2	63
(b).	F_{ct}/F_{cr} vs Velocidad promedio mapa 2	63
40.	F_{ct}/F_{cr} vs Distancia muros mapa 1. Fuente: Autor.	64
(a).	F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro derecha mapa 3	64
(b).	F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro izquierda mapa 3	64
41.	F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo y velocidad promedio mapa 3. Fuente: Autor.	64
(a).	F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo mapa 3	64
(b).	F_{ct}/F_{cr} vs Velocidad promedio mapa 3	64
42.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1, 5$. Fuente: Autor.	72
(a).	Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1, 5$	72
(b).	Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1, 5$	72
43.	Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1, 5$. Fuente: Autor.	73
(a).	Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1, 5$	73

(b).	Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. . .	73
44.	Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	73
(a).	Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	73
(b).	Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	73
45.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	74
(a).	Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	74
(b).	Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	74
46.	Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor. . . .	75
(a).	Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	75
(b).	Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	75
47.	Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	75
(a).	Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	75
(b).	Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	75
48.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.	76
(a).	Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	76
(b).	Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	76
49.	Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor. . . .	77
(a).	Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	77
(b).	Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$	77
50.	Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	77
(a).	Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	77
(b).	Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$	77
51.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	78
(a).	Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	78
(b).	Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	78
52.	Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor. . . .	79
(a).	Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	79
(b).	Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	79
53.	Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	79
(a).	Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	79
(b).	Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	79
54.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	80
(a).	Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	80
(b).	Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	80
55.	Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor. . . .	81
(a).	Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	81
(b).	Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	81
56.	Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	81
(a).	Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	81
(b).	Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	81

57.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	82
(a).	Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	82
(b).	Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	82
58.	Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	83
(a).	Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	83
(b).	Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	83
59.	Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.	83
(a).	Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	83
(b).	Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$	83
60.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	84
(a).	Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	84
(b).	Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	84
61.	Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	85
(a).	Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	85
(b).	Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	85
62.	Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	85
(a).	Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	85
(b).	Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	85
63.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	86
(a).	Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	86
(b).	Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	86
64.	Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	87
(a).	Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	87
(b).	Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	87
65.	Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	87
(a).	Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	87
(b).	Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	87
66.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	88
(a).	Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	88
(b).	Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	88
67.	Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	89
(a).	Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	89
(b).	Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	89
68.	Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.	89
(a).	Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	89
(b).	Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$	89
69.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	90
(a).	Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	90
(b).	Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	90

70.	Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor. . . .	91
(a).	Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	91
(b).	Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	91
71.	Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,3$. Fuente: Autor. . . .	91
(a).	Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	91
(b).	Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	91
72.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	92
(a).	Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	92
(b).	Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	92
73.	Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor. . . .	93
(a).	Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	93
(b).	Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	93
74.	Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor. . . .	93
(a).	Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	93
(b).	Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	93
75.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.	94
(a).	Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	94
(b).	Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	94
76.	Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor. . . .	95
(a).	Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	95
(b).	Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	95
77.	Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor. . . .	95
(a).	Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	95
(b).	Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$	95
78.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	96
(a).	Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	96
(b).	Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	96
79.	Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor. . . .	97
(a).	Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	97
(b).	Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	97
80.	Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor. . . .	97
(a).	Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	97
(b).	Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	97
81.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	98
(a).	Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	98
(b).	Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	98
82.	Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor. . . .	99
(a).	Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	99
(b).	Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	99
83.	Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor. . . .	99

(a).	Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	99
(b).	Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	99
84.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	100
(a).	Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	100
(b).	Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	100
85.	Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	101
(a).	Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	101
(b).	Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	101
86.	Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	101
(a).	Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	101
(b).	Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$	101
87.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	102
(a).	Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	102
(b).	Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	102
88.	Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	103
(a).	Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	103
(b).	Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	103
89.	Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	103
(a).	Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	103
(b).	Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	103
90.	Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	104
(a).	Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	104
(b).	Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	104
91.	Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	105
(a).	Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	105
(b).	Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	105
92.	Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.	105
(a).	Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	105
(b).	Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$	105

Glosario

Se presenta un listado con las palabras y siglas de mayor relevancia dentro del proyecto.

- **MPC:** Control predictivo por modelo.
- **FGM:** Método Follow the gap.
- **IMU:** Unidad de medición inercial
- **LiDAR:** Light Detection And Ranging
- **Nodo:** Archivo ejecutable dentro de un paquete de ROS.
- **Paquete:** Elemento principal de la arquitectura de ROS, contienen procesos de tiempo de ejecución (nodos), librerías dependientes ROS, conjuntos de datos, archivos de configuración, o cualquier otro archivo útil.
- **Tópico:** Forma de comunicación entre nodos.
- **ROS:** Robot operating system.
- **Rviz:** ROS Visualization
- **Workspace:** Espacio de trabajo donde se almacenan los paquetes para ejecutar una aplicación.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Problema

Durante años la proyección de automatizar todo proceso manipulado por el ser humano se ha materializado en una necesidad, a tal punto que la esencia de las nuevas tecnologías radica en la búsqueda de nuevos modelos de producción que favorezcan positivamente el desempeño del ser humano en sus actividades. Un claro ejemplo de esto, radica en la transición actual de vehículos operados manualmente a vehículos autónomos, que sean capaces de brindar las mejores condiciones de seguridad, eficiencia y movilidad [1].

Conforme a diversos informes presentados por la Organización Mundial de la Salud -OMS en relación a la seguridad vial en la última década se indica, que las muertes en accidentes de tránsito tienen un promedio anual de 1,35 millones de muertes [2]. A pesar de ser una cifra tan alta, cabe destacar que en los países de economías fuertes las cifras son mucho menores a las presentadas en los países de economías bajas. Esto debido en parte, a las medidas tomadas por los gobiernos de este tipo de economías, entre las que destacan, las tecnologías dinámicas como las cámaras y sensores en las vías [3]. Sin embargo a pesar de todas los esfuerzos en la implementación de nuevas medidas de seguridad, hay que contemplar que el error humano es una de las mayores causas de accidentalidad, por lo tanto, para reducir los accidentes viales, se hace necesario explorar el campo de los vehículos autónomos, ya que estos estarán completamente testeados y no incumplirán las normas de conducción, como lo pueden ser los excesos de velocidad, adelantamientos peligrosos, y la conducción bajo los efectos del alcohol.

Es por esta razón, que dicha transición, radica en un factor determinante: Seguridad. Asegurar continuamente que la trayectoria a tomar por el vehículo contemplará cualquier situación

inusual, con el fin de preservar constantemente la seguridad de los usuarios hasta llegar al destino deseado, teniendo en cuenta una serie de factores determinantes como son las normas de tráfico, límites de carretera, obstáculos y demás [4]. Es decir, que se debe mantener constantemente en consideración las múltiples condiciones físicas y geológicas a las que se ve sometida una carretera.

Por tal motivo, se desarrollan los sistemas de control de trayectoria, encargados de realizar el manejo y administración de tales factores en fin de promover la seguridad vial [5]. Sin embargo, en su mayoría, estos sistemas simplemente son capaces de conducir de un punto a otro, sin dar garantías que promuevan la eficiencia en movilidad. Por lo que, en función de dar este tipo de garantías, emerge el Control Predictivo por Modelo, o por sus siglas en ingles MPC, que se encarga de realizar la predicción de la dinámica del vehículo, con el fin de establecer una serie de acciones que busquen la optimización continua del mismo [6], el cual permite mantener control sobre múltiples variables físicas que interactúan en el proceso de navegación [7]. Es por esto que, dada la relación de equilibrio de seguridad y eficiencia que se busca ofrecer en los sistemas de navegación de los vehículos autónomos, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cómo implementar estrategias de navegación autónoma en vehículos a escala en un escenario con obstáculos, a partir de la técnica de Control Predictivo por modelo?

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Diseñar una estrategia de control basada en Control predictivo por modelo (MPC) para la navegación de un vehículo autónomo a escala en un entorno con obstáculos.

1.2.2. Específicos

- Modelar el vehículo autónomo como un sistema descrito en espacio de estados a partir de la revisión del estado del arte.
- Definir entradas, salidas y variables asociadas al sistema modelado del vehículo autónomo a escala con respecto a la técnica de control correspondiente.
- Simular la estrategia de control MPC en consideración del sistema modelado obtenido anteriormente del vehículo autónomo.

- Implementar la estrategia de control para la navegación del vehículo a escala mediante el uso de ROS en un escenario con obstáculos.
- Desarrollar una guía de laboratorio a partir de la construcción de una plataforma a escala de un vehículo autónomo para la identificación de conceptos asociados a un sistema.

1.3. Justificación

A partir de los recientes avances en computación, los vehículos autónomos se están convirtiendo en una realidad. Partiendo de lo anterior surge la necesidad de realizar diversas investigaciones que permitan explorar todas las diversas áreas que involucran la creación e implementación de los vehículos autónomos, como lo son: el control de navegación, sistemas de localización, mapeo, etc. Sin embargo, los costos de investigación e implementación de estos vehículos, son demasiado altos. Por lo que para realizar dichas investigaciones se hace necesario el uso de modelos a pequeña escala de los vehículos autónomos. Los modelos a pequeña escala son capaces de servir como un banco de prueba de bajo presupuesto para las ya mencionadas áreas necesarias para el funcionamiento de los vehículos, reduciendo de esta manera los costos de financiación para la investigación de los vehículos autónomos [8].

Partiendo de lo anterior, con un modelo a pequeña a escala de un vehículo autónomo se busca que, además de probar diversos métodos de control, se pueda realizar pruebas de navegación del vehículo. Es decir, realizar ensayos en pistas que simulen la conducción de los vehículos en ambientes normales, como lo sería la conducción en una carretera de ciudad. Esto se puede lograr, haciendo uso de un modelo a pequeña escala de una pista de automovilismo, que contenga obstáculos que simule el ya mencionado ambiente de ciudad. Esto con el fin de verificar la seguridad que deben tener estos vehículos.

En un ambiente más local, se debe tener en cuenta el impacto que se tendrá en el grupo de investigación GED de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Santo Tomás, ya que, a partir de este primer proyecto de vehículos autónomos implementados con un modelo a escala, se puede explorar una nueva línea de investigación dedicada a los mismos. Esta línea podría investigar los diferentes tipos de control que se utilizan en estos vehículos, o desarrollar vehículos autónomos para las competiciones de carreras.

El MPC es usado por la industria en plantas químicas, refinerías de petróleo y en sistemas de potencia. Este control permite la automatización de sistemas complejos y dinámicos. Es por esta característica que se requiere realizar un estudio donde se pueda observar el comportamiento y las

ventajas que tiene utilizar este tipo de control sobre el control más utilizado PID, esto debido a que el ambiente donde se desenvuelven los vehículos autónomos es de tipo dinámico. Otra ventaja importante de este tipo de control es que permite la implementación en sistemas a controlar que posean múltiples variables de entrada y de salida, que intercambian información de manera simultánea, como es el caso de los vehículos autónomos los cuales tienen múltiples variables a controlar como lo son velocidad y dirección [9]. Por último, otra ventaja de este tipo de control sobre los controles tradicionales, es que permite el uso de restricciones, las cuales se utilizan en los vehículos autónomos, ya que hay que mantener una distancia con los demás vehículos y una velocidad máxima, si se piensa en una implementación en los sistemas de transporte.

1.4. Impacto social

Los sistemas de transporte afectan la vida de la mayoría de los seres humanos de manera directa. La implementación de los vehículos autónomos traerá algunas mejoras esperables en la calidad de vida de las personas, como la reducción de tiempos de desplazamiento de un lugar a otro, esto debido a que los vehículos autónomos se conducirán de una manera eficiente, manteniendo una relación de velocidad - seguridad, con el fin de promover la integridad humana. Es decir, que los vehículos autónomos tomarán las decisiones que consideren óptimas en todos los escenarios posibles, para que de esta forma se logre evitar atascos en la vía. Con la ya mencionada reducción de tiempos de desplazamientos, se puede lograr reducir el estrés generado en las personas asociado a los trayectos de larga duración [10].

Al implementar los vehículos autónomos, se puede llegar a disminuir los accidentes automovilísticos, esto debido a que estos automóviles no necesitan un conductor, por lo que se elimina el error humano, una de las mayores causas de accidentes automovilísticos. Además, la inteligencia artificial que tomará el control del vehículo se espera que sea segura, es decir, que los vehículos tenderían a no incumplir ninguna norma de tránsito, por lo tanto, el vehículo conducirá a una velocidad correcta, sin adelantamientos peligrosos y respetando las señales de tránsito. Asimismo, la trayectoria de los vehículos estará guiada por diversos sensores que se implementaran en la vida real. Con todo esto se puede asegurar que con la implementación de los vehículos autónomos los desplazamientos serán seguros [3].

Además de reducir los accidentes, los coches autónomos podrán facilitar la movilidad a las personas mayores, personas con movilidad reducida y a las personas con visión reducida. Al facilitar la movilidad de estas personas, se les permite a las mismas, disfrutar de sus derechos civiles, ya que cuando una discapacidad limita las opciones de transporte, la discapacidad deriva

a su vez en una reducción de las oportunidades económicas, un aislamiento que agrave sus condiciones de salud o conduce a la depresión y la disminución de calidad de vida [11].

Por último, teniendo en cuenta que los vehículos autónomos serán de tipo eléctricos, se debe considerar el impacto ambiental que estos producirán. Actualmente más de una cuarta parte de todas las emisiones de efecto invernadero en el mundo, provienen del sector de transporte. Con la implementación de estos vehículos que utilizarán la energía eléctrica, se estima que se generará una reducción de las emisiones de efecto invernadero en un 90 % eventualmente [12].

Capítulo 2

Antecedentes

Los vehículos asistidos por sistemas de navegación autónoma o simplemente conocidos como vehículos autónomos (AV - Autonomous Vehicle) han sido el punto de inflexión sobre el cual los actuales grupos de desarrollo e investigación han incursionado por los últimos años en la implementación de estos, debido al potencial crítico alrededor del incremento de eficiencia en tráfico, así como de reducción de accidentes de carretera [13]. A tal punto ha llegado los prospectos de estos grupos que como se puede observar en [14] se presentan los diseños de los AV desarrollados por Mercedes-Benz y Google respectivamente como cualquier modelo de automóvil manual. De igual forma esta transición que asume actualmente el mundo, espera que para el año 2030 el 50 % de los automóviles cuente con la ayuda de conducción sistematizada, de acuerdo a un estudio de despliegue de las nuevas tecnologías en este campo, realizado en el proyecto AutoNet2030 en su artículo de *"Network Of Automated Vehicles: The AutoNet2030 Vision"* [15].

Dado esto, se puede entender el campo de la robótica móvil en prospecto evolucionista, donde en la década de 1920 se diseñaba los primeros vehículos radio controlados, siendo estos los pioneros en la industria de los AV [16] mientras que, para la última década del siglo XXI, se desarrollan día a día estrategias y modelos de control que permiten la automatización completa nivel 4 de vehículos [17], en búsqueda de mayor eficiencia en seguridad y movilidad. Siendo el indicador de éxito de estos avances, el entender la robótica automovilista en 3 componentes principales: Percepción y localización, planificación y control [18].

- Percepción: Este sistema se encarga de usar diversos sensores con el fin de obtener la información necesaria del trayecto, para luego de esta forma digitalizarla y realizar el modelado del mapa de trayectoria.

- Planificación: Es el sistema encargado de las tomas de decisiones de alto nivel.
- Control: Encargado del planeamiento y seguimiento de trayectoria del vehículo.

2.1. Optimización de trayectoria

Establecer referencia sobre la selección de trayectoria que debe seguir el AV en fin de llegar al punto de destino pertinente, relaciona directamente al accionar del módulo de control, el cual estará encaminado en estabilizar el vehículo, así como el guiarlo por la ruta adecuada [19]. Sin embargo encaminar el vehículo en la ruta, no significa el indicar a este en seguir un camino únicamente, se hace énfasis en la premisa de que se debe buscar continuamente las mejores opciones de ruta, teniendo en cuenta constantemente en el trayecto variables tales como, tiempo, normas de tráfico, aversión por situaciones inusuales, que puedan afectar la integridad de los usuarios, así como condiciones geográficas de la carretera que puedan llegar a impedir al AV en completar su función eficientemente [20]. Es por esta razón que para una implementación adecuada este módulo debe estar constantemente recibiendo la información obtenida por el módulo de percepción y localización para de esta forma estimar los movimientos del vehículo, con el fin de tomar la decisión acertada conforme al accionar del volante, acelerador y frenos [19].

De igual forma las únicas funciones de implementación de los AV no radican en optimización del desempeño individual del vehículo, sino que también, se espera aliviar la congestión de tráfico, así como la reducción de accidentes de carretera. Aunque en consideración de un esquema de implementación más amplio, emerge en discusión las disparidades que se llegan a encontrar entre caminos, ya que todos no son equivalentes entre sí. No es posible comparar los entornos urbanos a los entornos rurales, ya que para cada caso presentan estructuras totalmente diferentes, regidos por reglas de tráfico individuales [21]. Por lo que, de esta forma, garantizar que el AV está en completa autonomía de reaccionar ante distintas situaciones peligrosas es de vital importancia. Este debe estar preparado para tomar la decisión precisa en cuestiones de tiempo totalmente minúsculas, capacitado en función de análisis de velocidades, trayectoria de los vehículos opuestos, así como de análisis de entorno, como lo puede ser el clima, humedad, cantidad de vehículos por carretera, condiciones geográficas y demás.

Conforme a esta necesidad se desarrollan los esquemas de control a utilizar en estos módulos, como lo son los sistemas de retroalimentación de estado en búsqueda del equilibrio del vehículo [22], así como los sistemas reactivos en búsqueda del error para prevenciones futuras de accidentes. Sin embargo, actualmente el módulo de control se aborda desde la técnica robusta de MPC,

el cual se encarga de realizar la predicción de la dinámica del vehículo manteniendo total manejo de las restricciones de control, en fin, de estimar la decisión a tomar en función de entender el estado futuro del vehículo. Por lo que, en función de las necesidades explicadas anteriormente, este modelo representa la técnica de optimización actual más eficiente, como se es tomado en cuenta en el artículo "*Trajectory Optimization for Autonomous Overtaking with Visibility Maximization*", en el que se presenta la generación de una trayectoria a través del módulo de control MPC para evadir obstáculos estáticos en un ambiente urbano dinámico [23].

2.2. Control predictivo por modelo

A través de los años, los sistemas de control utilizados en la industria han cambiado de manera drástica, para permitir comportamientos más complejos y dinámicos. El control MPC permite implementar estos comportamientos, ya que este control lleva años de investigación y desarrollo enfocándose en las estrategias para aplicaciones específicas [9].

El control MPC es un algoritmo de control retroalimentado que usa un modelo para realizar predicciones sobre las salidas futuras en un proceso. El MPC utiliza un proceso iterativo de optimización, para realizar las predicciones de los estados futuros, mientras se manipulan las entradas, por lo que se necesita un modelo dinámico. Este control permite un manejo de sistemas que posean múltiples entradas y múltiples salidas que tengan interacciones entre sí, además, de que la implementación en este tipo de sistemas MIMO es bastante ligera, ya que se puede implementar un control que tenga en cuenta todas las ya mencionadas interacciones de una manera simultánea [9]. Una ventaja notable de este tipo de control, es que permite explotar la dinámica de la planta en su totalidad, ya que como se mencionó anteriormente este tipo de control explora la mayoría de las opciones disponibles en la entrada, a través de algoritmos de optimización. Otra ventaja de este tipo de control, es que permite el uso de restricciones, por lo que destaca en sistemas como el procesamiento de comida, robots, y en sistemas de navegación. En este último sistema se destaca este control ya que este permite la optimización de la trayectoria de cualquier vehículo, además de que al hacer uso de las restricciones se puede controlar de manera correcta la velocidad y la distancia mínima que se debe tener con cualquier objeto en el entorno, por lo que se puede garantizar un viaje seguro. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que en una implementación para sistemas con muchas variables de entrada y salida, dicha implementación debe contar con un procesador muy potente y con mucho espacio de memoria, para un correcto funcionamiento, esto debido a los cálculos iterativos en cada instante de tiempo, por lo que se utilizan diferentes métodos para solventar este problema, entre ellos

está, el arranque en caliente, uso de una barrera logarítmica o el uso de métodos de optimización eficientes [24].

En cuestión de optimización de trayectorias, en una primera instancia, se realiza una aproximación a la investigación denominada *"Path Planning and Tracking for Vehicle Collision Avoidance Based on Model Predictive Control With Multiconstraints"* [25] la cual realiza un estudio para el desarrollo de un marco de seguimiento y planificación de rutas a través de un controlador MPC para vehículos autónomos, contemplando escenarios de elevada concurrencia vehicular, así como de alta tasa de accidentes. De igual forma, así como se ha mencionado, una de las grandes ventajas que ofrece la implementación de este tipo de modelo, destaca el control de velocidad, es por esta razón, que en el artículo de 2016 por Xinxin Du, Kyaw Ko Ko Htet, y Kok Kiong Tan denominado como *"Development of a Genetic-Algorithm-Based Nonlinear Model Predictive Control Scheme on Velocity and Steering of Autonomous Vehicles"* [26] se implementa un control MPC para control de velocidad y dirección simultaneo de un vehículo autónomo, propuesto a través de un modelo estructurado sencillo, eficaz y preciso, en función de garantizar la comodidad y seguridad de los pasajeros del mismo.

Algo semejante ocurre con el estudio realizado por Pedro F. Lima, Mattias Nilsson, Marco Trincavelli, Jonas Martensson, y Bo Wahlberg denominado *"Spatial Model Predictive Control for Smooth and Accurate Steering of an Autonomous Truck"* [27] en el cual se encargan de desarrollar una estrategia de control lateral para un vehículo autónomo pesado, en este caso un camión de carga a través de un MPC suave para regular y reducir daños en los componentes de dirección del vehículo, así como para establecer rutas de trayectoria de referencia seguras y precisas. Finalmente, teniendo en consideración la cuestión de la capacidad de manejo y regulación que presenta el modelo en función de realizar control simultaneo de diversas funcionalidades del carro, se tiene que en el artículo denominado *"Combined Speed and Steering Control in High-Speed Autonomous Ground Vehicles for Obstacle Avoidance Using Model Predictive Control"* [28] por Jiechao Liu, Paramsothy Jayakumar, Jeffrey L. Stein, y Tulga Ersal se realiza un control a altas velocidades, dirección y ángulo de navegación, así como de optimización de trayectoria y evasión de obstáculos del vehículo por medio de un MPC suave en función de la búsqueda de algoritmos de control que aseguren la precisión y rendimiento óptimo de este en todo momento.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Cinemática directa

La cinemática directa determina la posición del vehículo X , Y , a partir de la velocidad y el ángulo del volante del mismo [29]. Esta se divide en un modelo lineal o no lineal, dependiente del objeto de estudio. Para el modelado del vehículo se presenta el modelo bicicleta que describe el comportamiento del vehículo, simplificando el cuerpo del carro uniendo las dos llantas delanteras, y las dos llantas traseras.

3.1.1. Modelo cinemático no lineal (Modelo bicicleta)

El modelo de la bicicleta consiste en la fusión de las ruedas laterales (derecha e izquierda) del vehículo, tanto en la parte frontal como trasera de este. A partir de esto se puede controlar la dirección de la rueda conforme al rumbo del vehículo. Para poder realizar este modelo, se sigue el siguiente esquemático.

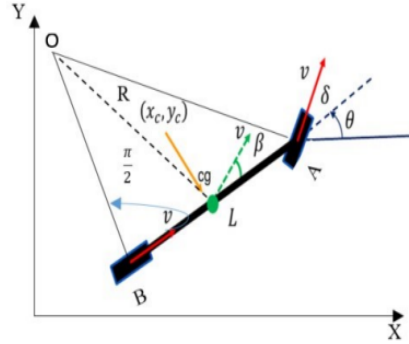


FIGURA 1: Esquemático del modelo cinemático del vehículo [13]

En este modelo se realiza un análisis utilizando dos puntos de referencia x_c y y_c los cuales corresponden al centro de gravedad del vehículo CG . El vector de velocidad v apunta a la misma dirección que la rueda delantera y tiene un ángulo de deslizamiento β . El ángulo de dirección de la rueda delantera δ se mide con respecto a la dirección longitudinal del vehículo.

Sin embargo, en este modelo, solo se dirigen las ruedas delanteras, asumiendo que no existen laterales o algún movimiento longitudinal de las ruedas, con ángulos de deslizamiento de 0. Entre otras notaciones se tiene, la longitud desde CG hasta las ruedas traseras se denota l_r , mientras que la longitud desde CG hasta las ruedas delanteras se denota l_f y la suma entre estas dos longitudes corresponde a la longitud total del vehículo L .

Otro de los aspectos a tener en cuenta es que el eje de coordenadas X, Y corresponde al marco inercial (No hay aceleración), θ corresponde al ángulo de “guiñada” (Giro del vehículo sobre su eje vertical) y $\dot{\theta}$ corresponde a la velocidad de giro o guiñada.

Teniendo en cuenta dicha notación, se inicia con el desarrollo matemático. Inicialmente se puede definir el ángulo de rumbo del vehículo como:

$$\gamma = \theta + \beta \quad (3.1)$$

Aplicando la regla del seno:

$$\frac{\text{sen}(\delta - \beta)}{l_f} = \frac{\text{sen}(\frac{\pi}{2} - \delta)}{R} \quad (3.2)$$

Donde R corresponde al radio de la ruta del vehículo. De igual forma aplicando la regla del seno al segundo triángulo:

$$\frac{\text{sen}(\beta)}{l_R} = \frac{\text{sen}(\frac{\pi}{2})}{R} = \frac{1}{R} \quad (3.3)$$

$$\frac{\text{sen}(\delta)\cos(\beta) - \text{sen}(\beta)\cos(\delta)}{l_f} = \frac{\cos(\delta)}{R} \quad (3.4)$$

Para linealizar la ecuación 3.4 se multiplica esta por $\frac{l_f}{\cos(\delta)}$

$$(\tan(\delta)\cos(\beta) - \text{sen}(\beta)) = \frac{l_f}{R} * l_r \quad (3.5)$$

$$\text{sen}(\beta) = \frac{l_r}{R} \quad (3.6)$$

$$\tan(\delta)\cos(\beta) = \frac{l_f + l_r}{R} \quad (3.7)$$

Asumiendo que el radio de la ruta del vehículo cambiara en pequeñas variaciones a una baja velocidad, el cambio de orientación en el vehículo es equivalente a la velocidad angular.

$$\dot{\theta} = \frac{v}{R} \quad (3.8)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v\cos(\beta)}{l_f + l_r} \tan(\delta) \quad (3.9)$$

De acuerdo al eje de coordenadas, se puede deducir que:

$$\dot{X} = v\cos(\theta + \beta) \quad (3.10)$$

$$\dot{Y} = v\text{sen}(\theta + \beta) \quad (3.11)$$

De esta forma se puede definir que las ecuaciones que definen el movimiento del vehículo corresponden a 3.9, 3.10 y 3.11 con un ángulo de deslizamiento obtenido en 3.5 y 3.6.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{l_r \tan(\delta)}{l_f + l_r}\right) \quad (3.12)$$

Modelo el cual se puede simplificar a partir de las siguientes suposiciones:

- El vehículo viaja a bajas velocidades y a su vez mantiene una velocidad longitudinal constante.

- No hay ángulo de deslizamiento de las ruedas, así como fuerzas externas actuando sobre estas.
- La dirección solo depende de las ruedas delanteras.

De esta forma se puede reescribir:

$$\dot{X} = v \cos(\theta) \quad (3.13)$$

$$\dot{Y} = v \sin(\theta) \quad (3.14)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v \tan(\theta)}{l_r + l_f} \quad (3.15)$$

A partir del modelo presentado en las ecuaciones 3.13 a 3.15, se infiere que el cambio de orientación es continuo y no lineal, por lo que se necesitaría desarrollar un modelo no lineal del MPC. Sin embargo, en función de evitar el desarrollo de este algoritmo más complejo, se linealiza el modelo alrededor del punto de operación t_0 (Modelo en espacio de estados de la linealización jacobiana), cuando el vehículo se encuentra detenido en el origen, con una velocidad constante.

$$\dot{X} = -v\theta.\sin(\theta_0) + v.\cos(\theta_0) \quad (3.16)$$

$$\dot{Y} = v\theta.\cos(\theta_0) + v.\sin(\theta_0) \quad (3.17)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v * (\sin(\theta_0) + \cos(\theta_0) * \theta)}{l} \quad (3.18)$$

Finalmente, construyendo el espacio de estados del vehículo, se plantean las siguientes matrices:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$B = \begin{bmatrix} (-\theta * \sin(\theta_0) + \cos(\theta_0)) & 0 \\ (\theta * \cos(\theta_0) + \sin(\theta_0) * \phi_0) & 0 \\ (\sin(\theta_0) + \cos(\theta_0) * \theta_i)/l & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Construyendo el espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (-\theta * \text{sen}(\theta_0) + \cos(\theta_0)) & 0 \\ (\theta * \cos(\theta_0) + \text{sen}(\theta_0 + \phi_0)) & 0 \\ (\text{sen}(\theta_0) + \cos(\theta_0) * \theta_i)/l & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v \\ \phi \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.1.2. Cinemática inversa

La cinemática inversa determina la velocidad que debe tener cada una de las llantas, para que el vehículo se desplace a cierta velocidad X, Y. Las ecuaciones 3.13 a 3.15 describen este comportamiento.

El modelo cinemático inverso del vehículo, se deriva el vector de movimiento de un robot móvil con tracción en las cuatro ruedas. Para desarrollar el diseño de control de navegación, en una primera instancia se debe realizar la contextualización al modelo de la planta que describe el comportamiento de la misma en el momento de realizar curvas y giros. Es decir, se debe desarrollar la cinemática inversa de este.

