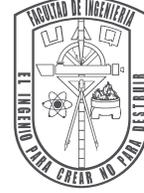




Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería en Automatización



**Sistema de maniobras anti-colisión en automóviles eléctricos con base en percepción
LiDAR y perfiles de velocidad**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en ciencias

Presenta:

Victor Ernesto Montalvo Garfias

Dirigido por:

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

SINODALES

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

Presidente

Firma

Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano

Secretario

Firma

Dr. Miguel Martínez Prado

Vocal

Firma

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza

Suplente

Firma

Dr. Suresh Thenozhi

Suplente

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la facultad de ingeniería

Querétaro, México
Marzo 2023



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de
Información



Sistema de maniobras anti-colisión en automóviles
eléctricos con base en percepción LiDAR y perfiles de
velocidad

por

Victor Ernesto Montalvo Garfias

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Clave RI: IGMAC-177161-0323-323

© 2023 - Victor Ernesto Montalvo Garfias

All rights reserved.

Esta tesis va dedicada a mi familia, amigos y a todos aquellos que luchan por sobreponerse tras haber caído una y otra vez...

Agradecimientos

Abstract

The main objective of this work is to study the design and implementation of an anti-collision maneuvering system for electric vehicles. The mentioned system will focus mainly on the perception of the environment (using a 2D LiDAR sensor) and speed regulation, through speed profiles. The work begins by describing and comparing the background that leads to the development of autonomous driving and its main components. Subsequently, the proposal of the work is justified through statistical data on car accidents and how the proposed system could prevent or mitigate the damages caused in these incidents. To continue, the technological and scientific principles are established that allow addressing the problem of autonomous driving through five different modules: perception, location, control, planning, and system management. Based on these concepts, the scope of the research is defined through the objective and hypothesis, where the driving challenge that is expected for the vehicle to be considered satisfactory is raised. Next, the methodology is presented that describes the technological development of the prototype as well as the proposed experiment to validate or reject the hypothesis. Once the tests are completed, the results obtained are shown with a main focus on the LiDAR sensor mapping, escape trajectory, and implementation of the speed profile under different variants of the experiment. Additionally, additional contributions generated from the work are included. Finally, the performance of the obtained system and its future applications are analyzed in the conclusions. (Keywords: Speed Profile, SLAM, Anti-Collision Maneuvers, LiDAR, Direct Current Motor, Proportional Controller)

Resumen

El foco central de este trabajo es examinar cómo se diseña e implementa de manera detallada un sistema de maniobras anti-colisión para automóviles eléctricos. El sistema mencionado tendrá como enfoque principal la percepción del entorno (mediante un sensor LiDAR 2D) y la regulación de velocidad, a través de perfiles de velocidad. Se comienza por describir y comparar los antecedentes que dan lugar al desarrollo de la conducción autónoma y sus principales componentes. Posteriormente, se justifica la propuesta del trabajo a través de datos estadísticos sobre accidentes en automóvil y cómo el sistema propuesto podría prevenirlos o mitigar los daños causados en dichos percances. Para continuar, se establecen los principios tecnológicos y científicos que permiten abordar el problema de la conducción autónoma a través de cinco diferentes módulos: percepción, localización, control, planeación y administración del sistema. Partiendo de estos conceptos se define el alcance de la investigación a través del objetivo e hipótesis, en donde se plantea el desafío de conducción que se espera que el vehículo realice para considerarse satisfactorio. A continuación, se presenta la metodología que describe el desarrollo tecnológico del prototipo así como el experimento planteado para validar o rechazar la hipótesis. Una vez concluidas las pruebas, se muestran los resultados obtenidos con un principal enfoque en el mapeo del sensor LiDAR, la trayectoria de escape y la implementación del perfil de velocidad bajo diferentes variantes del experimento. Además, se incluyen los aportes adicionales generados a partir del trabajo. Finalmente, se analiza en las conclusiones el desempeño del sistema obtenido así como sus aplicaciones futuras.

(Palabras clave: *Perfil de velocidad, SLAM, maniobras anti-colisión, LiDAR, motor de corriente directa, controlador proporcional*).

Nomenclatura

Cuadro 1: Variables y constantes del trabajo.

Símbolo	Descripción
t	Variable de tiempo, donde $t \in \mathbb{R}$
$\theta(t)$	Posición angular con respecto al tiempo.
θ_d	Posición angular deseada que busca igualar el controlador.
θ_f	Posición angular final.
$\omega(t)$	Velocidad angular con respecto al tiempo.
$\alpha(t)$	Aceleración angular con respecto al tiempo.
e	Error en el seguimiento de la posición, $(\theta_d - \theta)$.
T_x	Señal digital para la transmisión de datos.
R_x	Señal digital para la recepción de datos.
ω_{max}	Velocidad angular máxima.
$i(t)$	Corriente con respecto al tiempo.
$P(t)$	Potencia consumida durante el tiempo.
R	Resistencia eléctrica.
E	Energía que consume el motor durante una trayectoria angular.
T_s	Periodo de muestreo.
k	Multiplicador para cada instante tiempo, donde $k \in \mathbb{Z}$.
$\alpha(kT_s)$	Aceleración angular para cada instante de tiempo.
$\omega(kT_s)$	Velocidad angular para cada instante de tiempo.
$\theta(kT_s)$	Posición angular para cada instante de tiempo.
$u(t)$	Corrección del controlador a través del tiempo.
$u(k)$	Corrección del controlador en su forma discreta.
$e(t)$	Error en la posición a través del tiempo.
$e(k)$	Error en la posición en su forma discreta.
T	Tiempo en que la posición final será alcanzada.
a	Constante de aceleración.
u_k	Salida digital que el controlador entrega al DAC.
V_1	Voltaje que el DAC entrega al servo-amplificador.
V_2	Voltaje amplificado que el motor requiere para trabajar.
θ_m	Posición angular del motor que recibe el encoder.
CH_A	Señal digital A desfasada de B que del encoder.
CH_B	Señal digital B desfasada de A que del encoder.
m	Pendiente de una recta de primer grado.
$\tau_g(t)$	Torque de un motor.
τ_f	Torque del motor debido a la fricción.
J	Inercia del motor.
K_t	Constante que relaciona el torque del motor eléctrico y la corriente.
ERR	Registro digital del error.
SEL	Selector digital de los multiplexores.

Cuadro 2: Siglas y términos anglosajones.

Término	Descripción
<i>DC</i>	<i>Direct current.</i>
<i>FPGA</i>	<i>Field Programmable Gate Array.</i>
<i>VHDL</i>	<i>Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description.</i>
<i>UART</i>	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.</i>
<i>CNC</i>	<i>Computer Numerical Control.</i>
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor.</i>
<i>SOC</i>	<i>System on Chip.</i>
<i>PC</i>	<i>Personal Computer.</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface.</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation.</i>
<i>NoC</i>	<i>Network on Chip.</i>
<i>RPM</i>	<i>Revolutions per minute.</i>
<i>DAC</i>	<i>Digital to Analog Converter.</i>
<i>PCB</i>	<i>Printed Circuit Board.</i>
<i>BPS</i>	<i>Bits Per Second.</i>
<i>IDE</i>	<i>Integrated Development Environment.</i>

Índice general

Agradecimientos	i
Abstract	iii
Resumen	v
Nomenclatura	viii
Contenido	xi
Lista de figuras	xv
Lista de tablas	xvii
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	5
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivo	5
1.4.1 Objetivos específicos	5
1.5 Estructura de la tesis	6
2 Revisión de la literatura	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 Percepción	8
2.2.1 Estudio de los diferentes sensores usados en conducción autónoma	8
2.2.2 Algoritmos de mapeo y localización simultanea (<i>SLAM</i>)	12

2.3	Planeación	12
2.4	Control del vehículo	14
2.4.1	Control lateral	16
2.4.2	Control longitudinal	16
2.4.3	Generador analítico del perfil parabólico de velocidad	17
2.4.4	Generador analítico del perfil trapezoidal de velocidad	20
2.5	Administración del sistema	24
2.5.1	Sistemas robóticos con <i>Linux</i>	24
3	Metodología	29
3.1	Equipo y materiales	30
3.1.1	Sensores y procesadores	30
3.1.2	Software	30
3.1.3	Equipo de laboratorio	31
3.1.4	Recursos humanos	32
3.2	Modelo funcional del sistema	32
3.3	Implementación	34
3.3.1	Instrumentación	34
3.3.2	Diseño y manufactura de la plataforma de pruebas	37
3.3.3	Desarrollo del sistema en <i>ROS</i>	38
4	Resultados y discusión	47
4.1	Resultados	47
4.1.1	Percepción: Mapeo y localización del sistema a través de <i>LiDAR</i>	47
4.1.2	Planeación: Respuesta del vehículo ante los estímulos del experimento	49
4.1.3	Administración del sistema: Monitoreo y consumo de recursos	51
4.1.4	Aporte tecnológico de la plataforma de pruebas	52
4.2	Discusión	52
4.3	Aporte científico de la investigación	55
4.4	Aporte tecnológico de la investigación	56
4.5	Impacto sostenible de la investigación	56
4.5.1	Impacto social	56
4.5.2	Impacto ambiental	57

4.5.3	Impacto económico	58
5	Conclusiones	61
	Bibliografía	62
A	Apéndice	67

Índice de figuras

1.1	Niveles de autonomía en la conducción de acuerdo con la Sociedad de Ingenieros Automotrices (por sus siglas en inglés <i>SAE</i>).	2
1.2	Distribución de causas de colisión en la <i>RFC</i>	4
2.1	Componentes principales de un sistema de conducción autónoma.	7
2.2	Espectro electromagnético en que operan los diferentes sensores [1].	9
2.3	Clasificación de los diferentes sensores LiDAR [1].	11
2.4	Slamtec RPLIDAR A1.	12
2.5	Protocolo de la maniobra anti-colisión.	13
2.6	Sistema de ejes del vehículo [2].	14
2.7	Vehículo con rotaciones en el <i>roll</i> y <i>yaw</i>	16
2.8	Función de aceleración del perfil parabólico, $\alpha(t) = \frac{-2a}{T}t + a$	17
2.9	Función de velocidad del perfil parabólico, $\omega(t) = \frac{at^2}{T} + at$	18
2.10	Curva de posición para el perfil parabólico, $\theta(t) = \frac{-at^3}{3T} + \frac{at^2}{2}$	19
2.11	Curva de aceleración $\alpha(t)$ del perfil trapezoidal representada en (2.22).	20
2.12	Función de velocidad $\omega(t)$ para el perfil trapezoidal representada en (2.31).	21
2.13	Función de posición $\theta(t)$ para el perfil trapezoidal representada en (2.38).	22
2.14	Sistema en lazo cerrado de un cañón anti-áereo.	24
2.15	Esquema simplificado de un sistema desarrollado en <i>ROS</i>	25
2.16	Ejemplo de un espacio de trabajo organizado por carpetas de <i>ROS</i>	27
3.1	Funciones principales de la conducción autónoma con dispositivos específicos de este trabajo.	31
3.2	Diagrama de control propuesto para las maniobras anti-colisión.	33
3.3	Esquemático de la tarjeta de adquisición.	34

3.4	Distribución de componentes y pistas para la tarjeta de adquisición.	35
3.5	Tarjeta de adquisición.	36
3.6	Esquemático de la tarjeta de control.	37
3.7	Distribución de componentes y pistas para la tarjeta de control.	39
3.8	Tarjeta de control.	39
3.9	Modelado del vehículo y ubicación del centro de masa.	40
3.10	Desarrollo del sistema de nodos en ROS.	42
3.11	Espacio de trabajo <i>ROS</i> en la micro-computadora.	43
3.12	Espacio de trabajo <i>ROS</i> en la PC.	45
3.13	Inicialización del sistema en la PC y la micro-computadora.	46
3.14	Monitoreo de diferentes tópicos a través de la terminal multiplexada.	46
4.1	Muestreo de una habitación cerrada con el sensor LiDAR 2D.	48
4.2	Nube de puntos generada al interior de la habitación.	48
4.3	Primera posición seguida con el algoritmo SLAM.	49
4.4	Segunda posición seguida con el algoritmo SLAM.	49
4.5	Tercera posición seguida con el algoritmo SLAM.	50
4.6	Cuarta posición seguida con el algoritmo SLAM.	50
4.7	Fotografía cenital de los experimentos para la evasión.	52
4.8	Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $8m$	53
4.9	Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $3m$	54
4.10	Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $1m$	55
4.11	Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $0.5m$	56
4.12	Posición en y del vehículo para la distancia x al objetivo cuando se detecta a $8m$. . .	57
4.13	Posición en y del vehículo para la distancia x al objetivo cuando se detecta a $3m$. . .	58
4.14	Posición en y del vehículo para la distancia x al objetivo cuando se detecta a $8m$. . .	59
4.15	Consumo de recursos computacionales sin correr los nodos del sistema.	60
4.16	Consumo de recursos computacionales al correr los nodos del sistema.	60

Índice de cuadros

1	Variables y constantes del trabajo.	viii
2	Siglas y términos anglosajones.	ix
3.1	Tabla de componentes de la tarjeta de adquisición.	35
3.2	Tabla de componentes de la tarjeta de control.	38
3.3	Tabla de parámetros dimensionales del vehículo	40
4.1	Comparación de medidas reales y medidas obtenidas con el sensor LiDAR 2D	47
4.2	Comparación de medidas reales y medidas obtenidas con el algoritmo SLAM	51
4.3	Tiempos de colisión calculados para las diferentes distancias del experimento con la implementación y ausencia de un perfil de velocidad.	51

Introducción

Es posible afirmar que el antecedente histórico del automóvil es más un proceso escalable de ingeniería que un hallazgo único y atribuido a un inventor en específico (como el caso del fonógrafo inventado por Edison) [3]. Aún así, se define como el nacimiento del automóvil al momento en que la propulsión de un vehículo de cuatro ruedas dejó de lograrse con la fuerza ejercida por caballos y se consiguió utilizar un motor de combustión interna como principal fuente de energía. Dicho desarrollo es atribuido tanto a Karl Benz como a Gottlieb Daimler entre 1884 y 1886 [3]. Más de cien años después de haber encontrado una solución al problema de la autonomía en la propulsión, se han abierto nuevas líneas de investigación que ahora buscan dar solución a otros problemas relacionados con la maniobrabilidad y experiencia del usuario. El presente trabajo centrará su investigación en el desarrollo de maniobras que un vehículo puede ejecutar para salvaguardar colisiones cuando el conductor no logra responder a tiempo y que pueden ser ejecutadas sin su intervención.

De acuerdo con [cita de la SAE] existen 6 niveles de autonomía que un automóvil puede alcanzar. Comenzando con el nivel 0, la conducción del vehículo depende totalmente del conductor, mientras que en el nivel 5 su intervención no es necesaria en lo absoluto. Los niveles intermedios dependen de las situaciones en que el vehículo requiere supervisión y control intermitente del conductor. La Figura 1.1 muestra un resumen detallado de cada nivel.

A continuación se muestran algunas de las aplicaciones relacionadas con los niveles de autonomía aquí descritos.

1. Nivel 0: Frenado de emergencia, advertencia de punto ciego o advertencia de cambio de carril.
2. Nivel 1: Centrado de carril o control de velocidad crucero (sólo alguna de las dos).
3. Nivel 2: Centrado de carril y control de velocidad crucero (ambas al mismo tiempo).
4. Nivel 3: Conductor autónomo en embotellamientos.
5. Nivel 4: Servicio de taxi autónomo en ambientes locales.
6. Nivel 5: Mismos servicios del nivel 4 pero en cualquier ambiente.

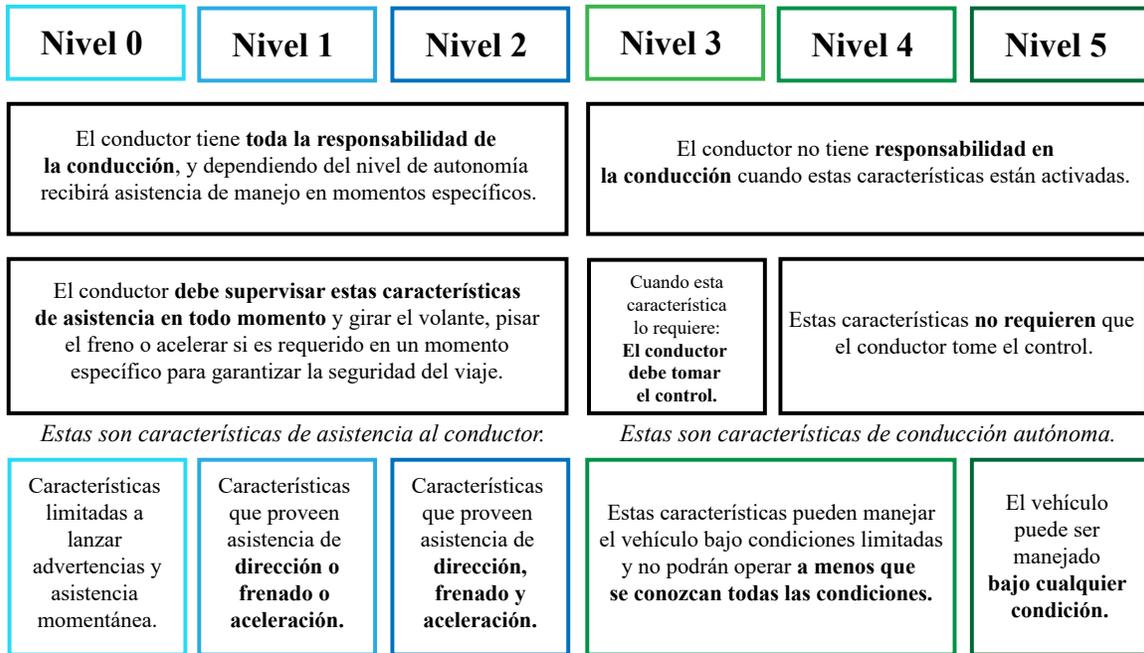


Figura 1.1: Niveles de autonomía en la conducción de acuerdo con la Sociedad de Ingenieros Automotrices (por sus siglas en inglés *SAE*).

De esta forma, las posibles aplicaciones de la conducción autónoma dependerán del nivel en que se encuentren y la necesidad específica que busquen resolver. Es importante mencionar que dichas aplicaciones no sólo están enfocadas en automóviles domésticos y por el contrario, existen diversos ejemplos dentro y fuera del contexto urbano. A continuación se en listan algunos:

- Mapeo de espacios de difícil acceso: una funcionalidad en la que por los peligros que representa el entorno próximo o su reducido acceso, el vehículo puede ser controlado de forma remota y con ayuda de ciertos sensores obtener un mapa preciso del lugar para su uso en diferentes proyectos.
- Traslado de activos peligrosos: Cuando se trata de manipular materiales peligrosos (explosivos por ejemplo) un vehículo remoto también es una opción preferible, en donde además se pueden integrar opciones de autonomía redundante en caso de que la señal del emisor se encuentre comprometida.
- Entrega y recolección de materiales al interior de una industria de maquila: en este caso si se les brinda autonomía a los vehículos que reparten materiales en celdas de producción, es posible reducir costos en personal y mejorar la logística de rutas.

Es importante mencionar que para que los niveles de autonomía puedan ser propiamente desarrollados es necesario utilizar sensores y actuadores cuya fuente de alimentación y señales de control

son principalmente eléctricas. Por ello, existen diferentes consideraciones sobre los componentes del sistema que deben ser tomados en cuenta, como por ejemplo el tipo de baterías y método de carga y descarga [4] o el control de velocidad del motor y control de la dirección [5].

El desarrollo en conducción autónoma ha conseguido ofrecer aplicaciones en las que la intervención del conductor es prácticamente nula y la toma de decisiones en trayectos prolongados es completamente responsabilidad del vehículo; un ejemplo de estos sistemas es la función autopiloto de los automóviles de la compañía *Tesla Motors* que permiten al conductor seleccionar el destino de llegada y posterior a ello permitir que el vehículo conduzca sin intervención adicional del usuario.

Con la finalidad de mejorar la detección del entorno a través de sensores, se han clasificado y abordado diferentes tecnologías de sensado para el reconocimiento del entorno en diferentes circunstancias ambientales; entre los sensores más usados para conducción autónoma se encuentran los sensores de tipo *Light Detection and Ranging* (por sus siglas en inglés *LiDAR*) [6] que funcionan rebotando rayos de luz en los alrededores para así poder interpretar el conjunto de datos como elementos sólidos que permiten tomar decisiones sobre la trayectoria del vehículo. El uso de cámaras es también muy común en la conducción autónoma y pueden ser usadas para, a través del procesamiento de imágenes, interpretar señalamientos como líneas en el pavimento o letreros simbólicos [7]. Los sistemas que integran las señales de sensores *LiDAR* y las imágenes de cámaras (en ocasiones también otros sensores) para asistir de manera avanzada al conductor son conocidos como *Advanced Driver Assistance Systems* (por sus siglas en inglés *ADAS*), y pueden abarcar diferentes tecnologías, como lo son: advertencia de colisión frontal (*FCW: Forward Collision Warning*) o la mitigación de colisiones a través del frenado (*CMbB: Collision Mitigation by Breaking*) [8]. Es importante mencionar que debido al costo y complejidad que involucra procesar y unificar la información de múltiples sensores, existen trabajos que proponen realizar las mismas maniobras *ADAS* pero con un menor número de sensores o incluso sólo con cámaras [9].

Con respecto a los actuadores, uno de los principales sistemas que intervienen en la conducción autónoma es la dirección del automóvil, que debe ser eléctrica con la finalidad de poder ser modificada a través de controladores y electrónica de potencia. Además, la dirección debe contar con un sistema de desacoplamiento del volante y el giro de las llantas con la finalidad de ceder las maniobras del conductor al sistema anti-colisión [10].

La planeación de trayectorias a través de perfiles de velocidad es un área de estudio que se encuentra principalmente relacionada con la velocidad angular del motor eléctrico a lo largo de una trayectoria, y que modela el comportamiento de la aceleración y desaceleración ante diferentes circunstancias: como lo puede ser el frenado de emergencia o la aceleración repentina necesaria para evitar algún obstáculo [11]. Con base en el contexto histórico planteado en estos antecedentes es posible concluir que las tecnologías de conducción terrestre han encontrado siempre a lo largo de la historia nuevas áreas de oportunidad que están siendo mejoradas día con día y que seguirán siendo parte importante de las investigaciones en movilidad por un tiempo aún indefinido. Este trabajo pretende establecer las bases de este desarrollo tecnológico en la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

1.1 Planteamiento del problema

Aún con la existencia de mejores sistemas para la detección de obstáculos y alertas al conductor sobre posibles colisiones, existen circunstancias que limitan el nivel de respuesta del automovilista

y que concluyen en un desafortunado accidente. De acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (*INEGI*), de los 365,281 accidentes en automóvil ocurridos en el 2018 en México: 337,266 fueron debidos al descuido del conductor, 3,089 a causa del pasajero, 9,565 por una mala condición del camino y 11,794 por alguna otra causa no clasificada. Es decir, más del 90% de los accidentes fueron responsabilidad del conductor.

Por otra parte, se estimó que en el 2019 cerca de 0.6 millones de personas perdieron la vida en accidentes de tráfico. Debido a lo anterior, los accidentes en automóvil son parte de las 10 principales causas de muerte a nivel mundial [12].

De acuerdo con el sitio oficial del Instituto Mexicano del Transporte (por sus siglas *IMT*), entre el 2013 y el 2015 se presentaron como principales causas de colisión en la Red Carretera Federal (*RFC*) los factores descritos en la Figura 1.2.

