

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*Implementación de acciones en un vehículo eléctrico para
navegación autónoma basada en eventos*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO EN:

*MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA (INSTRUMENTACIÓN Y SISTEMAS
DIGITALES)*

PRESENTA:

Jonathan Duarte Jasso

DIRECTOR:

Dra. Dora Luz Almanza Ojeda

CODIRECTOR:

Dr. Marco Antonio García Montoya

SALAMANCA, GTO.

MARZO, 2025

Agradecimientos Personales.

Dicen que los logros no son solo de quien los alcanza, sino de todas las personas que estuvieron ahí, apoyando, impulsando y creyendo en el camino. Esta tesis es el resultado de años de esfuerzo, pero también del cariño, la paciencia y el respaldo de muchas personas a quienes quiero agradecer de corazón.

A la Dra. Dora Luz Almanza Ojeda, gracias por darme la oportunidad de ser su asesorado, por compartir su conocimiento y por todo el tiempo que dedicó a ayudarme a crecer en el mundo de los sistemas autónomos. Su orientación ha sido clave en este camino.

Al Dr. Marco Antonio García Montoya, no hay palabras suficientes para agradecerle todo su apoyo. Su conocimiento, paciencia y compromiso fueron fundamentales para que este proyecto tomara forma. Gracias por guiarme, por confiar en mí y por hacer posible este logro.

Al Dr. Mario Alberto Ibarra Manzano, por estar siempre ahí, dispuesto a ayudar, aconsejar y orientar cuando más lo necesité. Sus palabras y enseñanzas marcaron la diferencia en este proceso.

A mi abuelita, María Antonia Jasso Morales, porque su amor y apoyo incondicional han sido una constante en mi vida. Gracias, abuelita, por estar siempre al pendiente de mí, por tu cariño inagotable y por ser una de mis

mayores motivaciones. Cada esfuerzo que hago, cada meta que alcanzo, es también por ti.

A mi madre, Olga Lilia Duarte Jasso, porque sin su amor y apoyo incondicional, nada de esto sería posible. Gracias por siempre impulsarme a seguir adelante, por levantarme cuando caí y por recordarme cada día que soy capaz de alcanzar mis sueños. ¡Gracias, mamá, por todo lo que sigues haciendo por mí!

A mi tío, Alfonso Vallejo Esquivel, quien aunque ya no está físicamente, sigue presente en cada uno de mis logros. Su recuerdo me ha dado fuerza para seguir adelante y cumplir mis expectativas.

A mi prometida, Kasandra Lysset Gómez Hernández, mi compañera en esta aventura. Gracias por ser mi refugio en los momentos difíciles, por motivarme a seguir, por celebrar mis triunfos y por nunca dejarme caer. Sin ti, este camino habría sido mucho más difícil.

A toda mi familia, porque cada palabra de aliento y cada muestra de apoyo han sido un impulso invaluable. Gracias por estar siempre ahí, celebrando conmigo cada pequeño avance.

A Eduardo Orozco Guzmán, un hermano de la vida, por estar al pendiente de cada paso que daba, por sus palabras de aliento y por no dejarme rendir cuando las cosas se complicaban.

A Alfredo Medina García, por decir “sí” a cada locura y reto que este posgrado nos puso en el camino. Gracias por la paciencia, por resolver dudas y por ser parte de este proceso de aprendizaje y crecimiento.

A mis compañeros José Rodrigo Paredes Miguel, Melanny Julisa Ramírez Lara, Daniel Yahir Andrade Herrera, José Miguel Fonseca Córdoba y Rodolfo Agustín García Magno, porque más que colegas, fueron un equipo inigualable. Su apoyo, ideas y compañía hicieron de este camino una experiencia única.

Y, por último, pero no menos importante. . . a mi TDAH. Porque aunque a veces fue un reto, también fue mi mejor aliado. Gracias por el hiperfoco, por la lluvia interminable de ideas y por esa energía inagotable que me llevó a convertirlas en realidad.

A todos ustedes, gracias. Esta tesis no es solo mía, sino de cada persona que, de una u otra forma, fue parte de este viaje.

Agradecimientos institucionales.

Agradezco a Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo del Programa Nacional de Posgrados de Calidad con No. CVU: 1245691 y No. beca: 83048, la cual me ha permitido dedicar tiempo completo a la investigación.



Agradezco a la División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca por facilitar el acceso a recursos, laboratorios y bibliotecas que han enriquecido mi experiencia educativa y han contribuido al éxito de esta investigación.



Campus Irapuato-Salamanca | División de Ingenierías

Agradezco a la Dirección de Apoyo a la Investigación y el Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el apoyo en los proyectos

CIIC 059/2023 y CIIC 048/2024: Implementación de frenado automático de un vehículo eléctrico para personas con discapacidad”.