Desarrollar la cinemática inversa requiere expandir el modelo Ackerman a un modelo 4 ruedas, con el fin de establecer el comportamiento en velocidad de cada una de las ruedas, por lo que para hacer esto, se plantea:

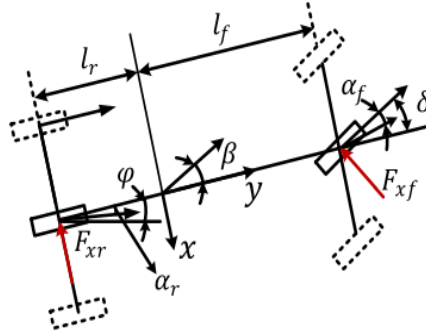


FIGURA 2: Modelo 4 ruedas [30]

De esta forma se puede establecer las siguientes ecuaciones:

$$r_{ri} = \sqrt{R^2 + l_r^2 - l_a} \quad (3.25)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{l_a + r_{ri}}{l_r}\right) \quad (3.26)$$

$$r_{ro} = r_{ri} + l_a + l_b \quad (3.27)$$

$$r_{fi} = \sqrt{r_{ri}^2 + L^2} \quad (3.28)$$

$$r_{fo} = \sqrt{(r_{ri} + l_a + l_b)^2 + L^2} \quad (3.29)$$

$$\delta_{fi} = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{r_{ri}}{L}\right) \quad (3.30)$$

$$\delta_{fo} = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{r_{ri} + l_a + l_b}{L}\right) \quad (3.31)$$

Donde l_a y l_b corresponden al ancho del vehículo y de resto la notación de las variables de la planta continua de la misma forma. Ahora bien, teniendo en cuenta el ángulo de la curva que debe tomar la planta, así como la fuerza ejercida sobre las llantas, se debe plantear un modelo diferencial de la velocidad rotacional de las ruedas, de la siguiente forma:

Diferencial rueda izquierda delantera:

$$\omega_{fo} = \frac{r_{fo}}{r_w} - \frac{V_x + V_y}{R} \quad (3.32)$$

Diferencial rueda derecha delantera:

$$\omega_{fi} = \frac{r_{fi}}{r_w} - \frac{V_x + V_y}{R} \quad (3.33)$$

Diferencial rueda izquierda trasera:

$$\omega_{ro} = \frac{r_{ro}}{r_w} - \frac{V_x + V_y}{R} \quad (3.34)$$

Diferencial rueda derecha trasera:

$$\omega_{ri} = \frac{r_{ri}}{r_w} - \frac{V_x + V_y}{R} \quad (3.35)$$

3.2. Control MPC

En consideración de que los vehículos autónomos deben contar con la capacidad de tomar decisiones en cualquier ambiente y situación, permaneciendo dentro de los límites de carretera, se introduce el enfoque de la estrategia de control MPC para realizar el diseño de un control de seguimiento de trayectoria capturando la dinámica del vehículo en tiempo real, operando sobre ella y a su vez permitiendo manejar múltiples variables considerando restricciones relacionadas a la capacidad del vehículo y su ambiente.

Para dar inicio con el diseño de este controlador, se discretiza el modelo del vehículo encontrado anteriormente a través del método de Euler.

$$X(k+1) = X_k + \Delta T \cdot f_k(X_k, u_k) = f^{dt}(X_k, u_k) \quad (3.36)$$

Donde ΔT corresponde al tiempo de muestreo. A partir del estado actual X_0 , la estrategia de control busca la secuencia de control óptima u_k a partir del horizonte de predicciones, resolviendo el siguiente problema de optimización:

$$\text{Minimise } J_{mpc}([X_k]_k^N, [u_k]) \quad (3.37)$$

$$\text{Sujeto : } X_{k+1} - f^{dt}(X_k, u_k) = 0 \quad (3.38)$$

$$|u_k| - u_{sat} \leq 0 \quad (3.39)$$

$$|\psi| - \psi_{max} \leq 0 \quad (3.40)$$

Donde k es el paso del tiempo dentro del horizonte de predicciones y este va hasta el último dato del mismo $[N]$. De igual forma u_{sat} corresponde a la entrada de control saturada. La ecuación 3.32 corresponde a las restricciones de igualdad del vehículo, mientras que las ecuaciones 3.33 y

3.34 a las restricciones de desigualdad de la entrada de control y tasa de giro. La tasa de giro debe estabilizarse definiendo la tasa máxima como:

$$|\psi_k| \leq \psi_{max} = \frac{\mu g}{V_x} \quad (3.41)$$

Los parámetros relacionados en la ecuación 3.35 corresponden a los coeficientes de fricción, gravedad y velocidad longitudinal (μ, g, V_x) . De esta forma se puede definir la función de costo como:

$$J_{mpc} = \frac{1}{2} \Delta X_k^T P \Delta X_k + \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{2} \Delta X_k^T Q \Delta X_k + \frac{1}{2} u_k^T R u_k \quad (3.42)$$

Donde ΔX_k es la desviación del estado actual con respecto a la referencia y u_k a la entrada de control. P y Q son matrices semi definidas positivas y R es una matriz de ponderación constante.

Sin embargo, se realiza un cambio sobre el modelo MPC a trabajar por el modelo adaptativo (A-MPC), ya que este permite manejar la dinámica del sistema de mejor forma, en suposición de utilizar el acelerador como la entrada y la velocidad como un estado. En este caso, las variables a controlar corresponden al acelerador y ángulo de dirección, mientras que las observadas corresponden a las posiciones en x, y del vehículo, la dirección y la velocidad del mismo. Ahora bien, para que el control sea capaz de seguir estas variables, estas deben tener un peso, el cual no tiene justificación física, pero que sirve como el punto de control para realizar los ajustes necesarios. De forma que:

$$J = \sum_{k=1}^N W_x |x_t - x_r|^2 + W_y |y_t - y_r|^2 + W_v |v_t - v_r|^2 + W_\theta |\theta_t - \theta_r|^2 \quad (3.43)$$

Donde la trayectoria de referencia se da desde la posición inicial del vehículo hasta el punto de destino, correspondiente frente al obstáculo en su carril. Dentro de estos puntos de trayectoria de referencia, el controlador solo observa los puntos de N más cercanos al horizonte de predicción con cada aumento de tiempo. A partir de esta información, el controlador se encarga de estimar la posición del vehículo para los puntos futuros y los utiliza para predecir el error en el seguimiento de referencia en estos estados.

3.3. Optimización matemática [31, 32, 33]

Un problema de optimización tiene la forma:

$$\text{Minimize} : f_0(x) \quad (3.44)$$

$$\text{Sujeto} : f_i(x) \leq b_i, i = 1, \dots, m \quad (3.45)$$

Donde x es el vector conocido como variable de optimización, la función f_0 es la función objetivo, las funciones f_i corresponden a las desigualdades o funciones de restricción y las constantes $b_1, \dots, b_m$ son las restricciones o límites. Un vector x^* se le denomina como solución del problema, si tiene el valor objetivo más pequeño posible que cumpla las restricciones de funcionamiento.

La optimización matemática se divide en dos clases, caracterizada por las formas de las funciones objetivo y de restricción. Se denomina programación lineal si las funciones f_0, f_i son lineales, de tal forma que:

$$f_i(\alpha x + \beta y) = \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad (3.46)$$

Para todas las soluciones donde x, y sean vectores pertenecientes a los reales y α, β sean números reales. Si las soluciones no son lineales, se denomina programación no lineal. De igual forma, si las funciones objetivo y de restricción cumplen o no la desigualdad a la que se encuentran sujetas, se les denomina como problemas de optimización convexo y no convexo respectivamente. En el caso de solución del control MPC, se define como un problema de optimización convexo, donde debe cumplir:

$$f_i(\alpha x + \beta y) \leq \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad (3.47)$$

Donde:

$$x, y \in R^n \quad (3.48)$$

$$\alpha, \beta \in R \quad (3.49)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (3.50)$$

$$\alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (3.51)$$

3.3.1. Solución al problema de optimización no lineal convexo

Los métodos de solución de un problema de optimización son algoritmos que se dedican a calcular una solución precisa dada una instancia del problema, donde su eficacia depende de factores como: Las formas particulares de la función objetivo y de restricción, el número de variables y restricciones que se reflejan en su estructura (Cantidad de variables de las que depende la función de restricción).

Para un problema de optimización convexo no existe una fórmula analítica para resolverlo. Sin embargo, existen métodos muy eficaces para resolverlo, como el método de punto interior que resuelve el problema de las ecuaciones 3.38 y 3.39 con un número de operaciones que no supera el polinomio de las dimensiones del problema, ignorando cualquier estructura como la dispersión, donde la función de restricción depende de un número pequeño de variables. Donde cada paso se establece en el orden:

$$\max\{n^3, n^2m, F\} \quad (3.52)$$

Donde F es el costo de evaluar la primer y segunda derivada de las funciones objetivo y de restricción. De esta forma, este método es capaz de resolver problemas de optimización con cientos de variables y miles de restricciones, en pequeñas cantidades de tiempo. A pesar de esto, la solución a este tipo de problemas no es una ciencia consolidada, donde la solución del método de punto interior es un campo ampliamente estudiado, en busca de establecer una solución avanzada para problemas no lineales. Actualmente, los softwares de código abierto para optimización no lineal más potentes son Ipopt, KNITRO y LOQO.

- Ipopt: Implementa un método de filtro de búsqueda lineal de puntos interiores.
- KNITRO: Implementa un método de barrera de penalización de punto interior de región de confianza.
- LOQO: Implementa un método punto interior primal-dual no factible.

Para la solución del problema de optimización expuesto en la sección 3.2, se utiliza el software de código abierto Ipopt con el solucionador lineal MA27 de HSL Mathematical Software Library.

3.4. Planificador de rutas

3.4.1. Método de campos de fuerza virtual

El método de campo de fuerza virtual, es un método de planificación de rutas basado en la discreción del entorno, el cual está especialmente diseñado para evitar obstáculos en tiempo real con rapidez en robots móviles. El método permite un movimiento continuo y suave del vehículo ante la existencia de obstáculos imprevistos.

El método utiliza un modelo bidimensional cartesiano, guía de cuadrícula (C), para la representación de obstáculos. El algoritmo funciona de la siguiente manera: El vehículo se mueve en una ventana de celdas (x, y) acompañado de un campo de seguridad (SF), el cual se le conoce como región activa, cualquier objeto que se encuentre en esta región se denomina “celda activa”, cada celda activa ejerce una fuerza repulsiva virtual F_r hacia el robot, la cual se encarga de direccionar el objeto en contra de la celda. La magnitud de esta fuerza es inversamente proporcional a la distancia entre la celda de posicionamiento del vehículo y la celda donde se encuentre la celda [34].

$$F_r = \frac{F_{cr} W C_{i,j}}{d(i,j)} \left(\frac{x_i - x_o}{d(i,j)} \hat{x} \frac{y_i - y_o}{d(i,j)} \hat{y} \right) \quad (3.53)$$

Donde F_{cr} es constante de fuerza de repulsión, $d(i,j)$ es la distancia entre el robot y la celda activa, $C_{i,j}$ es el valor de certeza de la celda activa, W es el ancho del robot, x_i, y_i son las coordenadas de la celda activa y x_o, y_o son las coordenadas actuales del robot.

En el caso del punto al cual se quiere llegar se le asigna una fuerza de atracción F_t , la cual se encarga de atraer al vehículo hasta el objetivo.

$$F_t = F_{ct} \left(\frac{x_t - x_o}{d_t} \hat{x} \frac{y_t - y_o}{d_t} \hat{y} \right) \quad (3.54)$$

Donde F_{ct} es la constante de fuerza de atracción, d_t es la distancia entre el robot y el objetivo y x_t, y_t son las coordenadas del objetivo.

La suma de los vectores F_r y F_t se le conoce como vector de fuerza resultante R .

$$R = F_r + F_t \quad (3.55)$$

Este vector es el que se toma como ruta a seguir.

3.4.2. Método “Follow the gap”

El método FGM se basa en un algoritmo geométrico para evitar obstáculos en el cual la seguridad es el factor más importante. Este algoritmo determina el ángulo de dirección final utilizando el espacio más grande, y la distancia con los obstáculos. Se utiliza un coeficiente de seguridad el cual afecta la distancia entre el robot y los obstáculos durante el recorrido.

El primer paso para el cálculo de la trayectoria, es encontrar los espacios existentes dentro del campo de visión. A partir de esto, se determina el espacio más amplio a partir de los ángulos de los bordes. El segundo paso es, calcular el punto medio del espacio, con esto se obtiene el ángulo de meta el cual se encuentra entre el punto de meta y la orientación del robot. Por último, se determina el ángulo de rumbo final utilizando la ecuación 3.56.

$$\phi_{final} = \frac{\frac{\alpha}{d_{min}} \phi_{gap_c} + \phi_{goal}}{\frac{\alpha}{d_{min}} + 1} \quad (3.56)$$

El ángulo de rumbo final, el ángulo del punto medio del espacio, el ángulo del punto de meta, la mínima distancia de los obstáculos y el coeficiente de seguridad son representados como ϕ_{final} , ϕ_{gap_c} , ϕ_{goal} , d_{min} y α respectivamente.

Cómo se observa, la ecuación contiene un factor que determina la distancia mínima que se debe tener con los obstáculos, y un coeficiente de seguridad. El propósito de estos dos parámetros, es mantener un campo de seguridad.

3.5. Sistema de localización global

El sistema de localización que se utilizará para la selección de destino y para el seguimiento del vehículo es el Lighthouse positioning deck. Este sistema consta de 2 Lighthouse V2 base station, y 1 Positioning deck.

Dentro de su hoja de datos, se tienen las siguientes características:

TABLA 1: Especificaciones LightHouse Base Station 2.0

Especificación	Medida
Alcance máximo	5 metro
Base station	Tornillo de montaje de 1/4' en la parte inferior y posterior de la estación base. Peso: 266g Tamaño (Ancho x Alto x Largo): 80x74x63mm
Adaptador de corriente	Cuerda de 3 metros Adaptadores de enchufe para EU/US/UK/JP/AU Peso: 240g Tamaño (An. x Al. x Pr.): 40x64x34 mm (sin cable ni enchufe)
Montaje en pared	Altura: 10cm Diámetro base: 5,7 cm Peso: 44g

El Lighthouse deck tiene 4 receptores los cuales se encargan de obtener la posición completa del dispositivo. Esta posición, se trasmite a través de comunicación por radio, y se recibe con la antena de radio Crazyradio PA, conectada a la estación central.

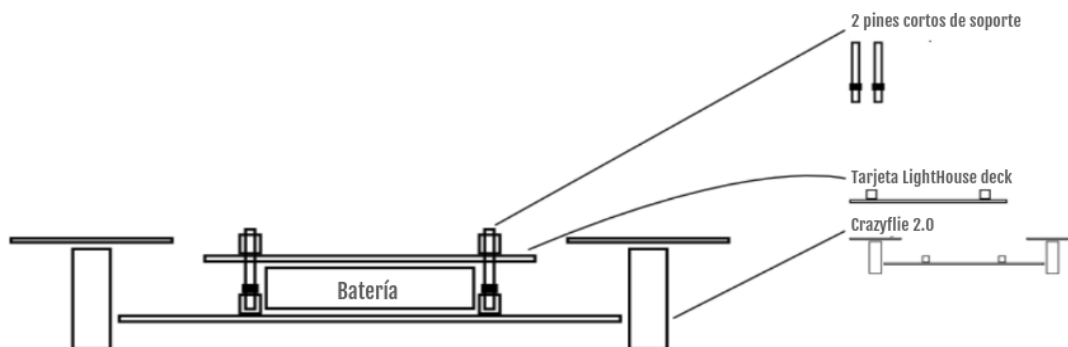


FIGURA 3: Montaje crazyflie con LightHouse Deck

Sin embargo, el sistema debe contar con un sistema de coordenadas de referencia. Para esto, se hace uso de las Lighthouse V2 base station las cuales a partir del lugar donde sean colocadas y su orientación, se puede obtener el sistema de coordenadas de referencia, y el rango de movimiento en todos los ejes, que como se evidencia en la anterior tabla, es de 5 metros.

Por otra parte, las Base Station. Utiliza barridos alternos de láseres infrarrojos horizontales y verticales para localizar el Lighthouse deck a partir de los pequeños receptores comunicados a los sensores del mismo. Esto se hace esencialmente a partir de dos ángulos que describen la dirección desde la estación hasta cada sensor. El sistema requiere de dos piezas de información para poder estimar su posición. El primero son los datos de calibración para todas cada Base Station. La segunda pieza, son los datos de geometría. Estos últimos describen la posición y orientación de las bases y son necesarios para relacionar los ángulos medidos con el sistema de referencia global. El sistema completo, integra todos los datos para determinar la rotación del dispositivo y su posición en un espacio 3D.

Capítulo 4

Diseño e implementación

En una primera instancia se trabajará con la plataforma TRAXXAS slash 4x4 del fabricante F1TENTH, que cuenta ya con el sistema mecánico adaptado de tal forma que permita el fácil movimiento del vehículo, así como la capacidad de adaptarse a otros tipos de manipuladores robóticos. La implementación de la plataforma F1TENTH se divide en tres partes: mecánica, electrónica y software.

4.1. Descripción mecánica

La plataforma se encuentra diseñada en aluminio anodizado ya que uno de los principales objetivos de esta es ser versátil, resistente y liviana. Su estructura corresponde a una métrica de 0.568x0.296 m, distribuida como se muestra en la Figura 4.

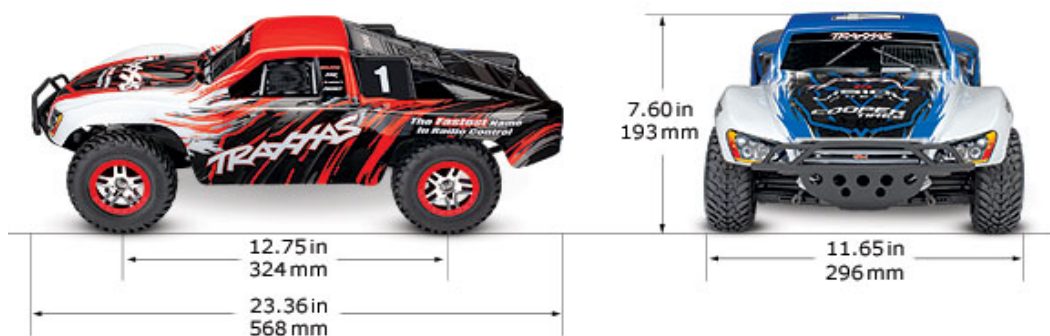


FIGURA 4: Distribución estructural de la plataforma [35]

Plataforma que cuenta con las especificaciones dadas en la Tabla 7.

TABLA 2: Características mecánicas de la plataforma TRAXXAS slash 4x4 [35]

Característica	Medida
Longitud	22,36 in (0,568m)
Tracción delantera	11,65 in (0,296m)
Tracción trasera	11,65 in (0,296m)
Distancia al suelo	2,83 in (0,072m)
Peso	2,64 Kg
Altura	7,60 in (0,193m)
Distancia entre ejes	12,75 in (0,324m)
Diámetro del neumático	4,31 in (0,110m)
Diámetro de la rueda	2,2 in (0,056m) Exterior 3 in (0,076m) Interior

De esta forma, el diseño final de la plataforma se divide en 2 niveles, el chasis inferior donde se encuentra la powerboard Talentcell Powerbank, el motor de escobillas Velineon 3500 y el servomotor encargado de la dirección de la tracción de la plataforma. A su vez, en el chasis superior se encuentra toda la adaptación electrónica como el control de velocidad VESC 6MkV, la tarjeta de cómputo Intel Apollo Lake J4205 así como el LiDAR D435, como se observa en la Figura 5.



FIGURA 5: TRAXXAS slash 4x4 construido. Fuente: Autor

4.1.1. Descripción electrónica

La distribución electrónica para la plataforma se divide en 2, electrónica de alimentación y electrónica de procesamiento. La distribución de alimentación consiste en una powerbank talentcell de 12V a 6000mAh que alimenta el motor principal Velanion 3500, control de velocidad VESC 6MkV y la tarjeta de cómputo Intel Apollo Lake J4205. De igual forma, la distribución de procesamiento corresponde a: La tarjeta de cómputo que se encarga de ejecutar el algoritmo de navegación para el funcionamiento de la plataforma, el control de velocidad que se encarga de regular la velocidad del motor principal y finalmente un LiDAR de profundidad RealSense D435.

De esta forma, la conexión entre estos elementos se especifica en la Figura 6.

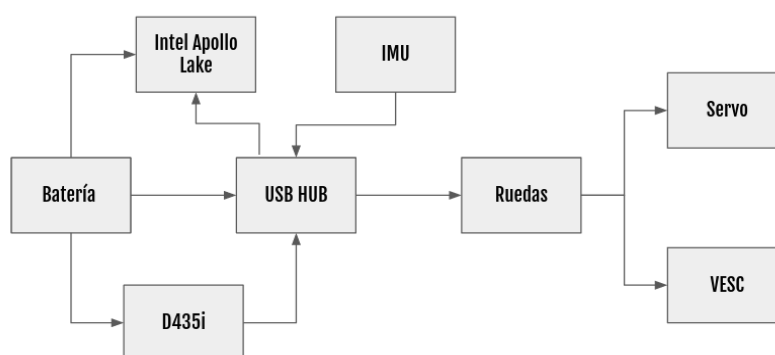


FIGURA 6: Diagrama de bloques componentes TRAXXAS slash 4x4. Fuente: Autor

Cámara Intel® RealSense D435

El LiDAR que se muestra en la Figura 7 corresponde al Intel® RealSense™ LiDAR Camera D435 que tiene un alcance de profundidad mínimo de 0.105m y máximo de 10m con una resolución de 1280x720 pixeles de profundidad. De igual forma, este cuenta con un módulo RGB con una resolución de 1920x1080 a una velocidad de 30 fps, adaptada con una unidad de medición inercial (IMU) que permite hasta 90 fps. Debido a su amplio campo de visión, así como su tecnología periférica, se convierte en una buena opción para el reconocimiento de objetos y navegación [36].

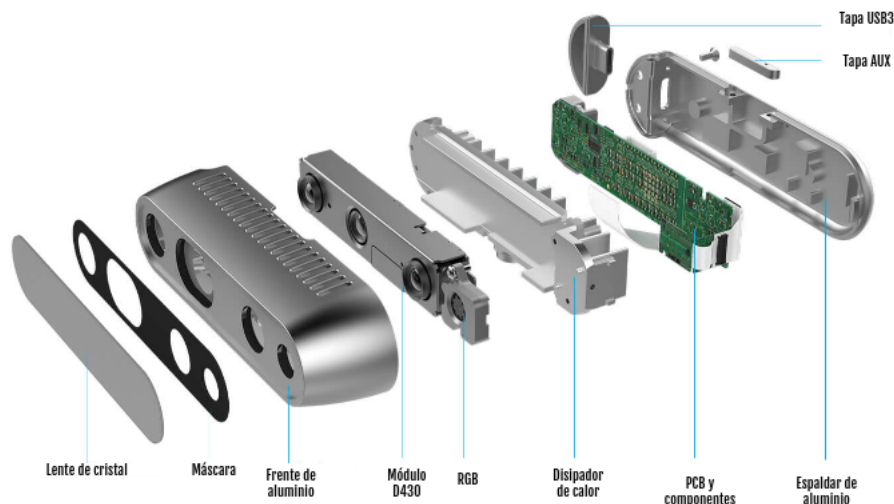


FIGURA 7: Cámara Intel® D435, Adaptado de [36].

VESC 6MkV

El controlador que se muestra en la Figura 8 corresponde al controlador de velocidad VESC 6MkV de 3 fases con filtros ajustables de tensión y de corriente, que cuenta con sensores de par completo, desde cero RPM, HFI (Inyección de alta frecuencia) hasta sensores de control de posición. De igual forma, cuenta con una nueva IMU con adaptación SPI (Interfaz periférica serial), equipado con giroscopio, acelerómetro y una brújula, capaz de entregar hasta 60V a 120A.

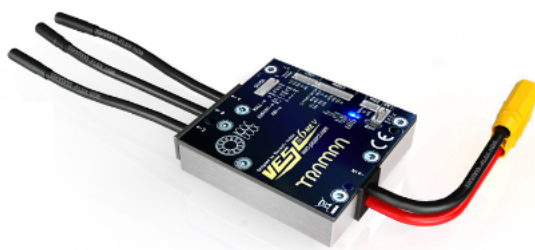


FIGURA 8: Controlador de velocidad VESC 6MkV, Adaptado de [37].

Computador embebido Intel Apollo Lake J4205

El computador embebido es la tarjeta Intel® NUC de la Figura 9, cuenta con un procesador i5 de undecima generación, 4 puertos USB 3.0, 2 puertos HDMI, 500 Gb de disco sólido, 64 Gb de memoria RAM. Con dichas especificaciones, la tarjeta cuenta con condiciones más que necesarias

para llevar a cabo el procesamiento para llevar a cabo el sistema de navegación y control del vehículo [38].



FIGURA 9: Computador Embebido Intel® NUC [38].

4.2. Configuración de software

4.2.1. Configuración VESC

Para el funcionamiento de los motores y la transmisión del vehículo, es necesario configurar el VESC. Para esto, se hace uso de la herramienta VESC Tool.

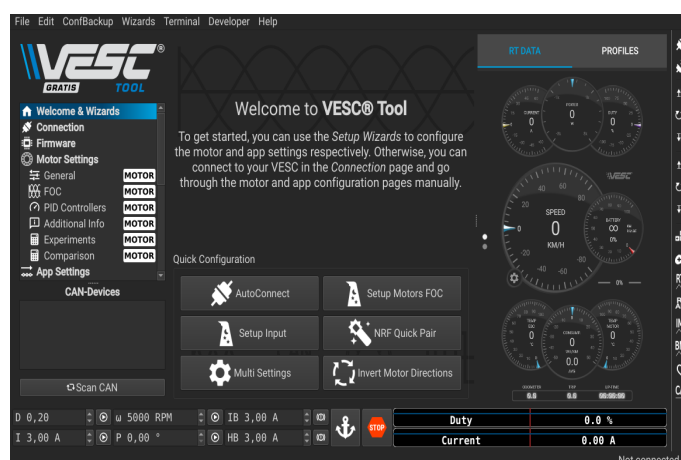


FIGURA 10: Página inicial VESC Tool. Fuente: Autor

Para la configuración de los motores, se utiliza la configuración prediseñada obtenida de la página oficial de desarrollo de F1Tenth. En esta configuración, se definen los valores de resistencias e inductancia de los motores. Sin embargo, la configuración del controlador PID, debe hacerse de manera manual, debido al arranque que se requiere para el uso de navegación automática.

TABLA 3: Configuración del control PID. Fuente: Autor

Speed controller	
Speed PID Kp	0,00700
Speed PID Ki	0,00003
Speed PID Kd	0,00080
Speed PID Kd Filter	0,100
Minimum ERPM	500,0

En la Tabla 3, se muestra la configuración de los valores del controlador PID seleccionados. Estos valores se obtuvieron a partir de una serie de pruebas de arranque, en las cuales se tomaba en cuenta el tiempo que se tomaban los motores en arrancar.

Por otra parte, se activó el uso del servo motor, para el control de la transmisión del vehículo, y se definió la velocidad máxima del mismo. En las Tablas 4 y 5 se muestra dichas configuraciones.

TABLA 4: Configuración APP. Fuente: Autor

Configuración	Valor
Timeout	1000 ms
Timeout brake current	0,00 A
Can status rate	50 Hz
Can baud rate	500 k
UAVCAN Raw RPM max	50000

TABLA 5: Configuración RPM. Fuente: Autor

Configuración	Valor
Max ERPM	189,00
Max ERPM Reverse	-189,00
ERPM Limit start	80 %

La velocidad máxima del vehículo se definió en 189 ERPM, lo que es igual a 3 m/s.

4.2.2. Configuración del espacio de trabajo y modo de navegación autónoma

4.2.2.1. ROS Setup

Para el control del vehículo, se utiliza un espacio de trabajo en ROS, el cual se encarga de comunicarse con el control de los motores y el LiDAR, esto con el fin de conducir el vehículo. Primeramente, se clona el repositorio del F1TENTH para la simulación y navegación de la plataforma.

```
git clone https://github.com/f1tenth/f1tenth_system
```

Posteriormente se crea una subcarpeta que servirá de espacio de trabajo.

```
mkdir -p f1tenth_ws/src
cp -r f1tenth_system f1tenth_ws/src/
```

Se construye y configura el paquete de trabajo de ROS

```
catkin_make
source devel/setup.bash
```

4.2.2.2. Udev rules

Cuando se conecta el controlador de velocidad, así como el LiDAR, Linux les asigna un nombre de la forma `/dev/ttyACMx` donde `x` es un indicador en el orden que fueron conectados. Es por esto que se hace uso de la herramienta `udev` que permite asignar un nombre virtual a cada dispositivo basado en el nombre del proveedor y los identificadores de producto. Inicialmente se abre desde raíz `/etc/udev/rules.d/99-vesc.rules` en un archivo de texto y se inscribe la siguiente regla para el uso del controlador de velocidad

```
KERNEL=="ttyACM[0-9]*", ACTION=="add"
ATTRS{idVendor}=="0483", ATTRS{idProduct}=="5740",
MODE="0666", GROUP="dialout", SYMLINK+="sensors/vesc"
```

Posteriormente se activan las reglas como:

```
sudo udevadm control --reload-rules
sudo udevadm trigger
```

Una vez conectado el controlador de velocidad, así como configurada su respectiva regla, se inicializa el espacio de trabajo.

```
source /opt/ros/foxy/setup.bash
source /f1tenth_ws/install/setup.bash
```

De esta forma se puede lanzar el nodo de navegación de la plataforma, el cual iniciara los controladores del VESC, LiDAR y Joystick, así como todos los paquetes necesarios para conducir el vehículo:

```
ros2 launch f1tenth_stack bringup_launch.py
```

Una vez lanzado el nodo, se abren los siguientes tópicos.