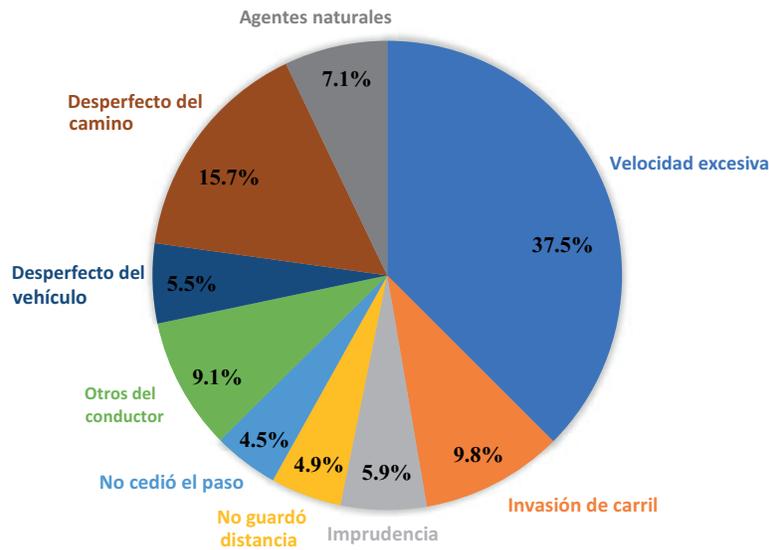


Figura 1.2: Distribución de causas de colisión en la *RFC*.

Es importante observar que entre las principales causas de una colisión se encuentran: conducir a una velocidad excesiva, encontrarse con un desperfecto en el camino o invadir otro carril. Es por tal motivo que las maniobras anti-colisión de este trabajo tienen especial enfoque en la regulación de velocidad y evasión de obstáculos.

Se pretende dar solución a los problemas mencionados a través de una arquitectura inteligente que actúe a la velocidad necesaria para regresar al conductor a una condición segura tras enfrentarse a un obstáculo repentino en su trayectoria, y posterior a ello regresarle el control del vehículo.

1.2 Justificación

El desafío global en movilidad con vehículos autónomos representa una oportunidad y competencia internacional en la que México, a través de sus investigadores y desarrolladores, debe comenzar a ganar posicionamiento. El desarrollo de este trabajo será sólo una parte de la gran cantidad de sistemas que intervienen en la autonomía de vehículos eléctricos. Sin embargo, se pretende proponer una solución a uno de los problemas más críticos en esta línea de investigación: los accidentes por colisión.

Las características modulares de este sistema permitirán que sea adaptado a otros trabajos de investigación sobre el desarrollo de un automóvil autónomo mexicano. Por otra parte, la implementación de la plataforma experimental del vehículo y la pista de pruebas ayudarán a promover la competencia educativa orientada al desafío de la conducción autónoma a través de torneos y desafíos.

Sin duda alguna, el proponer que algunas de las maniobras del sistema impliquen retirar el mando momentáneamente al conductor y entregárselo al mando autónomo del vehículo es una apuesta arriesgada ya que la responsabilidad de evitar o sufrir una colisión deja de ser del conductor y pasa a ser completamente del sistema desarrollado en este trabajo. Aún así, la recompensa por un trabajo bien logrado puede traducirse a salvaguardar una gran cantidad de vidas humanas.

De forma puntual este trabajo tiene un impacto significativo en los tres principales soportes de la sostenibilidad: el factor social, económico y ambiental; estos factores se describen a detalle en la sección de resultados.

1.3 Hipótesis

Un vehículo basado en percepción LiDAR y perfiles de velocidad permite evadir obstáculos y trazar trayectorias seguras a 20 km/h o inferior (en la escala dimensional 1:10) y el obstáculo se detecta a un mínimo de 50 cm de distancia.

1.4 Objetivo

Diseñar e implementar un sistema de evasión de obstáculos para la conducción de vehículos autónomos a través de percepción LiDAR y perfiles de velocidad.

1.4.1 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un automóvil eléctrico tipo buggy con escala dimensional 1:10 con impresión 3D que permita la conexión modular de sensores y actuadores, para así poder añadir o modificar funcionalidades del prototipo en trabajos futuros.
- Diseñar e implementar el subsistema de detección de obstáculos haciendo uso de sensores de distancia y cámaras para poder probar el prototipo en una pista de pruebas con obstáculos que simulen escenarios reales.

- Diseñar e implementar un subsistema de aceleración con base en perfiles de velocidad adaptables a sucesos internos y externos con la finalidad de siempre establecer curvas de velocidad seguras, haciendo uso de un *FPGA*.
- Diseñar e implementar un controlador inteligente que seguirá las trayectorias que generen los perfiles de velocidad con la intención de traducir la información en acciones de control para los actuadores haciendo uso de un *DSP*.
- Diseño y construcción de una pista de pruebas con la misma escala del vehículo que permitirá simular las condiciones reales de conducción en ciudad y poner a prueba el sistema de maniobras anti-colisión.

1.5 Estructura de la tesis

La estructura de esta tesis se compone de los siguientes elementos:

- El capítulo 1 contextualiza el tema de estudio y establece los objetivos e hipótesis que se abordarán para lograr la solución deseada.
- En el segundo capítulo se profundiza en las bases teóricas y proyectos previos relacionados con la temática tratada, haciendo referencia a diversos investigadores y autores.
- El tercer capítulo describe una metodología que se basa en modelos matemáticos y plantea una interpretación discreta para su implementación en dispositivos digitales.
- El cuarto capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos en la experimentación realizada.
- El quinto y último capítulo establece las conclusiones de la tesis, determinando si se han cumplido y comprobado los objetivos e hipótesis planteados a lo largo del trabajo.”

Revisión de la literatura

2.1 Antecedentes

En la Figura 4.1 se plantea la relación que existe entre las principales funciones de la conducción autónoma, así como las sub-funciones que sirven de soporte específico para las maniobras anti-colisión.

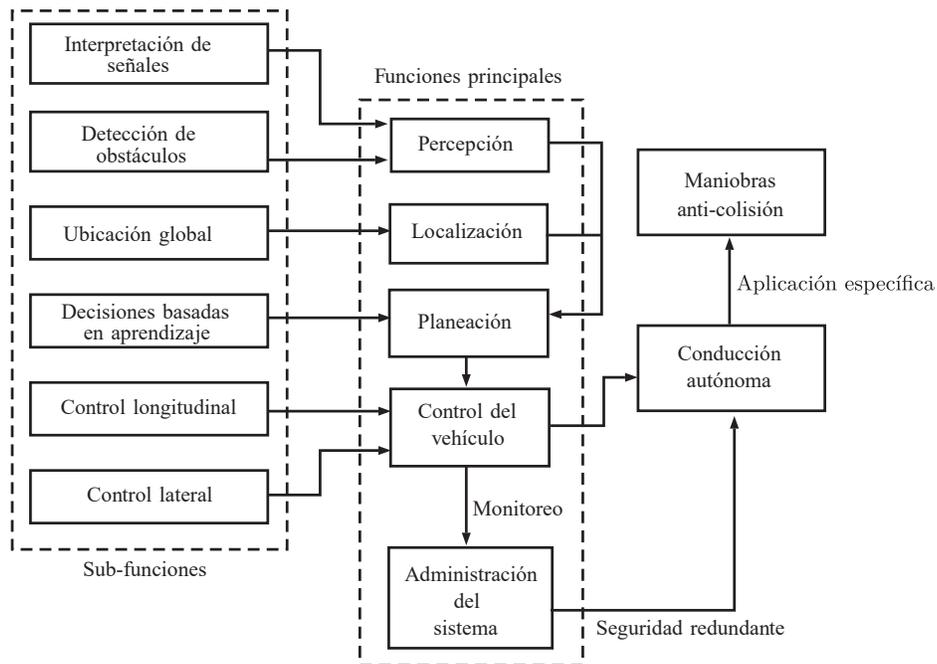


Figura 2.1: Componentes principales de un sistema de conducción autónoma.

De acuerdo con [13], las cinco funciones principales del diagrama tienen las siguientes características:

1. Localización: Provee una posición global del vehículo generalmente haciendo uso de un *GPS*.
2. Percepción: Genera un modelo del entorno próximo de conducción a partir de la fusión de diferentes sensores como cámaras, radares o escáneres láser. En conjunto con la localización provee información necesaria para que la función de planeación establezca una secuencia de decisiones.
3. Planeación: Determina las maniobras del vehículo autónomo necesarias para conseguir una navegación segura.
4. Control del vehículo: Sigue las funciones determinadas por la planeación y modifica la dirección, aceleración y frenado del automóvil.
5. Administración del sistema: Supervisa el funcionamiento general del sistema e implementa medidas de seguridad redundante en el caso de que el sistema principal falle.

Otra forma de clasificar las principales características del *software* es a través del sistema de reconocimiento del entorno, sistema de toma de decisiones y sistema de control de movimiento [14], esta referencia será útil para seleccionar los dispositivos y tecnologías que le darán operación práctica al sistema.

El desarrollo de este trabajo tendrá principal enfoque en la percepción, planeación, control del vehículo y administración del sistema. La función de localización no será incluida, ya que la presente metodología busca desarrollar un sistema que intervenga sólo para encontrar trayectorias seguras instantáneas, en caso de detectar un obstáculo, ejecutar maniobras que regresen el vehículo a una condición segura, y finalmente regrese el control al conductor.

A continuación se presenta la teoría relacionada a las funciones principales de la conducción autónoma.

2.2 Percepción

Una de las funciones obligatorias para desarrollar una tecnología de conducción autónoma es la percepción del entorno [6]. Una percepción robusta del entorno proviene de la combinación de sensores como LiDAR, cámaras y radares o sonares [8]. En la actualidad las técnicas de aprendizaje profundo para el procesamiento de imágenes han mostrado un rendimiento sobresaliente en detección de objetos, segmentación y seguimiento [15]. El seguimiento de múltiples objetos depende de dos factores fundamentales: la calidad de la detección y la precisión en la asociación de datos [16].

Un vehículo autónomo adquiere información de sus alrededores en dos principales etapas. La primera consiste en escanear el camino con el objetivo de detectar posibles cambios en las condiciones de conducción (luces de tráfico, señales, cruce de peatones y barreras, entre otras). La segunda etapa está relacionada a la percepción de otros vehículos.

2.2.1 Estudio de los diferentes sensores usados en conducción autónoma

Algunos de los sensores más representativos para la percepción de entornos próximos son los sensores ultrasónicos, RADAR, LiDAR y cámaras. Una primera aproximación que permite

identificar las fortalezas y debilidades de cada sensor es la porción del espectro electromagnético en que cada uno trabaja. La imagen 2.2 muestra la frecuencia y longitud de onda en que los ya mencionados sensores (y algunos otros) operan.

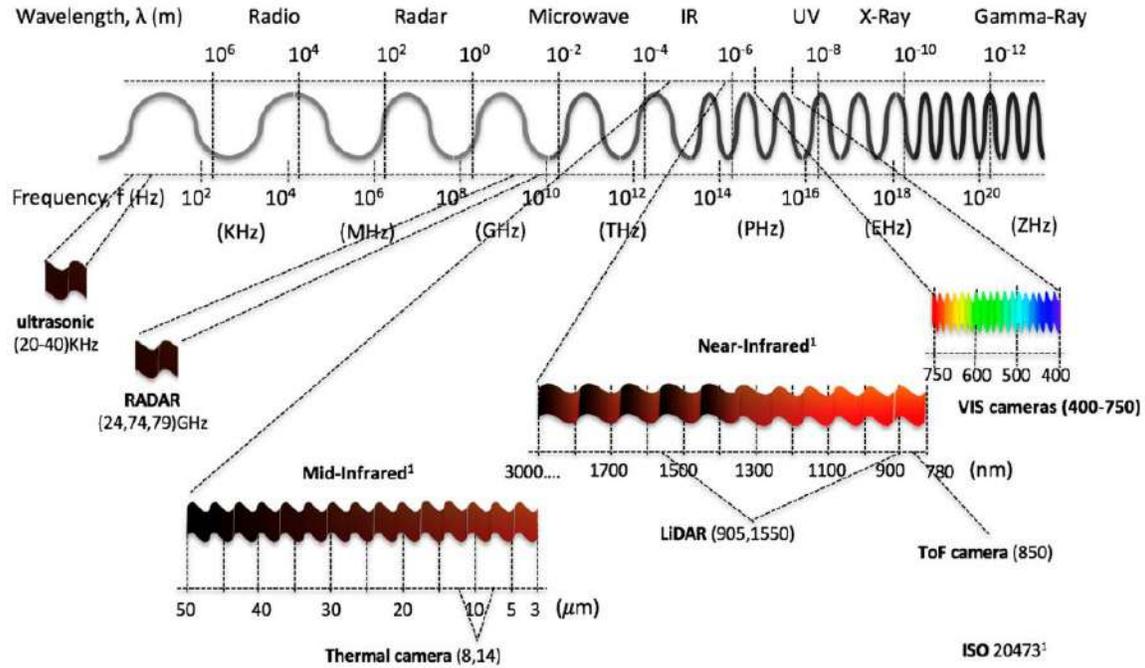


Figura 2.2: Espectro electromagnético en que operan los diferentes sensores [1].

Es interesante observar que diferentes sensores son capaces de operar en porciones del espectro electromagnético que no son apreciables o fáciles de procesar por el ser humano como lo son la imágenes reveladas gracias al espectro de la luz visible. Estos rangos de operación pueden representar una ventaja o desventaja para el sistema dependiendo de las condiciones del entorno.

A continuación se abordan las principales características de los sensores más utilizados en vehículos autónomos con la finalidad de comparar su rendimiento en la aplicación.

Sensor ultrasónico

Los sensores ultrasónicos funcionan, como su nombre lo indica, con ondas de sonido en una frecuencia de entre 20 y 40kHz. Su principio de operación es sencillo y consiste en medir el tiempo de vuelo TdV de una onda de sonido desde el momento que es emitida y hasta el momento en que es recibido su eco. La distancia se calcula de la siguiente manera:

$$d = \frac{c}{2}TdV \quad (2.1)$$

donde d es la distancia que necesita calcularse, c es la velocidad de la onda en metros por segundo y TdV es el tiempo de vuelo en segundos. Estos sensores son principalmente usados en la conducción autónoma para aplicaciones de baja velocidad, costo y distancia de detección, como puede ser la asistencia de estacionamiento.

Los sensores ultrasónicos demuestran un buen desempeño para medir cortas distancias y no importa el color de los materiales o la presencia de situaciones adversas como lo son polvo, humedad o lluvia. Las principales desventajas de estos sensores es que pueden presentar falsos-positivos del rebote, y tienen puntos ciegos ubicados entre el elemento emisor y su mínimo rango de detección [1].

RADAR (Detección de radio y rango)

De acuerdo con [1] los sistemas de radar para vehículos inteligentes actúan en las frecuencias de 24.77 y $79GHz$. Los radares miden la distancia entre el emisor y el objeto al calcular el tiempo de vuelo entre la señal emitida y la recepción del eco. Los radares son capaces de detectar la distancia de múltiples objetos y además proporcionar de forma precisa la dirección y velocidad de los objetivos.

Los radares en la conducción autónoma son principalmente usados en la detección de puntos ciegos, como asistente para el cambio de carril, y para emitir alertas de tráfico traseras y delanteras. Además, son muy efectivos para la detección de objetivos a cortas distancias en el frente, laterales y parte trasera del vehículo. Los radares facilitan la toma decisiones del conductor. Algunas desventajas del este tipo de sensores son la pérdida de precisión y su reducido campo de visión [1].

LiDAR

La Detección y Alcance de Luz (LiDAR) es una tecnología similar a la ultrasónica que consiste en medir el tiempo de vuelo de una luz pulsante desde un emisor hasta algún objeto en que será reflejada y adquirida de vuelta por el receptor. Este proceso es repetido un gran número de veces por los instrumentos LiDAR y termina produciendo un mapa del área estudiada conocido como una nube de puntos 3D. Los sistemas LiDAR fueron inicialmente creados en los 70's para detectar objetos en el océano o en la tierra desde satélites o aviones. Fueron especialmente creados para detectar submarinos [1].

El desarrollo en tecnologías de sensado ha generado un incremento significativo en la disponibilidad de ecáneres 3D como LiDAR, permitiendo así representaciones más precisas del entorno del vehículo [17], [18]. La operación de los sensores LiDAR se encuentra en el rango del infrarojo. Los láseres utilizados para la conducción autónoma pertenecen a la clase 1 [1] y son seguros bajo cualquier condición normal de uso. Los sensores LiDAR pueden ser clasificados de acuerdo a la información que obtienen de su entorno en LiDARs de tipo 2D y 3D. O también pueden ser clasificados de acuerdo a su construcción en LiDARs rotativos o de estado sólido. A continuación una breve descripción de sus características:

- LiDAR 2D: Obtienen información del entorno proyectando un simple haz de luz en un espejo rotativo perpendicular al eje de rotación (Ver en figura 4.3).
- LiDAR 3D: Haciendo uso de un conjunto de diodos emisores de luz montados sobre un rotor de alta velocidad y con sus respectivos receptores. El número de láseres de un LiDAR 3D puede ir desde los 4 hasta los 128 y campos de visión horizontal de 360° y vertical de 20° a 45° con una precisión de pocos centímetros. Dependiendo del número de canales el LiDAR

puede ser utilizado para control de cruce adaptativo, evasión de obstáculos, identificación de objetos o mapeo 3D.

- LiDAR de estado sólido: Los LiDAR de estado sólido pueden crear una representación 3D del entorno sin la necesidad de partes móviles gracias al uso de lentes difusoras que pueden proyectar líneas verticales que toquen los objetos y que no requieren de un rotor para funcionar. Los LiDAR de estado sólido son más durables pero tienen un campo de visión inferior a los LiDAR rotativos. La tendencia es que los vehículos comiencen a tener conjuntos de LiDAR de estado sólido montados en puntos estratégicos del vehículo.

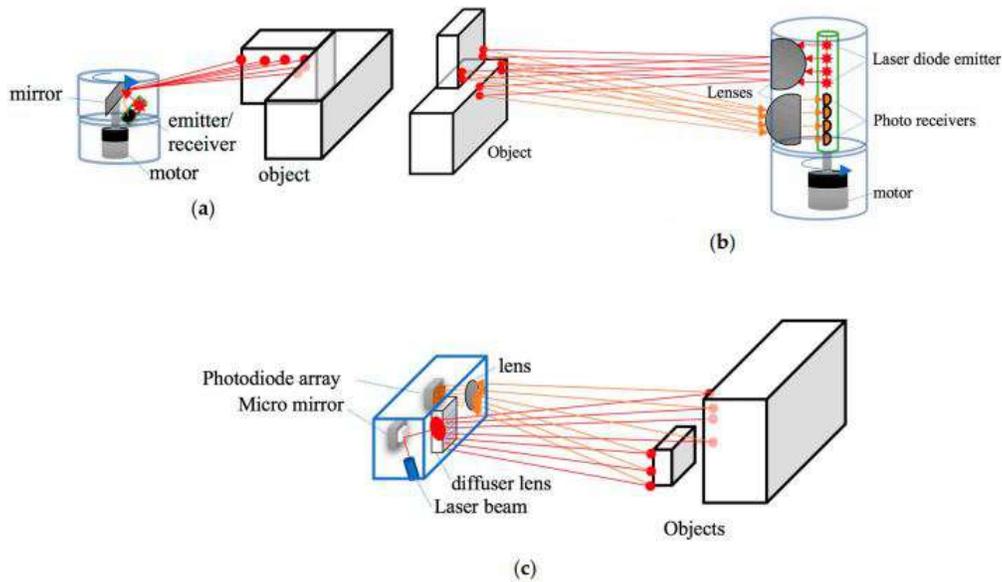


Figura 2.3: Clasificación de los diferentes sensores LiDAR [1].

Para aprovechar al máximo los datos: se requiere un cálculo para que el sistema LiDAR funcione definiendo la posición precisa del eco. Se requiere para la visualización de datos en vuelo o para el post-procesamiento de datos, así como para aumentar la precisión y la exactitud de la nube de puntos de la cartografía 3D.

En la figura 2.4 se muestra un LiDAR comercial de bajo costo que puede ser candidato para el desarrollo de este trabajo.

Cámaras

Las cámaras pueden ser clasificadas en dos grandes categorías de acuerdo a su espectro de funcionamiento: visibles e infrarrojas. De acuerdo con [1] sus características son las siguientes:

- **Cámaras visibles:** Estas cámaras son capaces de capturar imágenes de ondas que se encuentran entre los $400nm$ y $780nm$ de longitud, lo mismo que el ojo humano puede percibir. Son los dispositivos de percepción más utilizados debido a su bajo costo e información de color en alta



Figura 2.4: Slamtec RPLIDAR A1.

definición. Su mayor desventaja se encuentra en el procesamiento posterior de información, ya que los datos que las cámaras entregan representan un gran volumen de información con respecto a otros sensores. Las cámaras visibles son principalmente utilizadas para la grabación de accidentes e identificación de objetos y señales. Las cámara visibles son principalmente afectadas por condiciones que alteren la cantidad de luz como lo son la lluvia, niebla o nieve. Es por ello que son combinadas con tecnologías RADAR y LiDAR para aumentar su robustez.

- Cámaras infrarojas: El rango de operación de estas cámaras se encuentra en las longitudes de onda que van de los $780nm$ hasta $1mm$. La principal ventaja de este rango de operación es que existen pocas interferencias. Las cámaras infrarojas son principalmente utilizadas en situaciones donde hay picos de iluminación, como por ejemplo al final de un túnel o ante la excesiva luz proveniente de los faros de otro vehículo.

Los obstáculos que se pueden presentar y detectar con la fusión de múltiples sensores pueden ser diseñados para escenarios específicos como la detección de peatones en condiciones de niebla [19]. Como propuesta para este trabajo se planea diseñar una estrategia de aprendizaje profundo para la generación de las nubes de puntos que el vehículo necesita para viajar.

2.2.2 Algoritmos de mapeo y localización simultanea (*SLAM*)

2.3 Planeación

La planeación determina las maniobras que el control del vehículo autónomo ejecutará [20]. Los algoritmos de planeación pueden ser divididos en 3 etapas principales: trazado global, razonamiento del comportamiento y planeación local del movimiento.

Las misiones propuestas para el aprendizaje y prueba de los objetivos de este trabajo están basadas en las descritas en [21] y finalmente se seleccionan aquellas que están relacionadas con la

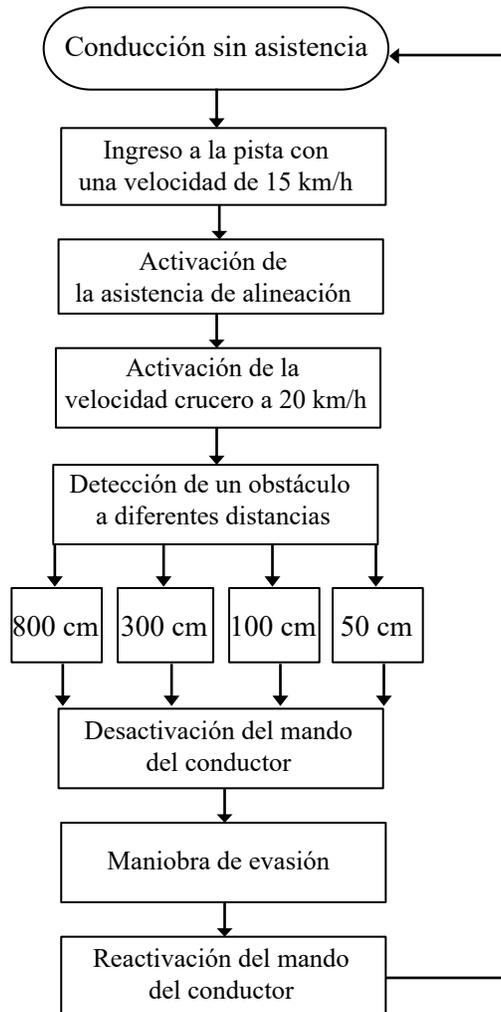


Figura 2.5: Protocolo de la maniobra anti-colisión.

evasión de obstáculos:

1. Rebasar a un vehículo lento.
2. Detectar una barrera a metros de distancia y detenerse sin comprometer la seguridad del pasajero.
3. Prueba de obstáculo complejo: Encontrar trayectorias seguras sin colisionar con obstáculos de aparición repentina.
4. Prueba de la construcción: Atravesar un camino con irregularidades en la ruta original.