Dirección de Apoyo a la
Investigación y al Posgrado

Agradezco a Innovación Desarrollo Emprendimiento y Aceleración (IDEA GTO) por facilitar el acceso a recursos, bibliotecas que han enriquecido mi experiencia educativa y han contribuido al éxito de esta investigación.



Índice general

Lista de Acrónimos	XII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Justificación	5
1.4. Contenido del documento	6
2. Estado del arte	8
2.1. Antecedentes históricos y conceptuales.	9
2.1.1. Evolución de los VE.	10
2.1.2. Aplicaciones de los VE	11
2.1.3. Fundamentos de control de un vehículo de conducción autónomo.	12
2.2. Sensores y adquisición de datos.	14
2.2.1. Medicion de corriente en VE	15
2.2.2. Pedal de acelerador	15
2.2.3. Pedal freno	16
2.2.4. Medición de velocidad	17
2.3. Métodos de Procesamiento de Datos.	17
2.4. Lógica difusa	18
2.5. Microcontroladores y actuadores	21
2.6. Evaluación de Riesgos y Prevención de Colisiones.	22

ÍNDICE GENERAL

2.6.1. Detección y Evaluación de Riesgos de Colisión.	23
2.6.2. Acciones Preventivas Basadas en Niveles de Riesgo. . .	23
2.7. Integración de Sistemas.	24
2.8. Aplicaciones	25
3. Metodología	27
3.1. Diagrama General	27
3.2. Diseño del Sistema	29
3.2.1. Hardware	29
3.2.2. Software	31
3.3. Módulo de aceleración y frenado	32
3.3.1. Base de los actuadores	33
3.3.2. Actuadores	33
3.4. Sensores	34
3.4.1. Sensor de corriente	35
3.4.2. Sensor ultrasónico	35
3.4.3. IMU/GPS	36
3.4.4. Voltaje del Pedal	37
3.5. Circuito electrónico	37
3.6. Microcontrolador	38
3.6.1. ESP32	38
3.6.2. ATMEGA 2560	40
3.7. Adquisición de datos (Sensores)	42
3.7.1. Circuito para el sensor SCT-013-100	42
3.7.2. Circuito para el control de actuadores	43
3.7.3. Circuito para la alimentación de los sensores	44
3.8. Interfaz de control y monitoreo	45
3.8.1. Botones	46
3.8.2. Barras de progreso	46
3.8.3. Funcionamiento de la interfaz gráfica	47
3.9. Lectura y Procesamiento de Datos	47
3.9.1. Tarjeta de desarrollo arduino MEGA 2560	47
3.9.2. ESP32	49
3.10. Modelado de Lógica Difusa	53
3.11. Validación	56

ÍNDICE GENERAL

3.12. Integración y Comunicación	56
4. Resultados	58
4.1. Plataforma experimental	58
4.2. Presentación de las mediciones	60
4.3. Resultados caso 1: Sin riesgo	61
4.4. Resultados caso 2: Advertencia	64
4.5. Resultados caso 3: emergencia	67
4.6. Resultados caso 4: peligro	69
5. Conclusiones	72
Conclusiones.	74

Índice de figuras

2.1. Diagrama del principio básico de un vehículo eléctrico	10
2.2. Diagrama de operación de VCA	13
2.3. Lógica clásica y difusa	19
3.1. Diagrama general para navegación autónoma basada en eventos de un vehículo eléctrico	29
3.2. Diagrama general para navegación autónoma basada en eventos	31
3.3. Vistas y dimensiones del soporte para los actuadores (en mm).	34
3.4. Actuador lineal con extensión de 8 <i>cm</i>	34
3.5. Sensor SCT-013-100	35
3.6. Sensor ultrasónicos HC-SR04	36
3.7. Sensor IMU/GPS	36
3.8. Circuito electrónico	38
3.9. Diagrama de conexión la tarjeta desarrollo ESP32	39
3.10. Diagrama de conexión de la tarjeta de desarrollo arduino ME- GA 2560	41
3.11. Circuito para la adquisición de datos de un sensor SCT-013-100	43
3.12. Circuito para la activación y desactivación del actuador	44
3.13. Interfaz de monitoreo y control del VE	45
3.14. Modelos de lógica difusa	53
3.15. Diagrama de ubicación de los componentes en el vehículo	57
4.1. Plataforma experimental para pruebas del control difuso.	59
4.2. Grafica del funcionamiento del nivel sin riesgo respecto a las lecturas de los sensores	63

ÍNDICE DE FIGURAS

4.3. Grafica del funcionamiento del nivel “advertencia” respecto a las lecturas de los sensores	66
4.4. Grafica del funcionamiento del nivel emergencia respecto a las lecturas de los sensores	69
4.5. Grafica del funcionamiento del nivel peligro respecto a las lecturas de los sensores	71