TABLA 6: Tópicos del nodo de navegación. Fuente: Autor

Tópico	Descripción
/scan	Publica los mensajes recibidos por el LaserScan del LiDAR
/odom	Publica los mensajes recibidos de la odometría del VESC
/sensors/imu/raw	Publica los mensajes recibidos por la IMU del VESC
/sensors/core	Publica los mensajes recibidos de telemetría del VESC
/drive	Encargado de la conducción del vehículo al recibir los datos de velocidad y ángulo de dirección

En la Figura 11 se aprecia de manera gráfica las relaciones existentes entre los nodos necesarias para el funcionamiento de la navegación del vehículo.

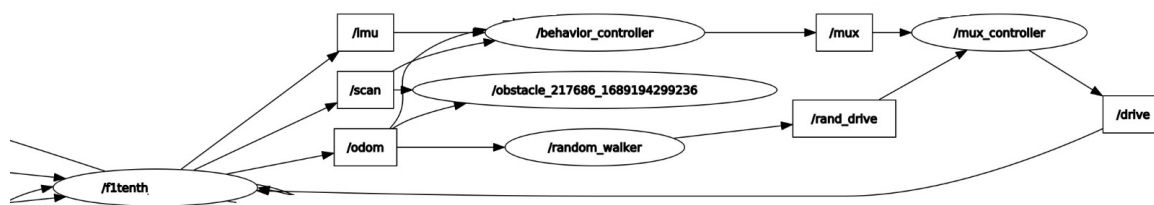


FIGURA 11: Diagrama de nodos para navegación. Fuente: Autor

Capítulo 5

Diseño y metodología

El desarrollo del proyecto es segmentado en una etapa global en función de garantizar el cumplimiento del objetivo general anteriormente propuesto, fundamentado en el modelo de investigación aplicada. En dicha etapa se abarcará el formulado matemático utilizado para el diseño del algoritmo de navegación, así como la simulación del mismo.

5.1. Algoritmo de navegación

El desarrollo del algoritmo consiste en el diseño de la estrategia de control MPC y el generador de trayectorias, de forma que el funcionamiento conjunto de estos conforme el sistema de navegación del vehículo. En función de establecer el paso a paso objetivo, se tiene en cuenta el modelo de diagrama de bloques de la Figura 12.

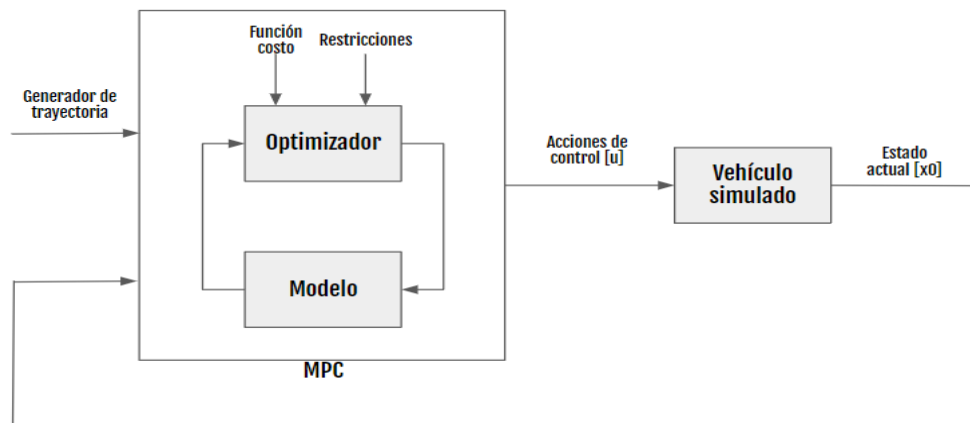


FIGURA 12: Diagrama de bloques arquitectura MPC. Fuente: Autor

De esta forma, de acuerdo al diagrama de bloques de la Figura 12, el único componente anteriormente explicado corresponde al modelo del vehículo en la sección 3.3.1, por lo que se hará continuación en esta sección de explicar los demás componentes del sistema.

5.1.1. Planeador de rutas

Para la implementación de un planeador de rutas, se utilizó la fusión de los métodos encontrados en la subsección planificador de rutas de la sección del marco teórico.

Del método de campos de fuerza virtual se utilizan los conceptos de fuerza de atracción y fuerza de repulsión. Sin embargo, este método se planteó a partir de discretizar el entorno, en este caso se propondrá un entorno continuo. Además, se propone utilizar la normalización de los vectores con el fin de variar la influencia de los mismos en el planeador de rutas a partir de los coeficientes de fuerza y el radio de la burbuja de seguridad. Por último, solo se utiliza un vector de repulsión, el cual está ligado al obstáculo más cercano del vehículo. A continuación, se muestra las ecuaciones planteadas con los ajustes propuestos.

$$F_r = F_{cr}(\frac{x_i - x_o}{d_o}\hat{x}, \frac{y_i - y_o}{d_o}\hat{y}) \quad (5.1)$$

$$F_t = F_{ct}(\frac{x_i - x_o}{d_g}\hat{x}, \frac{y_i - y_o}{d_g}\hat{y}) \quad (5.2)$$

Siendo d_o la distancia entre el objeto y el vehículo, y d_g la distancia entre la meta y el vehículo.

El vector resultante se encuentra de la misma manera que en la Ecuación 3.55

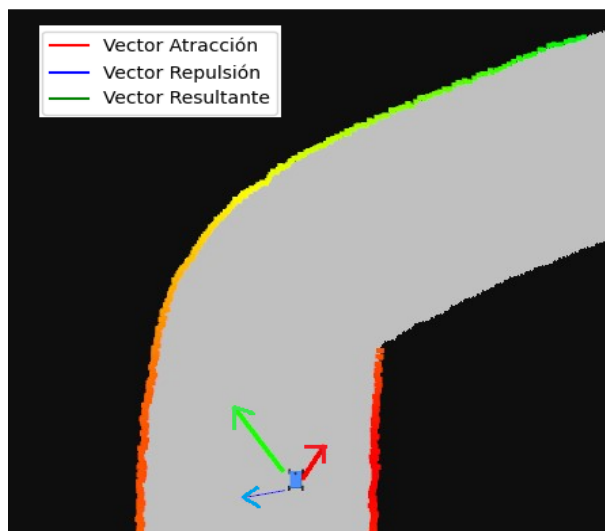


FIGURA 13: Ejemplo campos de fuerza. Fuente: Autor

En la Figura 13, se puede observar un ejemplo de funcionamiento de los campos de fuerza. El punto importante de esta figura, es que refleja en sí el comportamiento de las fuerzas, aunque la fuerza de atracción esta ligada a el punto objetivo, el camino a seguir no es una línea recta, debido a que el vector de repulsión atado al obstáculo más cercano se encarga de prevenir al vehículo de un posible choque.

En el caso del método FGM, se utiliza el algoritmo de obtención de meta. El cual, se calcula a partir de la posición promedio de que existen entre los puntos de la máxima discontinuidad hallada en el espacio.

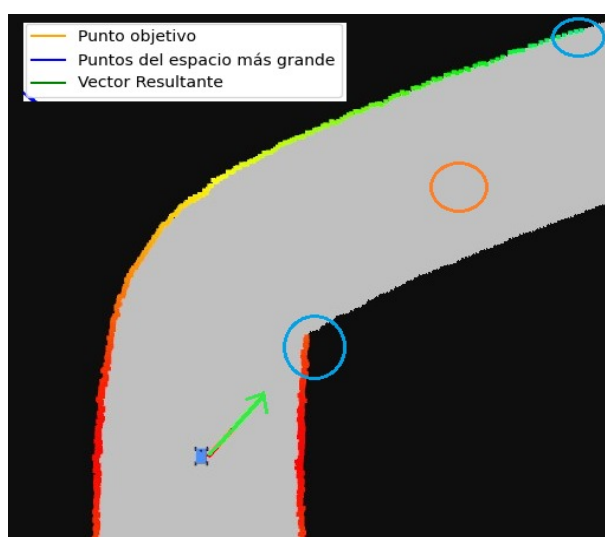


FIGURA 14: Ejemplo obtención posición objetivo. Fuente: Autor

En la Figura 14, se observa que a partir de los puntos que generan la discontinuidad más grande (el espacio más grande en la lectura del entorno) se obtiene la posición objetivo. La cual es, el punto medio entre estos dos puntos.

5.1.2. Restricciones de funcionamiento

Para definir las restricciones el modelo del vehículo se actualiza y linealiza en el punto de operación escogido, correspondiente a lo realizado en las ecuaciones 3.16 a 3.18. Requiriendo una retroalimentación de estado completo, permitiendo que todos los estados se mantengan observables. A partir de esto se definen las restricciones físicas que deben especificarse, siendo:

TABLA 7: Restricciones y tipo de restricción. Fuente: Autor

	Parámetro físico	Tipo de restricción
Ángulo de giro del volante	Bloqueo positivo	Restricción alta
	Bloqueo negativo	Restricción alta
Ratio de cambio del ángulo de giro del volante	Ratio positivo	Restricción suave
	Ratio negativo	Restricción suave

Las restricciones suaves actúan de forma que permiten el sobre impulso en ambas direcciones en caso de que no exista mucho tiempo de anticipación, así como que la trayectoria a la que se enfrenta sea demasiado agresiva. Sin embargo, las restricciones altas se encargan de proporcionar al MPC los límites máximos del ángulo de dirección para cualquier sentido. De esta forma la estrategia de control es capaz de establecer respuestas al problema de optimización viables y aplicables. En el caso del modelo aplicable se escoge un bloqueo de volante y una velocidad máxima de:

$$\delta = \frac{\pi}{8} rad \quad (5.3)$$

$$v = 2m/s \quad (5.4)$$

Estableciendo dichos limites, se puede realizar el cálculo de radio de giro del vehículo. De esta forma se establece la capacidad de giro de este. Para realizar el cálculo se tiene en cuenta el límite de bloqueo de volante, además de la distancia entre ejes del vehículo explicado en la Tabla 9, siendo:

$$R = \frac{L}{2 * \text{sen}(\delta)} \quad (5.5)$$

$$R = 0,86m \quad (5.6)$$

Es decir, el vehículo tiene una capacidad de maniobrar de 0.86m en los sentidos de dirección.

5.1.3. Diseño de la estrategia control MPC

Con la definición del modelo del vehículo, así como las restricciones de funcionamiento de entrada, se especifica la selección de parámetros para la estrategia de control, la cual se realiza de acuerdo al tiempo de procesamiento de esta, estableciendo:

$$\text{Horizonte de predicciones} = 10 \quad (5.7)$$

$$\text{Pasos entre predicciones} = 0,01 \quad (5.8)$$

Donde el horizonte de predicciones corresponde a la cantidad de predicciones que se realizan durante una cantidad de pasos establecidos, es decir:

$$t = \text{Horizonte de predicciones} * \text{Pasos entre predicciones} \quad (5.9)$$

$$t = 10 * 0,01 = 0,1s \quad (5.10)$$

Es decir, se realiza la predicción en 0.1 segundos. Posteriormente se definen los términos de Lagrange y Mayer del problema de optimización planteado en la Ecuación 3.36, siendo:

$$\text{Lagrange} = \frac{1}{2} \Delta X_k^T Q \Delta X_k \quad (5.11)$$

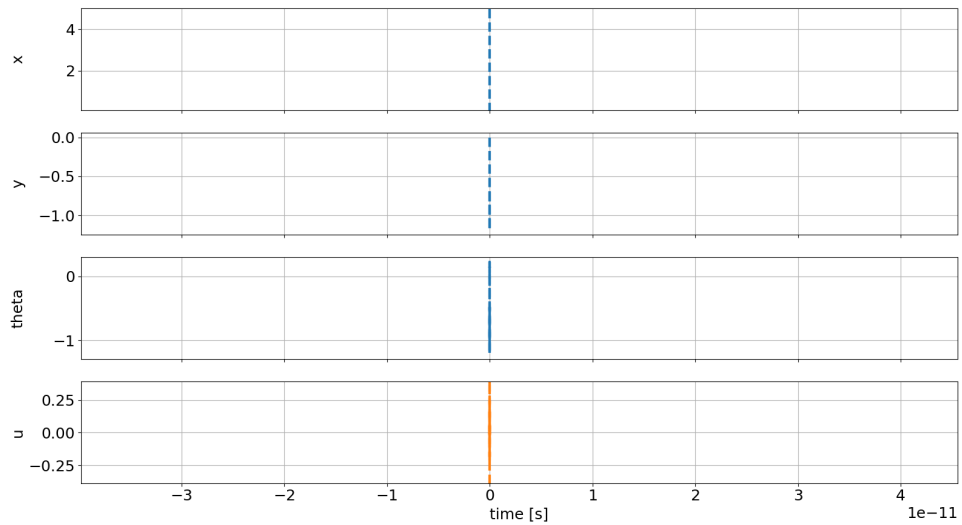
$$\frac{1}{2} \Delta X_k^T Q \Delta X_k = [x_{final} - x_{actual}]^2 + [y_{final} - y_{actual}]^2 + [\theta_{final} - \theta_{actual}]^2 \quad (5.12)$$

$$\text{Mayer} = \frac{1}{2} \Delta X_k^T P \Delta X_k \quad (5.13)$$

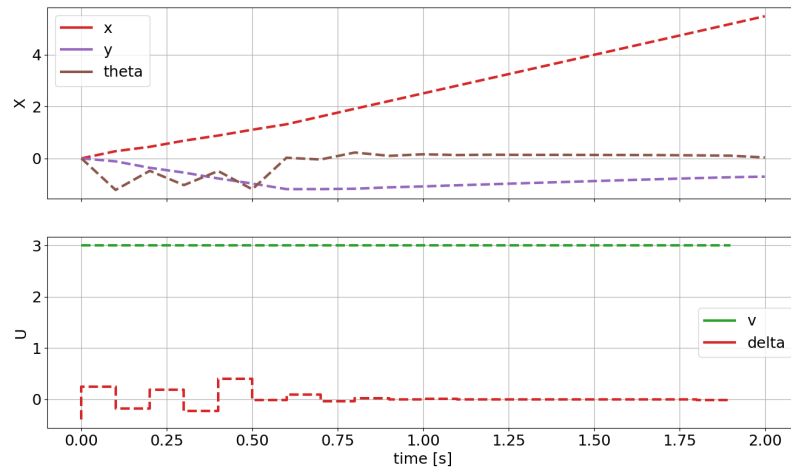
$$\frac{1}{2} \Delta X_k^T P \Delta X_k = [x_{final} - x_{actual}]^2 + [y_{final} - y_{actual}]^2 + [\theta_{final} - \theta_{actual}]^2 \quad (5.14)$$

Finalmente, para la solución de las ecuaciones 5.9 a 5.12, se utiliza el solucionador MA27 de Ipopt explicado en la sección 3.3.1.

Como ejemplo del funcionamiento de la estrategia de control, se plantea una situación de trayectoria aleatoria con inicio en posición $[0,0]$ y final en posición $[10,0]$. Primeramente, se observa en el estado inicial del vehículo (Inicio de trayectoria) en la Figura 15 y posteriormente en el estado final (Final de trayectoria) en la Figura 16.

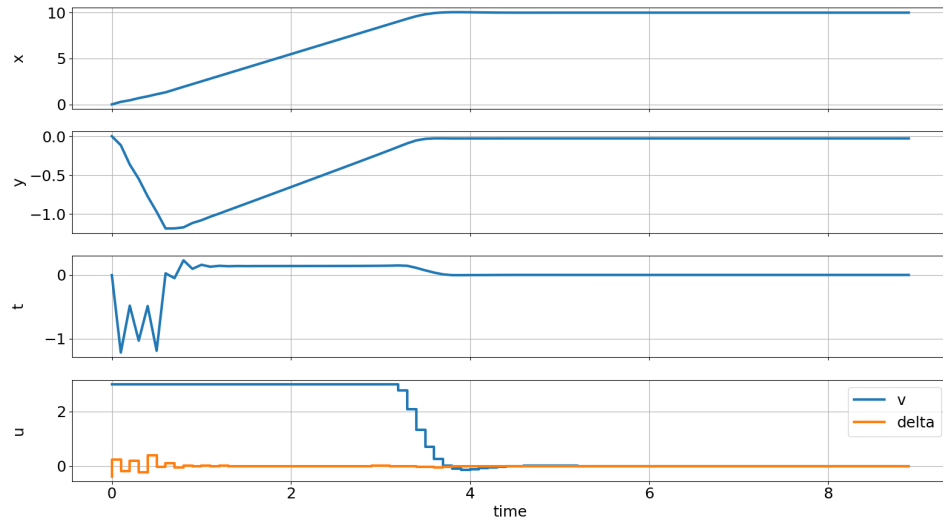


(A) Variables de estado y control

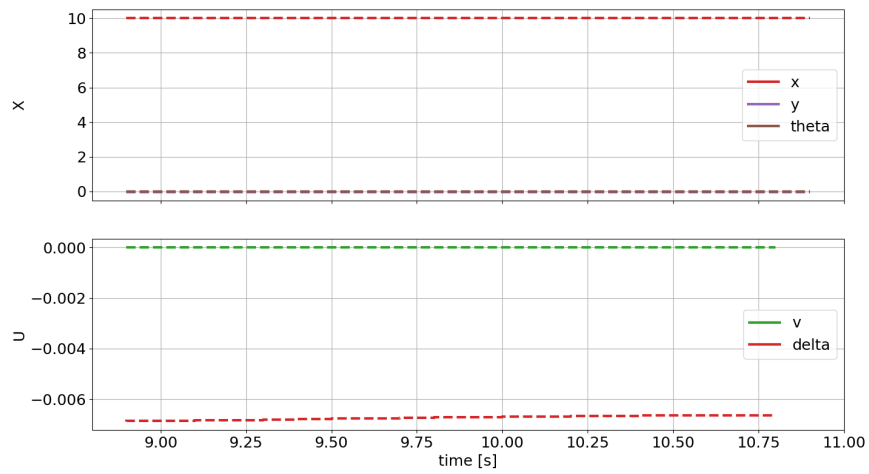


(B) Horizonte de predicciones

FIGURA 15: Estado inicial. Fuente: Autor.



(A) Variables de estado y control



(B) Horizonte de predicciones

FIGURA 16: Estado final. Fuente: Autor.

De acuerdo a como se planteó la trayectoria, en la Figura 16a, las variables de estado en X e Y , se encuentran en la posición estipulada.

5.1.4. Implementación con ROS

Iniciar con la simulación del vehículo en el ambiente integrado del F1TENTH requiere la instalación de las dependencias encargadas de la publicación de posición en cada instante de tiempo.

```
sudo apt-get install ros-noetic-tf2-geometry-msgs ros-noetic-ackermann-msgs  
ros-noetic-joy ros-noetic-map-server
```

De esta forma, se continua con la instalación del ambiente de simulación.

```
cd ~/catkin_ws/src  
git clone https://github.com/fitenth/fitenth_simulator.git  
cd ~/catkin_ws  
catkin_make  
source devel/setup.bash
```

Para iniciar la simulación se ejecuta:

```
roslaunch fitenth_simulator simulator.launch
```

Con el simulador ejecutándose se cargará el núcleo de ROS, un modelo de vehículo, mapa y el núcleo de comunicación de nodos roscore. Así mismo para la visualización del simulador se hace uso de RVIZ, donde se añaden los tópicos de publicación de los mensajes recibidos por el LaserScan `"/scan"` y de los mapas cargados `"/map"`.

5.1.4.1. ROS API

El ambiente de simulación está diseñado de tal forma que en caso que se realice implementación física del vehículo, exista una alta similitud con el modelo real, así como la incorporación de algoritmos de navegación. Es decir, el nodo del simulador se puede intercambiar con el nodo de conducción del vehículo, en dado caso que no se modifiquen los tópicos utilizados.

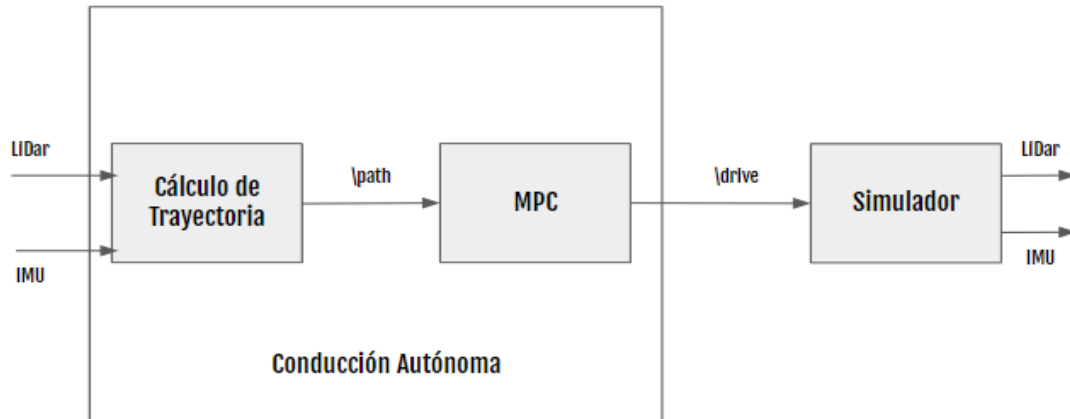


FIGURA 17: Diagrama de nodos. Fuente: Autor

En la Figura 17 se encuentra el diagrama de nodos enfocado en la simulación del control de navegación, en el que se incluye un nodo de cálculo de trayectoria, el cual se encarga de encontrar el punto de referencia final al que debe llegar el vehículo, así como el nodo del MPC, diseñado para encontrar la trayectoria que debe seguir la planta. Este conjunto de nodos denominado conducción autónoma puede recibir los datos de los sensores LiDAR que se publica en el tópico `"/scan"` de tipo LaserScan e IMU, para luego publicar los mensajes del tópico `"/drive"` de tipo AckermannDrive (Dirección de las ruedas y velocidad).

De esta forma, para lanzar la simulación completa considerando los tres nodos explicados, se ejecuta:

```

roslaunch fitenth_simulator simulator.launch
roslaunch path_mpc path.py
roslaunch path_mpc ROSmpc.py

```

Los cuales abren los siguientes tópicos:

TABLA 8: Tópicos de la simulación del control de navegación. Fuente: Autor

Tópico	Descripción
<code>/scan</code>	Publica el mensaje del LaserScan del LiDAR
<code>/odom</code>	Publica el mensaje de odometría de la VESC
<code>/path</code>	Publica los mensajes recibidos del cálculo de trayectoria
<code>/drive</code>	Publica la velocidad y ángulo de dirección del vehículo

Con la configuración completa se inicia la simulación de todo el sistema.

5.1.4.2. Configuración parámetros del vehículo

Para el ambiente de simulación se establece parámetros diferentes al modelo real de la planta.

TABLA 9: Parámetros del vehículo en simulación. Fuente: Autor

Parámetro	Especificación
Ancho	0,2032 m
Distancia entre ejes delanteros y traseros	0,66 m
Velocidad máxima	2 m/s
Ángulo de dirección máximo	0.3926 radianes
Aceleración máxima	7,51 m/s ²
Ratio de cambio de ángulo	3,2 radianes/s
Masa	3.47 kg

Dicha configuración de la Tabla 9 se carga al archivo de simulación del ambiente integrado antes de iniciar el simulador.

5.1.4.3. Escenarios de prueba

La validación del funcionamiento de la estrategia de control integrada se realiza en tres ambientes o mapas integrados por el grupo de investigación F1TENTH.

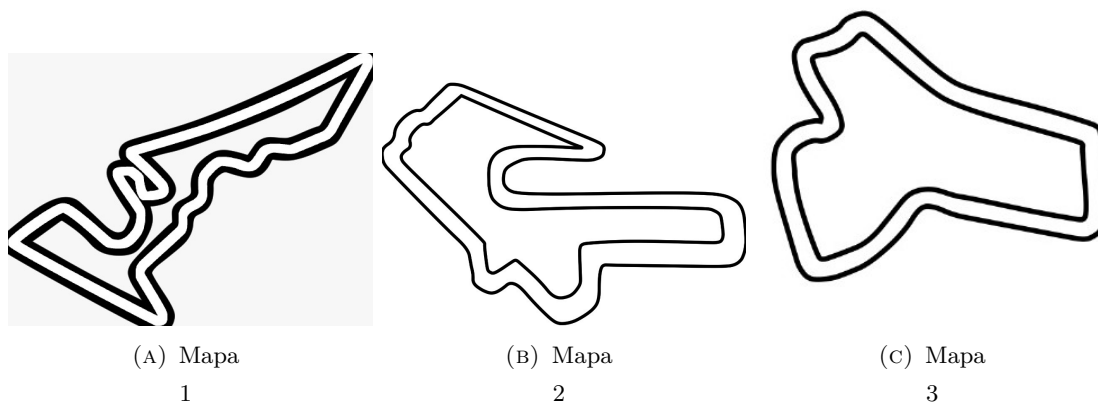


FIGURA 18: Mapas de simulación.

Los mapas de las Figuras 18a, 18b, 18c, fueron seleccionados debido a factores como lo son: Curvas pronunciadas, así como trayectorias rectas para evaluar velocidades. En las Tabla 10 se presentan las características de cada uno de los mapas.

TABLA 10: Características de los mapas. Fuente: Autor

Mapa	Promedio ángulo de curvas ($^{\circ}$)	Máximo valor ángulo de curvas ($^{\circ}$)
1	110.40	-146.52
2	60.38	154.18
3	98.77	111.44

En dichos mapas se realiza la variación de los parámetros del control y referencia de trayectoria, en función de identificar el comportamiento de la estrategia de control. Para esto se evalúa el sistema con diferentes coeficientes de atracción y repulsión del diseño del planeador de rutas, como se evidencia en la Tabla 11.

TABLA 11: Intervalos de variación para las pruebas. Fuente: Autor

Coeficiente	Coeficiente Inicial	Intervalo (+)	Coeficiente Final
Coeficiente de atracción (Fct)	1	0.5	4.5
Coeficiente de repulsión (Fcr)	1	0.1	1.3

El coeficiente final de repulsión de la Tabla 11 indica el valor máximo en el que el vehículo no cae en mínimos locales del generador de trayectorias, valor encontrado mediante experimentación. Mientras que el coeficiente final de atracción, se refiere al máximo valor en el que la relación de coeficientes permite una navegación sin presentar choques durante la misma.

Los intervalos se calcularon a partir de definir la cantidad de pruebas que se realizan, en el caso se coeficiente de atracción al tener un mayor intervalo entre coeficiente final e inicial, se propuso realizar 8 variaciones de coeficiente. Mientras que, en el caso de coeficiente de repulsión, al tener un intervalo más reducido, se propuso una cantidad de 4 variaciones. Obteniendo así, los intervalos de 0.5 en el caso del coeficiente de atracción, y 0.1 en el caso del coeficiente de repulsión.

5.1.5. Guía de laboratorio

Se propone una guía de laboratorio que consiste en la construcción de la plataforma TRAXXAS slash 4x4, configuración electrónica para la conducción de la misma e introducción para el manejo a control remoto. El documento se encuentra anexado dentro del repositorio Github encontrado en la sección 7.3.

Capítulo 6

Resultados y Discusión

Una vez se realiza el diseño de la estrategia de control, así como su implementación en el entorno simulado integrado, es necesario determinar el comportamiento de esta a partir de 2 discusiones como se evidencia a continuación:

6.1. Vehículo en lazo abierto

La simulación en lazo abierto del modelo cinemático Ackerman de un vehículo representa la respuesta del sistema sin ningún tipo de retroalimentación o control. En este tipo de modelo, se considera la dinámica del vehículo en términos de su posición, orientación y velocidad, sin tener en cuenta la corrección de trayectoria mediante acciones de control, como se ve en la Figura 19.

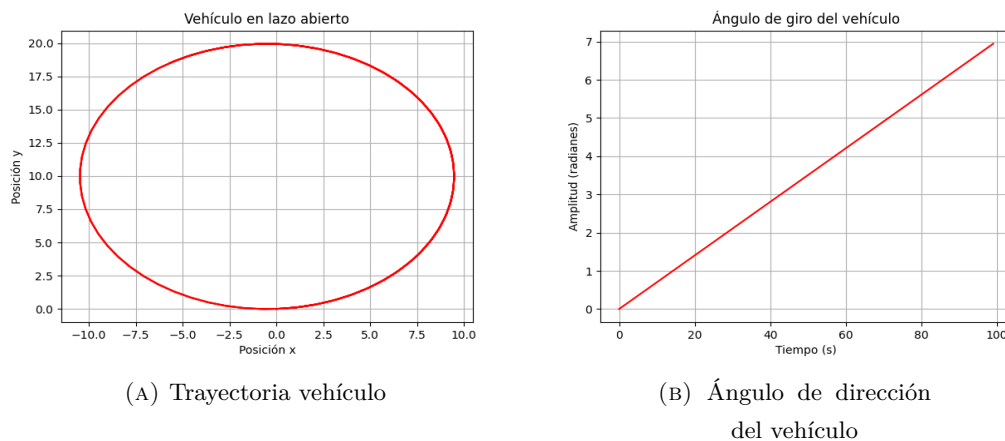


FIGURA 19: Simulación vehículo en lazo abierto. Fuente: Autor.

Para la Figura 19a, donde se tiene un ángulo de giro y velocidad constante como se ve en la Figura 19b, se forma una circunferencia completa obedeciendo a la ecuación 3.13 y 3.14 del modelo Ackerman que son de tipo sinusoidal.

Es decir que, la representación de la posición X e Y en función del tiempo muestra la trayectoria seguida por el vehículo, como en el caso de la Figura 19 que representa un giro del mismo. Y a su vez la representación de la orientación del vehículo en función del tiempo, determina la forma en la que se está moviendo el vehículo a medida que avanza.