Diagrama del sistema de maniobras

2.4 Control del vehículo

De acuerdo con [22] las maniobras de un vehículo autónomo son ejecutadas principalmente a través del control longitudinal y el control lateral. El control longitudinal es el encargado de regular la velocidad del vehículo y en este trabajo será desarrollado a través de perfiles de velocidad. El control lateral se encarga de que el vehículo siempre mantenga una dirección que coincida con la trayectoria planeada.

Por otra parte, los grados de libertad de un automóvil estudiado como un robot móvil pueden ser representados a partir de un marco de referencia cuyo origen sea el centro de masa del vehículo. En la figura 2.6 se muestra el sistema coordenado del cuerpo $B(C_{xyz})$. Donde, el eje x es el eje longitudinal que atraviesa el origen C con dirección hacia el frente del vehículo. El eje y está direccionado lateralmente hacia la izquierda desde la perspectiva del conductor. El eje z completa un sistema con base en la regla de la mano derecha y, cuando el coche se encuentra estacionado en un camino plano, este eje es perpendicular al suelo y opuesto a la aceleración de la gravedad g .

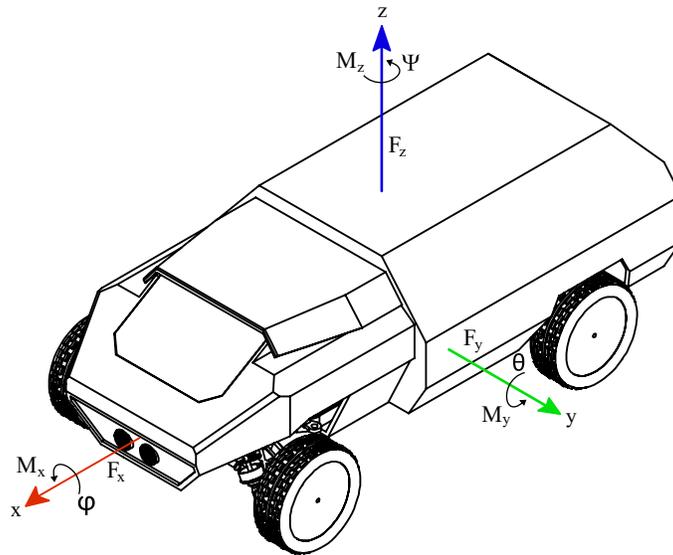


Figura 2.6: Sistema de ejes del vehículo [2].

La orientación del vehículo puede ser representada con tres ángulos: El ángulo *roll* φ sobre el eje x , el ángulo *pitch* θ sobre el eje y y el ángulo *yaw* ψ sobre el eje z .

El cambio con respecto al tiempo en los ángulos mencionados es importante, por ello se definen de la siguiente manera:

$$\dot{\varphi} = p \quad (2.2)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (2.3)$$

$$\dot{\psi} = r \quad (2.4)$$

El resultado de las fuerzas y momentos externos que el vehículo recibe desde el suelo y el entorno conforma el sistema de fuerzas del vehículo (\mathbf{F} , \mathbf{M}). Que expresado en el marco de referencia del coche se presenta como sigue:

$${}^B\mathbf{F} = F_x\hat{i} + F_y\hat{j} + F_z\hat{k} \quad (2.5)$$

para las fuerzas del sistema.

$${}^B\mathbf{M} = M_x\hat{i} + M_y\hat{j} + M_z\hat{k} \quad (2.6)$$

para los momentos del sistema.

Es importante mencionar que la letra B que antecede al vector de fuerzas y al vector de momentos denota el marco de referencia en que son expresados; en este caso, B proviene de *body* al tratarse del sistema de referencia en el cuerpo del vehículo.

Los componentes individuales de \mathbf{F} y \mathbf{M} tienen definiciones particulares de acuerdo a la causa de la misma y al efecto que producen en el movimiento del vehículo. Se presentan las siguientes definiciones:

1. Fuerza longitudinal F_x : Es la fuerza que se presenta sobre el eje x donde, si $F_x > 0$ se deberá a que el vehículo está acelerando, y por otra parte, si $F_x < 0$ el vehículo estará frenando. La fuerza longitudinal es también conocida como fuerza hacia adelante o fuerza de tracción.
2. Fuerza lateral F_y : Fuerza ortogonal tanto a F_z como a F_x . Generalmente es el resultado de girar el volante y la principal razón por la cual se genera un momento en *yaw* que provoca el giro del vehículo.
3. Fuerza normal F_z : Es una fuerza vertical, normal al plano del suelo. También puede ser conocida como fuerza vertical o carga del vehículo.
4. Momento del *roll* M_x : Es un momento longitudinal sobre el eje x . Cuando $M_x > 0$ el vehículo tiende a girar sobre el eje x . También es conocido torque de inclinación o momento de vuelco.
5. Momento del *pitch* M_y : Es un momento lateral sobre el eje y . Cuando $M_y > 0$ el vehículo tiende a girar sobre el eje y y mover el frente del vehículo hacia abajo.
6. Momento del *yaw*: es un momento sobre el eje z . Cuando $M_z > 0$ la llanta tiende a girar alrededor del eje z y también es conocido como momento de alineación.

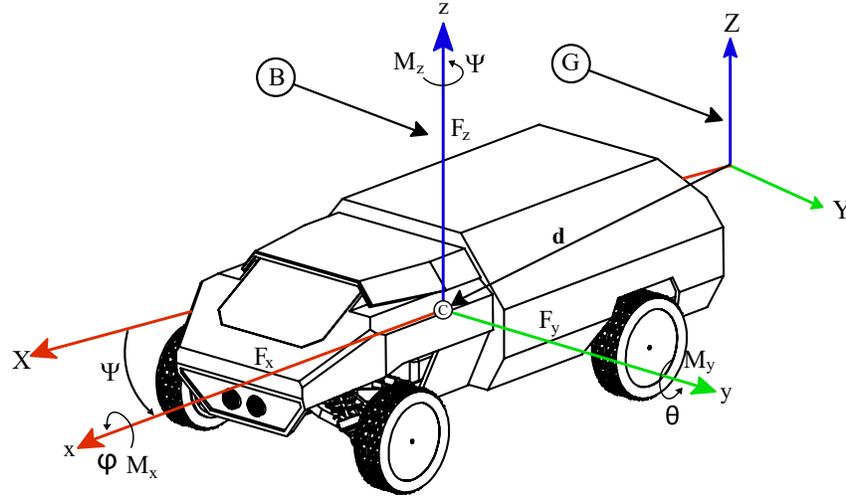


Figura 2.7: Vehículo con rotaciones en el *roll* y *yaw*

2.4.1 Control lateral

El control lateral de un vehículo es el encargado principal de dirigir al vehículo cerca de la trayectoria deseada y además de mantener la estabilidad del mismo. Los componentes vectoriales que tienen mayor influencia en el control lateral son el desplazamiento sobre el eje y y el de rotación del centro de gravedad en torno al componente *yaw*. La figura 2.7 ilustra los componentes escalares, vectoriales y angulares que ayudan a obtener el modelo dinámico del vehículo.

Las variables dinámicas que gobiernan al vehículo son transformadas a ecuaciones que estén relacionadas con la trayectoria que se desea que el vehículo alcance y en dónde se busca que el error lateral e y el error en el ángulo de trayectoria e_t sean eliminados. Sin embargo, sólo uno de ambos errores puede ser eliminado con una entrada simple al ángulo del volante δ_v . Por tal motivo se obtiene una combinación de ambos errores con la finalidad de reducir un único error proyectado e_p [23]. El presente trabajo buscará calcular el giro en la dirección necesaria para instante de tiempo en que se requiera evadir algún objeto detectado a tiempo con el sistema de percepción y nuevamente calcular la dirección que regresará al vehículo a una posición estable.

Maniobra de evasión sinusoidal

2.4.2 Control longitudinal

El control longitudinal de un automóvil se encuentra gobernado principalmente por la regulación en la velocidad del desplazamiento lineal dentro de la trayectoria establecida por el control lateral. Una técnica que permite abordar este movimiento son los perfiles de velocidad [11].

Según lo señalado en [24] la planificación de movimientos para mecanismos y actuadores robóticos que tienen una gran cantidad de motores inició a partir de la creación de mecanismos con levas que pudieran imitar los desplazamientos y rotaciones deseadas y cuya sincronización se lograra con uniones mecánicas. Actualmente, existe un mayor enfoque en el diseño de mecanismos electrónicos

que ayudan a manipular máquinas con servo-asistencia de una forma mayormente adaptable, logrando una sincronización completa a través de herramientas de software. De esta forma, se evita la necesidad de diseñar y fabricar de forma repetida mecanismos que contengan levas, que son costosas y difíciles de manufacturar según lo indicado en [25]) para cada tipo de trayectoria. Asimismo, el desplazamiento y rotación se simplifica al centrarse sólo en la manipulación del motor con el objetivo de trazar múltiples trayectorias.

Con el análisis de desplazamientos que se propone, las trayectorias se expresan como relaciones que dependen directamente del tiempo, y se realiza un estudio de ellas a partir de múltiples perfiles. En primer lugar, se estudia el desarrollo de una curva de velocidad parabólica, que se define mediante una relación cuadrática. Luego, concluye con un perfil con forma de trapecoide, que se compone de una función a partes lineal.

2.4.3 Generador analítico del perfil parabólico de velocidad

En [26] se desarrolla la forma en que, a partir de una función que describe la aceleración, es posible generar relaciones que definan la velocidad y la posición angular de un cuerpo que se mueve. Si la trayectoria de dicho cuerpo es parabólica, entonces su función matemática es una función cuadrática, y la recta representativa de su tasa de cambio (es decir, su derivada) será una línea recta, dicho comportamiento de aprecia en la Figura 2.8.

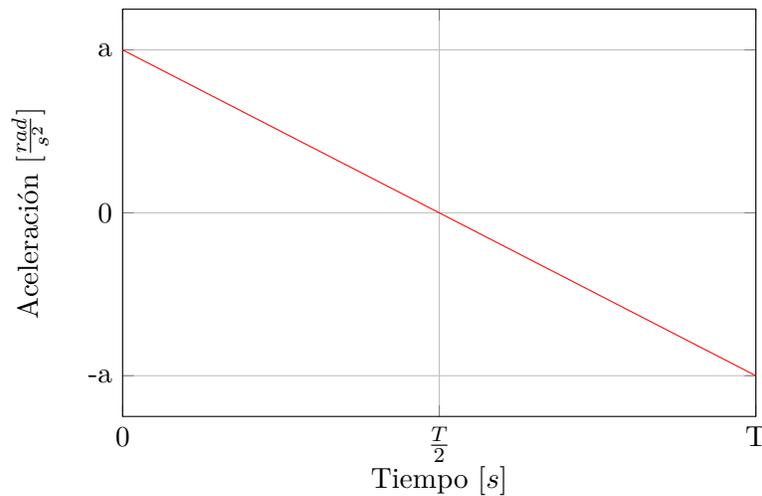


Figura 2.8: Función de aceleración del perfil parabólico, $\alpha(t) = \frac{-2a}{T}t + a$.

La relación punto-pendiente de una ecuación de primer grado se representa como:

$$\alpha(t) = mt + b \quad (2.7)$$

donde $b = a$ y el valor de la pendiente se calcula como sigue:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.8)$$

cuando se sustituyen en (2.8) el tiempo T y la aceleración a :

$$m = \frac{-a - a}{T - 0} \quad (2.9)$$

se obtiene la función para la aceleración.

$$\alpha(t) = \frac{-2a}{T}t + a \quad (2.10)$$

La función de velocidad angular es obtenida cuando se integra (2.10) con límites de 0 hasta t . La curva es mostrada en la Figura 2.9.

$$\omega(t) = \int_0^t \alpha(t)dt + \omega(0) \quad (2.11)$$

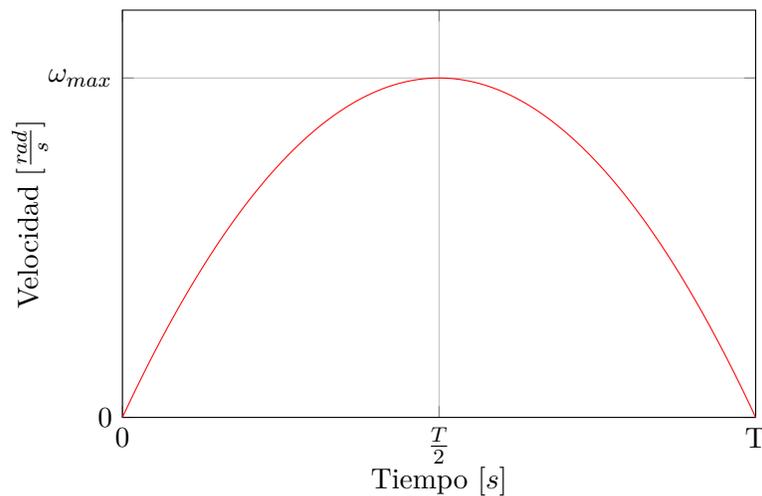


Figura 2.9: Función de velocidad del perfil parabólico, $\omega(t) = \frac{at^2}{T} + at$.

Al resolver la integración analíticamente se tiene:

$$\omega(t) = \frac{-at^2}{T} + at, \quad \omega(0) = 0 \quad (2.12)$$

Por otra parte, se sabe que el punto en el que la función de aceleración intersecta el eje del tiempo se tiene un máximo. Así que, cuando se evalúa la ecuación de velocidad (2.12) en $\frac{T}{2}$ el resultado obtenido es la máxima velocidad:

$$\omega_{max} = \omega\left(\frac{T}{2}\right) \quad (2.13)$$

Qué entrega:

$$\omega_{max} = \frac{aT}{4} \quad (2.14)$$

Para obtener la ecuación de posición angular se debe integrar la curva $\omega(t)$ en los límites de 0 hasta t :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t)dt + \theta(0) \quad (2.15)$$

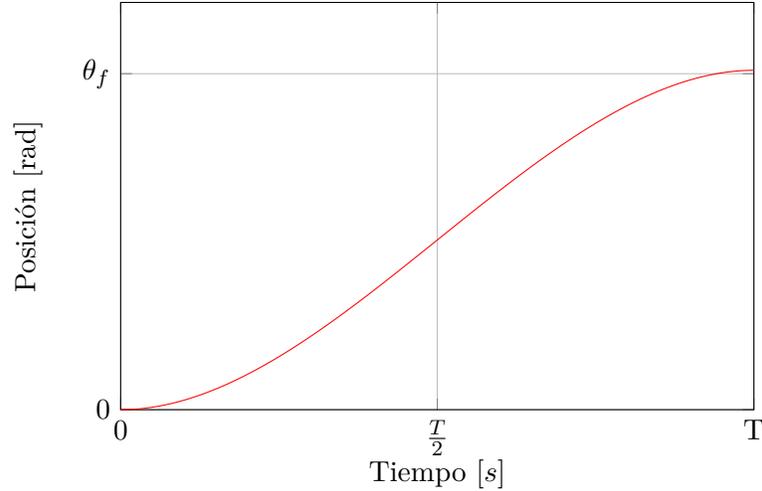


Figura 2.10: Curva de posición para el perfil parabólico, $\theta(t) = \frac{-at^3}{3T} + \frac{at^2}{2}$.

La relación de posición es cúbica y está representada como sigue:

$$\theta(t) = \frac{-at^3}{3T} + \frac{at^2}{2}, \quad \theta(0) = 0 \quad (2.16)$$

Cuando se evalúa $\theta(t)$ en T el resultado es la posición final:

$$\theta_f = \theta(T) \quad (2.17)$$

resolviendo se tiene:

$$\theta_f = \frac{2aT^2}{12} \quad (2.18)$$

Sirviendo a propósitos de aplicabilidad se re-define la relación (2.18) en términos de una máxima velocidad:

$$\theta_f = \frac{2T}{3}\omega_{max} \quad (2.19)$$

Al despejar (2.14) se obtiene una constante de aceleración:

$$a = \frac{4\omega_{max}}{T} \quad (2.20)$$

y T de la ecuación (2.19)

$$T = \frac{3\theta_f}{2\omega_{max}} \quad (2.21)$$

El desarrollo de las ecuaciones correspondientes tiene como objetivo lograr que tanto el tiempo requerido para que el perfil de movimiento alcance su posición deseada como la aceleración máxima del motor sean determinados exclusivamente por la posición final que se haya indicado y la máxima velocidad que el motor consiga generar. En el caso de generar el perfil parabólico en formato discreto, los valores T , a y $m = \frac{-2a}{T}$ son utilizados para realizar el cálculo, de forma iterativa, los distintos *set points* de posición que el objeto adquiere en cada instante de tiempo. Este cálculo se realiza mediante la integración numérica, lo cual tiene una explicación más detallada en la siguiente sección.

2.4.4 Generador analítico del perfil trapezoidal de velocidad

El perfil trapezoidal puede ser representado como una función compuesta por dos ecuaciones lineales y una constante igual a cero. En cuanto a la aceleración que describe este perfil, se expresa mediante una función que consta de diferentes valores constantes separados por discontinuidades, tal y como se ilustra en la Figura 2.11.

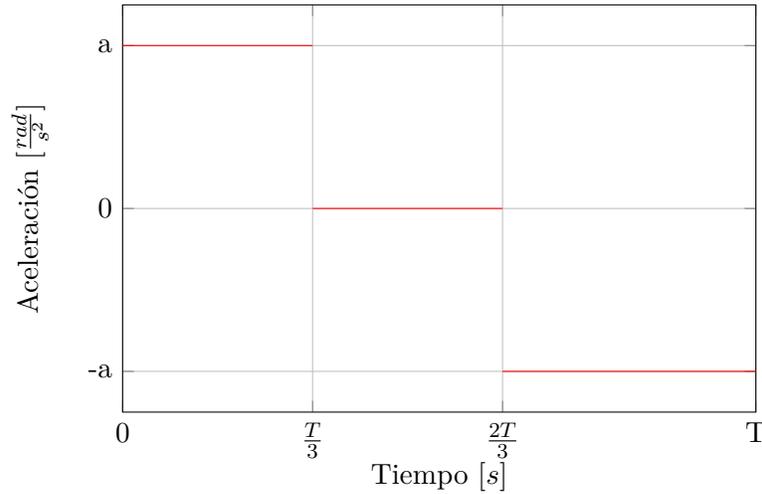


Figura 2.11: Curva de aceleración $\alpha(t)$ del perfil trapezoidal representada en (2.22).

Para calcular las relaciones de velocidad y posición del perfil trapezoidal, se debe integrar por partes en intervalos de tiempo que se encuentran definidos en la ecuación de aceleración. Estos intervalos se encuentran en la primera y segunda mitad del tiempo total, como se muestra en la Figura 2.11. Es posible experimentar con diferentes geometrías del trapecio y modificar los intervalos de tiempo. La ecuación que describe la curva de aceleración para el perfil trapezoidal se presenta de forma específica:

$$\alpha(t) = \begin{cases} a & 0 \leq t \leq \frac{T}{3}, \\ 0 & \frac{T}{3} \leq t \leq \frac{2T}{3}, \\ -a & \frac{2T}{3} \leq t < T. \end{cases} \quad (2.22)$$

La primera ecuación de velocidad es calculada al integrar función de aceleración en el intervalo $0 < t \leq \frac{T}{3}$:

$$\omega(t) = \int_0^t \alpha(t) dt + \omega(0) \quad (2.23)$$

De esta forma, se calcula la primera ecuación para la velocidad:

$$\omega(t) = at, \quad \omega(0) = 0 \quad (2.24)$$

que una vez que se evalúa en $\frac{T}{3}$ entrega la máxima velocidad que el motor puede alcanzar:

$$\omega_{max} = \omega\left(\frac{T}{3}\right) \quad (2.25)$$

y que como resultado entrega

$$\omega_{max} = \frac{aT}{3} \quad (2.26)$$

Dentro de $\frac{T}{3} < t \leq \frac{2T}{3}$ se realiza una integración:

$$\omega(t) = \int_{\frac{T}{3}}^t \alpha(t)dt + \omega\left(\frac{T}{3}\right) \quad (2.27)$$

y cuyo resultado es:

$$\omega(t) = \frac{aT}{3} \quad (2.28)$$

En el intervalo final $\frac{2T}{3} < t \leq T$ se integra nuevamente:

$$\omega(t) = \int_{\frac{2T}{3}}^t \alpha(t)dt + \omega\left(\frac{2T}{3}\right) \quad (2.29)$$

y se obtiene:

$$\omega(t) = -at + aT \quad (2.30)$$

De esta forma, la función que representa a la velocidad por partes es representada como sigue:

$$\omega(t) = \begin{cases} at & 0 \leq t \leq \frac{T}{3}, \\ \frac{aT}{3} & \frac{T}{3} \leq t \leq \frac{2T}{3}, \\ -at + aT & \frac{2T}{3} \leq t < T. \end{cases} \quad (2.31)$$

la curva se muestra en la Figura 2.12

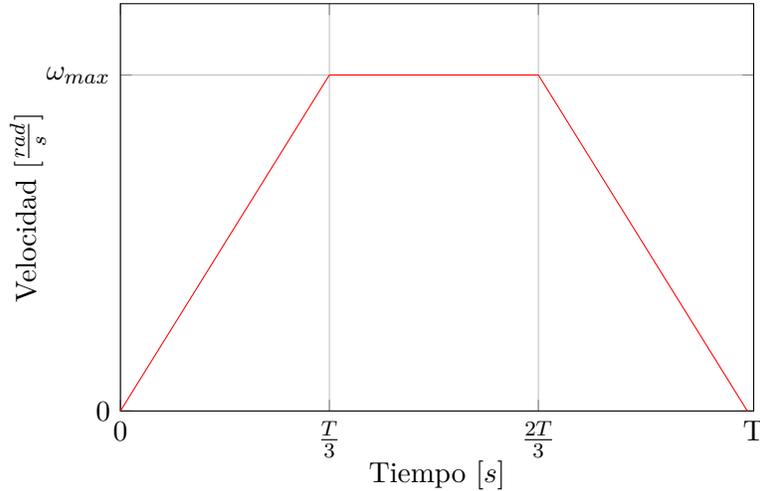


Figura 2.12: Función de velocidad $\omega(t)$ para el perfil trapezoidal representada en (2.31).

La obtención de la función que representa la posición angular se consigue con un procedimiento de integración por partes similar al que se utilizó para la curva de velocidad. Para el intervalo $0 < t \leq \frac{T}{3}$:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t)dt + \theta(0) \quad (2.32)$$

se resuelve:

$$\theta(t) = \frac{at^2}{2}, \quad \theta(0) = 0 \quad (2.33)$$

En el intervalo intermedio $\frac{T}{3} < t \leq \frac{2T}{3}$ se resuelve la integral:

$$\theta(t) = \int_{\frac{T}{3}}^t \omega(t)dt + \theta\left(\frac{T}{3}\right) \quad (2.34)$$

que da como resultado:

$$\theta(t) = \frac{aT}{3}t - \frac{aT^2}{18} \quad (2.35)$$

Para el último intervalo $\frac{2T}{3} < t \leq T$ la integral que se resuelve es:

$$\theta(t) = \int_{\frac{2T}{3}}^t \omega(s)dt + \theta\left(\frac{2T}{3}\right) \quad (2.36)$$

con solución:

$$\theta(t) = -\frac{at^2}{2}t + atT - \frac{5aT^2}{18} \quad (2.37)$$

La curva de velocidad se respresenta como sigue:

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{at^2}{2} & 0 \leq t \leq \frac{T}{3}, \\ \frac{aT}{3}t - \frac{aT^2}{18} & \frac{T}{3} \leq t \leq \frac{2T}{3}, \\ -\frac{at^2}{2}t + atT - \frac{5aT^2}{18} & \frac{2T}{3} \leq t < T. \end{cases} \quad (2.38)$$

En la Figura 2.13 se muestra la gráfica de la curva de posición.