Índice de Tablas

3.1. Características básicas del la tarjeta desarrollo ESP32	39
3.2. Características básicas de la tarjeta de desarrollo arduino ME- GA 2560	41
3.3. Características básicas del ESP32	45
3.4. Valores de los botones del servidor web	52
3.5. Tabla de los rangos por variable acorde a los niveles de riesgo	54
3.6. Acciones respecto a los niveles de riesgo	55

Lista de Acrónimos

NA	Navegación Autónoma
VE	Vehículos Eléctricos
VCA	Vehículo de Conducción Autónomo
LiDAR	Detección de Luz y Telemetría (Light Detection and Ranging)
RADAR	Detección y Localización por Radio (Radio Detection and Ranging)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
ADS	Sistema de Conducción Automatizada (Automated Driving System)
ABS	Sistema Anti Bloqueo (Anti Blocking System)
PWM	Modulación por Ancho de Pulsos (Pulse Width Modulation)
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers)
ECM	Módulo de Control del Motor (Engine Control Module)
PIC	Controlador de Interfaz Programable (Programmable Interface Controller)
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things)
IMU	Unidad de Medición Inercial (Inertial Measurement Unit)

Resumen

Este proyecto surge como parte de la incorporación de módulos de visión para la asistencia en vehículos de conducción autónoma. El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un módulo de asistencia para el desplazamiento rectilíneo en un prototipo de vehículo eléctrico (VE), el cual podría ser una alternativa aplicable en los vehículos de las personas con discapacidad. Se ha considerado la implementación de un carril exclusivo y adaptado para diversos eventos de conducción alrededor de los edificios de la División de Ingenierías en la sede Salamanca. Se desarrollo un sistema para la asistencia a la conducción del VE mediante una base empotrada al piso del vehículo y al asiento del conductor, este sistema consta de actuadores, sensores y microcontroladores para el control de la aceleración, desaceleración y frenado del vehículo. Para llevar a cabo las pruebas, se adquirieron bases de datos utilizando una unidad de medición inercial de 10 ejes, un sistema de posicionamiento global, un módulo especializado para la medición de corriente y voltaje, y se realizó la caracterización de dos actuadores lineales electromecánicos. Se propusieron las acciones para diversos eventos que incluyen la aceleración y el frenado de un VE. Se plantea el diseño de un control difuso que permite la toma de decisiones y acciones mediante actuadores electromecánicos colocados al nivel del freno y acelerador dentro del vehículo para la asistencia en la conducción. Estos actuadores intervienen en la aceleración y el frenado del vehículo, dependiendo de la evaluación realizada por el módulo de detección de eventos basado en visión y módulos de aprendizaje profundo. Este módulo proporciona 4 señales de acuerdo con el estado que se percibe en el entorno del vehículo hacia el módulo de desplazamiento, indicando el evento y el nivel de riesgo en el que se encuentra el

ÍNDICE DE TABLAS

VE. El prototipo toma decisiones acorde al modulo central de control difuso para llevar a cabo las acciones necesarias y evitar accidentes o colisiones en función de los resultados de esta evaluación el VE puede acelerar, desacelerar y frenar respecto a los niveles de riesgo detectados en un entorno controlado a una velocidad máxima de $30 \frac{Km}{h}$.

Capítulo 1

Introducción

La navegación autónoma (NA) es una tarea que involucra software y hardware tales como sensores, actuadores y controladores. El sistema adquiere información de los sensores, la procesa a través de los controladores y toma decisiones que se ejecutan mediante los actuadores. Las acciones clave en la NA son el frenado, la conducción y la dirección automatizada del vehículo [1].

Un vehículo de conducción autónoma (VCA) es descrito como un agente que cuenta con un sistema de NA. La gran mayoría de VCA son vehículos eléctricos (VE). El objetivo principal es controlar la dirección, la aceleración, desaceleración y frenado del VE. Esto se puede cumplir mediante diversos sensores, controladores, actuadores y sistemas embebidos [2].

Los VCA requieren de diversos sensores para cumplir con la tarea de asistencia en la conducción. Estos sensores permiten analizar el entorno con el que interactúan mediante cámaras, detección de luz y telemetría (por sus siglas en inglés LiDAR), detección y localización por radio (por sus siglas en inglés RADAR) y el sistema de posicionamiento global (por sus siglas en inglés GPS). Las cámaras permiten el reconocimiento de objetos, el seguimiento de líneas de carril y el estacionado del vehículo. El sensor LiDAR previene colisiones, detecta peatones y se utiliza para el frenado de emergencia. El RADAR se emplea para el control en cruces de forma adaptativa de

Introducción

acuerdo a la situación y a la medición de la proximidad de objetos cercanos al vehículo. Finalmente, el GPS se utiliza para la localización y validación de los datos de posición global [2].