6.2. Vehículo en lazo cerrado con MPC implementado

Para determinar el comportamiento del MPC, se varían los coeficientes F_{cr} y F_{ct} , con el fin de evidenciar la incidencia que estos tienen respecto a la navegación del vehículo. Para mostrar dicha incidencia, se propuso obtener los datos de entrada del vehículo, velocidad y ángulo de dirección, los datos de salida del vehículo, posición y ángulo. Por último, la distancia de los muros laterales respecto al vehículo.

6.2.1. Resultados variación de coeficientes Mapa 1

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el mapa 1.

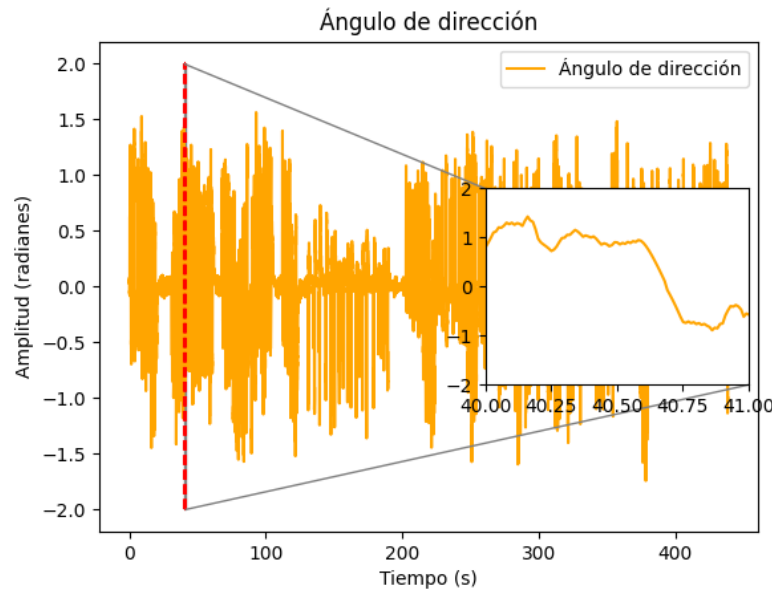


FIGURA 20: Ángulo de dirección $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$

En la Figura 20 se puede observar el comportamiento del ángulo de dirección del vehículo, en este se presenta un comportamiento que en a priori parece estar saturado. Sin embargo, esto es debido que el tiempo de paso del controlador es de 0.01 s, por lo cual en 1 s se presentan alrededor de 100 variaciones. Al realizar un zoom en un pequeño intervalo se observa que las variaciones son pequeñas y no presenta saturación.

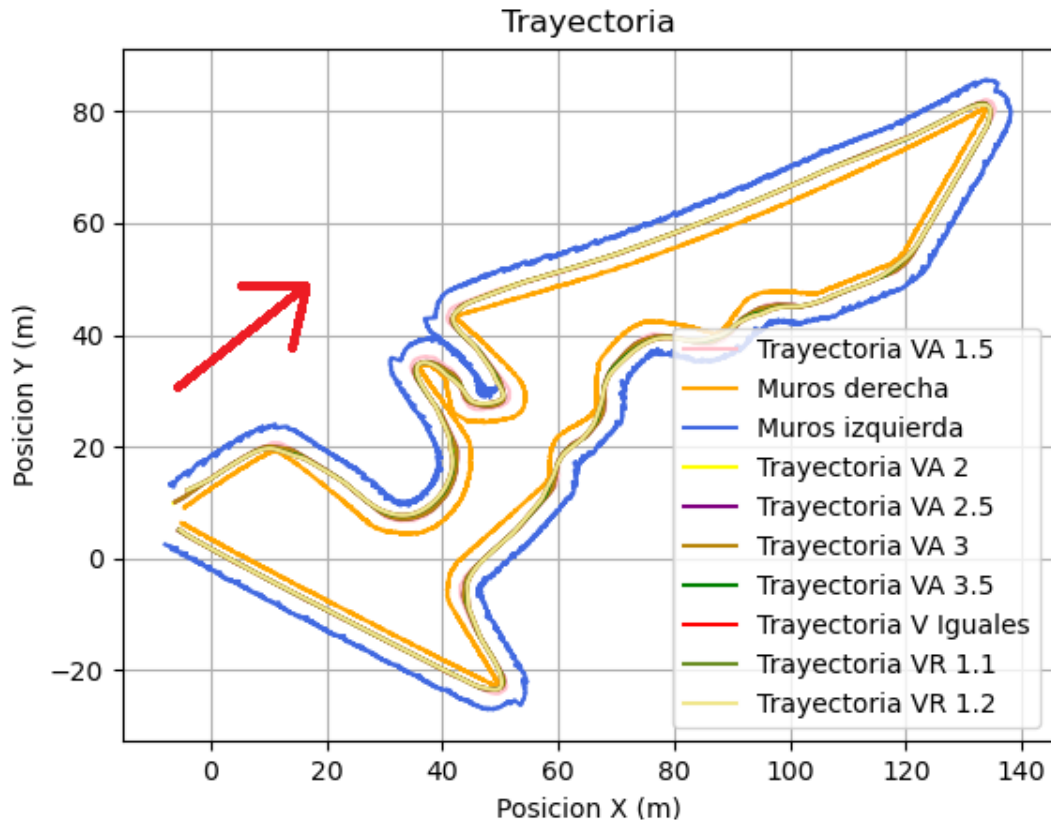


FIGURA 21: Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$

En la Figura 21 se observa la reconstrucción del mapa a partir de la distancia obtenida de los muros, se observa además una flecha que indica la dirección de la trayectoria. Además, se observan las diversas trayectorias presentadas en las diversas variaciones de coeficientes, tanto de atracción, como de repulsión. Sin embargo, no se hace apreciación de la dinámica de todos los escenarios de prueba, por lo que es necesario realizar un zoom sobre alguna zona de la trayectoria en función de observar la diferencia entre trayectorias.

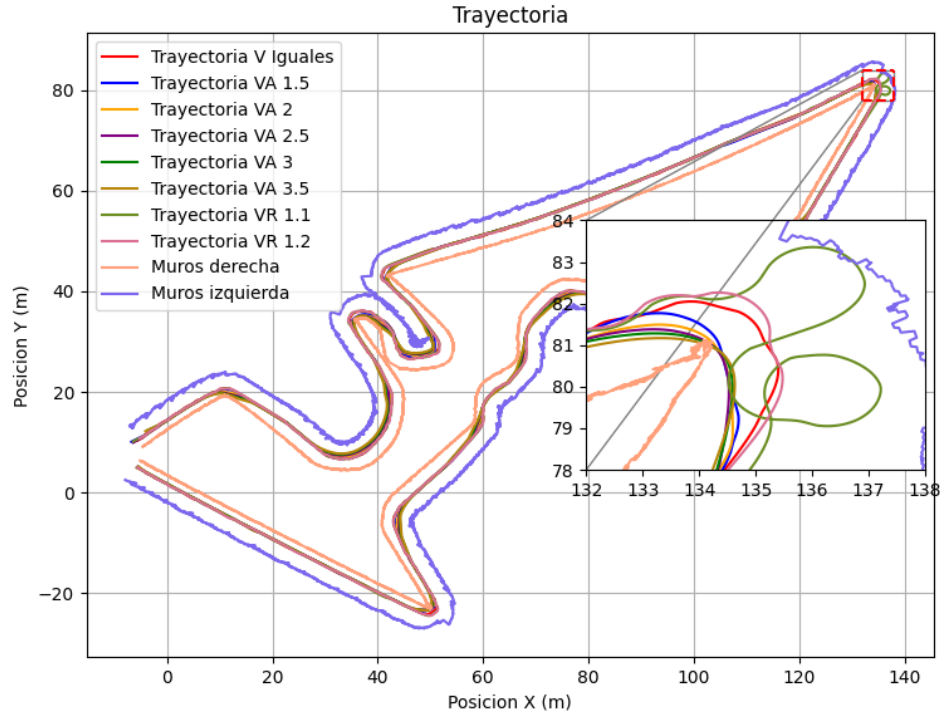
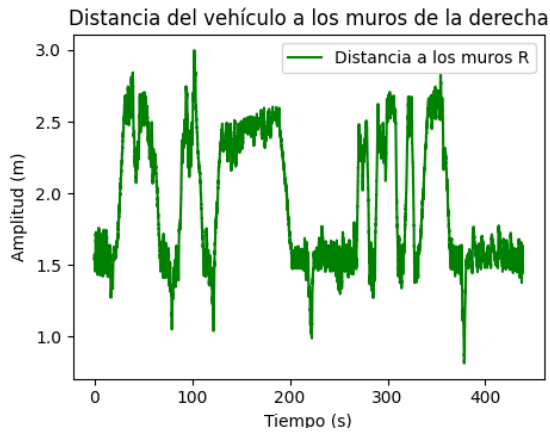


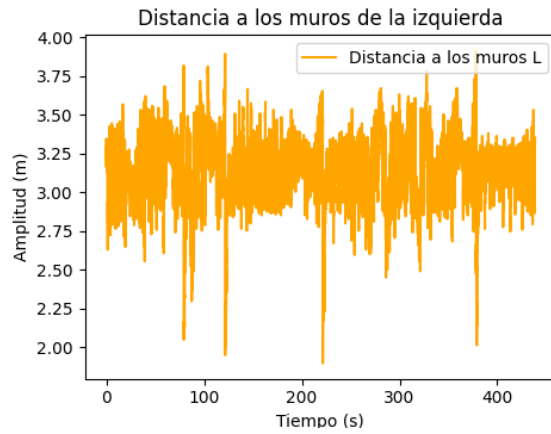
FIGURA 22: Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$

Al realizar un pequeño zoom en la curva más pronunciada se puede observar como las diferencias en los comportamientos se hacen más visibles. Primero, se debe destacar que la trayectoria más estable es en la que los coeficientes son iguales, presentando una trayectoria que no se acerca a las muros de forma tan regular, como en todos los casos donde el vector de atracción es mayor a 1. Mientras que la más inestable, es la trayectoria donde el vector de repulsión es 1.1 veces mayor al de atracción, en esta trayectoria se observa que realizó dos giros antes de retomar su camino. A priori se puede establecer que, al romper la relación unitaria de los vectores de atracción y repulsión, el vehículo presenta más dificultad para realizar giros. Comportamiento explicado a raíz del radio de giro hallado en la ecuación 5.6, radio que para el ancho de la pista es pequeño, dándole suficiente maniobrabilidad al vehículo para dar un giro tan pegado a los muros.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 1 con coeficientes

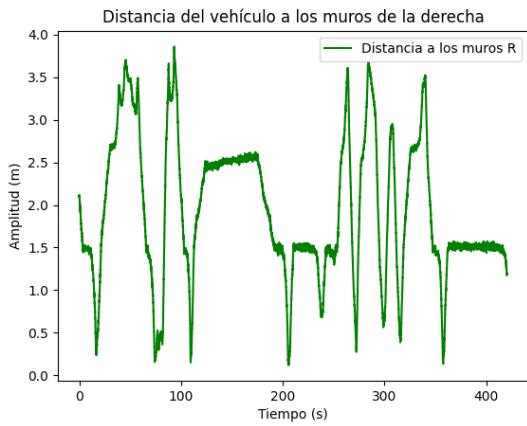
$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 1$$



(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 1 con coeficientes

$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 1$$

FIGURA 23: Distancia a los muros derecha y izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 1 con coeficientes

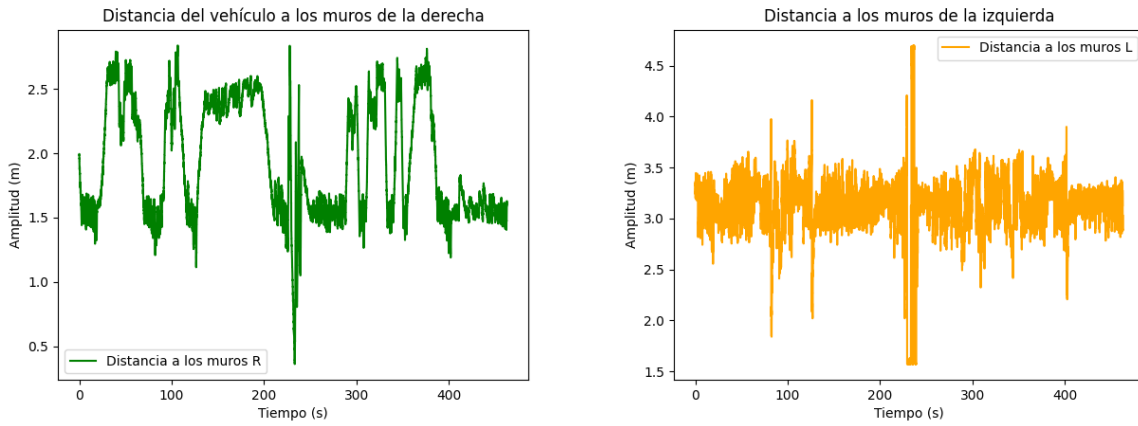
$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 3,5$$



(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 1 con coeficientes

$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 3,5$$

FIGURA 24: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 1 con coeficientes

$$F_{cr} = 1,1 \text{ y } F_{ct} = 1$$

(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 1 con coeficientes

$$F_{cr} = 1,1 \text{ y } F_{ct} = 1$$

FIGURA 25: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

En las Figuras 23 a 25 se observa el comportamiento de distancias a los muros respecto al vehículo. Se propone mostrar los casos más importantes, los cuales son los coeficientes iguales, el mayor coeficiente de atracción (3.5) y el mayor coeficiente de repulsión (1.1). En estos casos, se destaca que en el caso de mayor coeficiente de atracción la distancia con los muros de la derecha presenta los picos más altos, pero a su vez presentan las distancias más pequeñas. En el caso del coeficiente de repulsión de 1.1 se obtiene la mayor distancia respecto a los muros de la izquierda. Esto es debido al sentido de vuelta que se tomó para la recolección de los datos, se presentan más giros hacia la derecha por lo que el vehículo al realizar estos giros se acercará más a los mismos, dependiendo la fuerza de atracción.

TABLA 12: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.93(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.13(m)
Tiempo	438.56 (s)
Velocidad promedio	1.03 (m/s)

TABLA 13: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.93(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.12(m)
Tiempo	420.38 (s)
Velocidad promedio	1.01 (m/s)

TABLA 14: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.94(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.11(m)
Tiempo	462.68 (s)
Velocidad promedio	0.93 (m/s)

A partir de los resultados de las tablas anteriores, se observa que el mejor tiempo se realizó cuando el coeficiente de atracción es 3.5 veces mayor al de repulsión. Sin embargo, en los coeficientes iguales se observa una mayor velocidad promedio, por lo que se infiere que la distancia que recorrió en el caso de $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$ es menor. Por último, en el caso de $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$ se observa un tiempo mayor y una velocidad promedio menor al de ambos casos, esto es por causa de que la trayectoria se crea a partir de esquivar los obstáculos más que por llegar a la meta.

6.2.2. Resultados variación de coeficientes Mapa 2

Inicialmente se observa el condensado de todas las trayectorias, en consideración de todas las variaciones de coeficientes de atracción y repulsión, como se observa en la Figura 26.

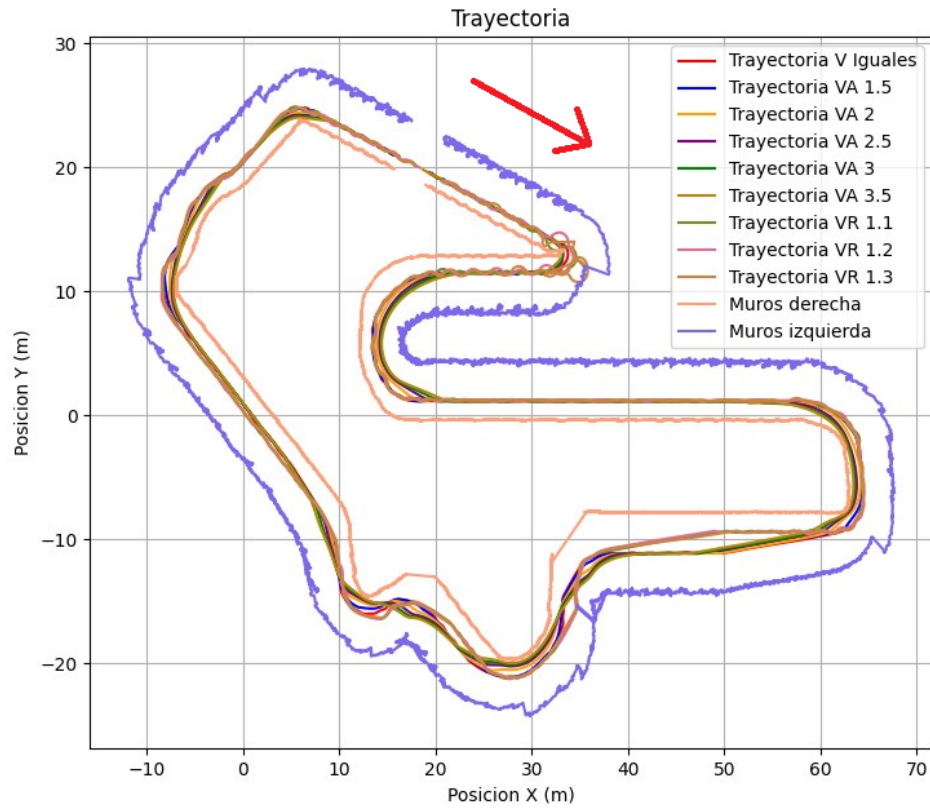


FIGURA 26: Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$

Como se puede observar en la Figura 26, se hace una reconstrucción del mapa teniendo en cuenta la distancia extraída de los muros laterales, se observa además una flecha que indica la dirección de la trayectoria, como en el caso de la sección 6.2.1. De la misma forma, se propone un zoom en una curva del mapa, en función de determinar la dinámica del vehículo en todo el recorrido. Así mismo se puede comparar estos y lograr determinar la influencia de los coeficientes de los vectores en la trayectoria, desde un punto de vista de relación seguridad-velocidad.

A diferencia de la sección anterior, se propone un zoom sobre una recta, para determinar si el cambio de la dinámica del vehículo solo se presenta en los giros, o de igual manera en una trayectoria completamente recta.

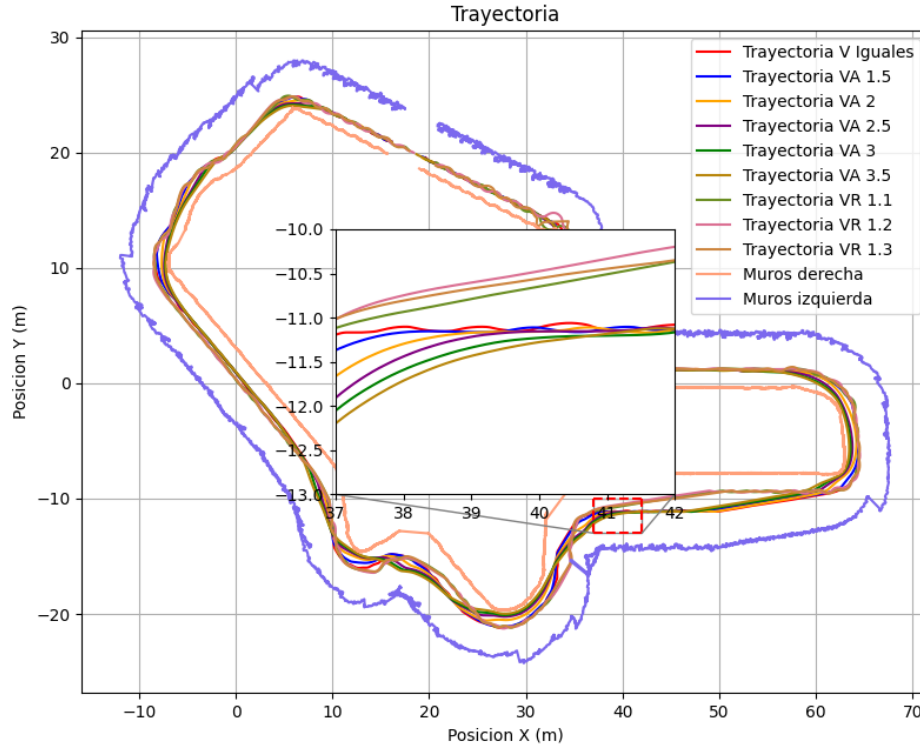
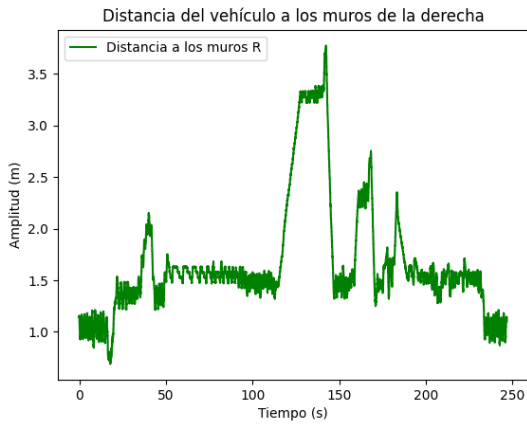


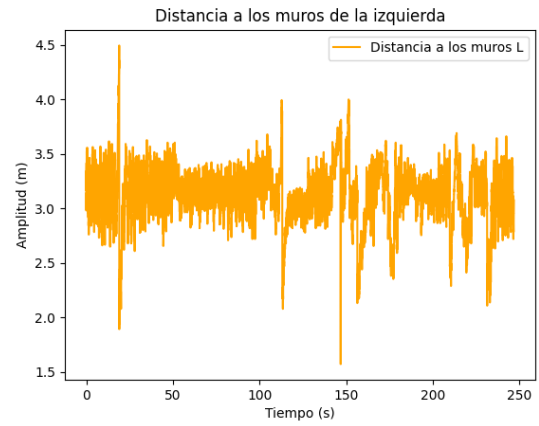
FIGURA 27: Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$

A diferencia del mapa 1, en un mapa donde no se presenta un promedio de curvas muy altas, de acuerdo a lo establecido en la Tabla 10, el aumento de los coeficientes de los vectores influye de forma no tan prominente, permitiéndole mejor maniobrabilidad al vehículo. Sin embargo, de igual forma, su comportamiento ante una curva con ángulos de giro altos, presenta la misma tendencia que en el caso anterior: Mejor estabilidad para coeficientes iguales, giros más complejos de acuerdo suba el coeficiente de atracción e inestabilidad para coeficientes de repulsión mayores a 1.

De esta forma, nuevamente se observa la distancia promedio mantenida por el vehículo a los muros durante toda su trayectoria en los mismos casos, como lo son: Coeficientes iguales, coeficiente de atracción (3.5) y coeficiente de repulsión (1.1)

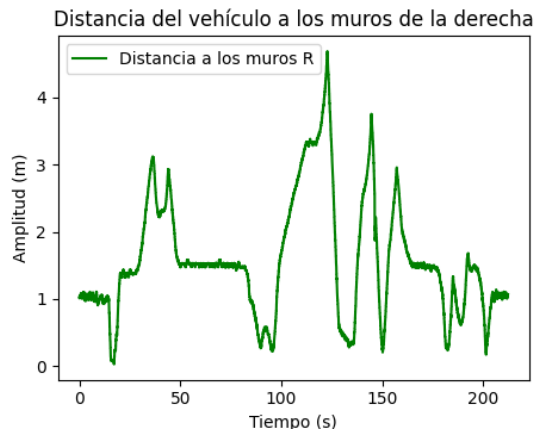


(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$

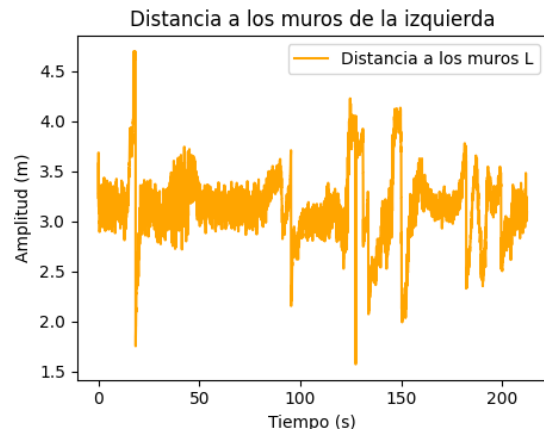


(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 28: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

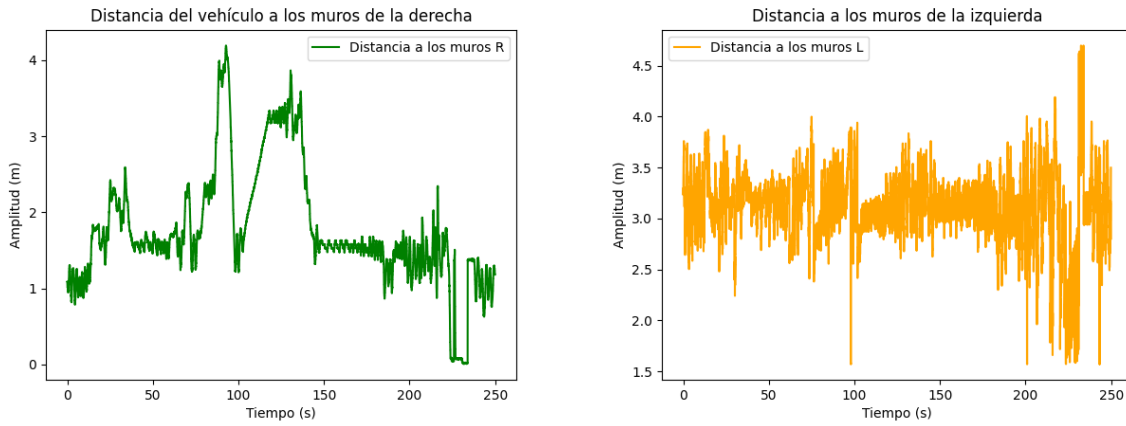


(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$



(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 29: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 2 con coeficientes

$$F_{cr} = 1,3 \text{ y } F_{ct} = 1$$

(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 2 con coeficientes

$$F_{cr} = 1,3 \text{ y } F_{ct} = 1$$

FIGURA 30: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Así como en el mapa 1, para el mayor coeficiente de atracción se presentan los picos de distancia a los muros de la derecha más altos, como se puede ver en la Figura 29a, aunque de la misma forma presenta las distancias más pequeñas. De igual forma para el coeficiente de repulsión de 1.3 se obtiene la mayor distancia con respecto a los muros debido a la forma en la que se realizó la recolección de datos.

TABLA 15: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.66(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.12(m)
Tiempo	246.85 (s)
Velocidad promedio	0,93 (m/s)

TABLA 16: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.58(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.14(m)
Tiempo	212.23 (s)
Velocidad promedio	1 (m/s)

TABLA 17: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.77(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.11(m)
Tiempo	249.86 (s)
Velocidad promedio	0.97 (m/s)

Teniendo en cuenta los resultados de comparación de la dinámica del vehículo para los tres distintos casos, el mejor tiempo se obtiene respecto al aumento del coeficiente de atracción. Reacción que se espera nuevamente debido a que se acerca mucho más a los muros y en combinación con el radio de giro, le permite mejor maniobrabilidad en curvas pronunciadas. Nuevamente para los coeficientes iguales se establece una velocidad promedio mayor, indicando que recorre más distancia con respecto a los demás casos. Finalmente, se determina que el aumento del coeficiente de repulsión influye de igual forma en el aumento de tiempo y velocidad al priorizar esquivar un obstáculo a llegar al punto final.

6.2.3. Resultados variación de coeficientes Mapa 3

Así como en las demás secciones de este capítulo, se varían los coeficientes del vector de atracción desde 1 hasta 3.5 y de repulsión de 1 a 1.3 como se establece en la Tabla 11. Se observa la trayectoria que sigue cada una de las variaciones en el mapa 3, como se observa en la Figura 31.

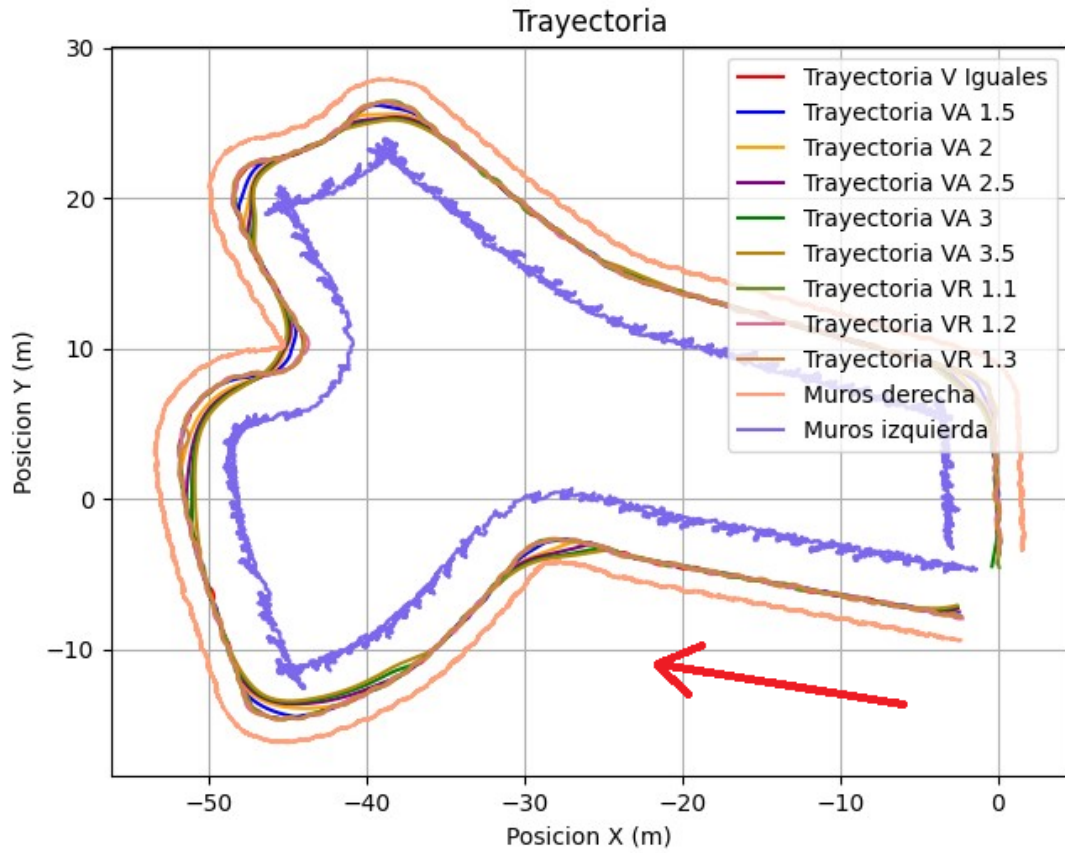


FIGURA 31: Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$

Como se puede observar en la Figura 31, se hace una reconstrucción del mapa teniendo en cuenta la distancia extraída de los muros laterales, se observa además una flecha que indica la dirección de la trayectoria, como en el caso de las anteriores secciones. De la misma forma, se propone un zoom en una curva del mapa, en función de determinar la dinámica del vehículo en todo el recorrido. Así mismo se puede comparar estos y lograr determinar la influencia de los coeficientes de los vectores en la trayectoria, desde un punto de vista de relación seguridad-velocidad.