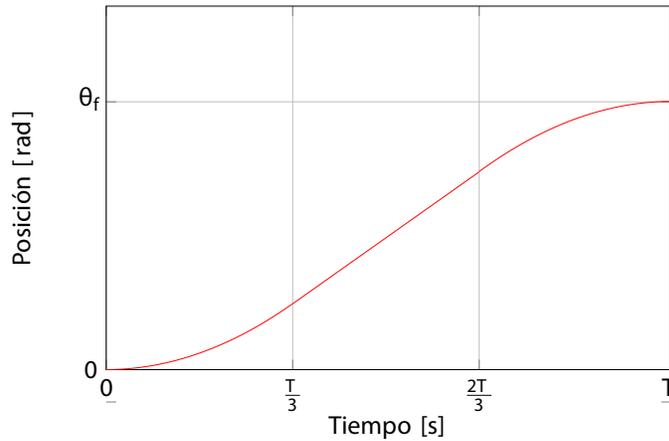


Figura 2.13: Función de posición $\theta(t)$ para el perfil trepezoidal representada en (2.38).

La posición final se obtiene al evaluar $\theta(t)$ en T :

$$\theta_f = \theta(T) \quad (2.39)$$

y al resolver obtenemos:

$$\theta_f = \frac{2aT^2}{9} \quad (2.40)$$

Es conveniente factorizar a la expresión (2.40) en el producto de $\frac{aT}{3}$ por $\frac{2T}{3}$ para así poder sustituir con la ecuación (2.26) y describir la posición final en términos de la velocidad máxima y el periodo de tiempo.

$$\theta_f = \frac{2T}{3}\omega_{max} \quad (2.41)$$

De la misma ecuación podemos despejar T :

$$T = \frac{3\theta_f}{2\omega_{max}} \quad (2.42)$$

y de la ecuación (2.26) despejamos la constante de aceleración:

$$a = \frac{3\omega_{max}}{T} \quad (2.43)$$

De forma similar al perfil parabólico, los valores numéricos derivados a partir de la velocidad máxima y la posición deseada por el usuario se utilizarán como coeficientes para el cálculo iterativo en el sistema discreto que se detallará en el próximo capítulo.

2.4.4.1 Seguimiento de trayectoria con un controlador proporcional

El artículo [27] indica que las trayectorias de vehículos autónomos necesitan un sistema que sea retroalimentado constantemente por sensores que detecten el ambiente alrededor del vehículo, de manera que se eviten posibles colisiones. Para satisfacer esta necesidad, se crea un modelo de lazo cerrado que recibe retroalimentación que es adquirida y sirve para procesar la acción de un controlador.

El artículo [28] muestra la información principal sobre lo que es un controlador mediante la analogía con cañón diseñado para derribar naves enemigas, que necesita calibrar su dirección para así alcanzar un objetivo en movimiento. Con el objetivo de alcanzar dicha aeronave, el cañón deberá efectuar diferentes rotaciones, que modifiquen el ángulo (θ), que serán producidas por la rotación de un motor. Al momento de aplicar voltajes positivos, el motor girará con un sentido anti-horario, mientras que al aplicar voltajes negativos, se le hará girar con sentido horario, y al no recibir voltaje, se detendrá. Con la ayuda de un radar la posición del avión puede ser determinada y se puede usar este valor como el *set point* θ_d que se busca que el ángulo θ del cañón adquiera. En otras palabras, se busca que $\theta = \theta_d$ en el menor tiempo posible para que al conseguirlo se realice el disparo.

La relación entre el voltaje en el motor y el procedimiento anterior se explica de la siguiente manera:

$$v = k_p(\theta_d - \theta) \quad (2.44)$$

donde la ganancia proporcional está dada por k_p .

Se muestra el comportamiento del sistema en el esquemático de la Figura 2.14:

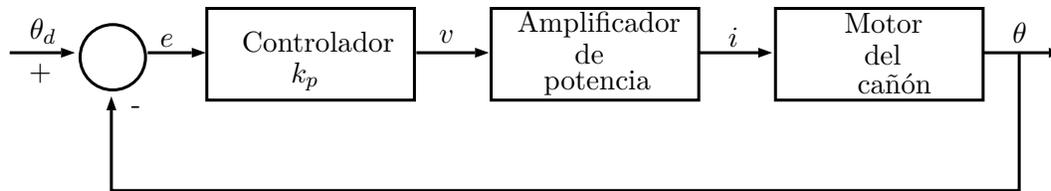


Figura 2.14: Sistema en lazo cerrado de un cañón anti-aéreo.

Se observa que el controlador se construye utilizando el ángulo del disparador θ (la salida) para proporcionar un voltaje v (la entrada) que se envía al motor. El error $e = \theta_d - \theta$ representa la diferencia entre el *set point* que se desea θ_d y la posición actual θ . En este trabajo, se propone que no es necesario el uso de controladores demasiados complejos gracias al uso de perfiles de velocidad.

2.5 Administración del sistema

El componente que corresponde a la administración de un sistema de conducción autónoma es uno de los más importantes y puede considerarse como el encargado de enlazar y supervisar el resto de los componentes. Por ello, es importante seleccionar una plataforma de desarrollo robusta y que además permita modificar los componentes de más bajo nivel en el sistema. Para dicha tarea se ha seleccionado un *middleware* que de forma nativa opera en distribuciones de *Linux*: *ROS Robotic Operating System*.

2.5.1 Sistemas robóticos con *Linux*

En el desarrollo de sistemas robóticos existen un gran número alternativas para la implementación de *software* y *hardware*. Sin embargo, no todas ellas son de arquitectura abierta o licencia libre; lo que en términos de desarrollo podría representar un claro límite de escalabilidad, portabilidad o propiedad intelectual. Tomando en cuenta las características anteriores, trabajar en *Linux* representa una clara ventaja con respecto a otros sistemas operativos como lo son *Windows* o *MacOS*.

ROS es un entorno de trabajo creado para el desarrollo e integración de sistemas robóticos bajo la licencia BSD (*Berkeley Software Distribution*) de código abierto. Esta licencia permite el libre uso para propósitos comerciales y de investigación. Algunas de las características más destacables de *ROS* son

- **Multi-lenguaje:** Sus bloques funcionales (nodos) pueden ser programados en diferentes lenguajes, como *python* o *c++*.
- **Compatibilidad con software externo:** Permite utilizar funcionalidades de terceros para aplicaciones específicas como cinemática o reconocimiento de imágenes.
- **Diferentes niveles de programación:** El desarrollo con esta plataforma ofrece una capa de abstracción de hardware que facilita la comunicación y gestión de acciones sin la necesidad de conocer los detalles específicos como protocolos de comunicación o algoritmos de control.

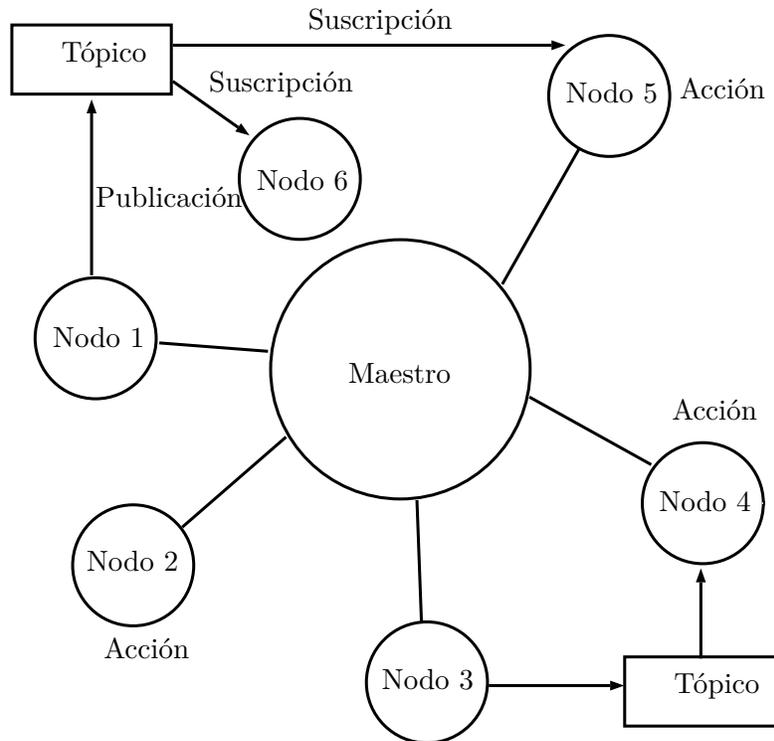


Figura 2.15: Esquema simplificado de un sistema desarrollado en *ROS*

Por otra parte, permite la manipulación de cada dispositivo a bajo nivel al tener acceso a todos los archivos de compilación.

- **Participación colectiva:** Una de las características más importantes de *ROS* es la creciente comunidad de desarrolladores que comparten su trabajo y que eventualmente facilitan la integración de sistemas más complejos.
- **Amplio repositorio de referencias oficiales:** Aún sin ser un marco de trabajo sobre el que existan muchos trabajos educativos como los hay en tecnologías individuales como *Arduino* o *Raspberry*; el sitio oficial de *ROS*: wiki.ros.org contiene la documentación y tutoriales necesarios para comenzar como desarrollador de esta herramienta.

2.5.1.1 Arquitectura de un sistema desarrollado en *ROS*

En la figura 2.15 se muestra de manera simplificada la forma en que se construye y funciona un sistema creado en *ROS*. Como puede observarse, la pieza fundamental del sistema son nodos, que a su vez representan funcionalidades de un sistema robótico (como sensado o actuación), y que se comunican a través de tópicos para compartir información relevante a otros componentes del sistema.

El desarrollo de un sistema con este marco de trabajo consiste en crear una red "de igual a igual" procesos de *ROS* que trabajen con datos en conjunto. Los componentes básicos de una red *ROS* son: nodos, maestro, parámetros del servidor, mensajes, servicios, tópicos y bolsas; todos ellos

proveen datos de diferentes formas:

- **Nodos:** Son procesos que proveen operaciones de computo y permiten crear sistemas de control modulares. Un robot generalmente estará compuesto de nodos interconectados entre si. Por ejemplo, un nodo controla la velocidad de un motor, otro nodo mide distancias objetivo y otros nodo puede procesar imágenes en tiempo real. Los nodos en *ROS* se pueden describir haciendo uso de una librería de cliente como *roscpp* o *rospy*.
- **Maestro:** Provee un nombre de registro y monitoreo del resto de la red. Sin el maestro, el resto de los nodos no son capaces de encontrarse entre si mismos, intercambiar mensajes, o invocar servicios.
- **Parámetros del servidor:** Permite que los datos sean almacenados en una ubicación central clave. este componente es parte del maestro.
- **Mensajes:** Los nodos se comunican entre si mediante mensajes. Un mensaje es simplemente una estructura de datos que comprende campos escritos. Los tipos estándar de datos primitivos como *integer*, *floating point*, *boolean*, entre otros, también son soportados.
- **Tópicos:** Se trata de un nombre que es usado para identificar el contenido del mensaje. Un nodo que está interesado en ciertos tipos de datos se suscribirá al tópico apropiado. Pueden existir múltiples nodos suscriptores o publicadores para un mismo tópico. De la misma forma, un mismo nodo puede publicar o suscribirse en múltiples tópicos. La principal idea de este sistema es desacoplar la producción de información de su consumo. De forma local un tópico puede ser considerado un bus de información.
- **Maletas:** Son una herramienta importante del sistema que permite almacenar un conjunto de datos (de un sensor , por ejemplo) y reproducirlos más tarde.

2.5.1.2 Espacio de trabajo en *ROS*

La forma en que *ROS* funciona, es a través de espacios de trabajo construidos en carpetas que almacenan los paquetes que hacen funcionar a cada nodo. Dentro de cada carpeta se puede encontrar el código fuente de cada paquete, así como los archivos de compilación y ejecutables. El sistema de organización de paquetes que se muestra en la figura 2.16 contiene los ejemplos más comunes de archivos, pero esto no quiere decir que sean los definitivos; por ejemplo, hay paquetes que no requieren carpetas *srv* (para servicios) pero sí de tipo *action*. Los detalles específicos sobre cada carpeta y archivo se abordan en la metodología. Finalmete, es importante mencionar que la curva de aprendizaje para el desarrollo con *ROS* es prolongada al principio, pero una vez que se adquiere cierto dominio ofrece herramientas de desarrollo muy robustas y escalables.

Ahora que se conoce el contexto científico y tecnológico detrás de la propuesta para este trabajo de investigación, es posible continuar con la sección de metodología.

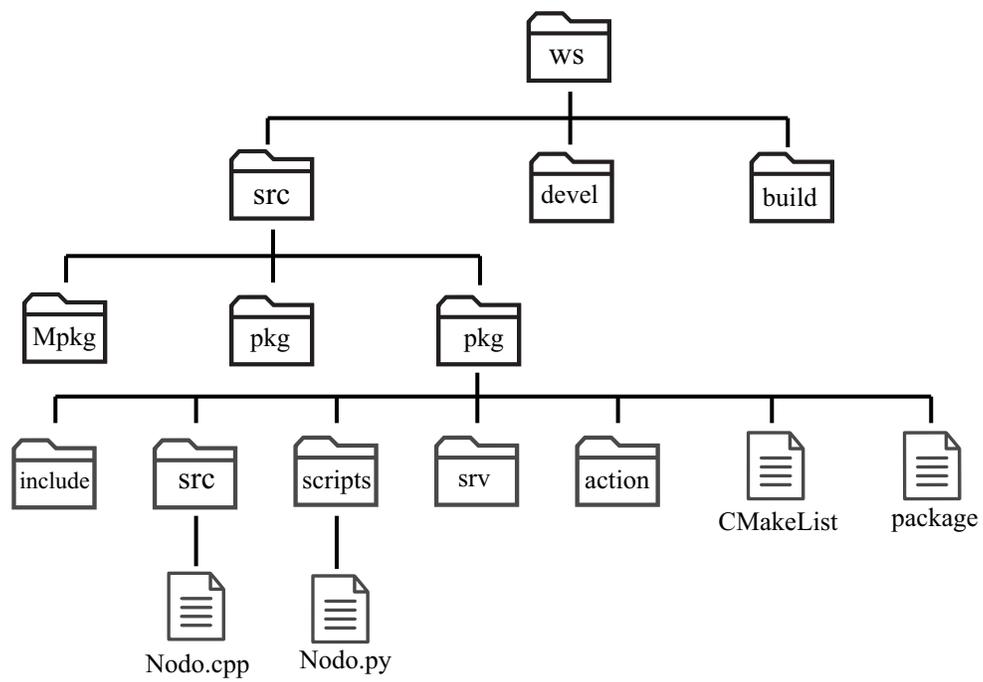


Figura 2.16: Ejemplo de un espacio de trabajo organizado por carpetas de *ROS*.

Metodología

Esta sección presenta los procesos y métodos que fueron utilizados para el desarrollo del prototipo que permitió experimentar y poner a prueba la hipótesis del trabajo. Así mismo, se mencionan los recursos materiales y humanos utilizados durante el proceso. La figura [referencia a figura del sistema final] es una modificación de la figura [referencia al sistema inicial], y sirve como puente entre el planteamiento teórico y el experimental a partir de las siguientes consideraciones:

- Se añaden los dispositivos que han sido seleccionados para asignar un medio de implementación a cada función.
- Se elimina la función de localización debido a que para el alcance de este trabajo no es necesario obtener una referencia global del vehículo.

Cada función tiene uno o varios dispositivos asociados que han sido seleccionados con base en qué características pueden aportar a los requisitos de cada operación:

1. LiDAR 2D utilizado para la detección de obstáculos: este dispositivo permitirá obtener una nube de puntos que será procesada mediante un algoritmo *SLAM* y entregará la posición y orientación del vehículo con respecto a un marco de referencia fijo. Además, será utilizado para detectar obstáculos durante la trayectoria.
2. Tacómetro digital para el monitoreo de la velocidad longitudinal: este dispositivo permite medir las revoluciones del eje principal de la transmisión y con ello calcular y retro-alimentar la velocidad longitudinal del vehículo.
3. Emisor y receptor de radiofrecuencia para el control manual del usuario: gracias a este par de dispositivos, el automóvil responde directamente a las acciones del piloto antes de que se activen las funciones autónomas del sistema.
4. Micro-computadora *Raspberry Pi 4* para la administración del sistema a bordo del vehículo: este dispositivo conecta los diferentes componentes de *hardware* y *software* a bordo del vehículo y administra la interacción que existe entre ellos. Además, efectúa el procesamiento de la información entregada por el sensor LiDAR e implementa el algoritmo *SLAM*.

5. Computadora con *Linux* para la administración del sistema (específicamente monitoreo) y generación de las maniobras autónomas: este dispositivo es el respaldo de procesamiento fuera del vehículo que permitirá procesar los algoritmos necesarios para generar el perfil de velocidad, maniobra de evasión y función de centrado automático. Este dispositivo establecerá una conexión con el vehículo de forma remota a través del protocolo TCP/IP en una red local.
6. Microcontrolador 1 y 2 (STM32) para la interacción directa con los componentes de *hardware*: estos dos dispositivos son el puente entre las instrucciones de la micro-computadora y el driver de potencia que alimenta al motor sin escobillas y el servomotor. Además, recibe y procesa la información del tacómetro digital.
7. Control electrónico de velocidad (*ESC*) para el movimiento del motor sin escobillas de la transmisión y el servomotor de la dirección: este controlador recibe dos señales de *PWM*, desde el Microcontrolador 2, que convierte a una señal eléctrica capaz de mantener una velocidad proporcional en el motor sin escobillas y una posición específica en el servomotor.
8. Motor de la transmisión y servomotor de la dirección: estos dos dispositivos son los actuadores finales que en conjunto ejercen la fuerza necesaria para modificar la posición y orientación del vehículo con respecto a un marco de referencia fijo.

3.1 Equipo y materiales

La investigación realizada durante este trabajo será de tipo cuantitativa y experimental con resultados finales enfocados a convertir los prototipos de pruebas en recursos de investigación para la Universidad Autónoma de Querétaro.

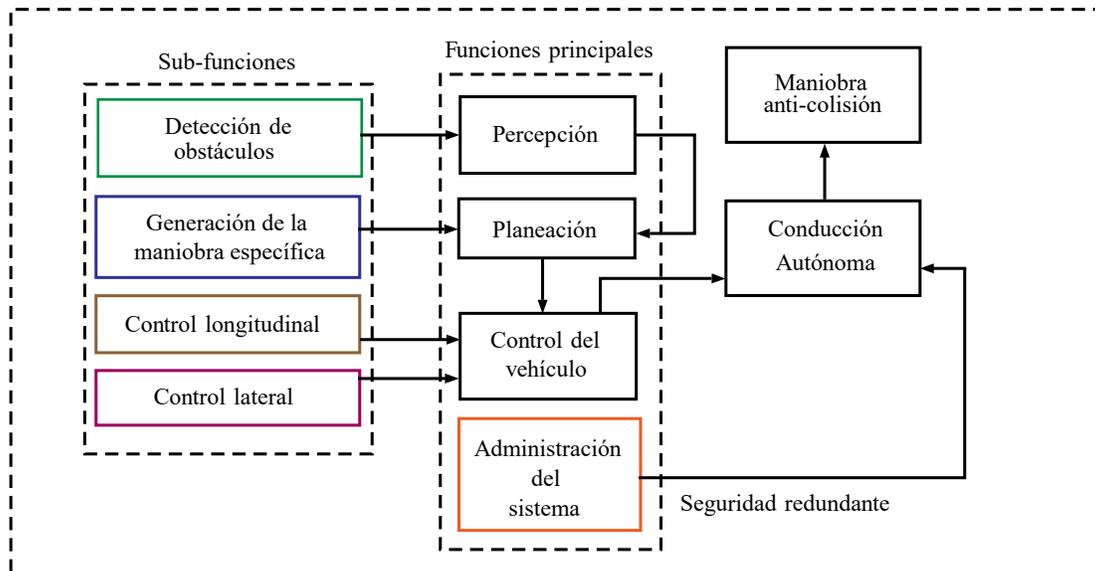
Los recursos humanos y materiales que serán necesarios para la investigación serán los siguientes:

3.1.1 Sensores y procesadores

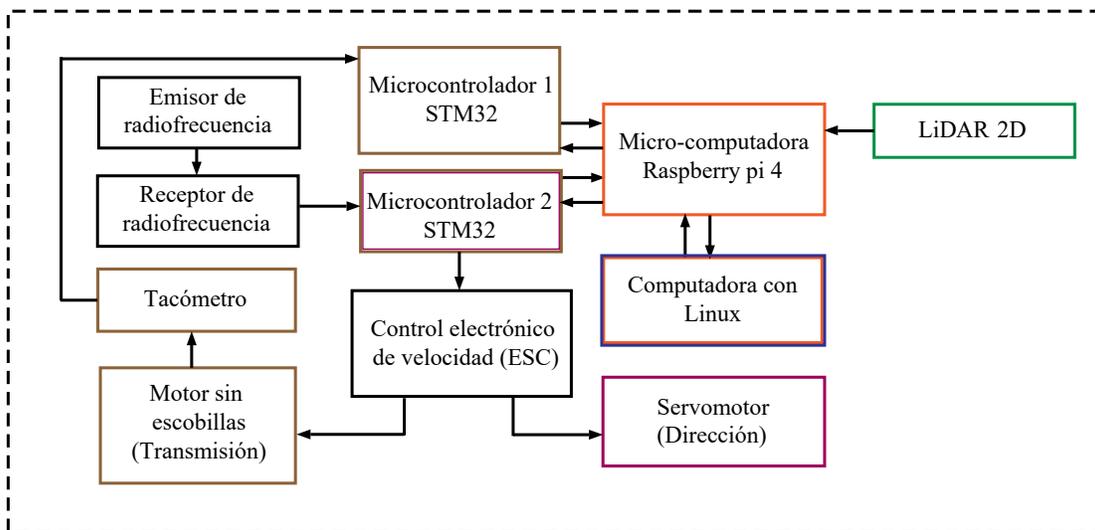
- Sensor *LiDAR 2D*.
- Micro-controlador STM32
- Tacómetro digital.
- Micro-computadora *Raspberry pi 4*.

3.1.2 Software

- *Vivado Design Suite*.
- *EAGLE*.
- *Digilent Waveforms*.
- *MATLAB*.



Componentes principales del sistema de conducción autónoma



Dispositivos principales

Figura 3.1: Funciones principales de la conducción autónoma con dispositivos específicos de este trabajo.

3.1.3 Equipo de laboratorio

- Osciloscopio *Analog Discovery*.
- Multímetro.
- Fuente de voltaje.

- Cautín.
- Componentes electrónicos consumibles (resistencias, capacitores, entre otros).

3.1.4 Recursos humanos

Se pretende trabajar con la asesoría de los siguientes investigadores debido al amplio conocimiento y experiencia que poseen en temas de interés para este trabajo:

- Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz, como Presidente.
- Dr. Roberto Valentín Carrillo Serrano, como Secretario.
- Dr. Miguel Martínez Prado, como Vocal.
- Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza, como Suplente.
- Dr. Suresh Thenozhi, como Suplente.