Los niveles de conducción autónoma según la Sociedad de Ingenieros Automotrices (por sus siglas en inglés SAE) son los siguientes:

- Nivel 0 se necesita ser conducido por un humano, por lo cual se le determina conducción no automatizada.
- Nivel 1 (asistencia al conductor) se basa en la toma de decisiones en una sola dirección, ya sea desplazamiento longitudinal o lateral, pero no ambas acciones simultáneamente.
- Nivel 2 (automatización parcial de la conducción) se basa en la toma de decisiones en dirección longitudinal y lateral, pero aún requiere la asistencia del conductor para eventos desconocidos.
- Nivel 3 (automatización condicional de la conducción) se basa en la toma de decisiones mediante un sistema de conducción automatizado (por sus siglas en inglés ADS), que puede conducir el vehículo en caminos libres, aunque aún requiere de un conductor o sistema remoto que monitoree el estado del vehículo para intervenir cuando sea necesario.
- Nivel 4 (automatización de alta conducción) se basa en que el usuario se convierte en un pasajero del ADS. Depende de una trayectoria de un punto a otro en carreteras y ya no requiere el monitoreo del sistema.
- Nivel 5 (automatización completa de la conducción) se basa en la completa autonomía del vehículo mediante el ADS para condiciones normales, similares a las de cualquier vehículo. Puede transitar por rutas existentes y su única adversidad son condiciones extremas, como tormentas de nieve o calles inundadas [1].

Hoy en día, existen vehículos eléctricos de baterías y vehículos eléctricos de hidrógeno. Los componentes generales de un VE son: motor eléctrico (de corriente alterna o corriente continua), controlador, fuente de alimentación y entrada de recarga. La gran mayoría de los VCA son VE, debido a la facilidad de implementar los sensores, actuadores y controladores necesarios para la NA, ya que cuentan con una fuente de alimentación en corriente continua [3].

1.1 Antecedentes

Para que un VCA pueda cumplir con su objetivo de conducirse sin el control de un tripulante, se requieren tres elementos importantes: el control de aceleración, el frenado y la dirección del vehículo. Estas tres acciones son esenciales para evitar accidentes o colisiones en la trayectoria en diversos eventos que recorre el vehículo [4].

En este trabajo de tesis se propone la implementación de un módulo de control para la toma de acciones basada en eventos para VCA, mediante el análisis de las señales de corriente del motor, el voltaje que suministra el acelerador y velocidad del vehículo. Estas señales se procesan mediante lógica difusa en tres niveles diferentes (bajo, medio y alto) para el accionamiento continuo de los actuadores. El análisis puede ser implementado en un prototipo de VE, lo que implica la toma de decisiones en la aceleración, desaceleración y frenado.

1.1. Antecedentes

Los VCA están conformados por diferentes sensores y conexiones. Los sensores permiten adquisición de datos sobre el ambiente por el que navega el vehículo, ejemplos de ellos pueden ser: sensores de localización, mapeo del ambiente o para extracción de características visuales. Las diferentes conexiones con las que cuenta un VCA hacen referencia al posicionamiento del vehículo, el protocolo de comunicación remoto para el análisis óptimo de los datos adquiridos, comprobación de los mapas generados, el procesamiento de trayectorias o seguimiento de rutas.

La fusión de los sensores con las diferentes conexiones logran el objetivo de controlar los actuadores del VCA y mediante un sistema de visualización proyecta los resultados de trayectorias, localización, detección de agentes en el ambiente y la toma de decisiones seguras [5].

El frenado de un vehículo con Sistema Anti Bloqueo (por sus siglas en inglés ABS) se establece mediante lógica difusa con tres variables dependientes de análisis la velocidad, la velocidad angular de los neumáticos y la fuerza de presión aplicada al pedal. Estas variables permiten la retroalimentación en

1.1 Antecedentes

el sistema y se genera la información suficiente para lograr una mejor predicción de control. En el caso de usar controles basados en lógica difusa, la retroalimentación permite generar valores entre 0 a 1 en las tres variables. Enseguida, estas variables entran al controlador de lógica difusa para ejecutar la acción de frenado.

El resultado del análisis compara el frenado del vehículo para diferentes condiciones del camino y velocidades [6]. En la revisión de las técnicas para el control de la desaceleración que evita accidentes, hay diferentes modelos que se pueden implementar, todo depende del tipo de frenado que tiene el vehículo. En la mayoría de los casos, los vehículos urbanos cuentan con un frenado de 4 a 3 canales, lo que permite utilizar un sistema de control inteligente mediante lógica difusa. Esto se propone controlando un actuador mediante un bloque de Modulación por Ancho de Pulsos (por sus siglas en inglés PWM) y válvulas de apertura y clausura, dependiendo de la señal procesada en la lógica difusa para el posicionamiento del pedal del freno para una desaceleración suave o brusca [7].