En este mapa las curvas presentadas son casi igual de pronunciadas se propone realizar el acercamiento en la curva en las que se puede observar mejor la incidencia de los coeficientes de atracción y repulsión.

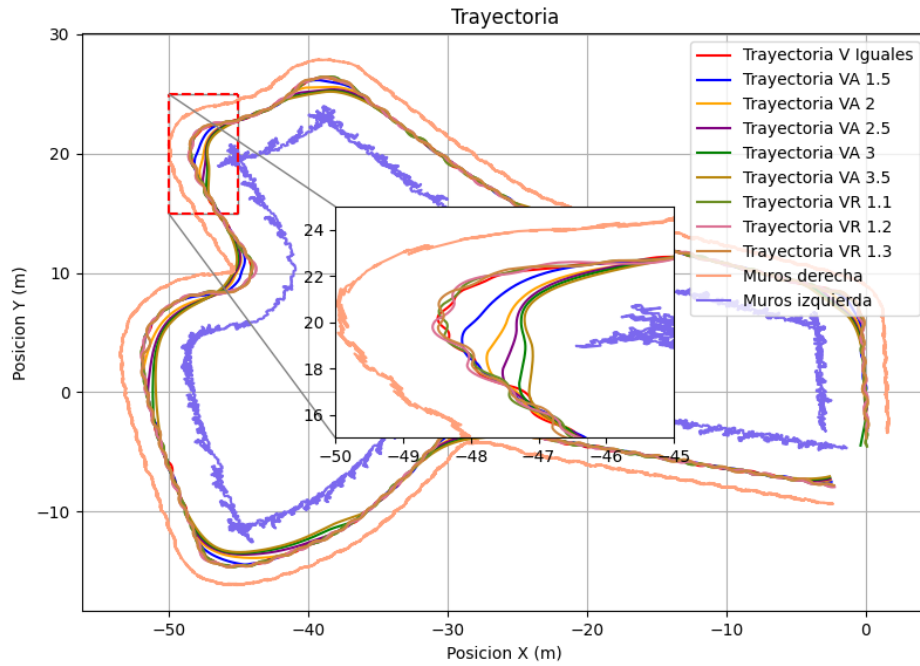
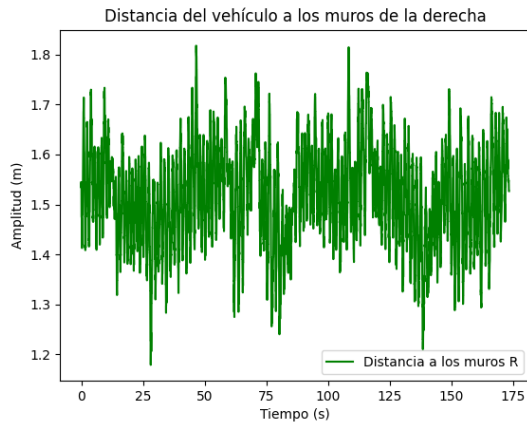


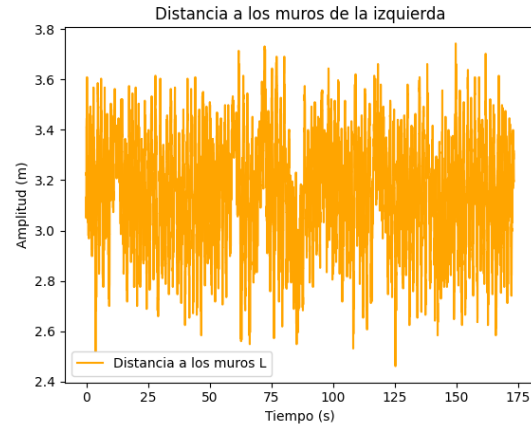
FIGURA 32: Trayectoria del vehículo con coeficientes de atracción $F_{c3} = 1, 1, 1, 1, 2, 1, 3$ y $F_{ct} = 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 3, 5$

En este caso se logra apreciar mejor la incidencia de vector de atracción, en este caso al aumentar el coeficiente de este vector la distancia al tomar la curva se reduce, por lo que deduce que la planeación de trayectoria se centra más en el parámetro de velocidad y no tanto en el de seguridad. Por otra parte, al aumentar el vector de repulsión se presenta mayores variaciones en la trayectoria realizada, en el zoom se observa un comportamiento en zigzag en el caso del coeficiente de repulsión igual a 1.3, esto debido a que en este caso la planeación de trayectoria se centra en esquivar los muros y no tanto en llegar al objetivo.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 3 con coeficientes

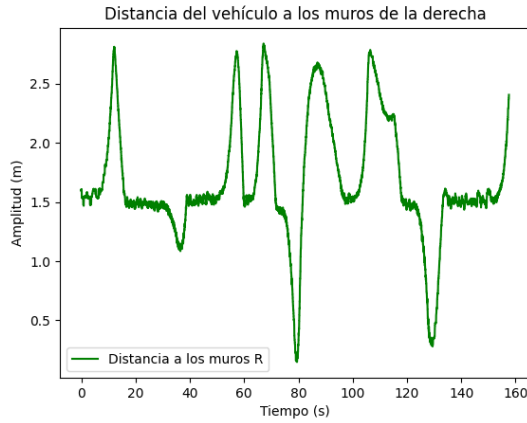
$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 1$$



(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 3 con coeficientes

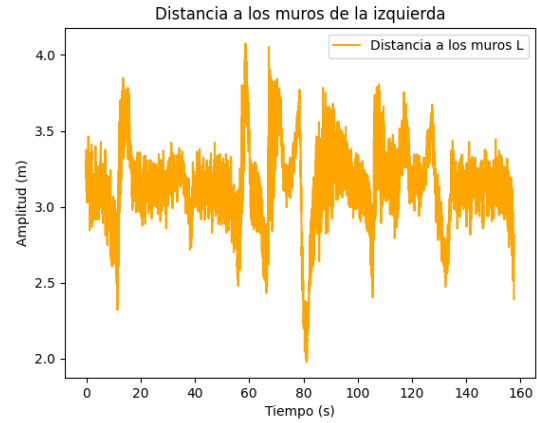
$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 1$$

FIGURA 33: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 3 con coeficientes

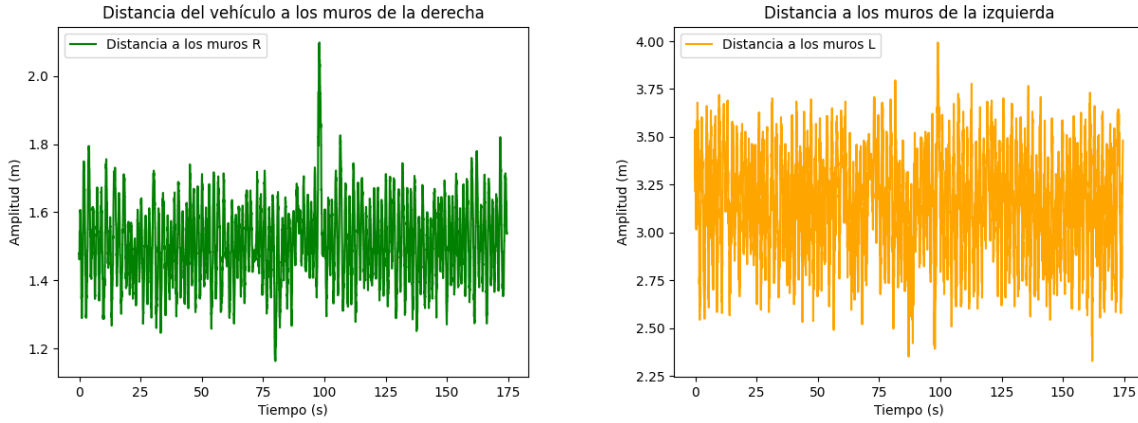
$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 3,5$$



(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 3 con coeficientes

$$F_{cr} = 1 \text{ y } F_{ct} = 3,5$$

FIGURA 34: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.



(A) Distancia a los muros de la derecha mapa 3 con coeficientes

$$F_{cr} = 1,3 \text{ y } F_{ct} = 1$$

(B) Distancia a los muros de la izquierda mapa 3 con coeficientes

$$F_{cr} = 1,3 \text{ y } F_{ct} = 1$$

FIGURA 35: Distancia a los muros derecha e izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Así como en los mapas anteriores, para el mayor coeficiente de atracción se presentan los picos de distancia a los muros de la derecha más altos, como se puede ver en la Figura 34a, aunque de la misma forma presenta las distancias más pequeñas. Al compararlo con los casos de los anteriores mapas, se destaca que, en el caso de los vectores de atracción más grandes, se presentan las menores variaciones, esto es por causa, de que el planeador de trayectoria se centra en llegar a la posición de meta sin tener tan en cuenta los obstáculos que se le presenten. De igual forma para el coeficiente de repulsión de 1.3 se obtiene la mayor distancia con respecto a los muros debido a la forma en la que se realizó la recolección de datos.

TABLA 18: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.51(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.15(m)
Tiempo	173.4 (s)
Velocidad promedio	0.92 (m/s)

TABLA 19: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.67(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.14(m)
Tiempo	157.54 (s)
Velocidad promedio	0.94 (m/s)

TABLA 20: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.51(m)
Distancia promedio muro izquierdo	3.15(m)
Tiempo	174.52 (s)
Velocidad promedio	0.93 (m/s)

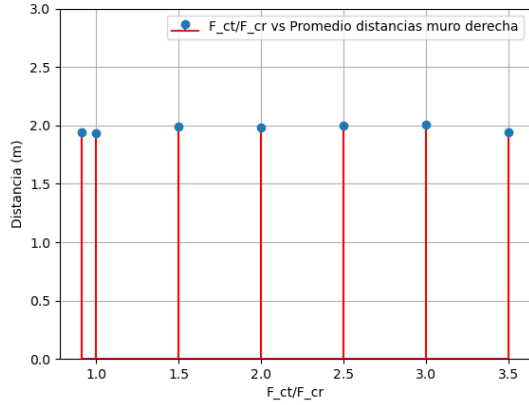
Como en los anteriores mapas, se destaca que el menor tiempo de realización de la pista se logró al tener el coeficiente de atracción más alto. Se debe destacar a su vez, que la velocidad promedio no es tan diferente a los otros casos, lo que denota que en este caso el planeador de trayectoria tomó un camino más corto.

6.2.4. Resumen de resultados

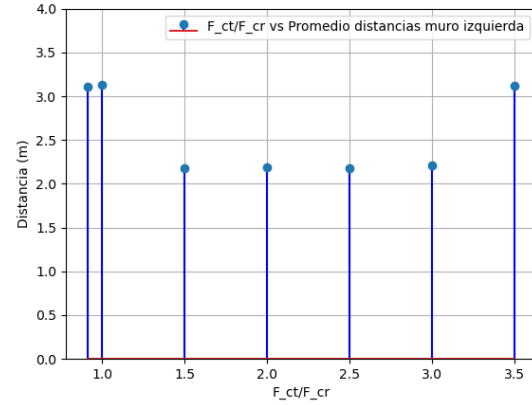
A continuación, se mostrarán gráficos que ilustran los datos obtenidos en cada uno de los mapas. Se mostrará el comportamiento de sus variables, a partir de la variación de la relación F_{ct}/F_{cr} .

6.2.4.1. Mapa 1

Se presentarán los datos de promedio de distancia con los muros, velocidad y tiempo para las variaciones respectivas en la relación F_{ct}/F_{cr} para el mapa 1.

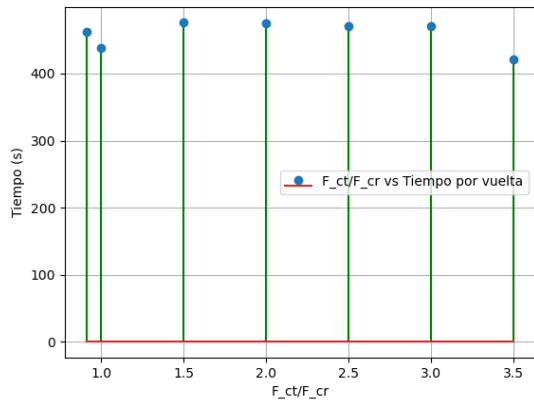


(A) F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro derecha mapa 1

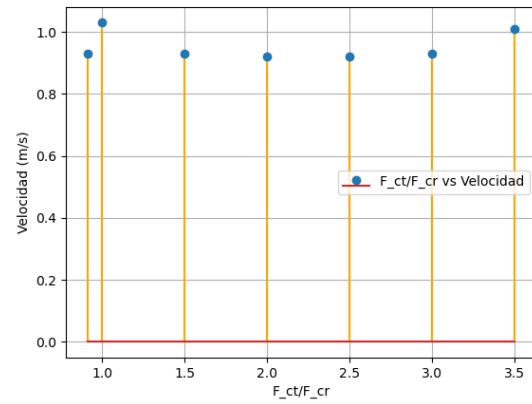


(B) F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro izquierda mapa 1

FIGURA 36: F_{ct}/F_{cr} vs Distancia muros mapa 1. Fuente: Autor.



(A) F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo mapa 1

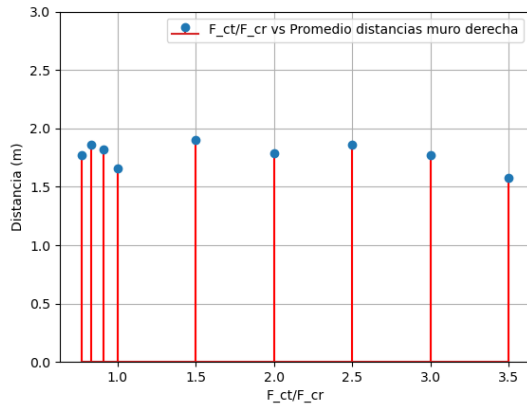


(B) F_{ct}/F_{cr} vs Velocidad promedio mapa 1

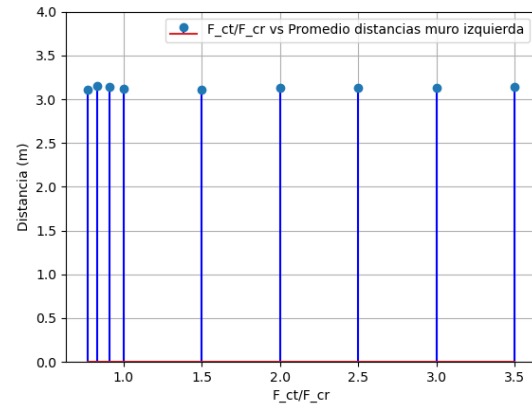
FIGURA 37: F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo y velocidad promedio mapa 1. Fuente: Autor.

6.2.4.2. Mapa 2

Se presentarán los datos de promedio de distancia con los muros, velocidad y tiempo para las variaciones respectivas en la relación F_{ct}/F_{cr} para el mapa 2.

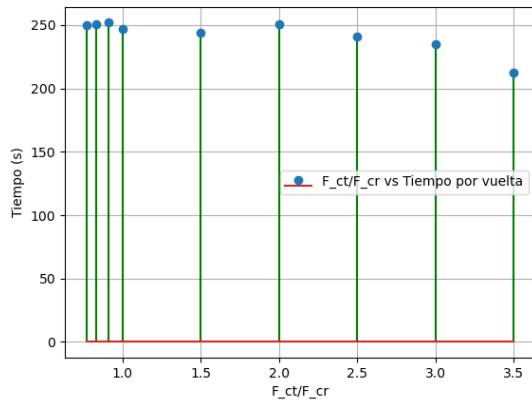


(A) F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro derecha mapa 2

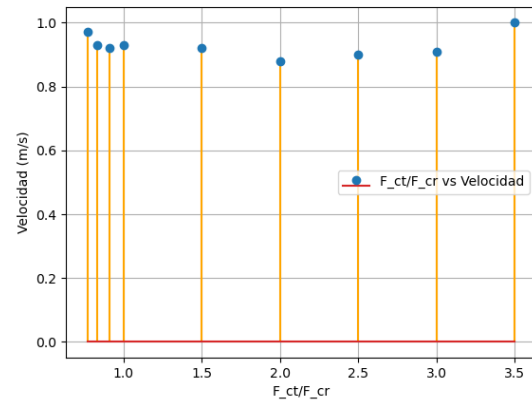


(B) F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro izquierda mapa 2

FIGURA 38: F_{ct}/F_{cr} vs Distancia muros mapa 1. Fuente: Autor.



(A) F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo mapa 2

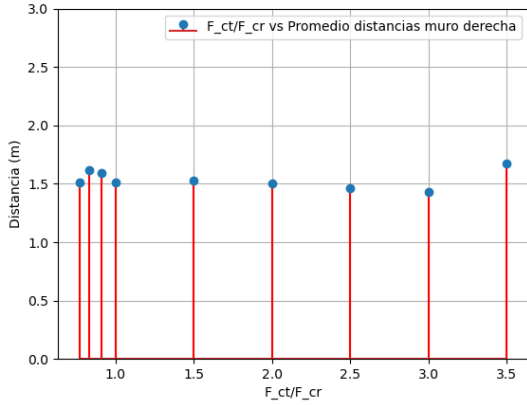


(B) F_{ct}/F_{cr} vs Velocidad promedio mapa 2

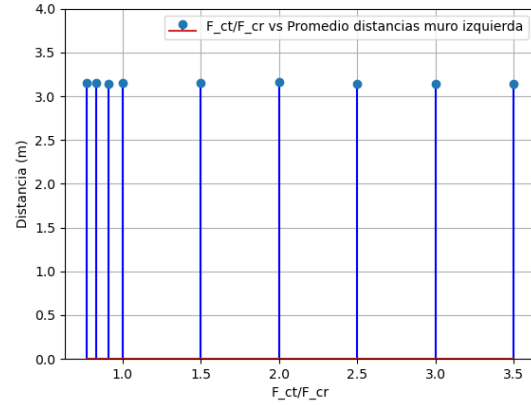
FIGURA 39: F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo y velocidad promedio mapa 2. Fuente: Autor.

6.2.4.3. Mapa 3

Se presentarán los datos de promedio de distancia con los muros, velocidad y tiempo para las variaciones respectivas en la relación F_{ct}/F_{cr} para el mapa 3.

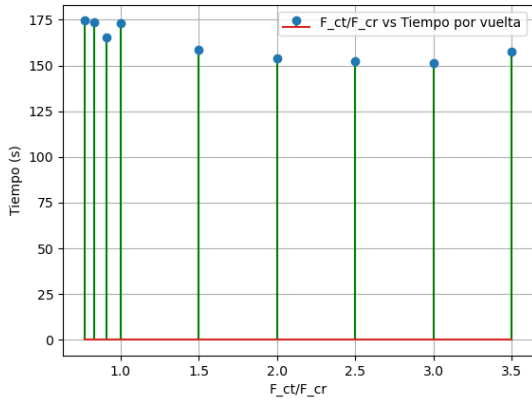


(A) F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro derecha mapa 3

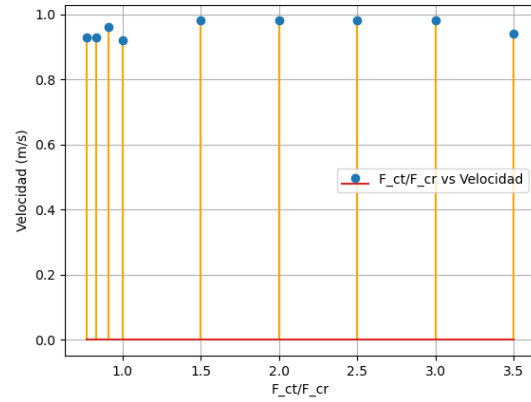


(B) F_{ct}/F_{cr} vs Promedio distancia muro izquierda mapa 3

FIGURA 40: F_{ct}/F_{cr} vs Distancia muros mapa 1. Fuente: Autor.



(A) F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo mapa 3



(B) F_{ct}/F_{cr} vs Velocidad promedio mapa 3

FIGURA 41: F_{ct}/F_{cr} vs Tiempo y velocidad promedio mapa 3. Fuente: Autor.

De la Figura 36 hasta la Figura 41, se puede observar el comportamiento que se obtiene al variar la proporción de F_{ct} con respecto a F_{cr} en los diferentes mapas. Como dato más importante, se observa que el mejor tiempo en todos los casos es cuando el coeficiente de atracción es 3.5 veces mayor al de repulsión. Sin embargo, se observa que en estos casos la distancia en los muros al realizar una curva se vuelve menor. En el caso de la relación 1/1, se obtiene una navegación más regular en las curvas como en las rectas, sin presentar cambios bruscos. Además, en este

caso el tiempo de vuelta no presenta una gran diferencia con respecto a los menores tiempos presentados.

Al aumentar la mencionada proporción, es decir, al darle una mayor fuerza de atracción respecto a la de repulsión en un factor de 1.5, la navegación del vehículo se vuelve lenta e insegura. Sin embargo, al seguir aumentando este factor se puede observar una recuperación en el tiempo que se demora en recorrer la pista. No obstante, la navegación se vuelve más insegura debido a que presenta una menor distancia promedio en alguno de los dos muros, por lo que se prevé que al seguir aumentando este factor la navegación empiece a fallar.

En el caso de una relación menor, es decir, el coeficiente de repulsión es mayor al de atracción surge un problema, en el cual se corre el riesgo de no completar la pista. Debido a que al aumentar la magnitud del vector de repulsión el sistema de planificación de rutas determina que la mejor ruta para evitar los obstáculos es dar un giro de 180° . Esto sucede al tener una relación menor 1/1.1 en el mapa 1. Este mapa es el que presenta un mayor promedio de ángulo de curvas, por lo que se infiere que la incapacidad del algoritmo de encontrar una ruta que realice una vuelta, es debido a las curvas tan pronunciadas que este mapa presenta.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros

7.1. Conclusiones

Se establece el modelo que permite simular el vehículo y evaluar su comportamiento en los parámetros de entrada, siendo estos: velocidad y ángulo de giro, como en sus parámetros de salida, siendo estos: posición y ángulo del vehículo. Esto se logró a partir de una revisión de las investigaciones pasadas.

Para el diseño de la técnica de control MPC, se tuvieron en cuenta diferentes factores para su correcto funcionamiento. Entre los cuales se definió un tiempo de paso de 0.01 s y un horizonte de predicciones de 0.1 s. Con estos parámetros el sistema presentó un tiempo de respuesta adecuado para encontrar la solución a los diversos problemas que presentaban los escenarios de prueba.

Para el diseño del planeador de rutas, se utilizó la fusión de 2 métodos diseñados para esto, donde se pudo obtener la mejor parte de ambos y solventar los problemas que presentaba uno con la ayuda del otro. Además, se propuso la variación de 2 coeficientes con el fin de encontrar la relación seguridad - velocidad asociada a estos.

A partir de la variación de los coeficientes de fuerzas (atracción y repulsión). Se obtuvo que la relación de 1/1 presenta la trayectoria más estable, en la cual guarda una distancia igual a ambos muros, a su vez presenta un buen tiempo de realización de las pistas. En el caso de la relación en la cual el vector de atracción es 3.5 veces mayor, el sistema completaba sus escenarios en el menor tiempo posible y con la mejor velocidad promedio, respecto a las pruebas realizadas con diferentes relaciones. Por último, en los casos en los que el vector de repulsión era mayor al de atracción, se presentaban navegaciones muy inestables y se corría el riesgo de no completar las

pistas, debido a que el algoritmo se centraba más en evitar los obstáculos, que seguir el punto objetivo.

7.2. Trabajos futuros

Como trabajos futuros, se plantea reemplazar el algoritmo de planificación de ruta, por un algoritmo basado en inteligencia artificial, con la finalidad de comparar los algoritmos convencionales, con los algoritmos basados en inteligencia artificial.

Otra aplicación sería implementar un LMPC (Learning Model Predictive Control) que se encargue de realizar una optimización de trayectoria iterativa, con el fin de minimizar el tiempo que tarda el vehículo en dar una vuelta en cada uno de los escenarios.

Bibliografía

- [1] Hui Zhang y Simon G. Braun. «Signal processing and control challenges for smart vehicles». En: *Mechanical Systems and Signal Processing* 87 (2017). Signal Processing and Control challenges for Smart Vehicles, págs. 1-3. ISSN: 0888-3270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.11.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327016304848>.
- [2] Peter Harwood. «LA SEGURIDAD VIAL EN BOGOTÁ D.C. DESDE LA TEORÍA DE LA ORGANIZACIÓN Y ADMINISTRACIÓN PÚBLICA PERIODO 2010 – 2019». Tesis de mtría. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, 2020.
- [3] Juan Antonio Guerrero-ibanez, Sherali Zeadally y Juan Contreras-Castillo. «Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies». En: *IEEE Wireless Communications* 22.6 (2015), págs. 122-128. DOI: 10.1109/MWC.2015.7368833.
- [4] J. Yoon et al. «Unified Chassis Control for Vehicle Rollover Prevention». En: *IFAC Proceedings Volumes* 41 (2008), págs. 5682-5687.
- [5] Christos Katrakazas et al. «Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions». En: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60 (2015), págs. 416-442. ISSN: 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.09.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X15003447>.
- [6] Chao Shen, Yang Shi y Brad Buckham. «Integrated Path Planning and Tracking Control of an AUV: A Unified Receding Horizon Optimization Approach». En: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22.3 (2017), págs. 1163-1173. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2612689.
- [7] Ardashir Bulsara et al. *Obstacle Avoidance Using Model Predictive Control: An Implementation and Validation Study Using Scaled Vehicles*. Inf. téc. SAE Technical Paper, 2020.

-
- [8] Rasheed Hussain y Sherali Zeadally. «Autonomous Cars: Research Results, Issues, and Future Challenges». En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 21.2 (2019), págs. 1275-1313. DOI: 10.1109/COMST.2018.2869360.
 - [9] Yu-Geng XI, Dewei Li y Shu Lin. «Model Predictive Control — Status and Challenges». En: *Acta Automatica Sinica* 39 (mar. de 2013), págs. 222-236. DOI: 10.1016/S1874-1029(13)60024-5.
 - [10] Ashenafi Damtew et al. «The effect of long distance transportation stress on cattle: a review». En: *Biomedical Journal* 2.5 (2018).
 - [11] Ph.D. Henry Claypool Amitai Bin-Nun y Jeffrey Gerlach. «SELF-DRIVING CARS: THE IMPACT ON PEOPLE WITH DISABILITIES». En: *THE RUDERMAN WHITE PAPER* (2017). URL: https://rudermanfoundation.org/wp-content/uploads/2017/08/Self-Driving-Cars-The-Impact-on-People-with-Disabilities_FINAL.pdf.
 - [12] J. Worland. «Self-Driving Cars Could Help Save the Environment—Or Ruin It. It Depends on Us». En: *time* (2016).
 - [13] Behnaz Ahmadi. «Design a Reliable Model Predictive Control for Path Following with Application to the Autonomous Vehicle and Considering Different Vehicle Models». Tesis de mtría. University of Waterloo, 2021.
 - [14] Xiangjun Qian. «Model predictive control for autonomous and cooperative driving». Tesis doct. Ph. D. Thesis, PSL Research University, France, 2017.
 - [15] Arnaud De La Fortelle et al. «Network of automated vehicles: the autonet2030 vision». En: *21st World Congress on Intelligent Transport Systems*. CONF. 2014.
 - [16] Julius Ziegler et al. «Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route». En: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 6.2 (2014), págs. 8-20. DOI: 10.1109/MITS.2014.2306552.
 - [17] Daniel P Piatkowski et al. *Preparing for a Driverless Future*. Inf. téc. Nebraska. Department of Transportation, 2020.
 - [18] Julius Ziegler et al. «Making bertha drive—an autonomous journey on a historic route». En: *IEEE Intelligent transportation systems magazine* 6.2 (2014), págs. 8-20.
 - [19] Pedro F Lima. «Optimization-based motion planning and model predictive control for autonomous driving: With experimental evaluation on a heavy-duty construction truck». Tesis doct. KTH Royal Institute of Technology, 2018.
 - [20] Ugo Rosolia, Ashwin Carvalho y Francesco Borrelli. «Autonomous racing using learning Model Predictive Control». En: *2017 American Control Conference (ACC)*. 2017, págs. 5115-5120. DOI: 10.23919/ACC.2017.7963748.