3.2 Modelo funcional del sistema

Con el objetivo de realizar múltiples pruebas para la evasión de obstáculos, se ha desarrollado un sistema que permita ejecutar diferentes partes de la maniobra dependiendo del momento específico del experimento. En términos generales, el sistema se encuentra recopilando y codificando información del entorno de forma iterativa para así ejecutar una maniobra longitudinal y lateral de acuerdo a las variables del exterior. Posteriormente, las maniobras seleccionadas generan una posición angular y velocidad deseada que son ingresadas a sus lazos de control respectivos para finalmente obtener una acción en el motor de la dirección y de la transmisión.

En la figura 3.2 se muestra la interacción funcional de los principales bloques del sistema atendiendo al siguiente flujo:

1. Escaneo bi-dimensional del entorno: Haciendo uso de un sensor *LiDAR 2D* montado en la parte superior del vehículo se obtiene una nube de puntos con coordenadas polares $\theta_l(t)$ y $r_l(t)$. Posteriormente, se procesa la información y se obtiene un plano con bi-dimensional con las barreras físicas en un radio máximo de 8 metros.
2. Obtención de coordenadas a través de marcos de referencia: Implementado un algoritmo *SLAM* a la nube de puntos es posible obtener un marco de referencia móvil (montado en el vehículo) con respecto a un marco de referencia fijo (donde se inició la trayectoria del vehículo) y extraer variables de movimiento relevantes para el resto del sistema. Se obtiene la posición $x_v(t)$ y $y_v(t)$ y la orientación $\theta_v(t)$ del vehículo con respecto al marco de referencia fijo.
3. Selección de un algoritmo para la posición angular de la dirección y la velocidad angular de la transmisión: Dependiendo del momento específico del experimento se seleccionarán un par de entradas para asignarse a $\theta_i(t)$ y $\omega_i(t)$ con un multiplexor. Las posibles combinaciones de entradas son las siguientes:

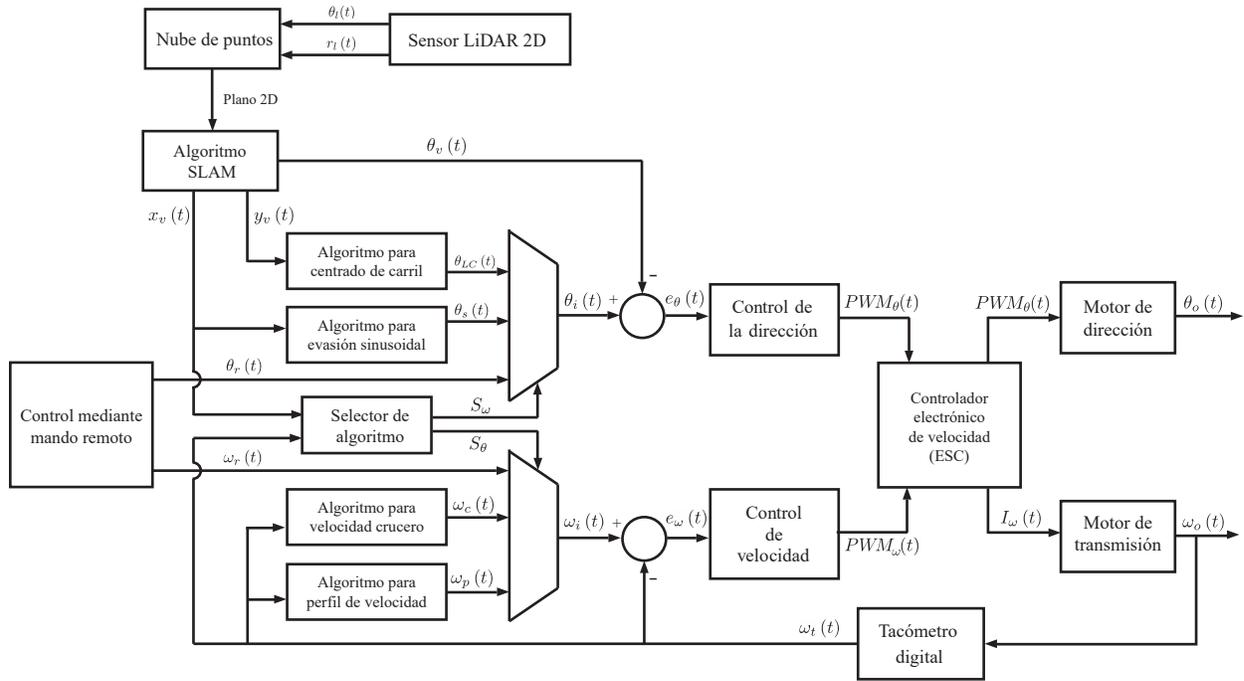


Figura 3.2: Diagrama de control propuesto para las maniobras anti-colisión.

- (a) Control mediante mando remoto: Al principio del experimento y antes de que cualquier obstáculo sea detectado $\theta_r(t)$ y $\omega_r(t)$ serán las señales del control remoto manipuladas por un piloto externo.
 - (b) Algoritmo para centrado de carril y velocidad crucero: Cuando el vehículo alcance una velocidad de $15 \frac{km}{h}$, se activará la asistencia para mantener al vehículo centrado sobre una línea haciendo uso de la variable $y_v(t)$ para detectar cualquier variación en la posición lateral y hacer la corrección respectiva en $\theta_{LC}(t)$. Posteriormente, cuando el vehículo alcance una velocidad de $20 \frac{km}{h}$ se activará la asistencia de velocidad crucero con lo cual el piloto podrá soltar el acelerador y sólo si des-acelera con el mando la velocidad disminuirá, en caso contrario se fijará $\omega_c(t)$ en $20 \frac{km}{h}$.
 - (c) Algoritmo para la evasión sinusoidal y el perfil de velocidad: Una vez detectado el obstáculo, se ejecutará una des-aceleración comandada por el perfil de velocidad parabólico y al mismo tiempo un cambio en la dirección de las llantas que efectúe un movimiento sinusoidal en el vehículo. Los parámetros que den lugar a $\theta_s(t)$ y $\omega_p(t)$ dependerán de la distancia en que el obstáculo sea detectado.
4. Control de dirección y velocidad: Partiendo de las variables, $\theta_i(t)$ y $\omega_i(t)$, seleccionadas por los multiplexores de posición y velocidad, se efectuarán las respectivas acciones de control $PWM_{\theta}(t)$ y $PWM_{\omega}(t)$.

3.3 Implementación

En esta sección se abordan tres principales aspectos de la metodología: la instrumentación electrónica, el diseño mecánico y el desarrollo de *software* a través de *ROS*.

3.3.1 Instrumentación

La instrumentación de este sistema integra los actuadores y sensores del sistema con los principales dispositivos de control (dos micro-controladores y una micro-computadora). Para dicho propósito se tienen dos circuitos principales: una tarjeta de adquisición que agrupa todas las señales a bordo del vehículo, y otra tarjeta de control que recibe dichas señales y las distribuye entre los micro-controladores.

3.3.1.1 Tarjeta de adquisición

El esquemático de la figura 3.3 muestra que casi todos los componentes de la tarjeta de adquisición son conectores que concentran las principales señales de los diferentes periféricos en el conector *JP3*. Dicho conector intercambia información con la tarjeta de control que se encuentra ubicada en la parte superior del vehículo.

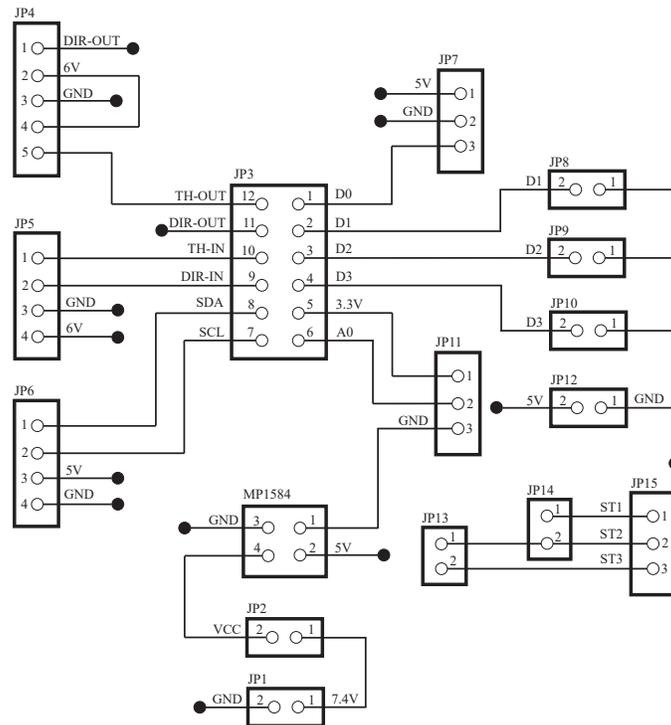


Figura 3.3: Esquemático de la tarjeta de adquisición.

La descripción detallada de cada componente se encuentra en el cuadro 3.1.

Componente	Función
JP1	Conector de alimentación principal que recibe 7.4V de la batería principal.
JP2	Conector destinado para colocar un interruptor que energiza el convertidor DC-DC con los 7.4V de la batería.
MP1584	Convertidor DC-DC que está ajustado para suministrar un voltaje fijo de 5V.
JP3	Conector principal del sistema que adquiere y envía información a los sensores y actuadores del sistema.
JP4	Conector que envía señales PWM al controlador electrónico de velocidad (ESC).
JP5	Conector que recibe señales PWM del receptor RC.
JP6	Conector para la comunicación I^2C con el display OLED.
JP7	Conector que recibe la señal del tacómetro digital.
JP8, JP9, JP10	Conectores utilizados para recibir o enviar señales digitales de múltiple propósito.
JP11	Conector utilizado para adquirir el valor analógico dado por un divisor de voltaje.
JP12	Conector que suministra 5V
JP13, JP14, JP15	Conectores que en conjunto proporcionan las señales necesarias para activar el ESC en modo de operación o programación.

Cuadro 3.1: Tabla de componentes de la tarjeta de adquisición.

El trazado de las pistas y las dimensiones finales, que se muestran en la imagen 3.4, están diseñadas con el objetivo de que sea posible colocar la tarjeta abordo del vehículo en un espacio reducido y además cercano a los principales periféricos.

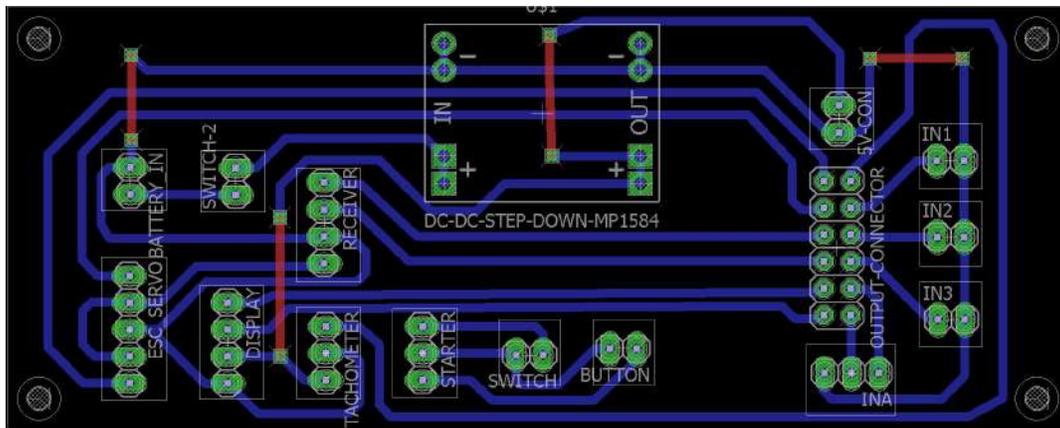


Figura 3.4: Distribución de componentes y pistas para la tarjeta de adquisición.

En la figura 3.5 se muestra la implementación física de la tarjeta de adquisición con sus respectivos componentes etiquetados.

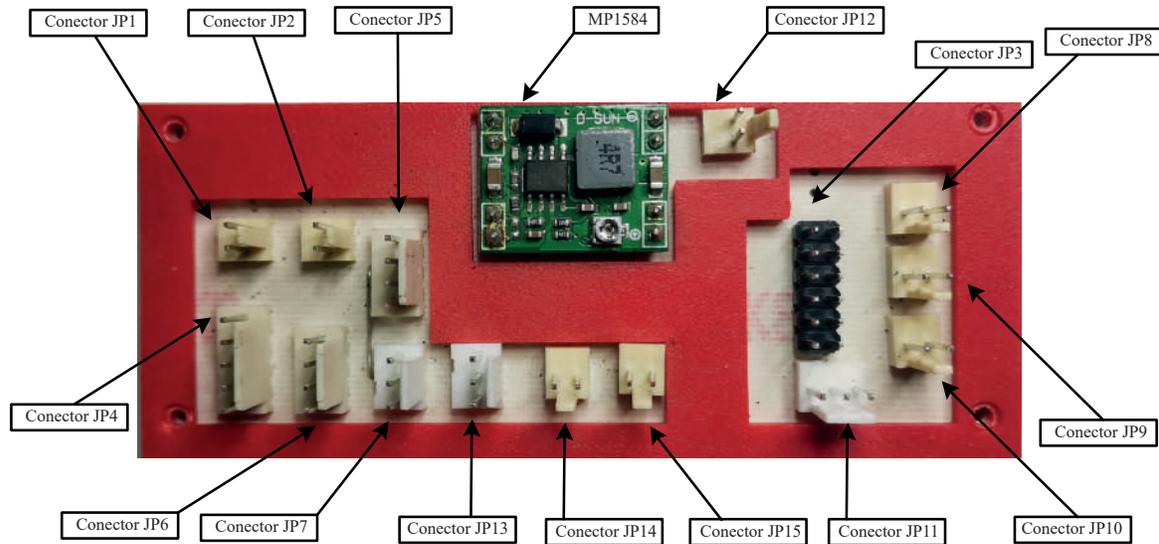


Figura 3.5: Tarjeta de adquisición.

3.3.1.2 Tarjeta de control

El principal objetivo de la tarjeta de control es agrupar y redistribuir las señales de cada sensor y actuador, para que sirvan como información para los micro-controladores montados en la tarjeta. Así mismo, en la tarjeta se conectan los micro-controladores con la micro-computadora a través de dos convertidores USB-Serial.

Una de las principales características de la tarjeta de control, es la capacidad de seleccionar a cual de los dos micro-controladores debe ser conectada determinada señal. Lo anterior se consigue a través de los conectores *JP1* y *JP2* que puede permiten mapear señales a través de *jumpers*.

Los detalles de cada componente se listan en el cuadro 3.2.

El trazado de pistas y dimensiones del *PBC* responden a la necesidad de colocar la tarjeta en un lugar accesible para el usuario si es que éste desea removerla para reconfigurar alguna característica de *hardware*.

En la imagen 3.7 se muestra el diseño final del *PCB*.

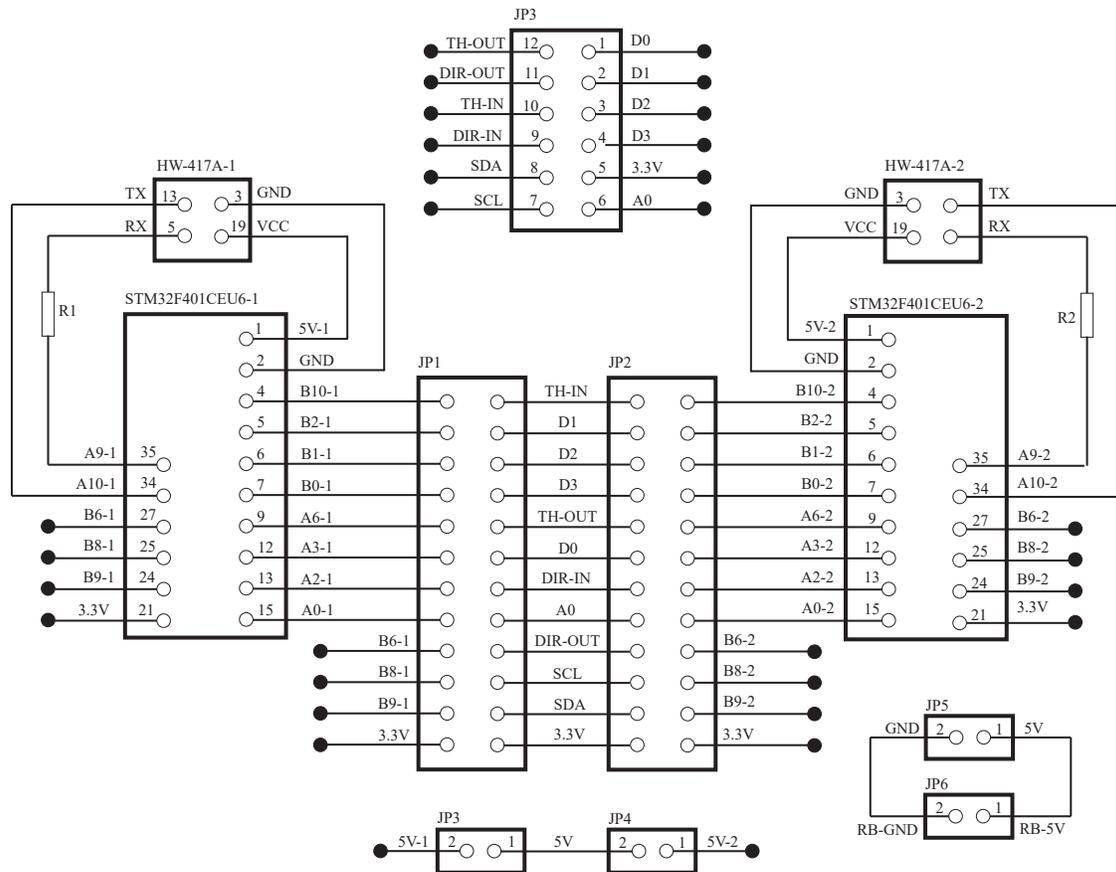


Figura 3.6: Esquemático de la tarjeta de control.

En la figura 3.8 se muestra la implementación física de la tarjeta de control con sus respectivos componentes etiquetados.

3.3.2 Diseño y manufactura de la plataforma de pruebas

En esta sección se presenta el procedimiento llevado a cabo para obtener los principales parámetros del vehículo con que se trabajó en el proyecto.

Debido a que el material y distribución de cada componente no es uniforme con respecto al ensamble final, la estrategia para obtener la masa y centro de masa fue pesar de forma individual los principales componentes, modelarlos en CAD, ensamblarlos y asignar las masas obtenidas en el *software Solid Works*.

Posteriormente, para calcular la masa total, ubicación del centro de masa, momentos de inercia y distancia de las llantas al centro de masa se utilizó la herramienta de *Solid Works* llamada

Componente	Función
STM32F401CEU6-1	Microcontrolador principal que administra las principales señales de control tipo PWM.
STM32F401CEU6-2	Microcontrolador secundario que administra los dispositivos indicadores como la pantalla OLED.
HW-417A-1	Convertidor USB-Serial del microcontrolador principal que permite comunicarse con la microcomputadora.
HW-417A-2	Convertidor USB-Serial del Microcontrolador secundario que permite comunicarse con la microcomputadora.
R1	Resistencia de 220Ω que protege la entrada RX de HW-417A-1.
R2	Resistencia de 220Ω que protege la entrada RX de HW-417A-2.
JP1	Conector utilizado para asignar señales específicas de la tarjeta de adquisición al microcontrolador principal mediante <i>jumpers</i> .
JP2	Conector utilizado para asignar señales específicas de la tarjeta de adquisición al microcontrolador secundario mediante <i>jumpers</i> .
JP3	Conector que permite alimentar el microcontrolador principal con $5V$.
JP4	Conector que permite alimentar el microcontrolador secundario con $5V$.
JP5	Conector que recibe la alimentación de $5V$ proveniente del convertidor DC-DC.
JP6	Conector que proporciona una fuente de alimentación para la microcomputadora.
JP7	Conector que recibe las señales adquiridas por la tarjeta de adquisición y que envía de vuelta las señales de control generadas por los microcontroladores.

Cuadro 3.2: Tabla de componentes de la tarjeta de control.

propiedades físicas. En la figura 3.9 se observan dos diferentes perspectivas que ayudan a acotar apropiadamente las dimensiones de interés. La referencia R contra la que se mide el centro de masa fue colocada en la intersección entre la base del chasis y la cara trasera de la superficie protectora del coche.

Finalmente, en la tabla 3.3 se reúne el resumen de los principales parámetros obtenidos.

3.3.3 Desarrollo del sistema en *ROS*

De acuerdo a lo mencionado en el estado del arte, un sistema desarrollado en *ROS* se compone principalmente de nodos y tópicos. Dichos nodos pueden ser suscriptores o publicadores dependiendo de si proporcionan o toman información de un tópico para efectuar alguna acción.

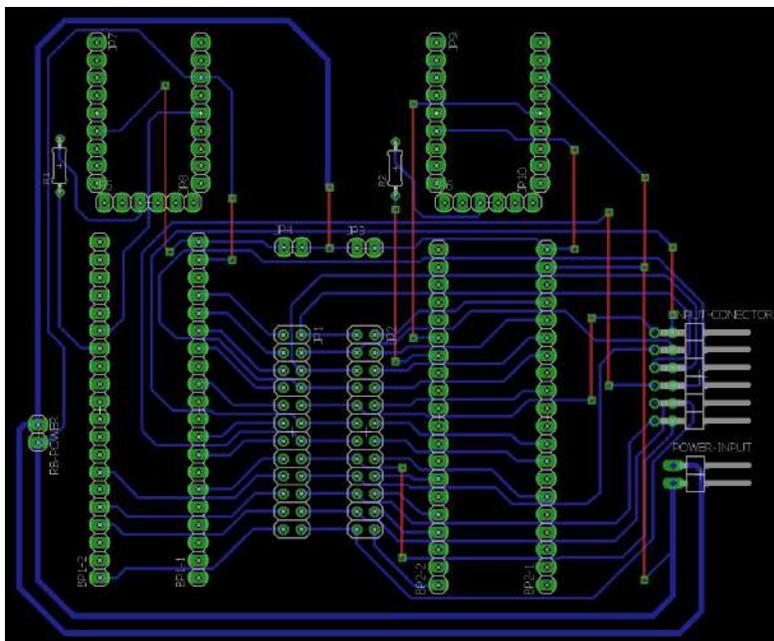


Figura 3.7: Distribución de componentes y pistas para la tarjeta de control.

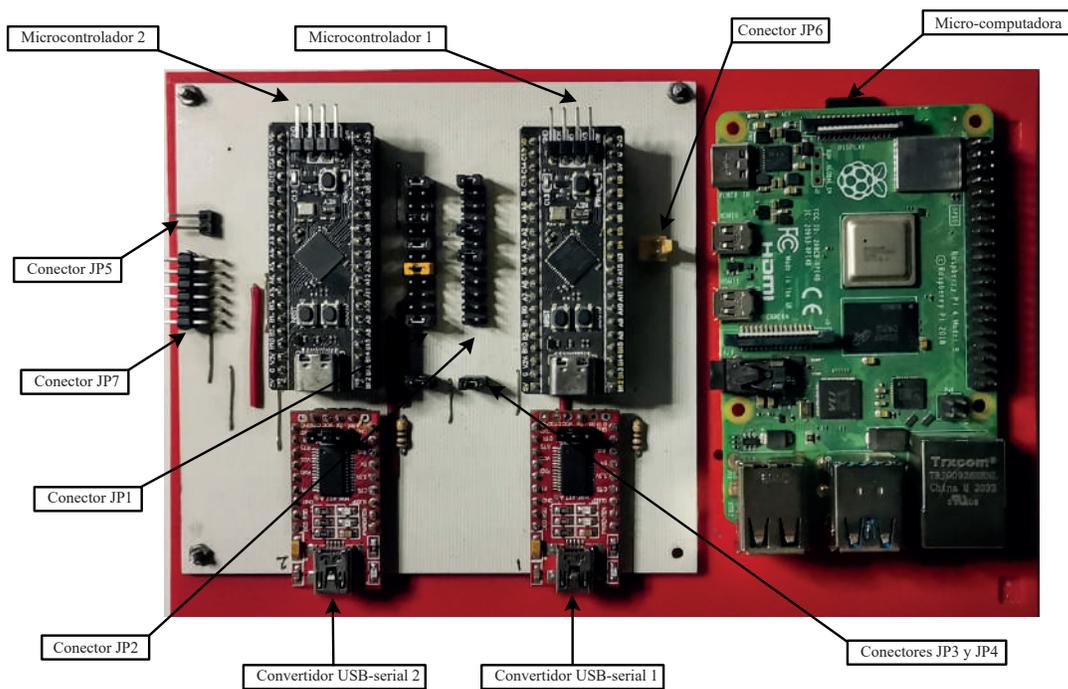


Figura 3.8: Tarjeta de control.