En el análisis de los modelos para la advertencia y prevención de accidentes con vehículos no motorizados, se habla de tres diferentes metodologías. La primera se basa en el frenado de emergencia, manteniendo constante el frenado hasta una desaceleración de 0. La segunda propuesta habla del frenado de advertencia, el cual tiene tres niveles de desaceleración disminuyendo la aceleración conforme se va aproximando el objeto. Por último, el frenado preventivo el cual va incrementando de forma lineal hasta llegar al punto máximo en el que se logra la desaceleración igual a 0 [4].

El planteamiento de control de aceleración en un VE se genera usando un conjunto de datos basado en la distancia relativa, el tiempo transcurrido y la fuerza aplicada sobre el pedal. Estos datos son fundamentales para el análisis dinámico del vehículo y el desarrollo de un módulo de aceleración. Se aplica una función de activación tipo sigmoide con la finalidad de evitar cambios bruscos en el incremento de la velocidad relativa de forma no lineal. Este modelo se implementa en un sistema de control para la acción de aceleración [8].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseño de un módulo para implementar acciones de aceleración y desaceleración autónomas en un vehículo eléctrico basado en el estado de los agentes y el evento detectados.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Configuración de eventos considerados como riesgo durante la navegación de un vehículo eléctrico en un ambiente de exterior, validando su velocidad y posición a través de diferentes sensores y técnicas.
2. Generación de bases de datos de los sensores y actuadores para diferentes pruebas de velocidad, corriente, torque, movimiento de acuerdo con las situaciones de riesgo que pueden presentarse en el ambiente.
3. Selección de componentes electromecánicos para el accionado automático del acelerado o desacelerado en el prototipo de vehículo eléctrico.
4. Diseño de un módulo de control y su implementación en hardware para la ejecución de acciones de desaceleración sobre el vehículo de acuerdo con los agentes y eventos detectados.
5. Pruebas experimentales del módulo en la toma de decisiones integradas bajo diferentes escenarios y situaciones.

1.3. Justificación

La Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE [1] establece los siguientes niveles de autonomía en vehículos:

- Nivel 0. La conducción no tiene nada automatizado
- Nivel 1. Asistencia del conductor
- Nivel 2. Automatización parcial
- Nivel 3. Automatización de conducción condicional
- Nivel 4. Automatización de conducción alta
- Nivel 5. Automatización de conducción completa

1.4 Contenido del documento

En este contexto, los VCA de nivel 2 y 3 han experimentado un aumento en la inclusión de estos sistemas en la sociedad vehicular, generando nuevas oportunidades en la investigación y desarrollo de nuevas metodologías, reformas viales y la minimización de costos. La inclusión de VCA en países desarrollados se vuelve más notoria, por ejemplo, algunos países han optado por desarrollar un carril exclusivo para estos vehículos. Por otra parte, se ha incursionado en el transporte de material para la industria por medio de VCA. El sistema de control de los VCA se ha desarrollado para vialidades de calidad, cumpliendo con el objetivo primordial del nivel 2 y 3 de autonomía. Estas infraestructuras únicamente se encuentran presentes en países desarrollados. Además, los países con baja infraestructura tecnológica carecen de rutas adecuadas por donde puedan transitar los VCA, reduciendo las posibilidades de aumentar la implementación de este tipo de sistemas lo cual reduce la posibilidad de tener ciudades inteligentes. En este contexto, el presente proyecto de tesis busca el desarrollo de un módulo de control con tecnología accesible de bajo costo y confiable para generar módulos de asistencia a la conducción para personas con discapacidades y les permita conducir de forma accesible evitando posibles accidentes materiales o fatales. El compromiso de diseñar este módulo de control y accionamiento en el vehículo considera todos los agentes o variables que permiten el funcionamiento y accionamiento de respuestas inmediatas a situaciones tanto de riesgo bajo, como de alto riesgo.

1.4. Contenido del documento

En el capítulo 2, se abordan conceptos clave relacionados con los sensores y el procesamiento de datos en un sistema de asistencia a la conducción autónoma.

En el capítulo 3, se habla de los componentes clave utilizados en el sistema mediante la combinación de sensores de corriente, sensores ultrasónicos, un sensor IMU/GPS, un convertidor analógico-digital, actuadores lineales, y los microcontroladores ATMEGA2560 y ESP32. Estos dispositivos son

1.4 Contenido del documento

analizados e instrumentados para capturar datos que se procesan mediante un modelo de lógica difusa. Este modelo permite controlar la aceleración, desaceleración y frenado del vehículo eléctrico mediante los actuadores instalados en los pedales del acelerador y el freno. Además, se presenta una interfaz gráfica diseñada para simular los niveles de riesgo a los que se enfrenta el vehículo en su trayectoria, considerando los obstáculos en el camino. Esta herramienta es fundamental para la prevención de accidentes, ya que facilita el análisis y la toma de decisiones en tiempo real.