-
- [21] Keshav Bimbraw. «Autonomous cars: Past, present and future a review of the developments in the last century, the present scenario and the expected future of autonomous vehicle technology». En: *2015 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Vol. 01. 2015, págs. 191-198.
 - [22] Roger W Brockett et al. «Asymptotic stability and feedback stabilization». En: *Differential geometric control theory* 27.1 (1983), págs. 181-191.
 - [23] Hans Andersen et al. «Trajectory optimization for autonomous overtaking with visibility maximization». En: *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2017, págs. 1-8. DOI: 10.1109/ITSC.2017.8317853.
 - [24] Mitesh Agrawal. «What is Model Predictive Control (MPC)?» En: *Control Automation* (2020). URL: <https://control.com/technical-articles/what-is-model-predictive-control-mpc/>.
 - [25] Jie Ji et al. «Path Planning and Tracking for Vehicle Collision Avoidance Based on Model Predictive Control With Multiconstraints». En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66.2 (2017), págs. 952-964. DOI: 10.1109/TVT.2016.2555853.
 - [26] Xinxin Du, Kyaw Ko Ko Htet y Kok Kiong Tan. «Development of a Genetic-Algorithm-Based Nonlinear Model Predictive Control Scheme on Velocity and Steering of Autonomous Vehicles». En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63.11 (2016), págs. 6970-6977. DOI: 10.1109/TIE.2016.2585079.
 - [27] Pedro F. Lima et al. «Spatial Model Predictive Control for Smooth and Accurate Steering of an Autonomous Truck». En: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 2.4 (2017), págs. 238-250. DOI: 10.1109/TIV.2017.2767279.
 - [28] Jiechao Liu et al. «Combined Speed and Steering Control in High-Speed Autonomous Ground Vehicles for Obstacle Avoidance Using Model Predictive Control». En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66.10 (2017), págs. 8746-8763. DOI: 10.1109/TVT.2017.2707076.
 - [29] Hans Andersen et al. «Trajectory optimization for autonomous overtaking with visibility maximization». En: *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE. 2017, págs. 1-8.
 - [30] Yoonsuk Choi et al. «A variable-sampling time model predictive control algorithm for improving path-tracking performance of a vehicle». En: *Sensors* 21.20 (2021), pág. 6845.
 - [31] Stephen P Boyd y Lieven Vandenberghe. *Convex optimization*. Cambridge university press, 2004.

-
- [32] Sven Leyffer y Ashutosh Mahajan. «Nonlinear constrained optimization: methods and software». En: *Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois* 60439 (2010).
 - [33] A Wächter. «IPOPT Online Dokumentation. web site [http://www. coin-or. org](http://www.coin-or.org)». En: *Ipoprt/documentation* (2015).
 - [34] Y. Koren y J. Borenstein. «Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation». En: (1991), 1398-1404 vol.2. DOI: 10.1109/ROBOT.1991.131810.
 - [35] traxxas. <https://traxxas.com/products/models/electric/slash-4x4-tsm?t=specs>.
 - [36] Intel® RealSense™ Product Family D400 Series Datasheet Intel® RealSense™ Vision Processor D4, Intel® RealSense™ Vision. 2022. URL: www.intel.com/design/literature.htm.
 - [37] VESC 6 MkVI PCB - The next generation - Benjamin Vedder Electronic Speed Controller. 2022. URL: <https://trampaboards.com/vesc-6-mkv--the-next-generation--benjamin-vedder-electronic-speed-controller-p-27517.html>.
 - [38] Intel® NUC Products NUC11PA[x]i3/NUC11PA[x]i5/ NUC11PA[x]i7 Technical Product Specification Regulatory Models: NUC11PAK (Slim Kit/Mini PC) NUC11PAH (Tall Kit/Mini PC) NUC11PAQ (Kit/Mini PC Wireless Charging). 2022.

ANEXOS

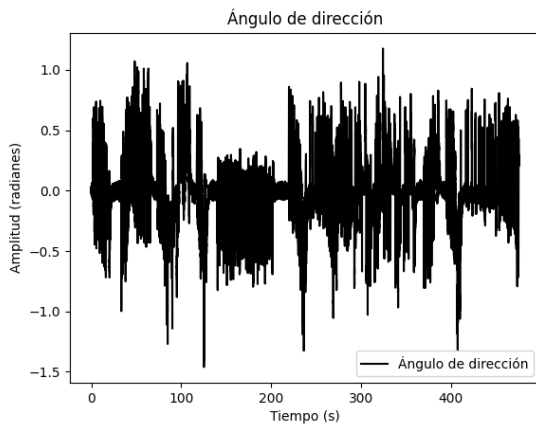
7.3. Anexo A:

<https://github.com/JuanCgarcia09/Navigation-MPC>

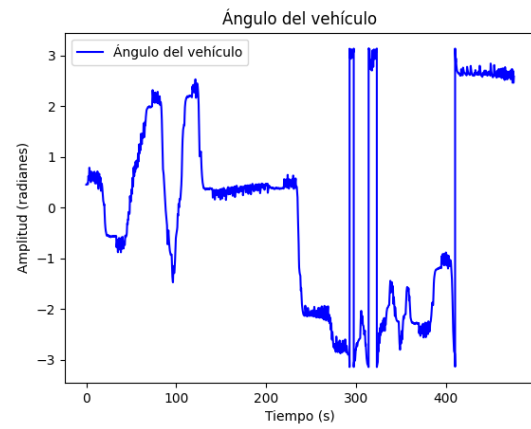
7.4. Anexo B:

7.4.1. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

7.4.1.1. Mapa 1

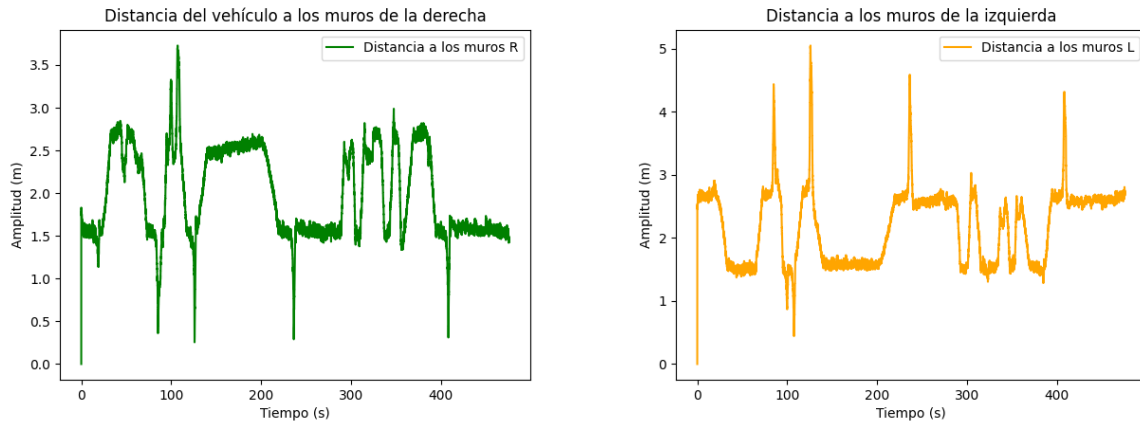


(A) Ángulo de dirección mapa 1
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$



(B) Ángulo del vehículo mapa 1
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

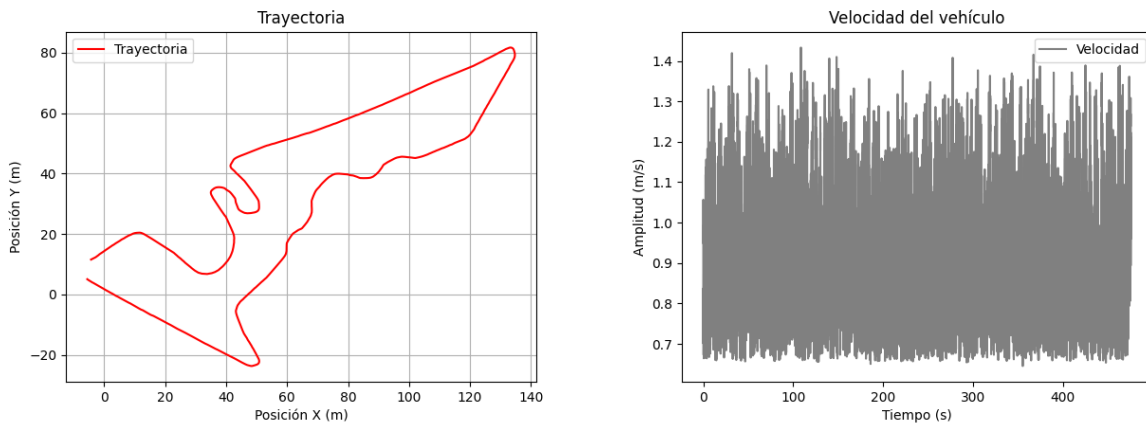
FIGURA 42: Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.



(A) Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

(B) Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 43: Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

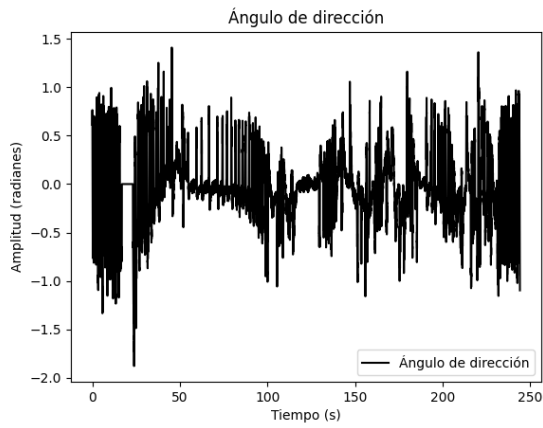
(B) Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 44: Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

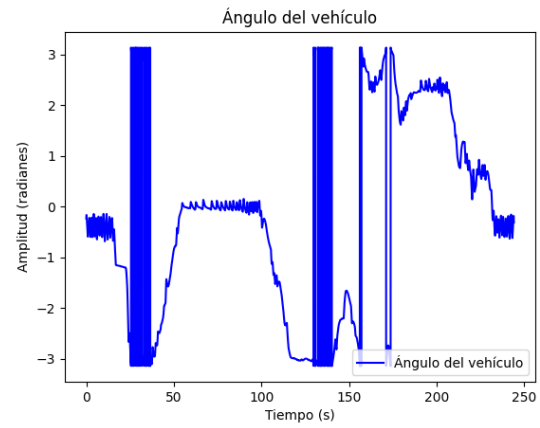
TABLA 21: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.99(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.18(m)
Tiempo	475.71 (s)
Velocidad promedio	0.93 (m/s)

7.4.1.2. Mapa 2

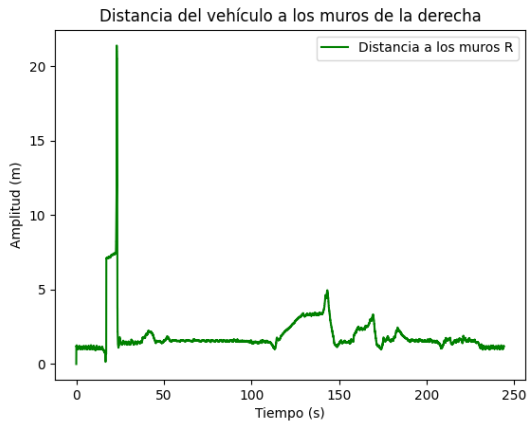


(A) Ángulo de dirección mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

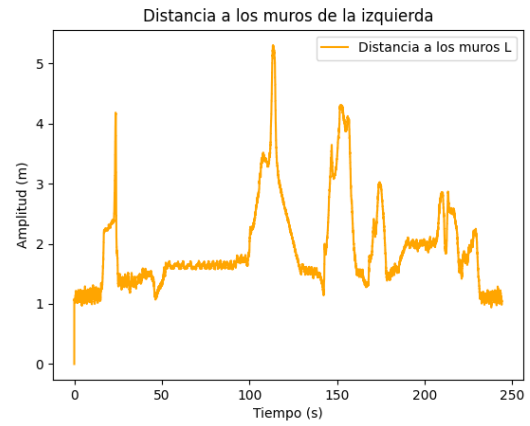


(B) Ángulo del vehículo mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 45: Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

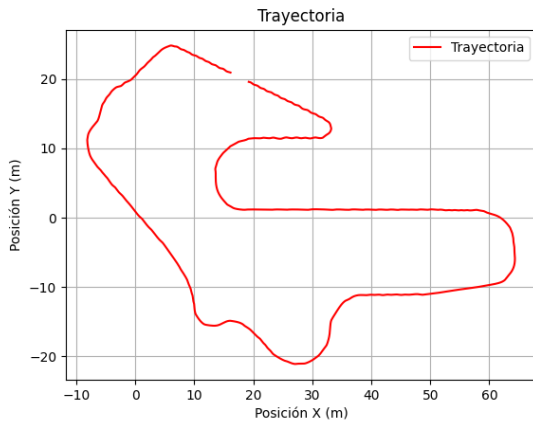


(A) Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

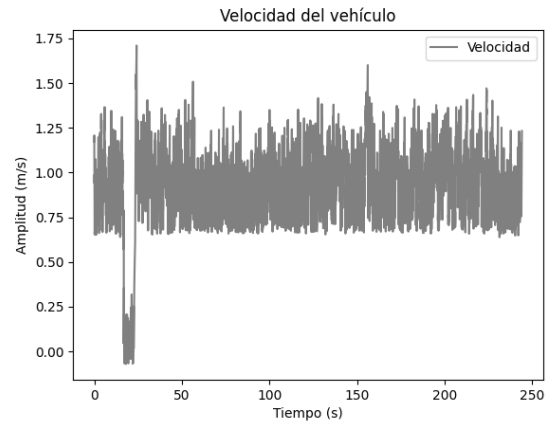


(B) Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 46: Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$



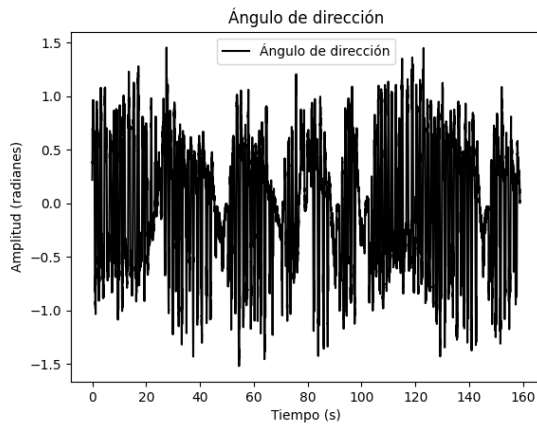
(B) Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 47: Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

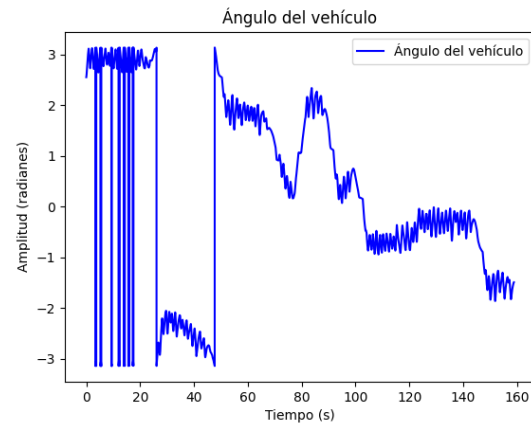
TABLA 22: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.90(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.92(m)
Tiempo	244.13 (s)
Velocidad promedio	0.92 (m/s)

7.4.1.3. Mapa 3

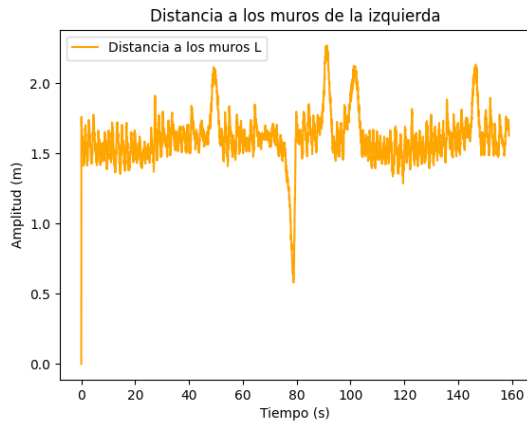


(A) Ángulo de dirección mapa 3
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

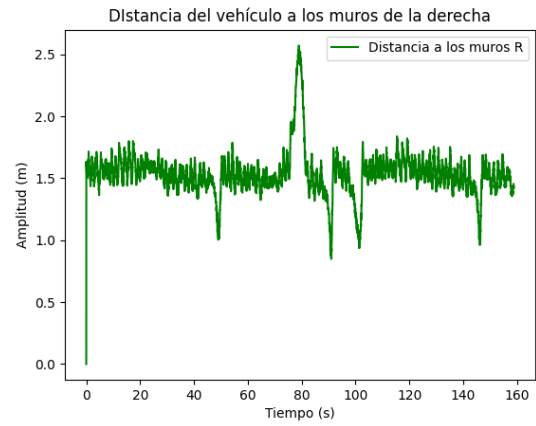


(B) Ángulo del vehículo mapa 3
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 48: Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

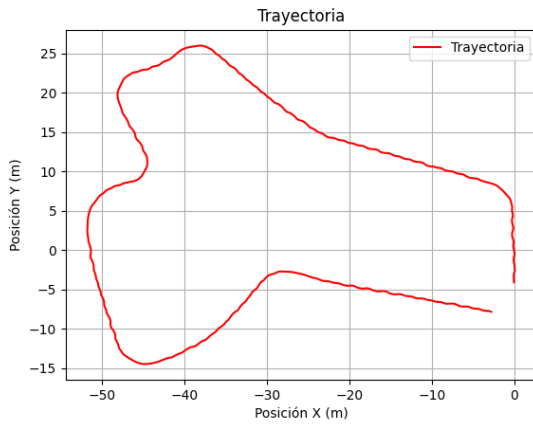


(A) Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

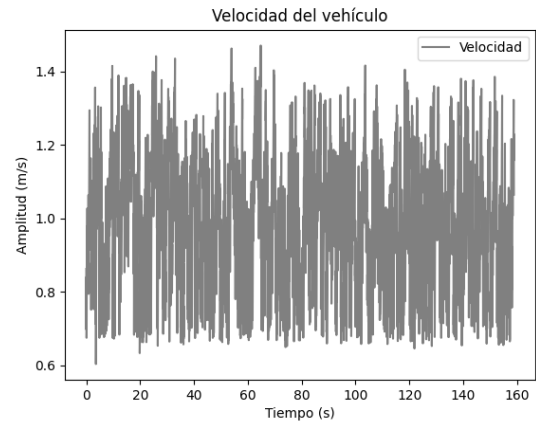


(B) Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$

FIGURA 49: Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$



(B) Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$

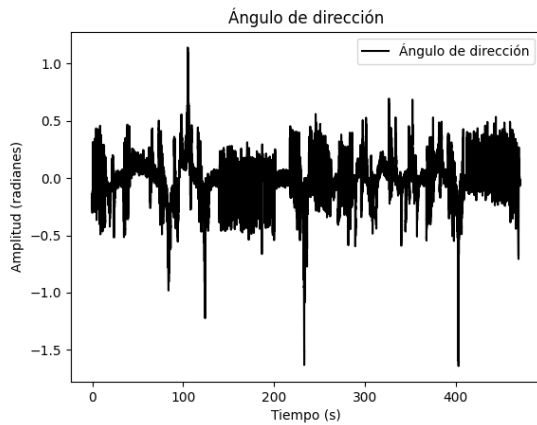
FIGURA 50: Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

TABLA 23: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 1,5$. Fuente: Autor.

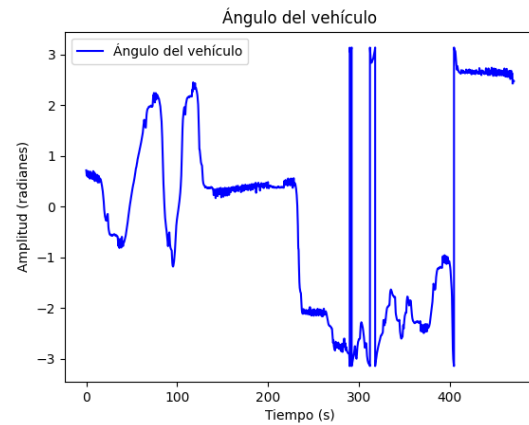
Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.53(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.61(m)
Tiempo	158.84 (s)
Velocidad promedio	0.98 (m/s)

7.4.2. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

7.4.2.1. Mapa 1

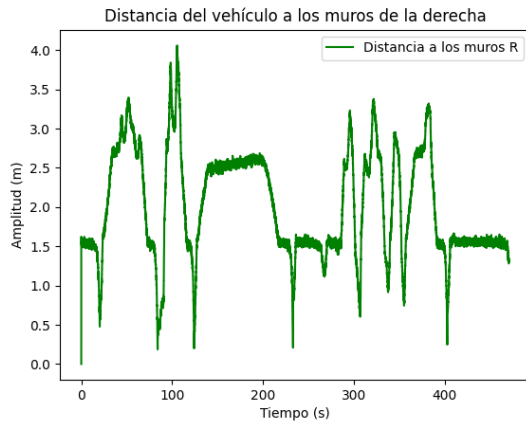


(A) Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

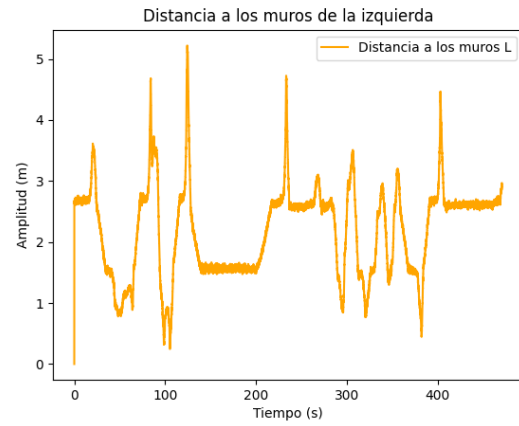


(B) Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 51: Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

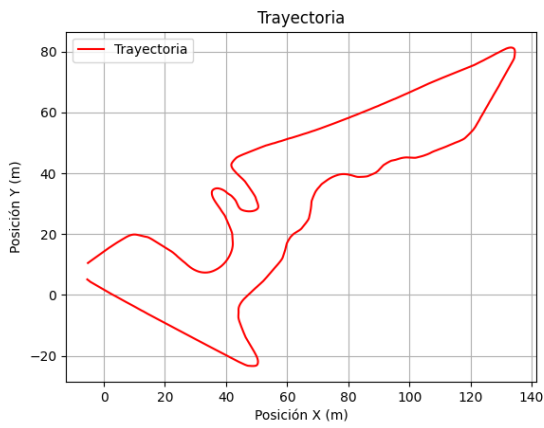


(A) Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

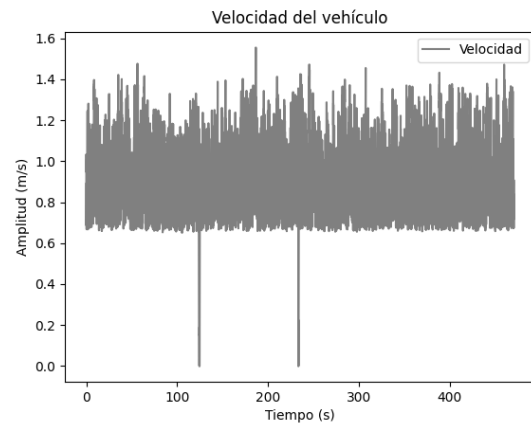


(B) Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 52: Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$



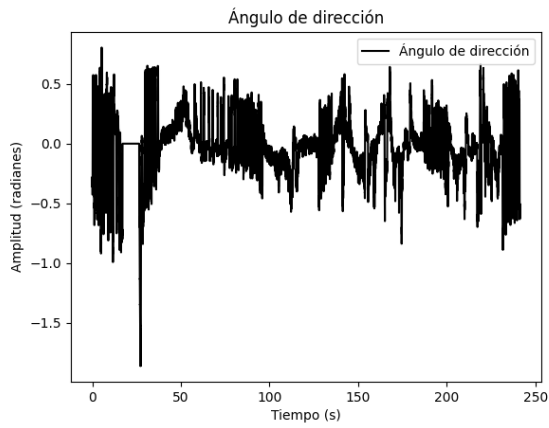
(B) Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 53: Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

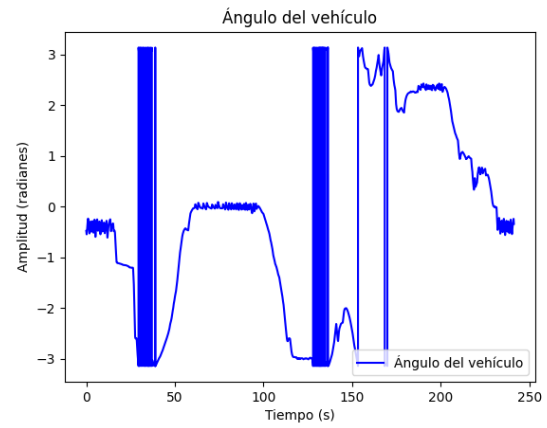
TABLA 24: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	2.00(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.18(m)
Tiempo	470.70 (s)
Velocidad promedio	0.92 (m/s)

7.4.2.2. Mapa 2

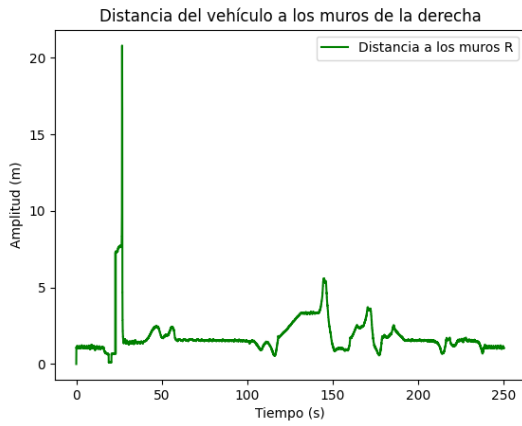


(A) Ángulo de dirección mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

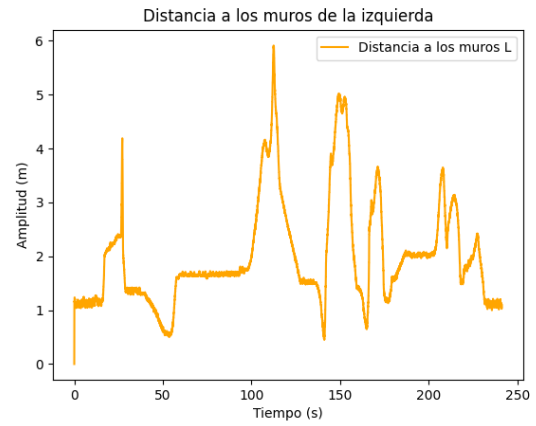


(B) Ángulo del vehículo mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 54: Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

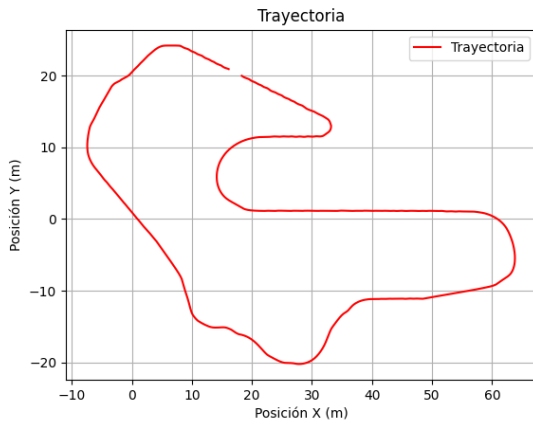


(A) Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

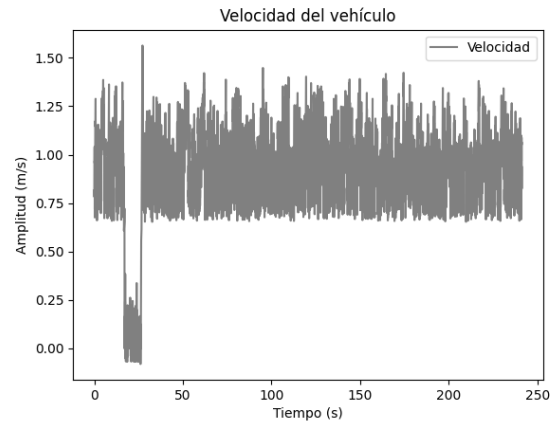


(B) Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 55: Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$



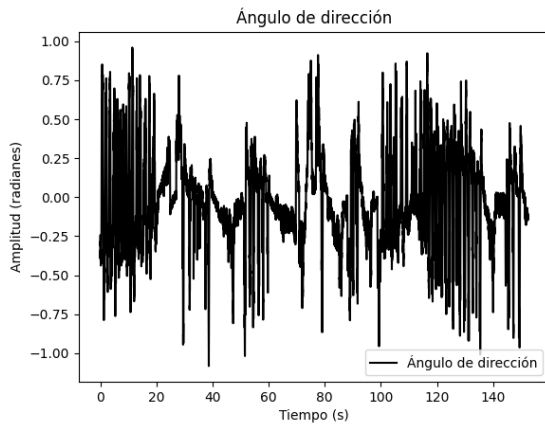
(B) Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 56: Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

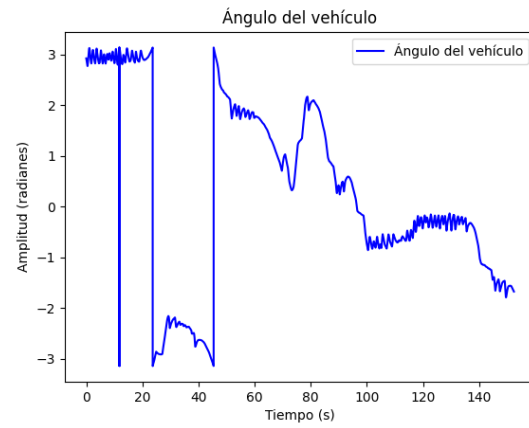
TABLA 25: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.86(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.00(m)
Tiempo	241.20 (s)
Velocidad promedio	0.90 (m/s)

7.4.2.3. Mapa 3

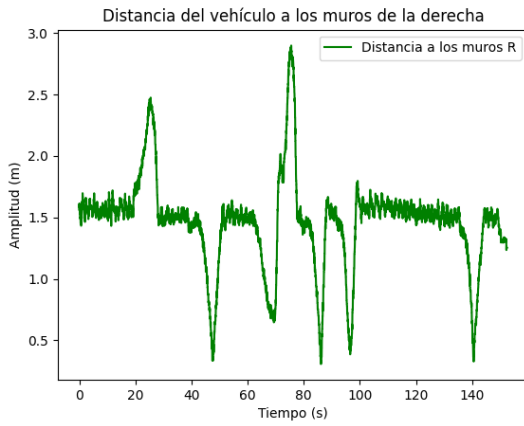


(A) Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

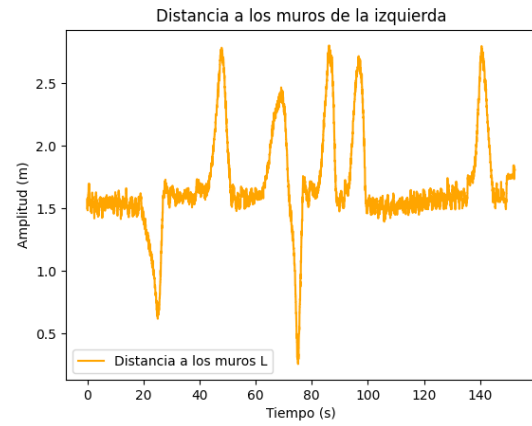


(B) Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 57: Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

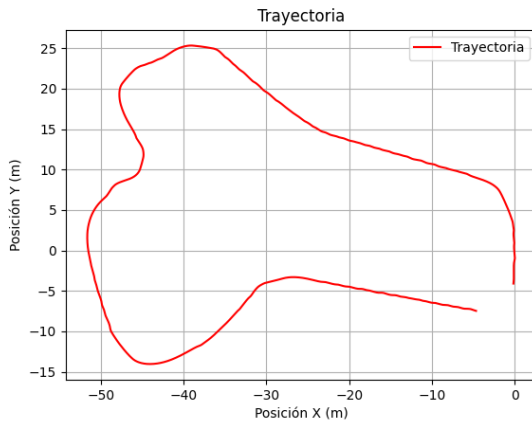


(A) Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

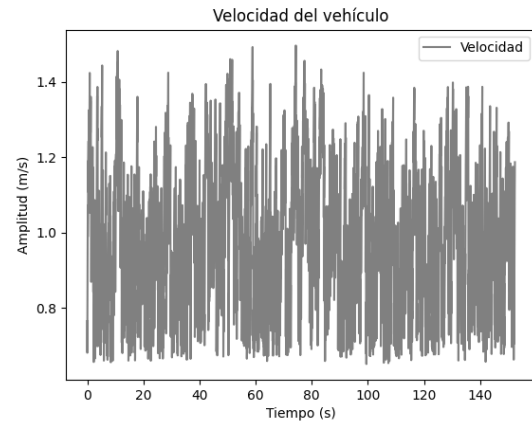


(B) Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

FIGURA 58: Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$



(B) Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$

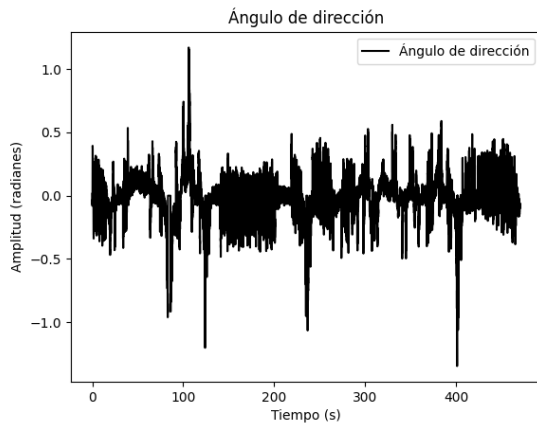
FIGURA 59: Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

TABLA 26: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 2,5$. Fuente: Autor.