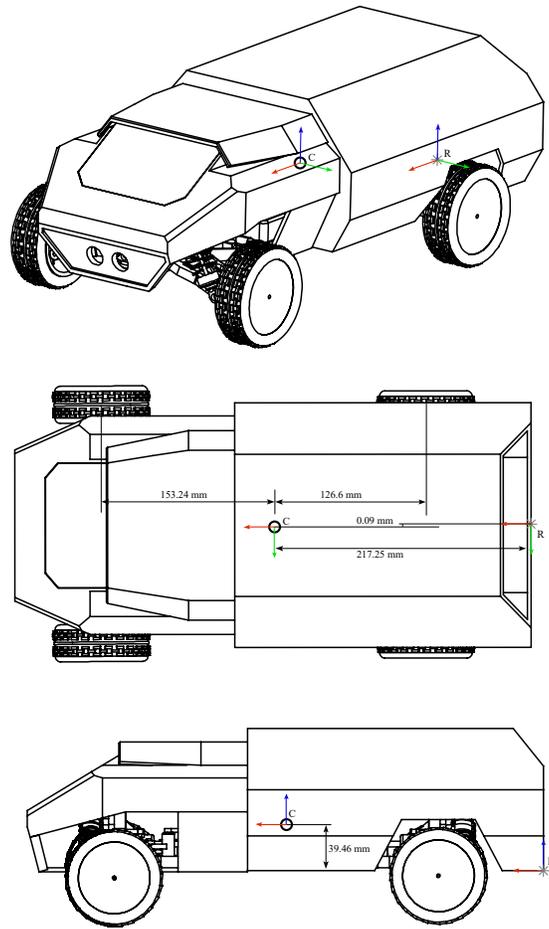


Figura 3.9: Modelado del vehículo y ubicación del centro de masa.

Parámetro	Valor
m	2249.75 g
Centro de masa en x	217.25 mm
Centro de masa en y	0.09 mm
Centro de masa en z	39.46 mm
I_x	9770624.77 g mm ²
I_y	35521846.23 g mm ²
I_z	38701965.52 g mm ²
a_1	153.24 mm
a_2	126.6 mm

Cuadro 3.3: Tabla de parámetros dimensionales del vehículo

3.3.3.1 Nodos publicadores y suscriptores

En la figura 3.10 se muestra el sistema desarrollado para ejecutar la maniobra de evasión cuando un obstáculo es detectado. Es importante observar que el flujo de control tiene como salidas principales los tópicos *ESCblmotorPWM* y *ESCblmotorPWM* que sirven como información para que el micro-controlador 2 controle la transmisión y dirección del vehículo. Por otra parte, existen tres nodos que conectan directamente el *hardware* de los periféricos con la micro-computadora: *microcontroller1*, *microcontroller2* y *rplidarNode*. El resto de los nodos son internos a la micro-computadora o a la *PC* con *linux*, dependiendo de la cantidad de recursos que demanden para funcionar.

3.3.3.2 Distribución de paquetes, nodos y archivos *launch*

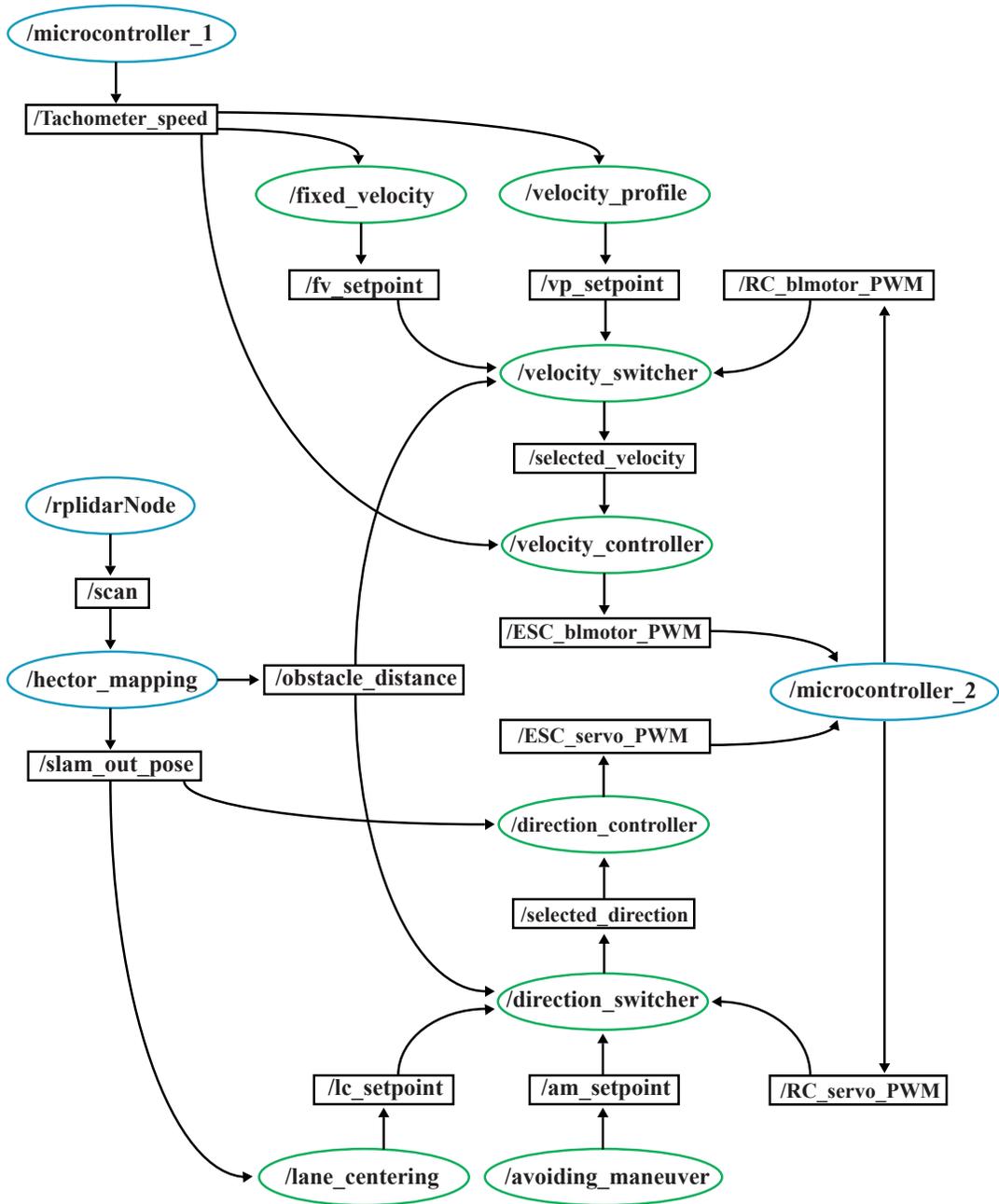
La correcta distribución de paquetes, nodos y archivos *launch* en las carpetas del sistema es importante para la correcta compilación y funcionamiento del sistema. Así pues, las figuras 3.11 y 3.14 muestran la ubicación de carpetas y archivos relevantes en la micro-computadora y la *PC*.

A continuación, se describe brevemente la función de cada nodo y la relación con los tópicos en los que publica o a los que está suscrito. Es importante mencionar que el código en C++ de cada nodo se incluye en los anexos de este trabajo.

Los nodos que se ejecutan dentro de la micro-computadora son:

- **rplidarNode**: Nodo encargado de activar el sensor LiDAR 2D, muestrear cada disparo de luz en diferentes ángulos y regresar una nube de puntos que es publicada en el tópico *scan*.
- **microcontroller 1**: Este nodo fue diseñado para comunicar el microcontrolador 1 con la micro-computadora a través de una conexión USB-serial. De forma específica, este nodo ayuda a obtener la velocidad del vehículo a través de un tacómetro que se encuentra montado en la transmisión y que es codificado para ser publicado en el tópico *Tachometer speed*.
- **microcontroller 2**: Al igual que *microcontroller 1*, este nodo establece una conexión USB-serial con el segundo micro-controlador. Sólo que en este caso, la información que publica es la señal de radiofrecuencia recibida por el mando a distancia que conductor manipula. Por otra parte, la información a la que está suscrito es el valor de PWM final que el micro-controlador envía al ESC, que a su vez controla el motor de la transmisión y el servo-motor de la dirección.
- **hector mapping**: Con la información publicada en el tópico *scan*, este nodo permite obtener la posición y pose del vehículo con respecto a un marco de referencia fijo (dónde este nodo fue llamado al principio). Además, este *hector mapping* identifica las interferencias del mapeo original y devuelve la distancia a la que se encuentran los posibles obstáculos.

En la figura 3.11 se muestra el espacio de trabajo y distribución de carpetas principales en la micro-computadora. Es importante observar que la carpeta *src* del paquete creado se encuentra vacía; esto se debe a que los nodos que se ejecutan provienen de tres paquetes externos.



- Nodos que se encuentran programados y corren dentro de la PC con linux
- Nodos que dependen de *hardware* externo y corren dentro de la micro-computadora

Figura 3.10: Desarrollo del sistema de nodos en ROS.

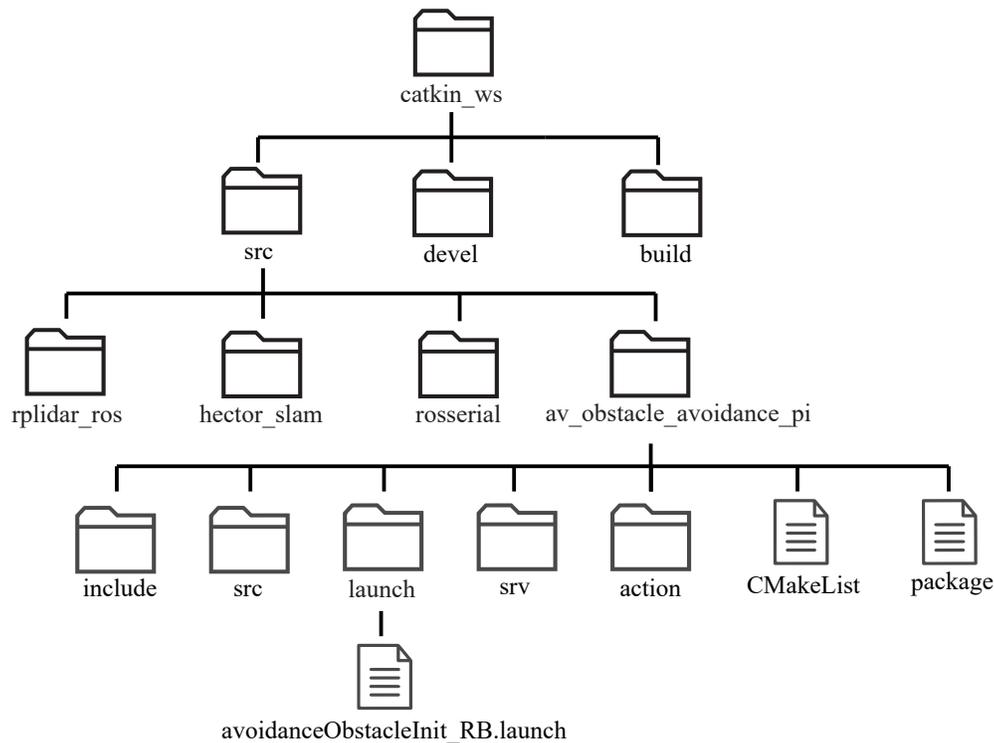


Figura 3.11: Espacio de trabajo *ROS* en la micro-computadora.

A continuación se presenta la descripción de los nodos y tópicos que corren dentro de la PC con *linux*:

- **fixed velocity:** Este nodo revisa de forma continua la velocidad entregada por el tópico *Tachometer speed*, una vez alcanzados los $20 \frac{km}{h}$ el nodo fija el *set point* de velocidad en ese máximo, aún y cuando el conductor acelere o desacelere a través del mando.
- **velocity profile:** Este nodo ofrece una curva de desaceleración que se activa cuando el obstáculo de prueba es detectado a una distancia en específico.
- **velocity switcher:** Con ayuda de este nodo es posible seleccionar el *set point* proveniente del mando del conductor, la velocidad fijada o el perfil de velocidad para reasignarlo al controlador de velocidad. El momento en que cada uno de los *set points* sea seleccionado dependerá de la distancia a la que se encuentre el obstáculo.
- **velocity controller:** Este nodo recibe un *set point* de velocidad que es comparado con la información del tacómetro y que devuelve una acción de control en términos de *PWM*. Este nodo es un controlador *PID* que proviene de una paquetería de *ROS* que facilita el uso del algoritmo. Las ganancias para este nodo y el controlador de la dirección se ajustaron de forma experimental al desconocer varios detalles específicos de la planta.

- **lane centering:** Este nodo provee asistencia para el centrado de carril, utilizando información de *slam out pose* genera un *set point* que intenta que el desplazamiento en y (eje lateral del vehículo) sea 0 con respecto al momento en que se inicializa este nodo.
- **avoiding maneuver:** Cuando el obstáculo se encuentra a la distancia en que la maniobra debe de comenzar, este nodo envía un vector de *set points* a partir de una onda sinusoidal para la dirección del vehículo.
- **direction switcher:** Este nodo permite conmutar entre los valores entregados por el mando del usuario, el asistente de centrado y maniobra sinusoidal; entregando el valor a controlar a través del tópico *selected direction*.
- **direction controller:** Una vez seleccionado el valor de dirección deseado, este nodo lo compara con la rotación entregada por el tópico *slam out pose* y genera una acción de control en forma de *PWM*.

En la figura 3.14 se muestra el espacio de trabajo de la PC y la ubicación de los códigos para cada nodo. Cabe mencionar que se añade un archivo *rvizSlam* que puede ser ejecutado de forma opcional si se desea hacer un monitoreo gráfico del espacio capturado.

3.3.3.3 Inicialización y monitoreo del sistema

A continuación se presentan los pasos necesarios para inicializar el sistema de evasión de obstáculos.

Una vez que los nodos han sido programados es necesario hacer el llamado de cada uno de ellos para que por sí sólo empiecen a generar acciones a partir de su suscripción o publicación en diferentes tópicos.

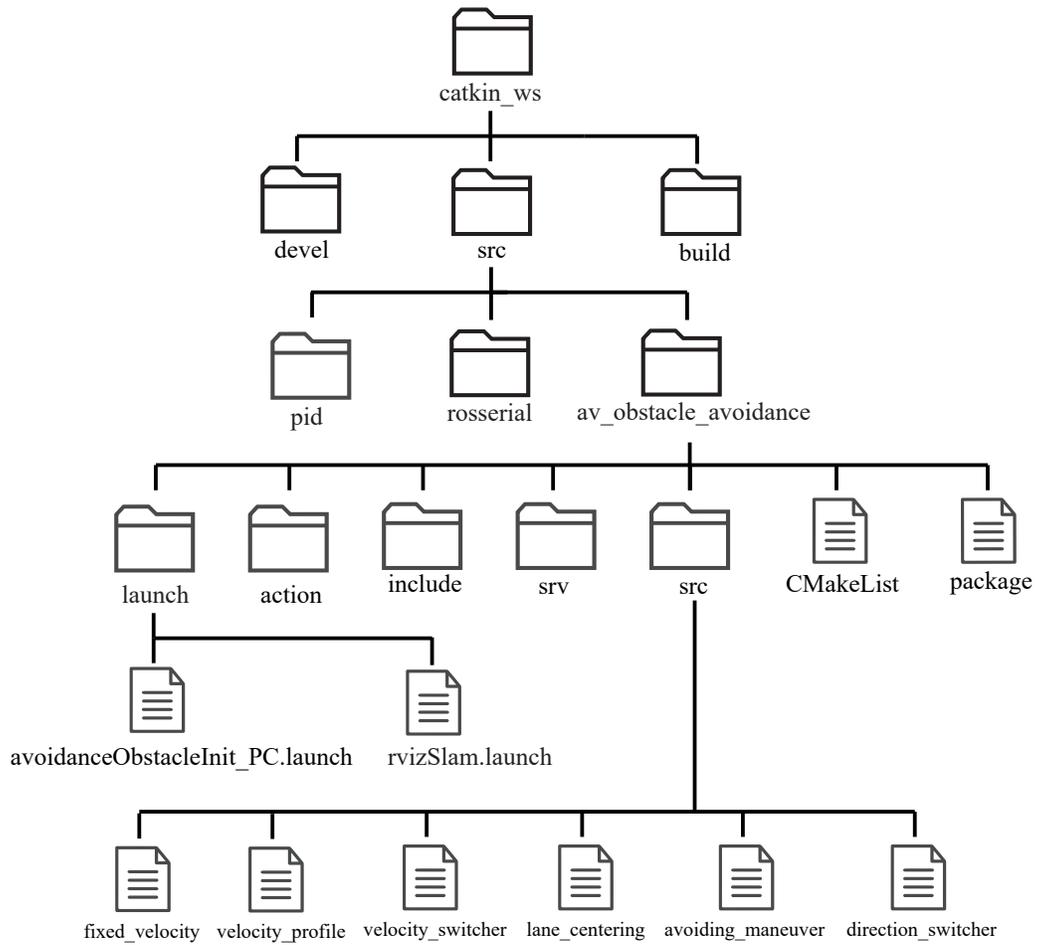


Figura 3.12: Espacio de trabajo *ROS* en la PC.

Resultados y discusión

4.1 Resultados

Los resultados de este trabajo documentan cuatro aportes fundamentales: la percepción conseguida con el sensor LiDAR 2D, la maniobra de evasión para diferentes distancias, el consumo de recursos computacionales y la contribución tecnológica como plataforma educativa.

4.1.1 Percepción: Mapeo y localización del sistema a través de *LiDAR*

En la figura 4.1 se observa el prototipo colocado en una habitación con una iluminación media y múltiples objetos diferentes a las paredes, como es el caso de los monitores. En la tabla 4.1 se muestra información que ayuda a comparar las dimensiones reales de la habitación con las dimensiones obtenidas con la nube de puntos. Además, en la imagen 4.2 se respaldan de forma visual dichas medidas.

Dimensión	Medida real (m)	Medida LiDAR (m)	Error (%)
D1	3.34	3.32	0.59%
D2	3.05	3.03	0.58%
D3	2.85	2.83	0.61%
D4	0.83	0.82	0.69%
D5	0.62	0.61	0.8%

Cuadro 4.1: Comparación de medidas reales y medidas obtenidas con el sensor LiDAR 2D .

El siguiente experimento realizado para poner a prueba la percepción del vehículo con el sensor LiDAR 2D fue correr el algoritmo *SLAM* y medir diferentes desplazamientos y rotaciones con respecto a su marco de referencia fijo.

En las figuras de 4.3 a 4.6 se muestran las posiciones asignadas al vehículo en un espacio cerrado.

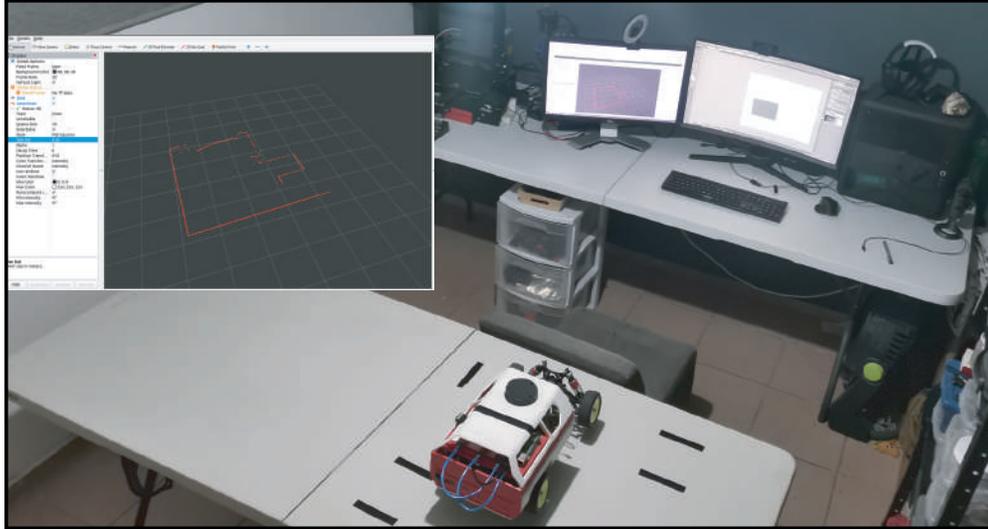


Figura 4.1: Muestreo de una habitación cerrada con el sensor LiDAR 2D.

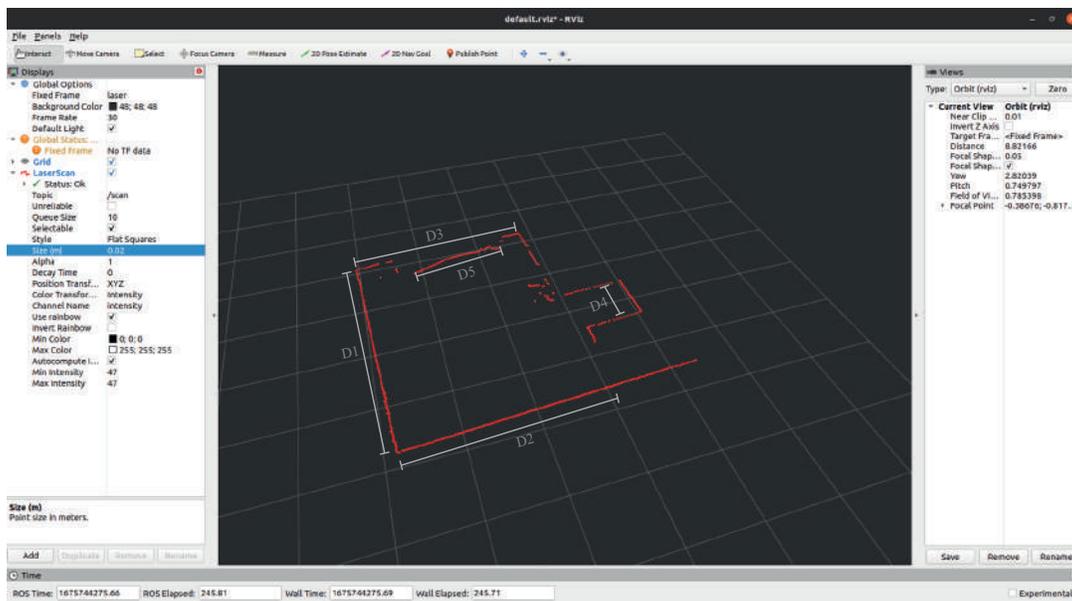


Figura 4.2: Nube de puntos generada al interior de la habitación.

En la tabla 4.2 se muestra el la información obtenida con el algoritmo SLAM y se compara con la obtenida de mediciones reales.