En el capítulo 4, se analizan las lecturas del sistema en relación con los cuatro niveles de riesgo y se describe cómo el vehículo eléctrico responde en cada caso. Se incluye un análisis detallado del comportamiento del sistema en condiciones reales de operación.

Para complementar esta información, puedes acceder al URL de [YouTube](https://youtube.com/shorts/G3Clv1Z1uS0?feature=share) (<https://youtube.com/shorts/G3Clv1Z1uS0?feature=share>), donde se muestra material funcional que ilustra cómo interactúa el vehículo eléctrico en una situación real.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se aborda la descripción de los diversos elementos que resultan indispensables para la toma de decisiones en vehículos eléctricos (VE) con un sistema de (NA) basado en eventos. Se exploran en detalle los componentes que permiten al vehículo evaluar su entorno y actuar en consecuencia, de manera eficiente y segura.

Asimismo, se examinan en profundidad los sensores empleados para el monitoreo continuo y preciso de las diferentes variables que influyen en el funcionamiento de los VE. Estos sensores cumplen un rol esencial al proporcionar la información necesaria sobre el estado del vehículo y su entorno, lo cual permite a los sistemas de control tomar decisiones en tiempo real.

Por otra parte, se introducen y explican los modelos de lógica difusa que han sido aplicados a los sistemas mecánicos y eléctricos. Estos modelos son fundamentales para gestionar la incertidumbre y la variabilidad inherente en los sistemas complejos. Mediante la lógica difusa, es posible formular decisiones más flexibles y adaptativas, lo que mejora el rendimiento de los sistemas de control tanto a nivel mecánico como eléctrico.

2.1. Antecedentes históricos y conceptuales.

El desarrollo del primer prototipo de VE se remonta al año 1828, cuando el ingeniero húngaro Ányos Jedlik creó un pequeño motor eléctrico que, aunque rudimentario, logró propulsar un vehículo. En esa época, sin embargo, los vehículos aún no contaban con baterías recargables, lo que limitaba significativamente su autonomía y practicidad. Fue recién en 1859 cuando Gastón Planté, un físico francés, desarrolló la primera batería recargable de plomo-ácido, lo que marcó un hito crucial en la evolución de los VE, permitiendo una mayor flexibilidad en su uso.

Un paso importante en la producción de VE ocurrió en 1884, cuando Thomas Parker, un inventor británico, lanzó el primer VE de producción masiva. En ese momento, una de las principales desventajas que enfrentaban los VE era la competencia de los motores impulsados por vapor [9], que ya estaban más consolidados en el mercado. Además, la caída en los costos de la gasolina durante ese período provocó una disminución en el interés por los VE, lo que eventualmente llevó a su desaparición temporal en el mercado automotriz.

No fue sino hasta la década de 1990 que los VE comenzaron a resurgir con fuerza. El impulso vino de la mano de avances significativos en diversas tecnologías, especialmente aquellas relacionadas con la generación de energía, los motores eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía. Estos avances hicieron que los VE volvieran a ser una opción viable y atractiva en el ámbito del transporte personal y comercial [10].

Los principios básicos que rigen el funcionamiento de un vehículo eléctrico se basan en sus componentes, tales como una fuente de energía, generalmente una batería recargable, un convertidor que regula la corriente, un inversor que convierte la corriente directa en alterna, un motor eléctrico encargado de la propulsión, y una caja de cambios que permite ajustar la velocidad y el par motor del vehículo, como se ilustra en la figura 2.1.

2.1 Antecedentes históricos y conceptuales.

- **Fuente de energía (baterías):** Las baterías almacenan y suministran la energía necesaria para hacer funcionar el vehículo.
- **Convertidor:** Este componente ajusta o convierte la corriente eléctrica según sea necesario. Por ejemplo, puede cambiar de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC) o modificar el voltaje para adecuarlo a las necesidades del sistema.
- **Inversor:** El inversor transforma la corriente continua (DC) de las baterías en corriente alterna (AC) que el motor eléctrico necesita para funcionar.
- **Motor eléctrico:** El motor convierte la energía eléctrica en movimiento, generando el torque necesario para mover el vehículo.
- **Caja de cambios:** La caja de cambios transmite el torque generado por el motor a las ruedas, permitiendo que el vehículo se mueva.