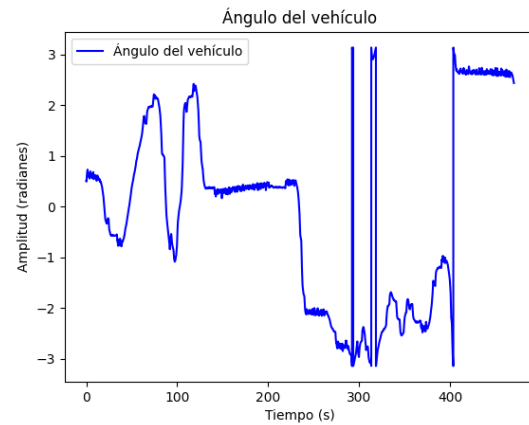
Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.46(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.68(m)
Tiempo	152.37 (s)
Velocidad promedio	0.98 (m/s)

7.4.3. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

7.4.3.1. Mapa 1

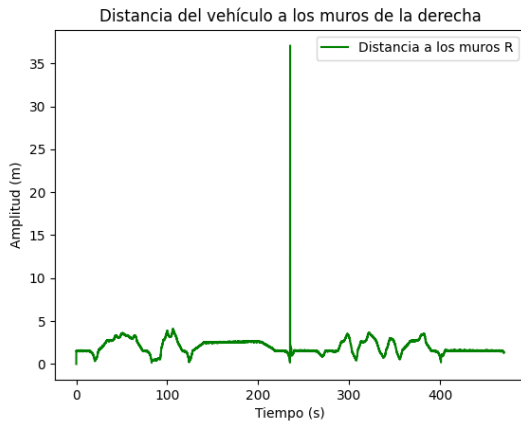


(A) Ángulo de dirección mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

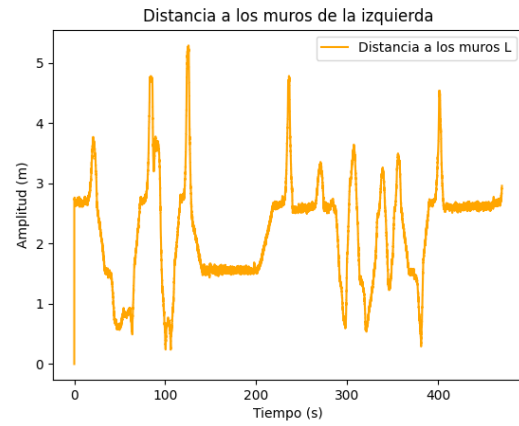


(B) Ángulo del vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 60: Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

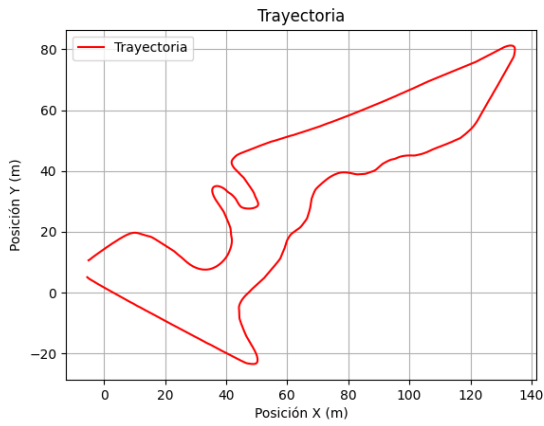


(A) Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

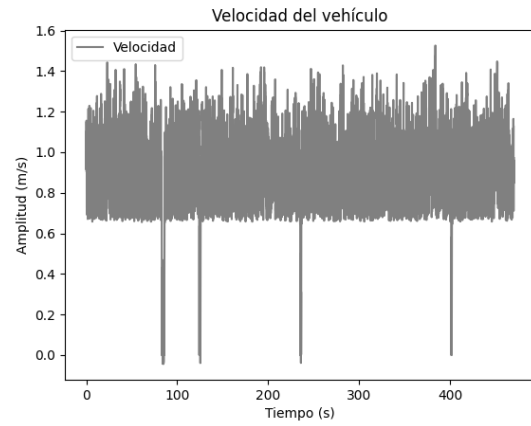


(B) Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 61: Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$



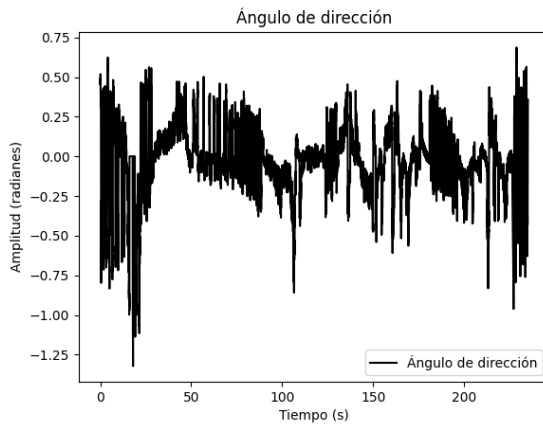
(B) Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 62: Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

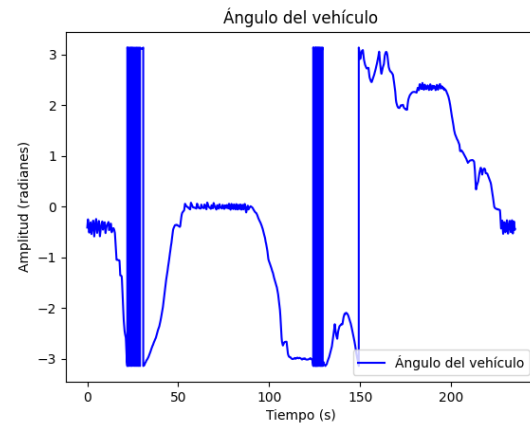
TABLA 27: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	2.01(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.21(m)
Tiempo	469.92 (s)
Velocidad promedio	0.91 (m/s)

7.4.3.2. Mapa 2

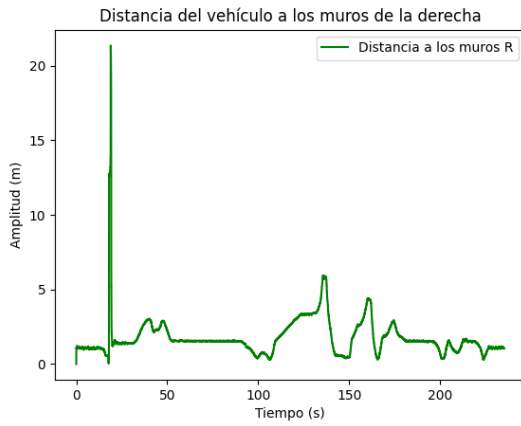


(A) Ángulo de dirección mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} =$
3

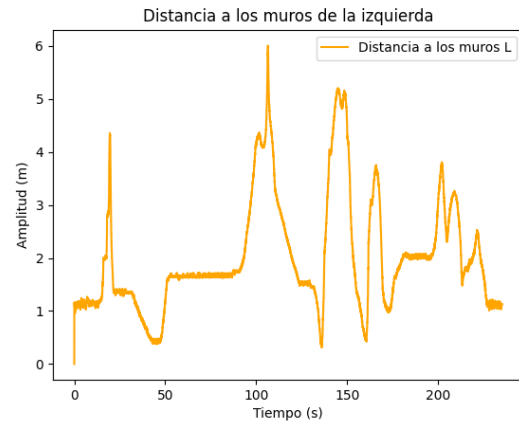


(B) Ángulo del vehículo mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} =$
3

FIGURA 63: Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

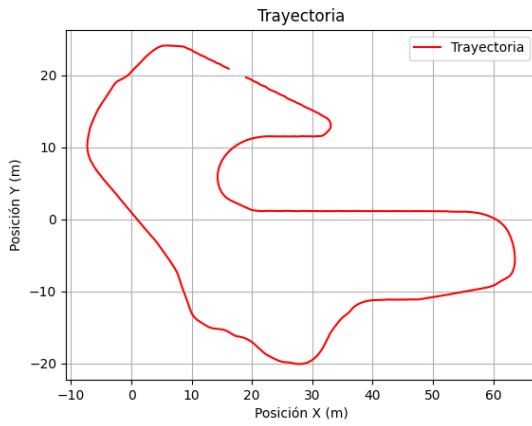


(A) Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

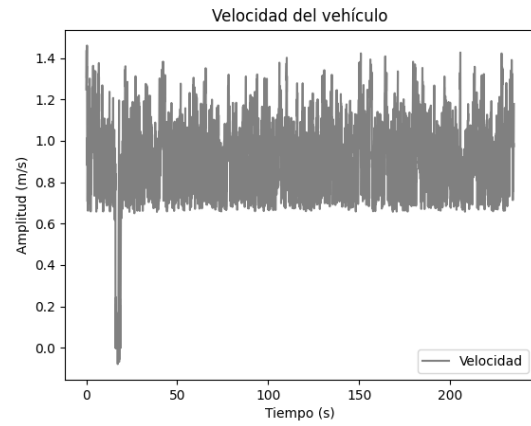


(B) Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 64: Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$



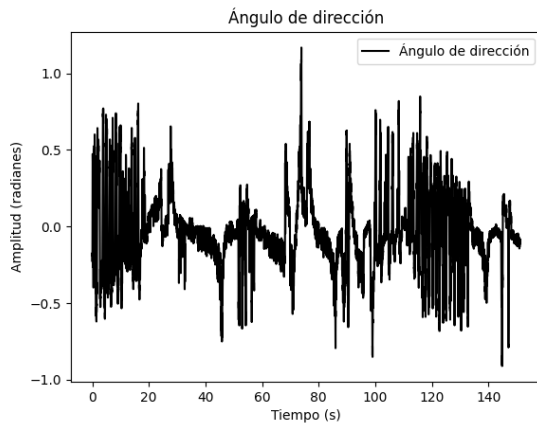
(B) Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 65: Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

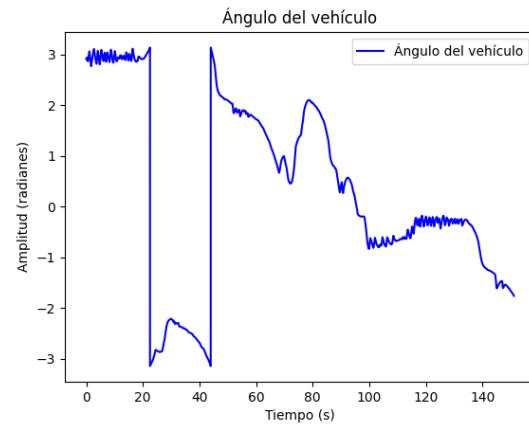
TABLA 28: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.77(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.02(m)
Tiempo	235.16 (s)
Velocidad promedio	0.91 (m/s)

7.4.3.3. Mapa 3

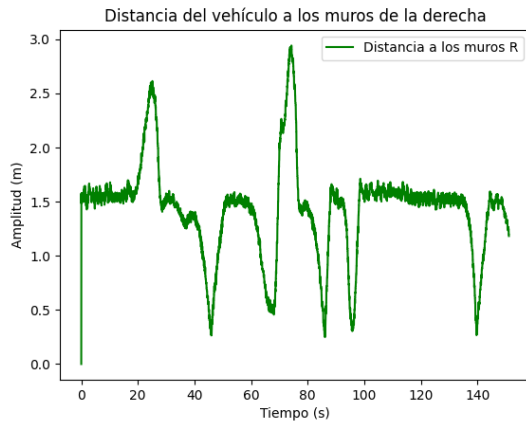


(A) Ángulo de dirección mapa 3
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

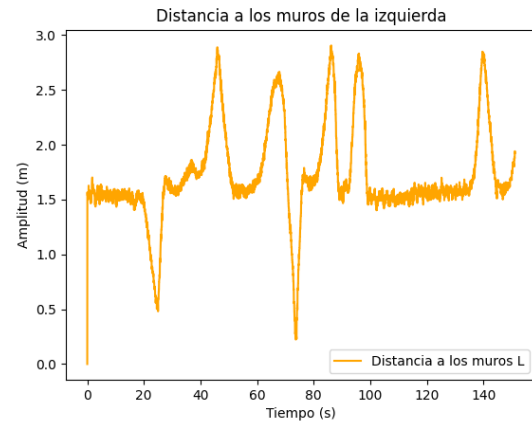


(B) Ángulo del vehículo mapa 3
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 66: Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

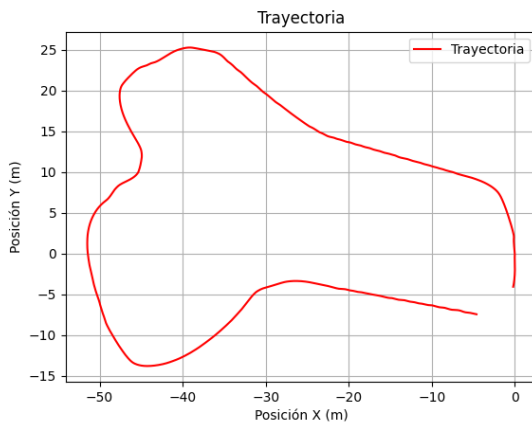


(A) Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

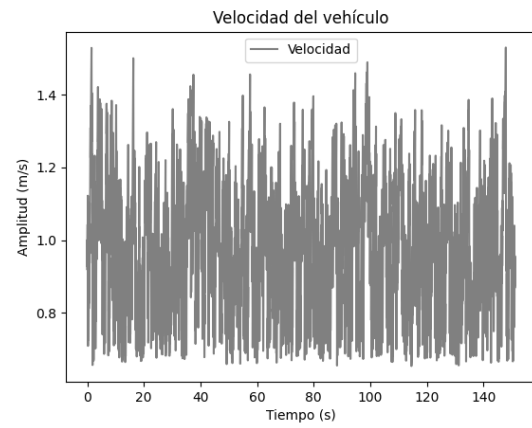


(B) Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 67: Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$



(B) Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$

FIGURA 68: Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3$. Fuente: Autor.

TABLA 29: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.43(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.72(m)
Tiempo	151.14 (s)
Velocidad promedio	0.97 (m/s)

7.4.4. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

7.4.4.1. Mapa 1

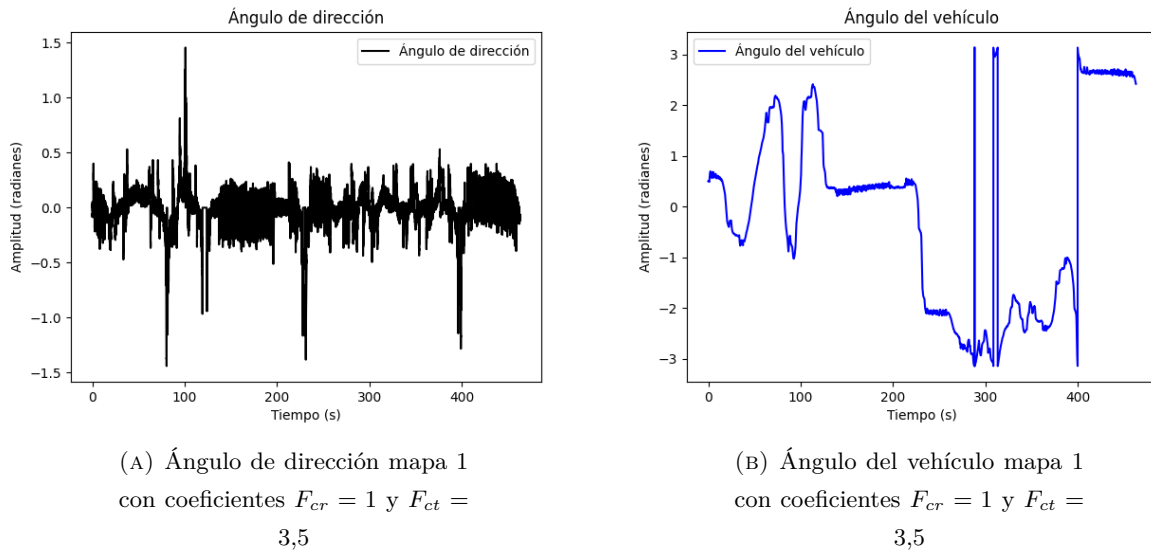
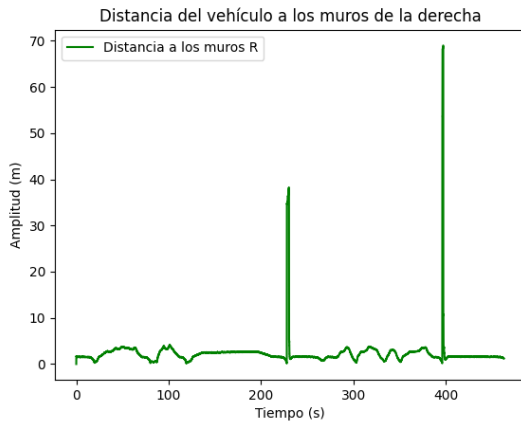
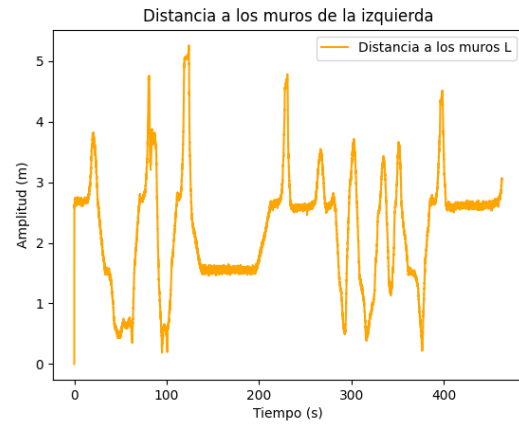


FIGURA 69: Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

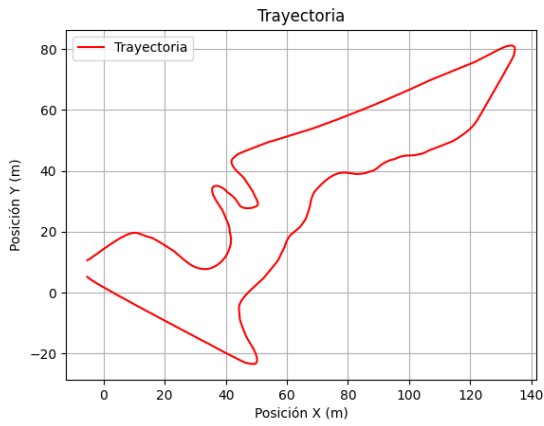


(A) Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

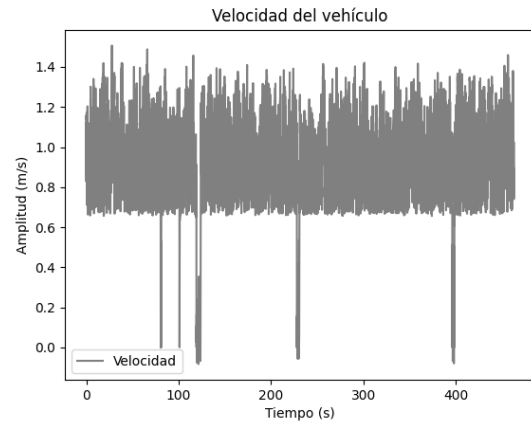


(B) Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 70: Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$



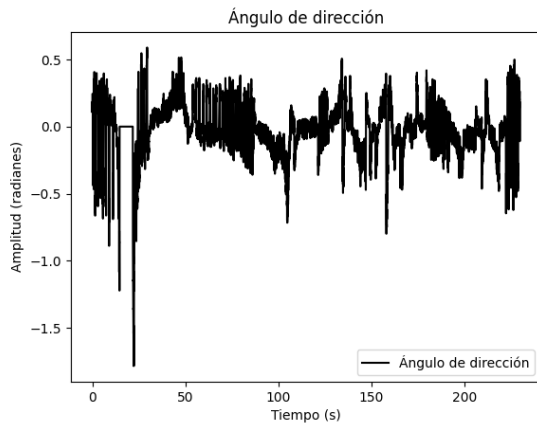
(B) Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 71: Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,3$. Fuente: Autor.

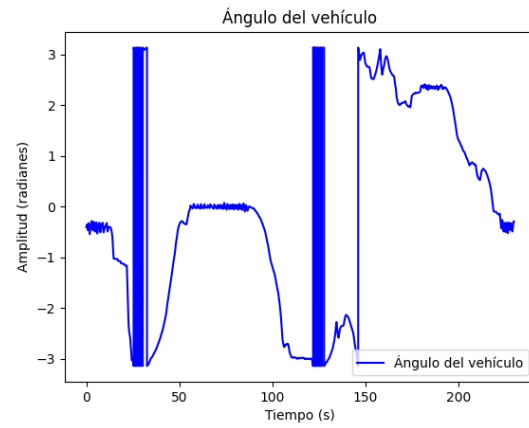
TABLA 30: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	2.36(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.22(m)
Tiempo	463 (s)
Velocidad promedio	0.92 (m/s)

7.4.4.2. Mapa 2

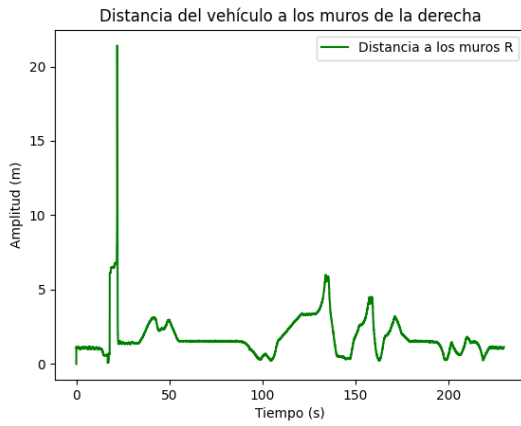


(A) Ángulo de dirección mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

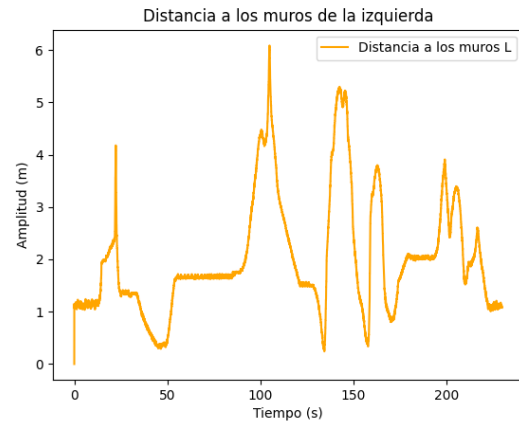


(B) Ángulo del vehículo mapa 2
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 72: Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

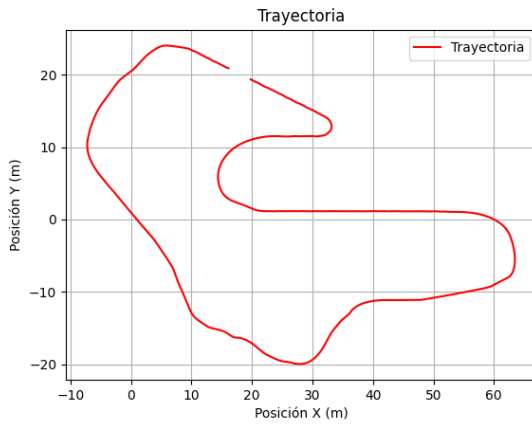


(A) Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

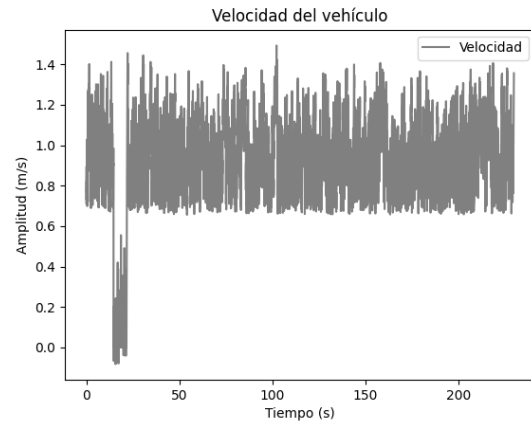


(B) Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 73: Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$



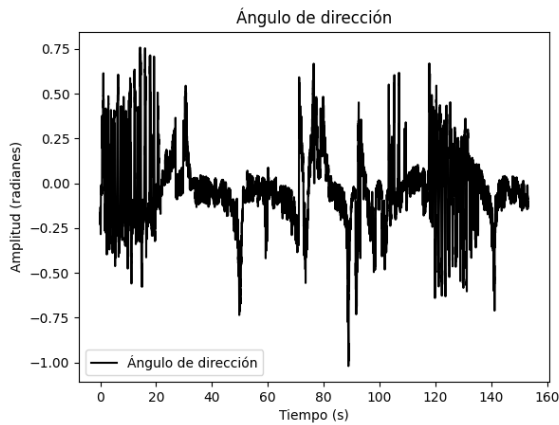
(B) Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 74: Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

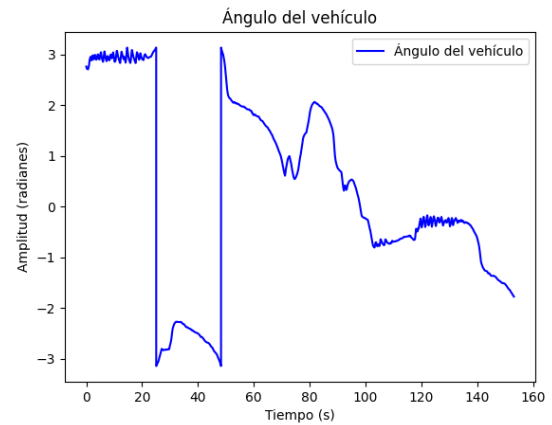
TABLA 31: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.80(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.01(m)
Tiempo	229.75 (s)
Velocidad promedio	0.92 (m/s)