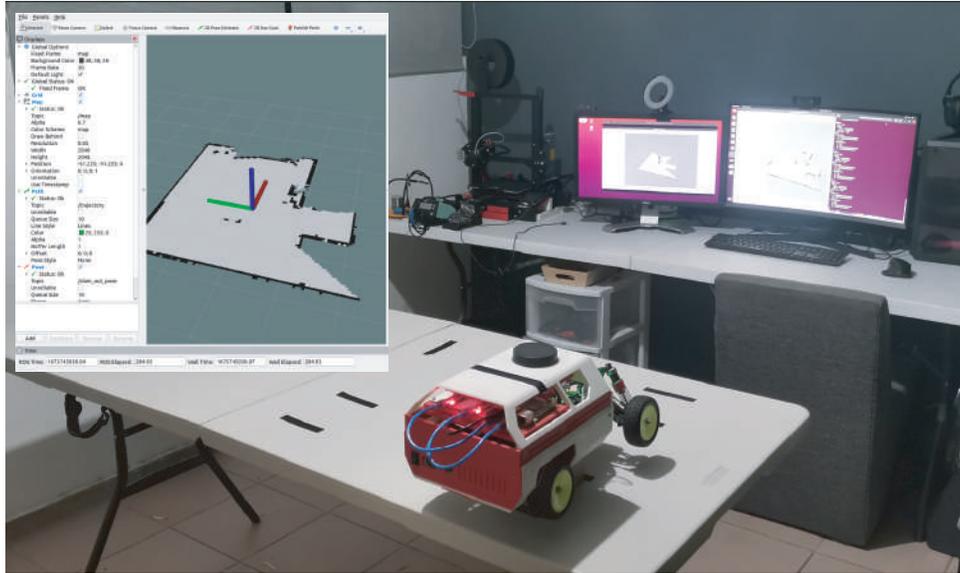


Figura 4.3: Primera posición seguida con el algoritmo SLAM.

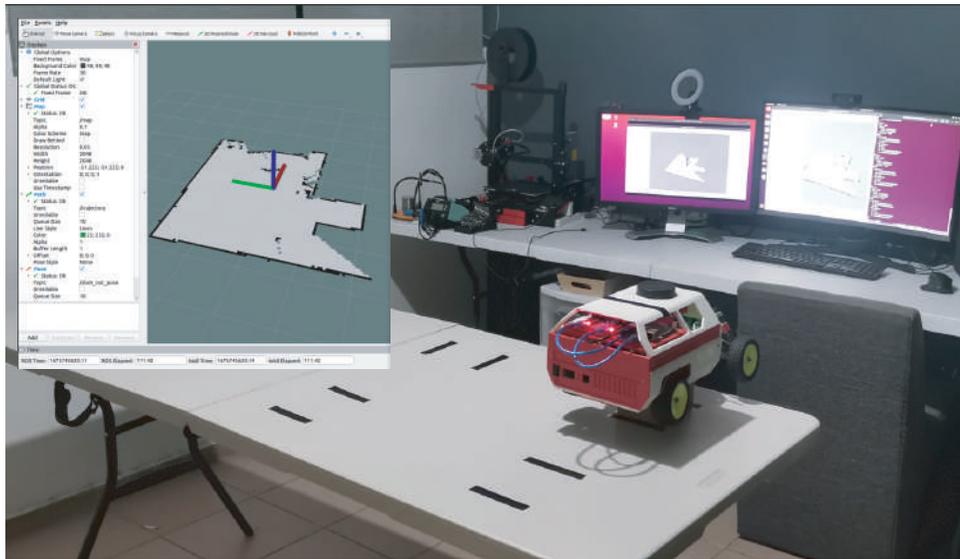


Figura 4.4: Segunda posición seguida con el algoritmo SLAM.

4.1.2 Planeación: Respuesta del vehículo ante los estímulos del experimento

En esta sección se muestran las trayectorias de escape que el vehículo siguió una vez detectado el obstáculo a las diferentes distancias planteadas para el experimento. En la figura 4.16 se muestra la maniobra a $8m$, $3m$ y $1m$. No se adjunta el experimento a $0.5m$ ya que la maniobra no fue exitosa y resultó en colisión. En la sección de discusión se argumenta una explicación a lo sucedido.

En las figuras de 4.8 a 4.11 se muestran las gráficas comparativas entre el vector de velocidades generado con $1ms$ para cada elemento del vector y las velocidades registradas y publicadas en

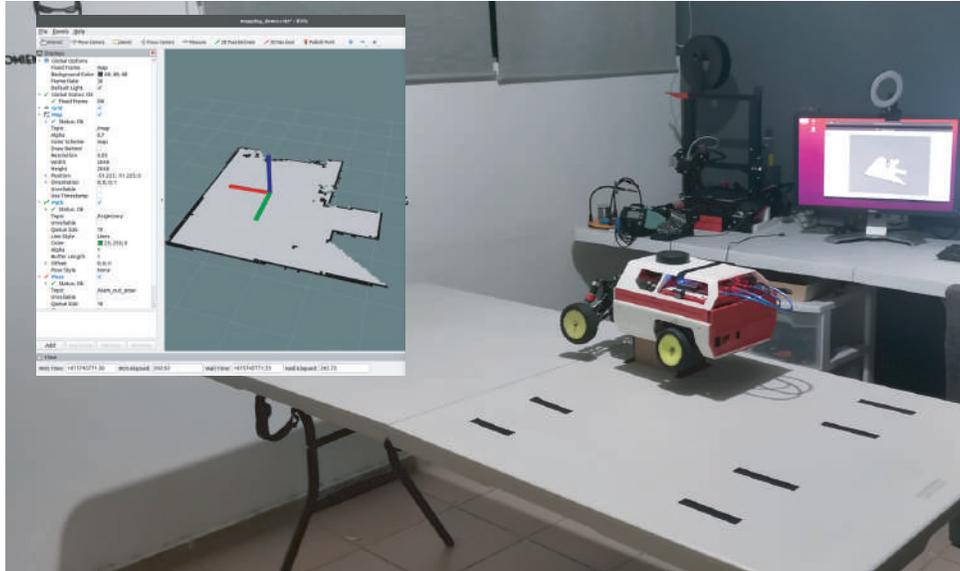


Figura 4.5: Tercera posición seguida con el algoritmo SLAM.

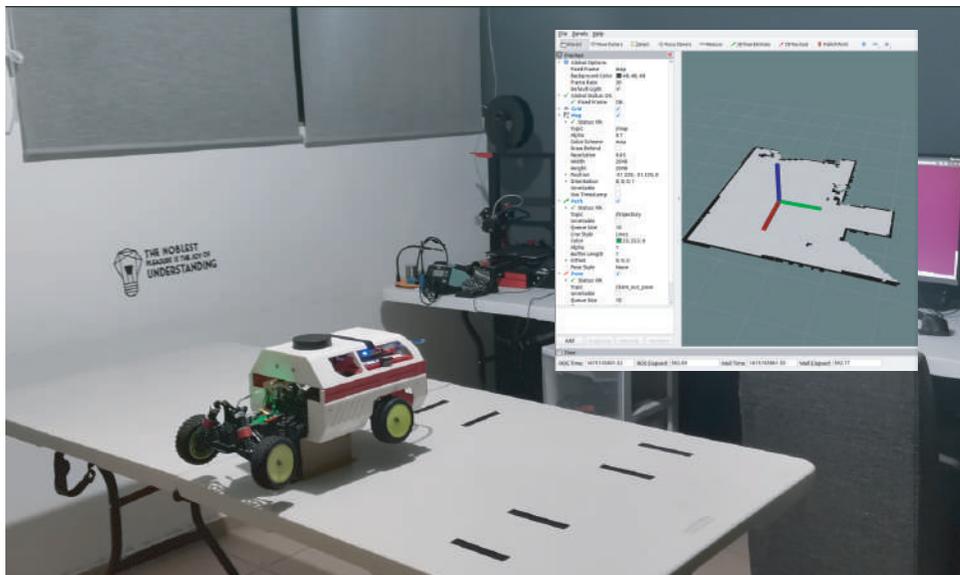


Figura 4.6: Cuarta posición seguida con el algoritmo SLAM.

el tópic del tacómetro digital. El limitante de comunicación en el sistema provocó que el menor tiempo de publicación fuera $20ms$. Por ello se observa una diferencia entre el perfil computado sin límites de comunicación y el registrado por el tacómetro. El máximo error observado fue de 8.1% en el perfil generado cuando el obstáculo se detectaba a $0.5m$.

Por otra parte, en la tabla 4.3 se muestran los tiempos que el vehículo tardaría en colisionar cuando se le aplicaba un perfil de velocidad para detenerlo y cuando no. Además se muestra el

Primera posición y orientación	Medición real	Medición SLAM	Error (%)
$x(m)$	0.0	0.0062	0.62
$y(m)$	0.0	0.0052	0.52
$\psi(rad)$	0.0	0.00051	0.051
Segunda posición y orientación			
$x(m)$	0.4	0.4056	1.4
$y(m)$	0.0	0.0065	0.65
$\psi(rad)$	0.0	0.00040	0.04
Tercera posición y orientación			
$x(m)$	0.4	0.4069	1.72
$y(m)$	0.5	0.4989	0.22
$\psi(rad)$	1.5708	1.5621	0.55
Cuarta posición y orientación			
$x(m)$	0.0	0.0082	0.82
$y(m)$	0.5	0.5147	2.94
$\psi(rad)$	3.1416	3.1321	0.30

Cuadro 4.2: Comparación de medidas reales y medidas obtenidas con el algoritmo SLAM .

Distancia (m)	Colisión sin perfil (s)	Colisión con perfil (s)	Error máximo (%)
8	1.44	4.32	6.2
3	0.54	1.62	6.4
1	0.18	0.54	7.8
0.5	0.9	0.27	8.1

Cuadro 4.3: Tiempos de colisión calculados para las diferentes distancias del experimento con la implementación y ausencia de un perfil de velocidad.

error entre el valor esperado (computado a $1ms$) y el valor registrado (computado a $20ms$).

En las figuras desde 4.12 a 4.14 se muestran las gráficas comparativas entre la posición en y del vehículo al intentar evadir el obstáculo a través de la distancia x hacia el mismo. Las dos mediciones que se utilizaron para obtener esta información fueron las registradas por el procesamiento SLAM y las posiciones adquiridas a través de un vídeo aéreo con perspectiva cenital. Se consideró a la imagen cenital como el valor real y al algoritmo SLAM como el valor deseado. Al comparar la información se encontró un error máximo de 4.9% a una distancia de $8m$, 4.3% a $3m$ y 5.1% a $1m$. No se registró una trayectoria con el obstáculo detectado a $0.5m$ ya que el sistema no logró responder a esa distancia. Se debe mencionar además que la información proporcionada por el algoritmo SLAM fue la más lenta con un tiempo de publicación de $100ms$.

4.1.3 Administración del sistema: Monitoreo y consumo de recursos

Uno de los aspectos fundamentales de la plataforma de pruebas es el consumo de recursos computacionales, ya que cuando exceden la capacidad del sistema, la repercusión inmediata es la velocidad del respuesta en la maniobra.

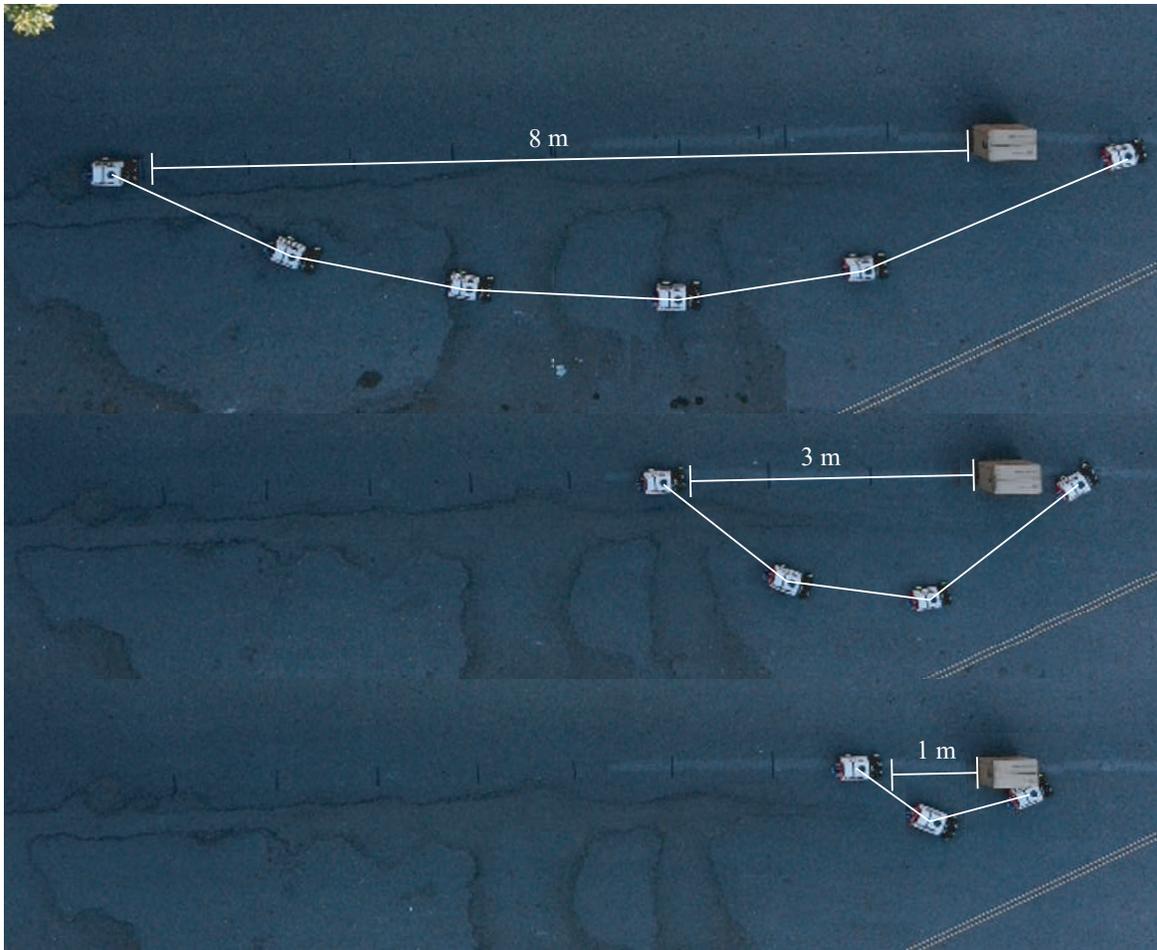


Figura 4.7: Fotografía cenital de los experimentos para la evasión.

4.1.4 Aporte tecnológico de la plataforma de pruebas

Uno de los principales propósitos de este trabajo es obtener un sistema de maniobras autónomas que permita abordar, en trabajos futuros, otras características de la conducción autónoma de forma escalable. Al cumplirse lo anterior se espera fortalecer y facilitar la línea de investigación en conducción autónoma que ya se tiene en la Universidad Autónoma de Querétaro, para así progresivamente estar cada día más cerca de lanzar un automóvil autónomo universitario.

4.2 Discusión

A raíz de los resultados presentados se derivan dos principales temas de discusión:

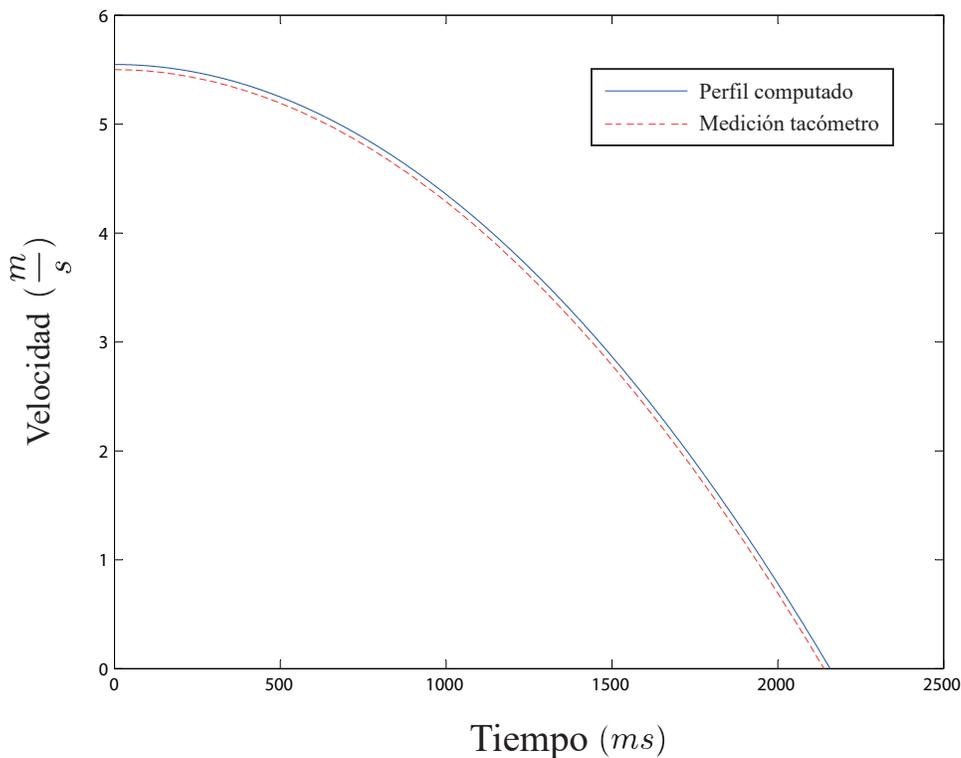


Figura 4.8: Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $8m$.

1. **Percepción:** Uno de los principales objetivos del trabajo consistía en poner a prueba una percepción lograda a través de un sensor LiDAR 2D y algoritmos SLAM. Los resultados mostraron que en el caso del dimensionamiento de espacios el error más alto fue del 0.8% en superficies de hasta $10m^2$. Es un error significativamente bajo, si se considera la magnitud del espacio. Además, fue posible observar que las dimensiones en que el error aumentó (D4 y D5), eran zonas que no reflejaban bien la luz o que estaban muy oscuras.
2. **Maniobra de evasión:** La hipótesis del trabajo planteaba que un obstáculo podría ser evadido, con el sistema propuesto, si se detectaba a una distancia mínima de $0.5m$, sin embargo, en el experimento el resultado para esa distancia fue colisión. Se comprobó además, que la distancia mínima para lograrlo fue $1m$. Existen diferentes factores que condujeron a este resultado:
 - **Tamaño del obstáculo:** Se escogió un obstáculo que en dimensiones fuera lo suficientemente grande para ser detectado a diferentes distancias, sin embargo, fue demasiado grande como para poder ser esquivado.

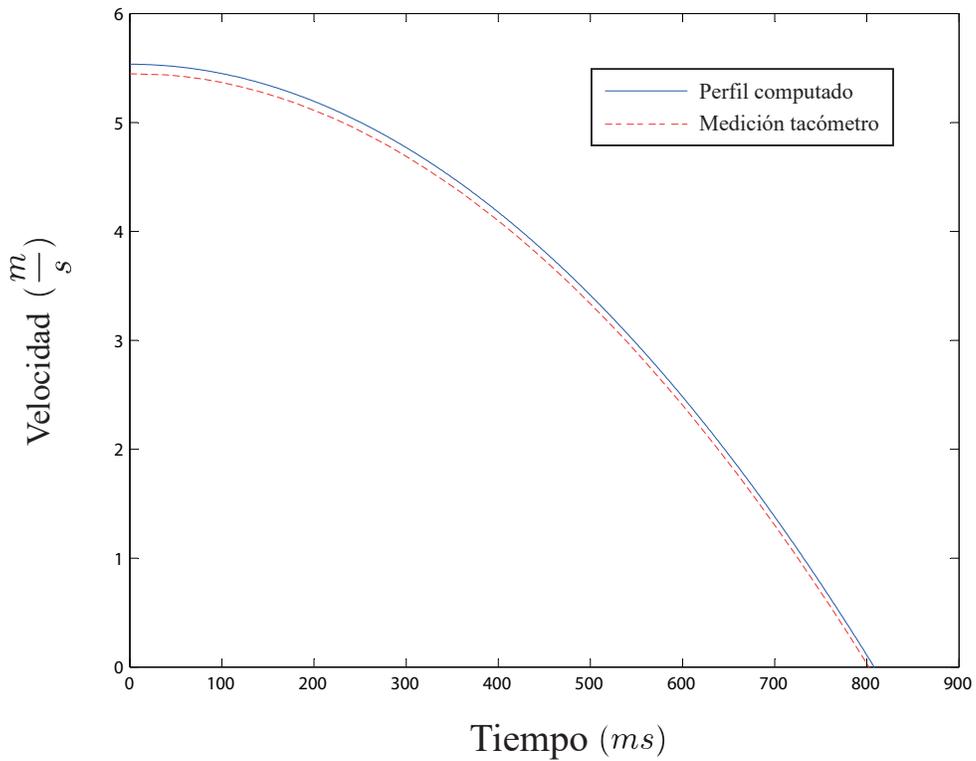


Figura 4.9: Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $3m$.

- Consumo de recursos computacionales: Como se observó en los resultados computacionales, la micro-computadora se encontraba trabajando a más del 80% de su capacidad de procesamiento cuando se trataba de realizar la percepción del entorno. Lo anterior terminó afectando la capacidad de respuesta del sistema y a una distancia tan reducida no fue posible reaccionar a tiempo.
- Impedimentos mecánicos del prototipo: El chasis original del vehículo pesaba $754g$, cuando se le añadieron las tarjetas y toda la estructura que sostiene el sensor LiDAR su peso aumentó a $2200g$; dicho peso afectó la transmisión al desgastar el engrane que conectaba con el motor sin escobillas y a la dirección volviéndola inestable, por ello, aunque los actuadores respondían a tiempo la mecánica del vehículo no fue suficiente para esa acortada distancia.

Por otra parte, es muy importante mencionar cómo es que el uso de perfiles de velocidad ayudó a aumentar el tiempo esperado para la colisión a diferentes distancias. Esto permitió al sistema reaccionar a tiempo en la mayoría de los experimentos.

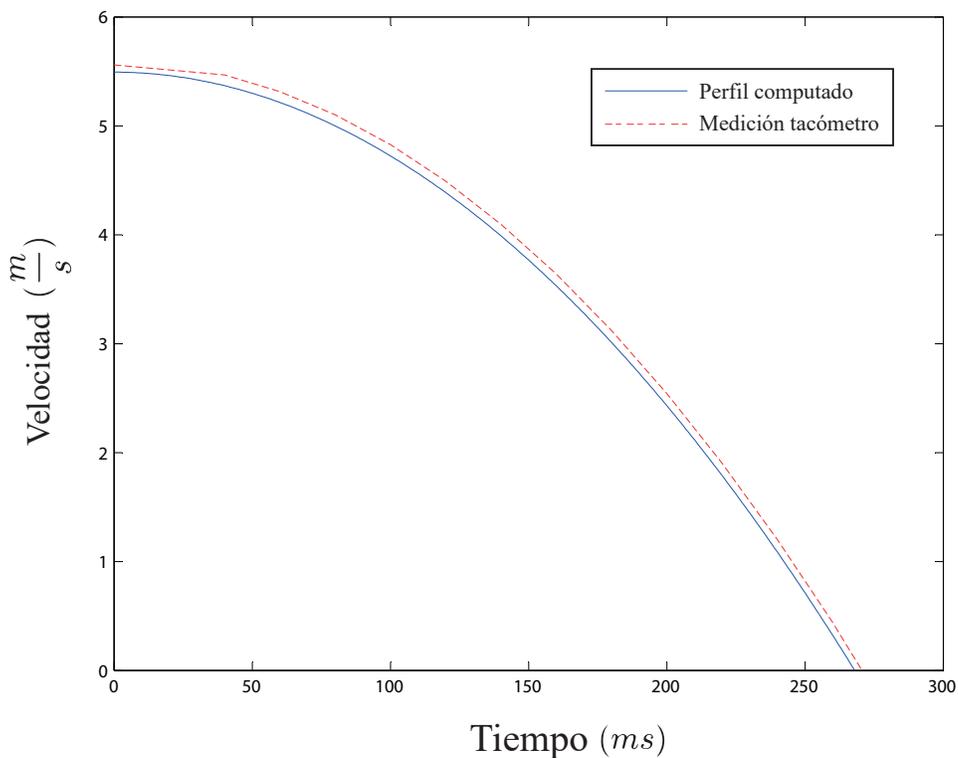


Figura 4.10: Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $1m$.