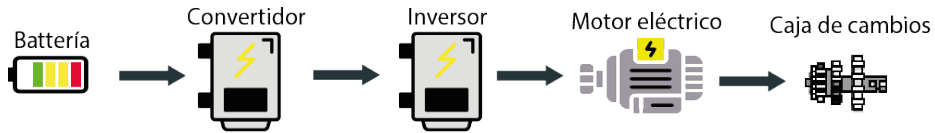


Figura 2.1: Diagrama del principio básico de un vehículo eléctrico

2.1.1. Evolución de los VE.

En el ámbito de la ingeniería, se consideran varios parámetros clave que afectan directamente el rendimiento y la viabilidad de los VE. Entre los aspectos más importantes se encuentran la capacidad y la autonomía de la batería, que determinan la distancia que el vehículo puede recorrer sin necesidad de recargarse, el consumo energético, que está relacionado con la eficiencia del sistema, y el sistema de propulsión, que define cómo la energía almacenada en la batería se convierte en movimiento. Estos factores tecnológicos son fundamentales para mejorar la competitividad de los VE frente a los automóviles tradicionales.

2.1 Antecedentes históricos y conceptuales.

Desde el punto de vista social, el precio del vehículo es uno de los factores determinantes, ya que influye directamente en la decisión de compra de los consumidores. Las estrategias de venta, que incluyen tanto la forma en que los VE se comercializan como las campañas de concienciación sobre sus beneficios, también son esenciales. A esto se suman los subsidios gubernamentales, que facilitan el acceso a los VE a través de incentivos económicos, y el creciente interés por el uso de energías renovables, que ha impulsado la demanda de opciones de transporte más sostenibles [11].

Otro factor importante en la evolución de los VE es la creación de redes industriales, las cuales han fomentado alianzas estratégicas entre diferentes sectores, permitiendo el avance en su desarrollo. Estas alianzas abarcan desde la extracción y procesamiento de los recursos primarios, necesarios para la fabricación de baterías y otros componentes, hasta la producción y comercialización del producto final. En este sentido, el trabajo de Pozzi [12] analiza los vínculos generados en el sector industrial, destacando cómo la colaboración entre empresas ha sido clave para la innovación y expansión del mercado de VE.

En 2006, existían aproximadamente 14 industrias dedicadas específicamente al desarrollo de VE. Para el año 2020, ese número había aumentado alcanzando las 1108 empresas, reflejando interés por los VE como una alternativa viable y sostenible para el futuro del transporte.

2.1.2. Aplicaciones de los VE

La industria de logística en los Estados Unidos, específicamente en el sector de transporte de mercancías, ha sido pionera en la adopción de camiones eléctricos. Esta industria se organiza en tres categorías principales según las distancias que cubren los camioneros: local, regional y en carretera. La segmentación en estas categorías presenta una oportunidad significativa para el desarrollo de infraestructura de recarga de baterías, así como para la reducción de emisiones contaminantes. La transición hacia camiones eléctricos en estas distintas categorías de operación podría contribuir de manera notable a la disminución de la huella de carbono en el sector del transporte

2.1 Antecedentes históricos y conceptuales.

de mercancías [13].

En contraste, China ha implementado una política enfocada en la promoción de VE a través de subsidios destinados a la adquisición de estos vehículos para el servicio de transporte público. Esta política ha tenido un impacto positivo en la reducción de emisiones, logrando una disminución del 16.3% en las emisiones de gases contaminantes [14].

En México, se ha apostado por la inclusión social en el transporte de personas con discapacidades. Se ha desarrollado un vehículo eléctrico biplaza especialmente diseñado para este propósito, que incluye un asiento ajustable que puede ascender y descender para facilitar el acceso a personas con discapacidades. Además, este vehículo cuenta con un espacio específico para el transporte de sillas de ruedas o muletas, lo que lo convierte en una opción accesible y práctica para la movilidad de personas con necesidades especiales [15].

Los VE tienen mejor capacidad para integrar sensores avanzados y sistemas de cómputo altamente eficientes, estos vehículos no solo facilitan la tarea de conducción mediante la prevención de riesgos, sino que también permiten una detección y localización precisa de objetos en el entorno. Esta integración tecnológica es esencial para la implementación segura y efectiva de sistemas de (NA) [16].

2.1.3. Fundamentos de control de un vehículo de conducción autónomo.

Los fundamentos clave del funcionamiento de un vehículo de conducción autónomo (VCA) son: percepción, localización, planeación, control y navegación. La percepción se encarga de recopilar datos del entorno del vehículo a través de diversos sensores, como cámaras, y sensores Lidars. La localización permite al vehículo determinar su posición exacta dentro de un mapa o entorno, utilizando tecnologías como el GPS y sistemas de posicionamiento avanzado. La planeación implica el desarrollo de estrategias para seguir rutas y tomar decisiones basadas en la información recopilada, mientras que el

2.1 Antecedentes históricos y conceptuales.

control se ocupa de la ejecución de las acciones necesarias para seguir la ruta planificada, ajustando la velocidad, dirección y otras variables del vehículo. Finalmente, la navegación integra todos estos componentes para permitir una movilidad autónoma fluida y segura.