7.4.4.3. Mapa 3

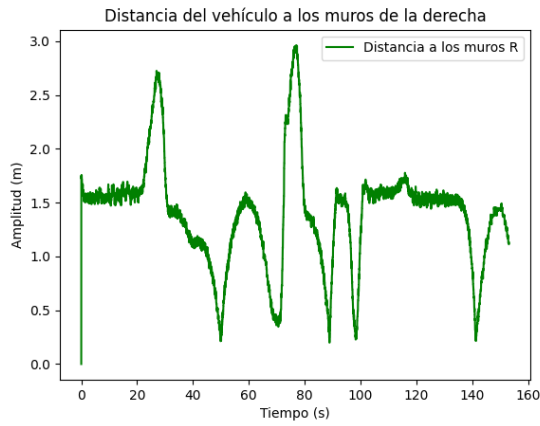


(A) Ángulo de dirección mapa 3
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

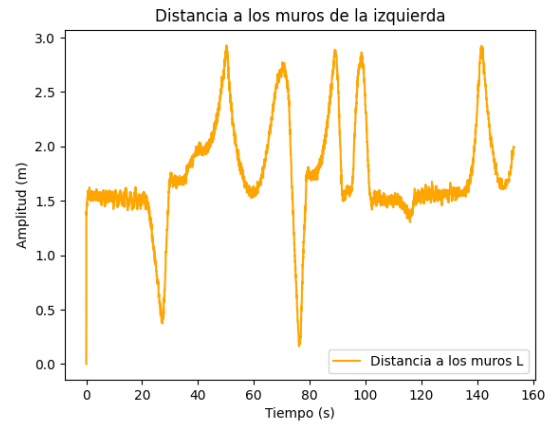


(B) Ángulo del vehículo mapa 3
con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 75: Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

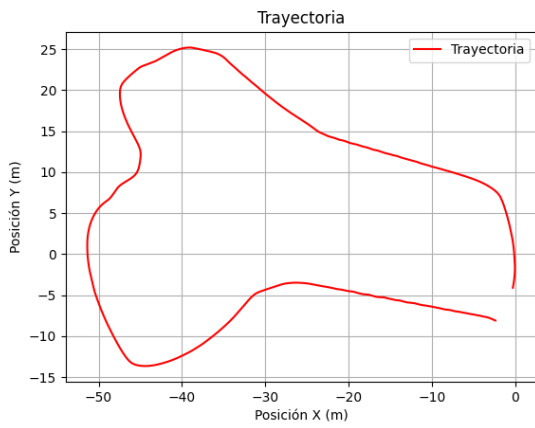


(A) Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

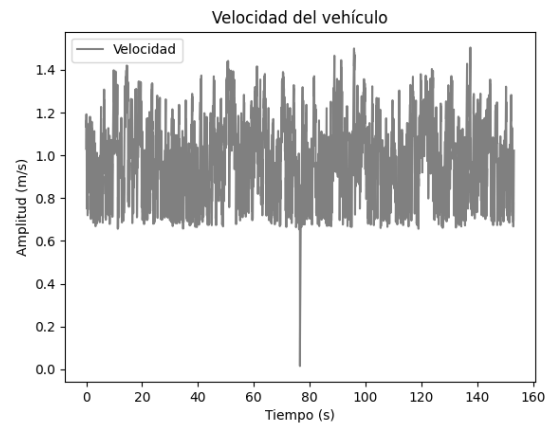


(B) Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 76: Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$



(B) Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$

FIGURA 77: Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

TABLA 32: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1$ y $F_{ct} = 3,5$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.39(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.75(m)
Tiempo	153.12 (s)
Velocidad promedio	0.97 (m/s)

7.4.5. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

7.4.5.1. Mapa 1

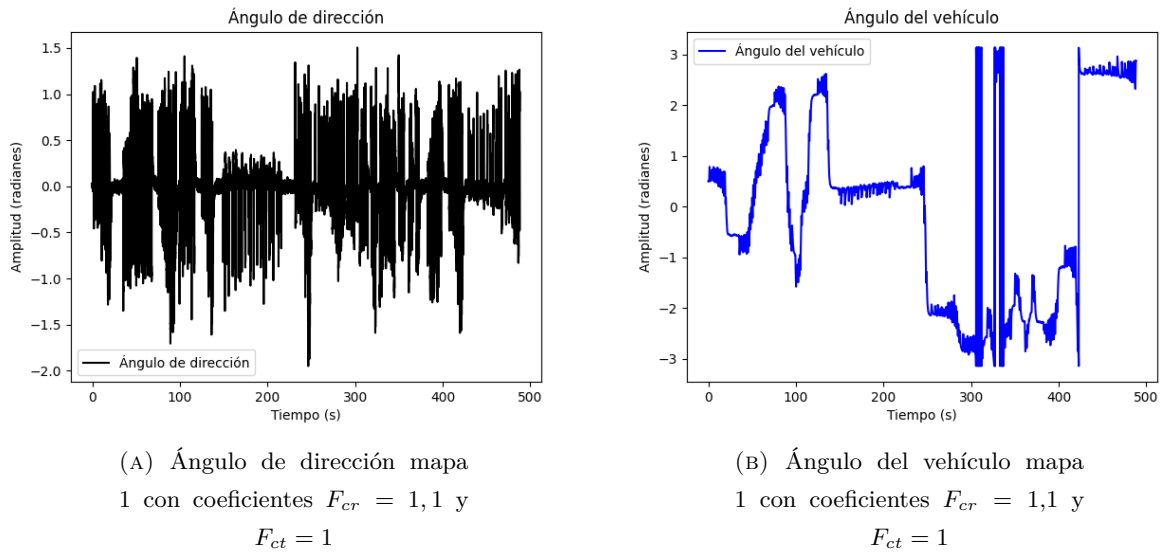
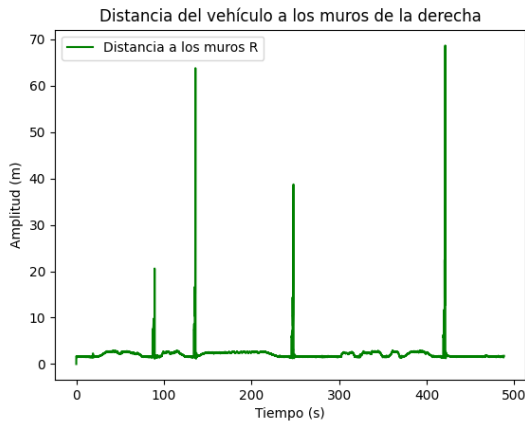
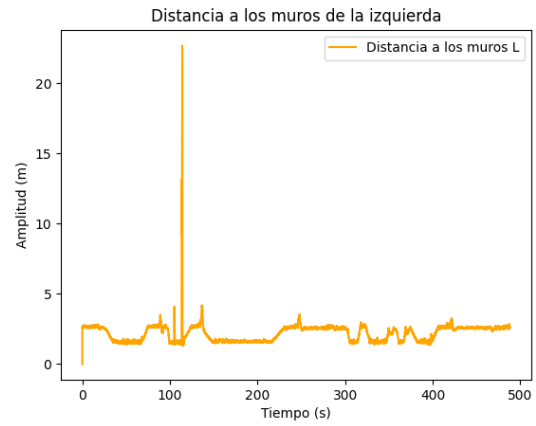


FIGURA 78: Ángulos de dirección y vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

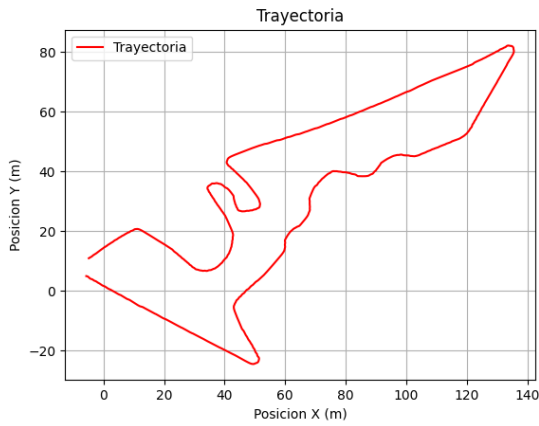


(A) Distancia muro derecha mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

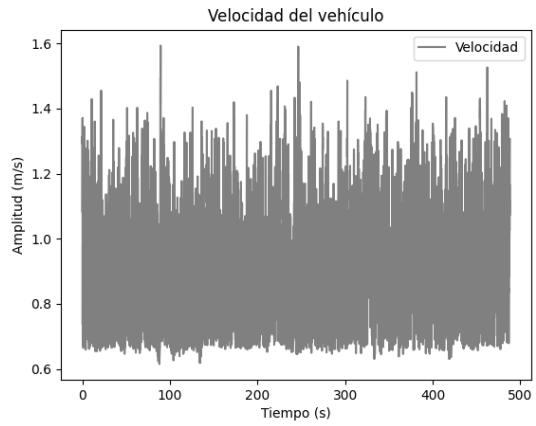


(B) Distancia muro izquierda mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 79: Distancia muros mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$



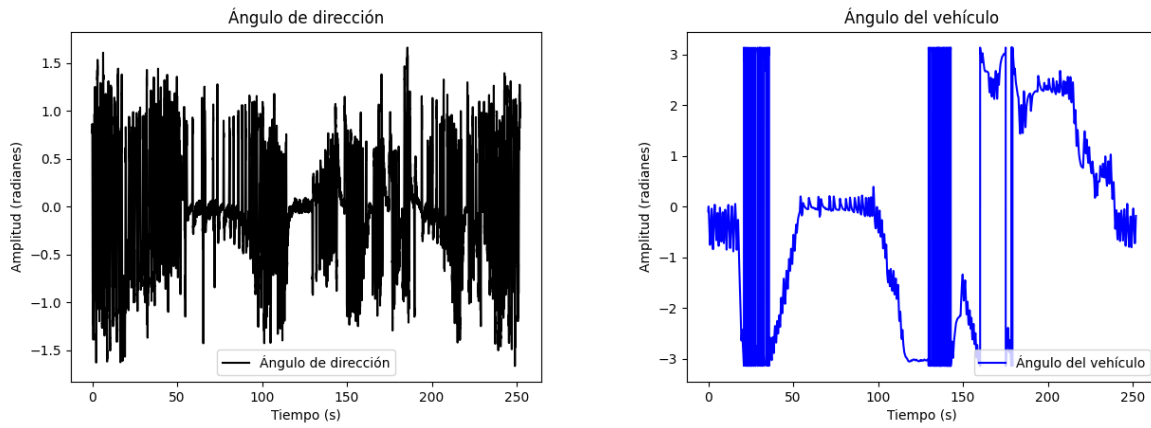
(B) Velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 80: Trayectoria y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

TABLA 33: Datos de seguridad y velocidad mapa 1 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	2.15(m)
Distancia promedio muro izquierdo	2.19(m)
Tiempo	488.19 (s)
Velocidad promedio	0.93 (m/s)

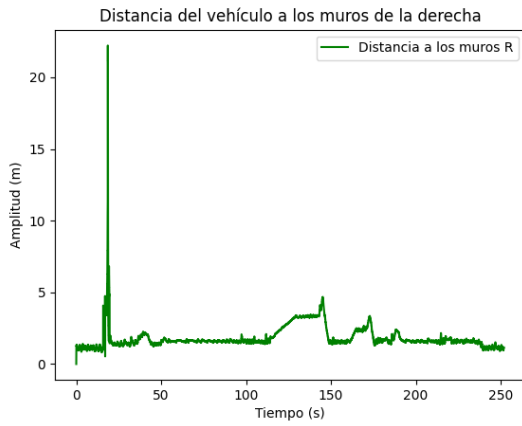
7.4.5.2. Mapa 2



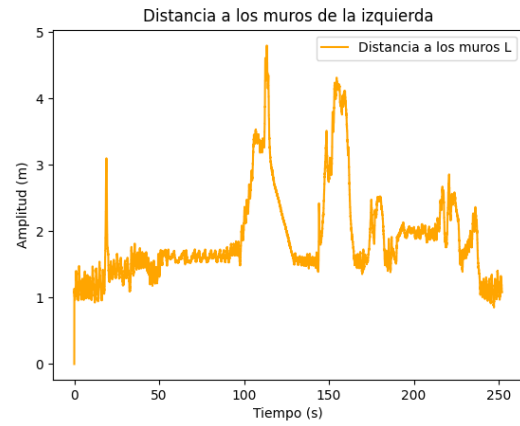
(A) Ángulo de dirección mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

(B) Ángulo del vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 81: Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

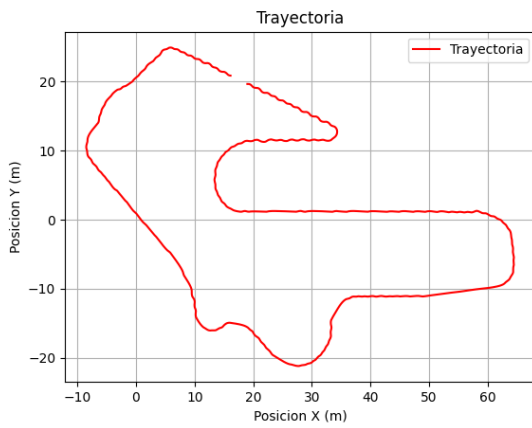


(A) Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

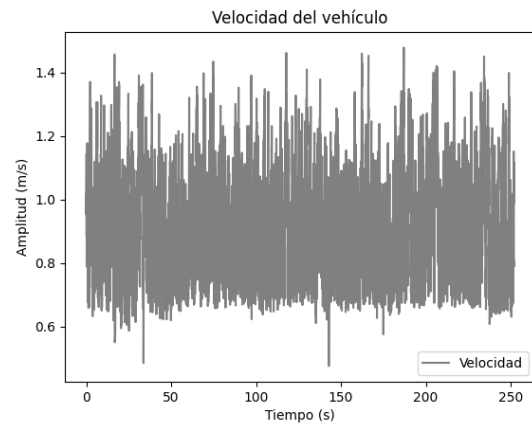


(B) Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 82: Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$



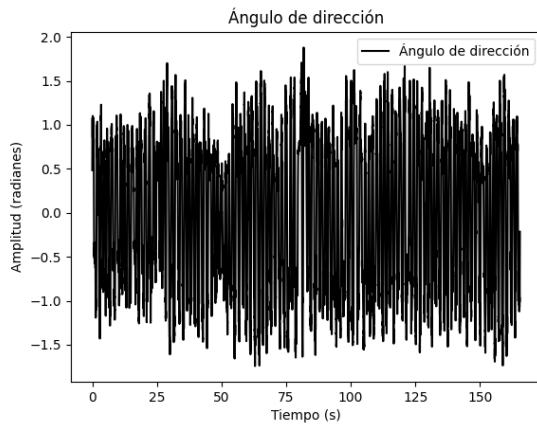
(B) Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 83: Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

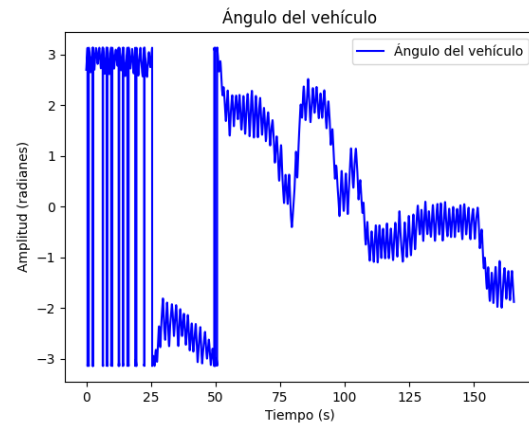
TABLA 34: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.82(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.89(m)
Tiempo	251.88 (s)
Velocidad promedio	0.92 (m/s)

7.4.5.3. Mapa 3

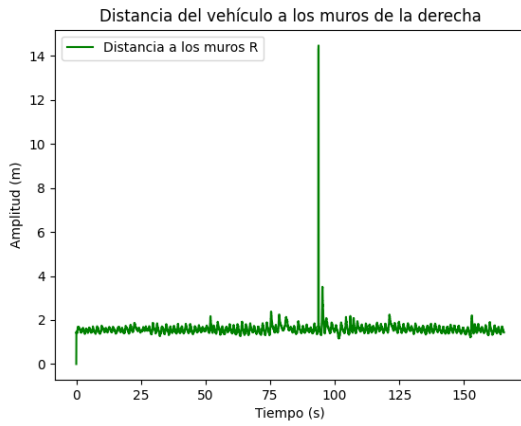


(A) Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

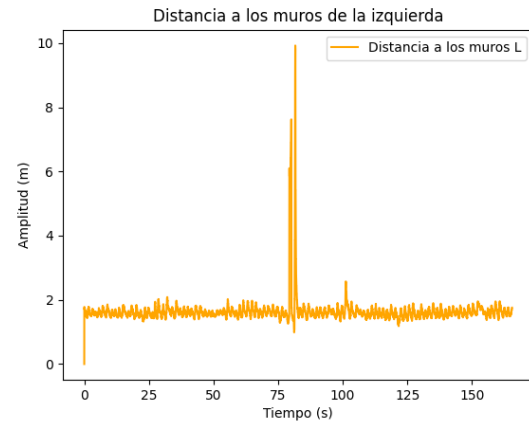


(B) Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 84: Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

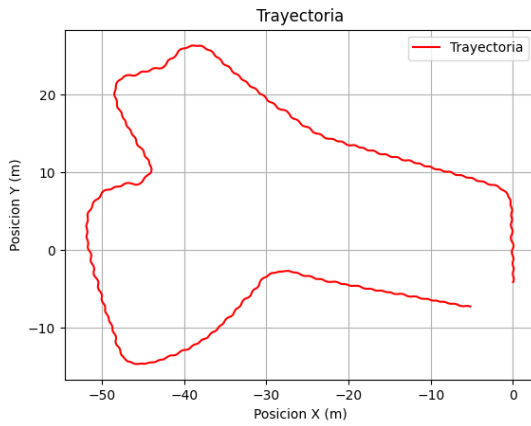


(A) Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

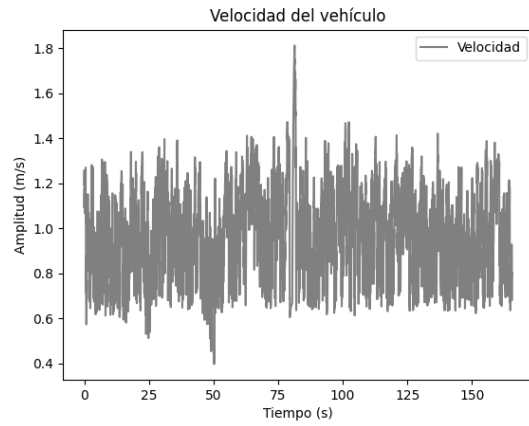


(B) Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 85: Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$



(B) Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 86: Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

TABLA 35: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,1$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.59(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.64(m)
Tiempo	165.44 (s)
Velocidad promedio	0.96 (m/s)

7.4.6. Resultados para prueba con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

7.4.6.1. Mapa 2

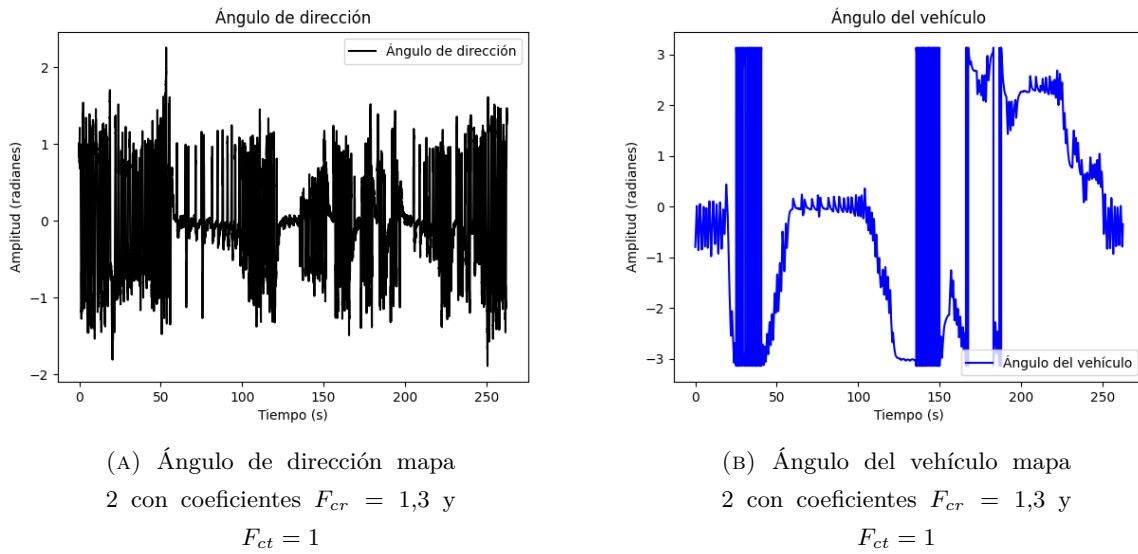
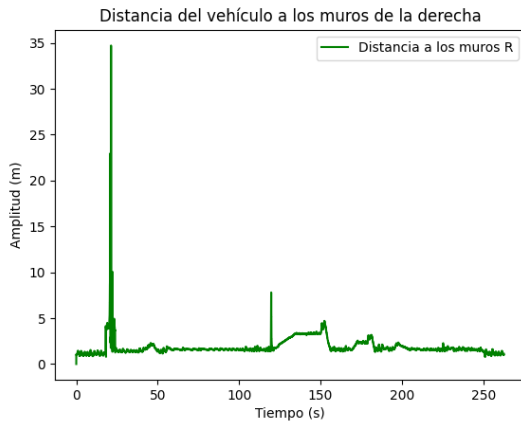
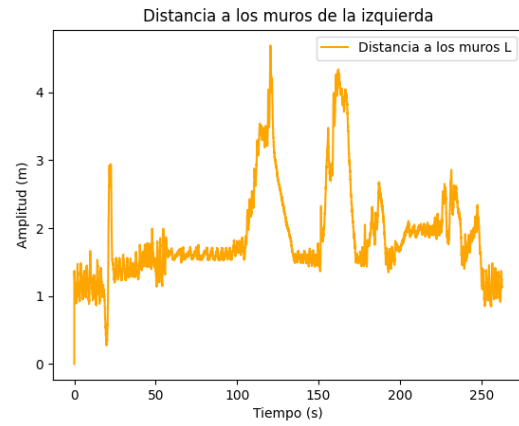


FIGURA 87: Ángulos de dirección y vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

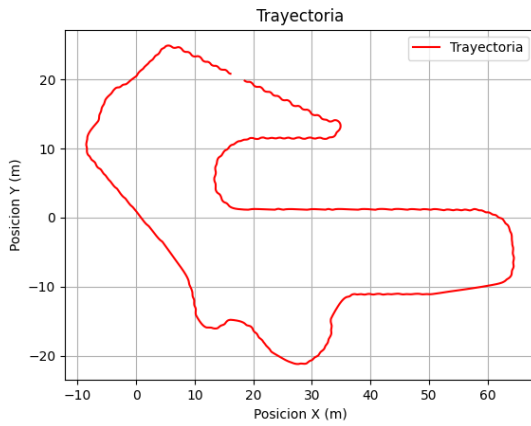


(A) Distancia muro derecha mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

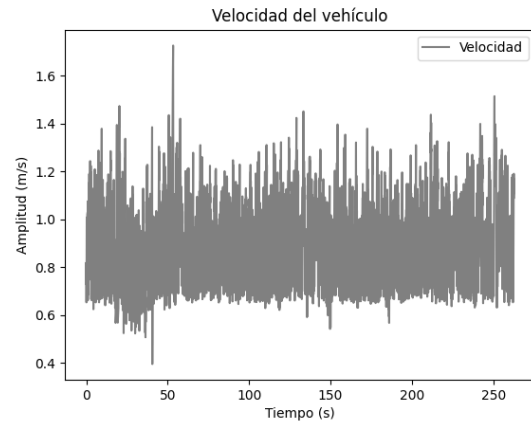


(B) Distancia muro izquierda mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 88: Distancia muros mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$



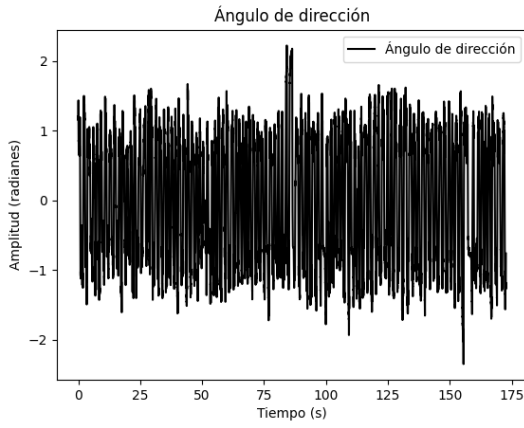
(B) Velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 89: Trayectoria y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

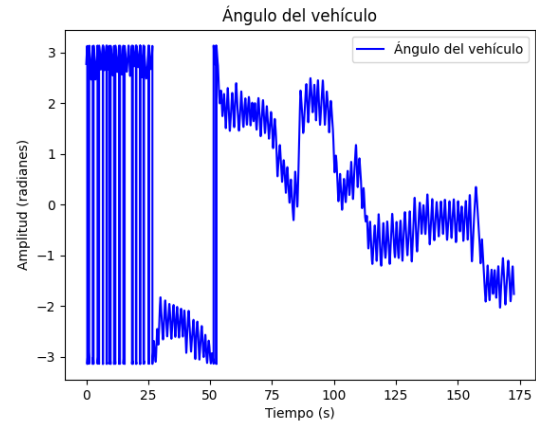
TABLA 36: Datos de seguridad y velocidad mapa 2 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.86(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.88(m)
Tiempo	262.64 (s)
Velocidad promedio	0.89 (m/s)

7.4.6.2. Mapa 3

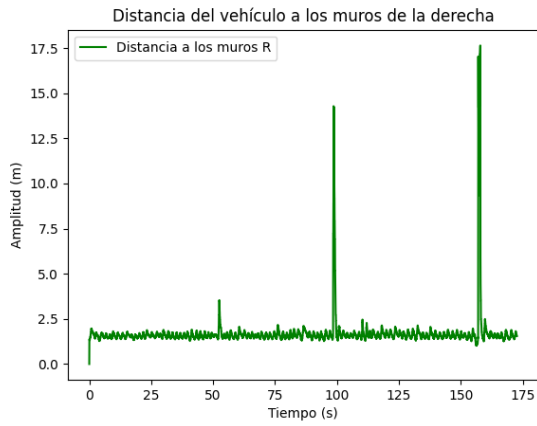


(A) Ángulo de dirección mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

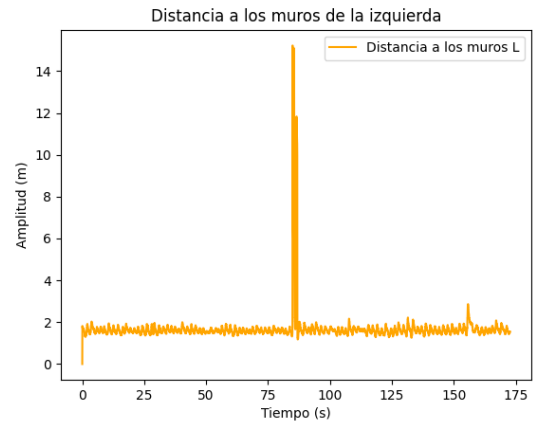


(B) Ángulo del vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 90: Ángulos de dirección y vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

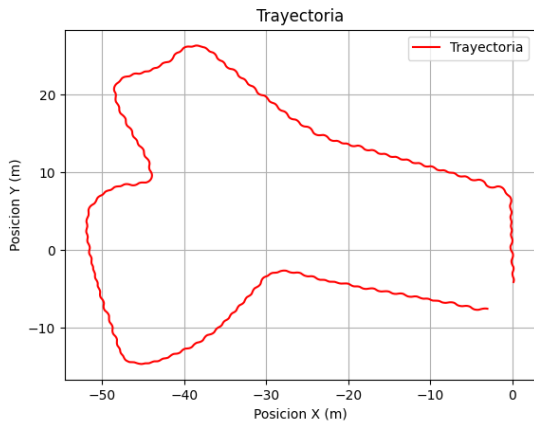


(A) Distancia muro derecha mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

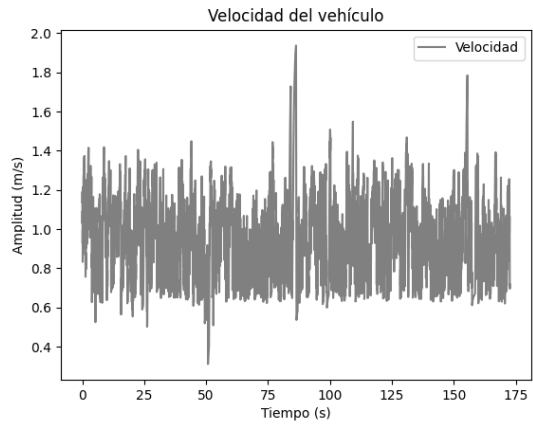


(B) Distancia muro izquierda mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 91: Distancia muros mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.



(A) Trayectoria vehículo mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$



(B) Velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$

FIGURA 92: Trayectoria y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

TABLA 37: Datos de seguridad y velocidad mapa 3 con coeficientes $F_{cr} = 1,3$ y $F_{ct} = 1$. Fuente: Autor.

Medida	Valor
Distancia promedio muro derecho	1.70(m)
Distancia promedio muro izquierdo	1.68(m)
Tiempo	172.6 (s)
Velocidad promedio	0.94 (m/s)