4.3 Aporte científico de la investigación

Los principales aportes científicos de este trabajo son:

- Metodología para el desarrollo de un sistema de maniobras anti-colisión en el marco de trabajo *ROS*.
- Diseño e implementación de perfiles de velocidad para para control longitudinal en un micro-controlador.
- Implementación de algoritmos que permitan el mapeo y localización simultánea con un sensor LiDAR 2D.

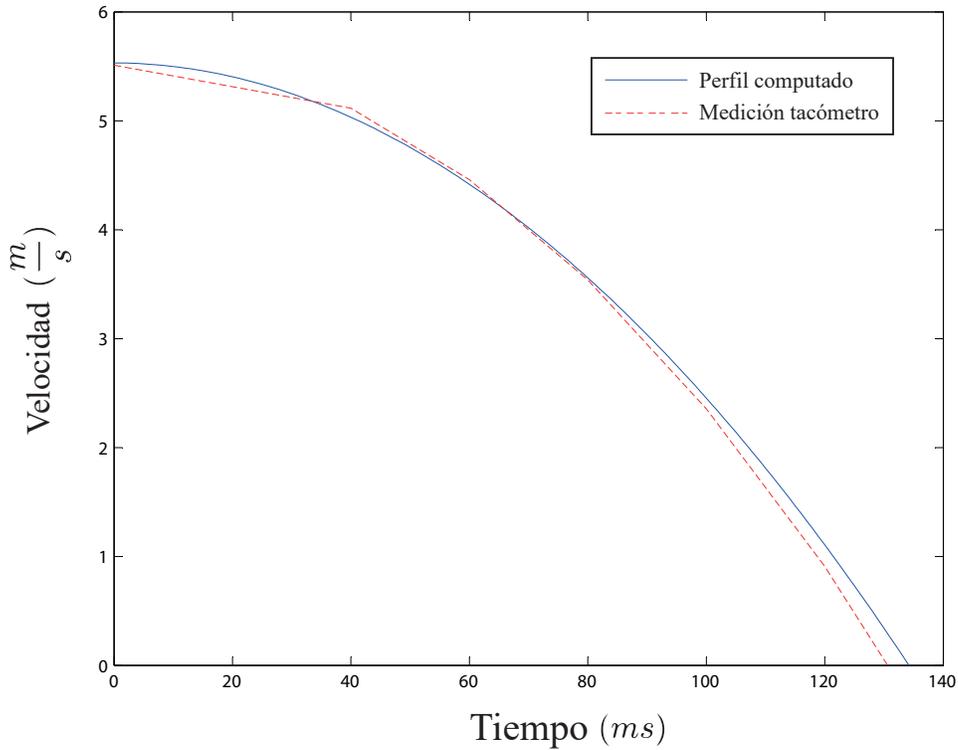


Figura 4.11: Perfil de velocidad generado por computadora y su comparación con la medición del tacómetro cuando se detecta el obstáculo a $0.5m$.

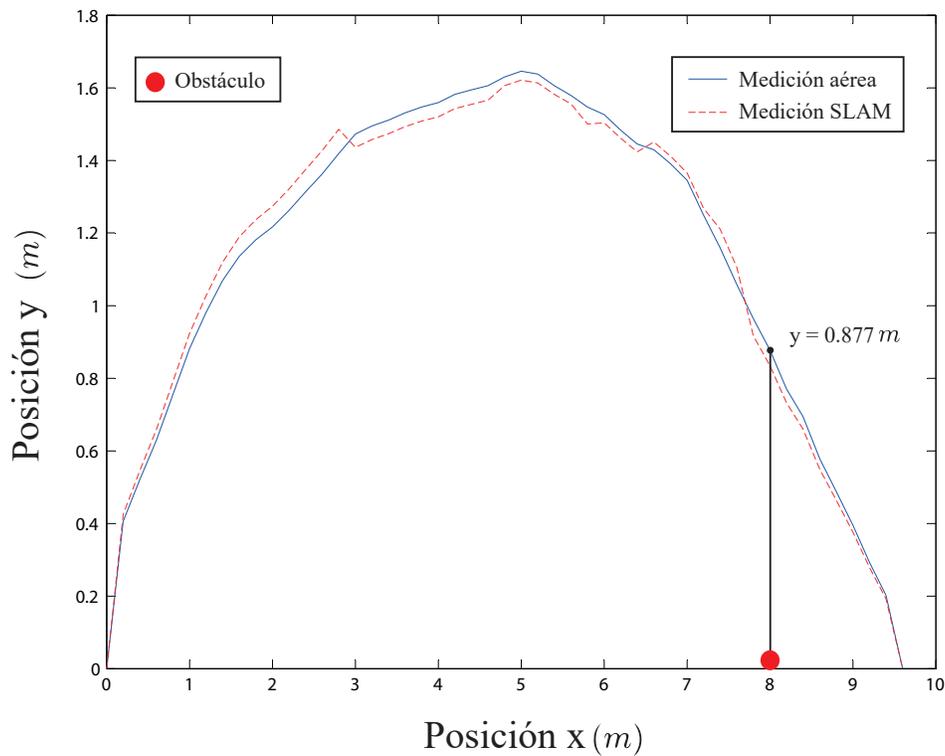
4.4 Aporte tecnológico de la investigación

- Automóvil eléctrico a escala 1:10 diseñado de forma modular con la finalidad de poder agregar o quitar, tarjetas electrónicas o sensores para futuras investigaciones.

4.5 Impacto sostenible de la investigación

4.5.1 Impacto social

1. La implementación exitosa de este trabajo abrir una línea de investigación encaminada a disminuir el número de accidentes en automóvil relacionados con descuidos o falta de habilidad del conductor.
2. Los productos finales son de libre acceso y arquitectura abierta con el objetivo de incluir y



Pos

Figura 4.12: Posición en y del vehículo para la distancia x al objetivo cuando se detecta a 8m.

ayudar a un mayor número de investigadores con temas relacionados al trabajo aquí presentado.

4.5.2 Impacto ambiental

1. Debido a que para ejecutar las maniobras de conducción propuestas es necesario regular la velocidad de un motor eléctrico y modificar el ángulo de una dirección servo-asistida, es necesario que su implementación sea en un automóvil totalmente eléctrico. Por tal motivo, este desarrollo impulsa la compra de automóviles eléctricos o la modificación de los ya existentes que utilizan motores de combustión. A causa de una transformación de energía más eficiente y nula emisión de gases de efecto invernadero, la opción del motor eléctrico involucra un gran impacto ambiental.

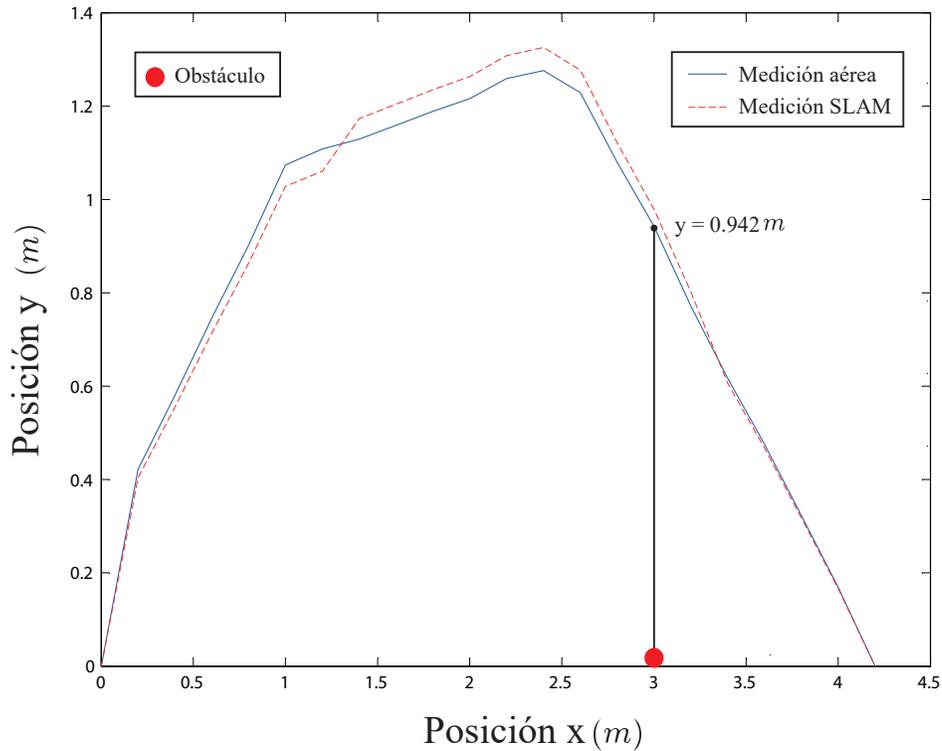


Figura 4.13: Posición en y del vehículo para la distancia x al objetivo cuando se detecta a $3m$.

4.5.3 Impacto económico

1. Si bien, la primera inversión al adquirir un vehículo eléctrico es mayor a la de un vehículo de combustión, la rentabilidad en el mediano y largo plazo es mucho mayor, no sólo por el uso de motores eléctricos, sino por la implementación de perfiles de velocidad y sistemas inteligentes de consumo energético (que también son abordados en este trabajo).
2. Además, se pretenden sentar las bases de un desarrollo automotriz integral en México con la expectativa de que, en un futuro cercano, sean las marcas mexicanas de automóviles eléctricos las que se posicionen en el mercado global y en consecuencia contribuyan al crecimiento de la economía nacional.

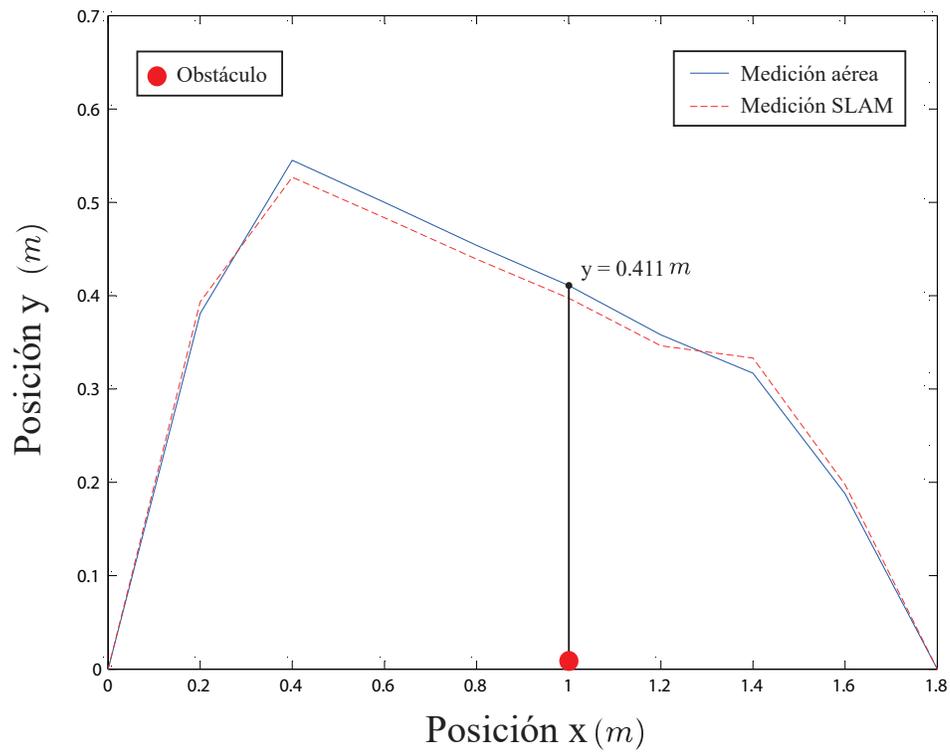
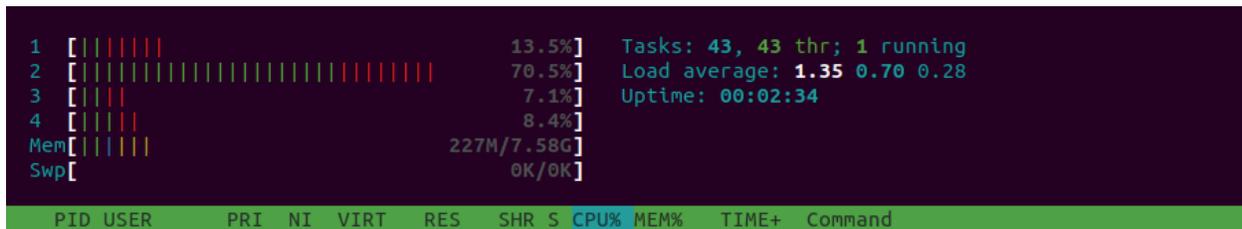


Figura 4.14: Posición en y del vehículo para la distancia x al objetivo cuando se detecta a $8m$.

Consumo de la micro-computadora sin correr ningún nodo



Consumo de la PC sin correr ningún nodo

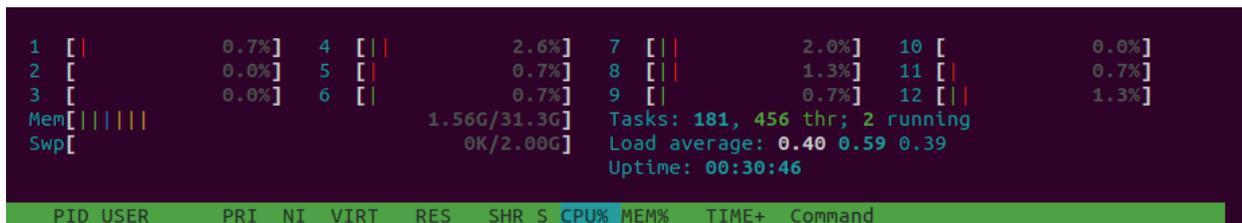
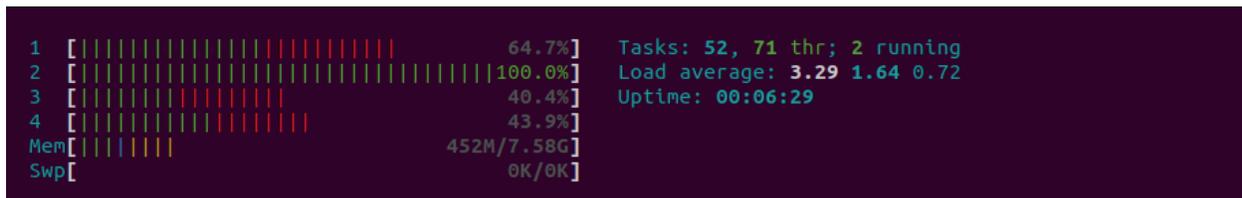


Figura 4.15: Consumo de recursos computacionales sin correr los nodos del sistema.

Consumo de la micro-computadora corriendo sus nodos



Consumo de la PC corriendo sus nodos y herramientas gráficas

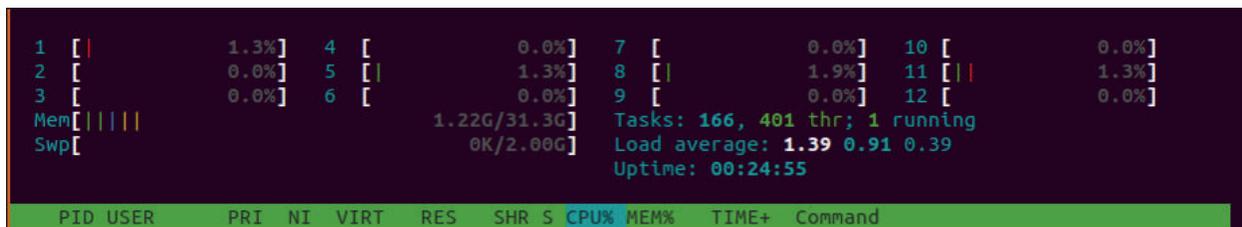


Figura 4.16: Consumo de recursos computacionales al correr los nodos del sistema.

Conclusiones

En este trabajo se desarrolló e implementó un sistema de maniobras anti-colisión cuyo principal enfoque tecnológico y científico fue la percepción del entorno a través de la tecnología LiDAR y el control de la velocidad longitudinal haciendo uso de perfiles.

Durante el desarrollo de los objetivos se abordó el desafío de esquivar un objetivo cuando era detectado a diferentes distancias y con una velocidad fija de $20\frac{km}{h}$. Al realizar los diferentes experimentos se encontró posible esquivar el obstáculo desde distancias superiores a $1m$. No se consiguió esquivar el obstáculo en distancias inferiores debido a factores que se abordaron en la discusión de los resultados. Sin embargo, es importante mencionar el más importante de ellos: las tecnologías sobre las que se desarrolló el prototipo.

Como ya se ha mencionado, *ROS* es un marco de trabajo que funciona en distribuciones de *linux* y que trabaja con una arquitectura de nodos y tópicos. Su versatilidad tiene grandes ventajas, entre las que se encuentran la unificación de múltiples dispositivos programables, aunque se desarrollen con diferentes lenguajes; por otra parte, ofrece múltiples herramientas gráficas para monitorear y revisar la evolución de un sistema desde un nodo centralizado. Sin embargo, lo anterior es también una de las principales desventajas de esta tecnología. *ROS* sólo puede trabajar con una conexión de internet estable y fue diseñado para crear tantos nodos como dispositivos existan. Esto implica que el sistema no pueda ser embebido fácilmente y que a su vez la velocidad de respuesta de la plataforma dependa de la conexión a internet.

Este trabajo permitió crear una plataforma de pruebas que puede ser escalada y modificada debido a sus características modulares. Además, se llega a la consideración de que *ROS* no fue el paradigma ideal para la plataforma de este trabajo, pero sí lo es para aplicaciones en interiores industriales, con tiempos de respuesta no tan críticos, y para controlar la interacción entre múltiples sistemas robóticos.

Uno de los objetivos cualitativos principales de este trabajo fue establecer una metodología que permitiera abrir una línea de investigación sobre conducción autónoma en la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Gracias a la plataforma desarrollada para los experimentos y la guía de este trabajo de tesis la perspectiva futura para la comprensión y desarrollo en este nuevo campo es muy favorable.

Bibliografía

- [1] F. Rosique, P. Navarro, and C. Fernández, “A systematic review of perception system and simulators for autonomus vehicles research,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 3, 2019.
- [2] T. D. Gillespie, *Fundamental of Vehicle Dynamics.*, vol. 1 of 1. Society of Automotive Engineers, 1 ed., 1992.
- [3] J. C. Nixon, *The invention of the automobile (Karl Benz and Gottlieb Daimler).*, vol. 1. edizioni savine, 2016.
- [4] S. A. Botsford, C., “Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles,” *24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, vol. 3, no. 2, pp. 1811–1819, 2009.
- [5] K. H. Nam, *AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications*, vol. 1 of 1. CRC Press, 1 ed., 2010.
- [6] S. C.-W. Hsu, C.-M., “3d lidar-based precision vehicle localization with movable region constraints,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 942, 2019.
- [7] R. A. Wu, T., “Vehicle localization using road markings,” *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, no. 6629627, pp. 1185–1190, 2013.
- [8] S. Manghat and El-Sharkawy, “A multi sensor real-time tracking with lidar and camera,” pp. 0668–0672, 01 2020.
- [9] Manghat and El-Sharkawy, “Forward collision prediction with online visual tracking,” pp. 1–5, 09 2019.
- [10] H. Zhang and W. Zhao, “Decoupling control of steering and driving system for in-wheel-motor-drive electric vehicle,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 101, pp. 389–404, 02 2018.
- [11] V. Montalvo, “Control de movimiento para servomotores sobre un perfil parabólico de velocidad implementado en un fpga.” Tesis de licenciatura sobre perfiles de velocidad y su implementación en FPGA en proceso de publicación.
- [12] W. H. Organization, “Top 10 causes of death worldwide,” 2019.

- [13] J. Kichun, K. Junsoo, K. Dongchul, J. Chulhoon, and S. Myoungho, “Development of autonomous car - part ii: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 5119–5132, 2015.
- [14] Y. L. a, X. Fan, C. Lv, J. Wu, L. Li, and D. Ding, “An innovative information fusion method with adaptive kalman filter for integrated ins/gps navigation of autonomous vehicles,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 100, pp. 605–616, 2018.
- [15] V. P., K. M., A. Osep, L. J., S. B. B. G., G. A., and L. B, “Mots: Multi-object tracking and segmentation,” *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2019.
- [16] K. A. P. and M. D., “Harnessing feedback region proposals for multi-object tracking,” *IET Computer Vision*, vol. 14, no. 7, pp. 434–442, 2020.
- [17] F. D., S. A., N. R., S. C., G. D., G. M., N. P., M. J., and M.-P. P., “Point-cloud based 3d object detection and classification methods for self-driving applications: A survey and taxonomy,” *Information Fusion*, vol. 68, pp. 161–191, 2021.
- [18] J. Tang, S. Li, and P. Liu, “A review of lane detection methods based on deep learning,” *Pattern Recognition*, vol. 111, 2021.
- [19] G. Broughton, F. Majer, T. Rouček, Y. Ruichek, Z. Yan, and T. Krajník, “Learning to see through the haze: Multi-sensor learning-fusion system for vulnerable traffic participant detection in fog,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 136, 2021.
- [20] R. Kala and K. Warwick, “Motion planning of autonomous vehicles in a non-autonomous vehicle environment without speed lanes,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 26, no. 5-6, pp. 1588–1601, 2013. Cited By :26.
- [21] K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang, and M. Sunwoo, “Development of autonomous car - part ii: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 5119–5132, 2015. Cited By :110.
- [22] A. Bustanul, S. B. Yudo, P. S. A. Dwi, and N. Zainuddin, “The lateral control of autonomous vehicles: A review,” *ICECOS 2019 - 3rd International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, Proceeding*, pp. 277–282, 2019.
- [23] J. Xuewu, H. Xiangkun, L. Chen, L. Yahui, and W. Jian, “Adaptive-neural-network-based robust lateral motion control for autonomous vehicle at driving limits,” *Control Engineering Practice*, vol. 76, pp. 41–53, 2018.
- [24] L. Biagiotti and C. Melchiorri, “Trajectory planning,” in *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*, p. 5, Feb 2008.
- [25] R. Norton, *Diseño de maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, vol. 1 of 1. Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fé, Delegación Alvaro Obregón, C.P. 01376, México, D.F.: Mc Graw Hill, 5 ed., 2013.

- [26] M. Martínez-Prado, J. Rodríguez-Reséndiz, R. A. Gómez, and G. H. Ruiz, “Parabolic velocity profile,” in *Velocity Profiles: Analysis and Implementation*, pp. 9–12, Feb 2013.
- [27] V. J. Lumelsky and A. A. Stepanov, “Dynamic path planning for a mobile automaton with limited information on the environment,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 31, no. 11, pp. 1058–1063, 1986. Cited By :188.
- [28] V. Henández, R. Silva, and R. Carrillo, “Modelo matemático de sistemas físicos,” in *Control Automático: Teoría de diseño, Construcción de prototipos, Identificación y Pruebas Experimentales*, p. 16, Feb 2013.

Apéndice