Estos elementos se integran en un sistema que gestiona cada aspecto del funcionamiento del vehículo para tomar decisiones de manera autónoma [17]. La figura 2.2 ilustra cómo estos componentes trabajan juntos en el sistema general de VCA, mostrando las interacciones y el flujo de información entre cada uno de ellos.

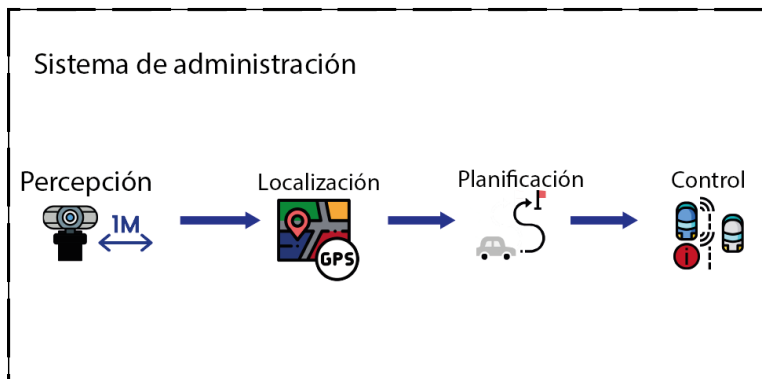


Figura 2.2: Diagrama de operación de VCA

- **Percepción:** Permite al vehículo reconocer su entorno utilizando sensores ópticos, como cámaras o LiDAR, y sensores de radiofrecuencia, como el RADAR.
- **Localización:** Conoce la precisión en la que se ubican, los VCA utilizan módulos GPS y puede conectarse con otros vehículos, conocer su posición exacta y evitar colisiones.
- **Planeación:** Toma las decisiones en diferentes escenarios, ya sean simples o complejos. Incluye acciones como cambiar de carril, reducir la velocidad o prevenir accidentes, adaptándose al entorno y a las condiciones de tráfico.

2.2 Sensores y adquisición de datos.

- **Control:** El control se encarga de ejecutar las acciones del vehículo, tanto en dirección longitudinal (aceleración y frenado) como lateral (dirección). Esto se logra a través del manejo de los componentes mecánicos y eléctricos del vehículo.

Actualmente, existen varios sistemas diseñados para asistir en la NA, mejorando la seguridad y la comodidad durante el manejo. Uno de los ejemplos es el sistema de detección de peatones, que se presenta en [18]. Este sistema tiene como objetivo principal prevenir accidentes al detectar la presencia de peatones en las cercanías del vehículo.

Cuando el sistema detecta la presencia de peatones y evalúa su proximidad usando los sistemas de visión, determina si es necesario activar el frenado del vehículo para evitar una colisión, en función de la distancia entre el vehículo y los peatones detectados, así como de la velocidad y otros factores dinámicos. Este tipo de tecnología permite mejorar la seguridad al proporcionar respuestas automáticas y rápidas en situaciones potencialmente peligrosas, reduciendo el riesgo de accidentes y protegiendo a los peatones y a los ocupantes del vehículo.

2.2. Sensores y adquisición de datos.

Los sensores permiten recoger información en tiempo real sobre diversos aspectos operativos. La capacidad de los sensores para medir y registrar datos precisos es crucial para la toma de decisiones. Esta información puede incluir parámetros como la temperatura, presión, velocidad, o cualquier otro indicador relevante que influya en el rendimiento del sistema. Además, los sensores verifican que el sistema esté funcionando correctamente, a través de la monitorización continua. Esto permite implementar medidas correctivas de manera proactiva, asegurando que el sistema mantenga su eficacia y fiabilidad a lo largo del tiempo.

2.2 Sensores y adquisición de datos.

2.2.1. Medicion de corriente en VE

El monitoreo del estator es uno de los métodos utilizados para la detección de fallas en motores eléctricos. Este enfoque se basa en la vigilancia de dos parámetros clave: la temperatura de operación y el campo magnético de los imanes. La monitorización de la temperatura del estator permite identificar posibles sobrecalentamientos que podrían indicar problemas en el funcionamiento del motor. Del mismo modo, el análisis del campo magnético proporciona información sobre el estado de los imanes y la posible presencia de defectos en el sistema. Aunque la monitorización de la temperatura de los imanes permanentes del rotor en VE aún no ha sido tan desarrollada como otras técnicas, sigue siendo una opción viable para la detección temprana de fallas [19]. Por otro lado, el sensor de gancho magnético SCT-013-100 es una herramienta utilizada para medir la corriente eléctrica que fluye a través de un cable o conexión donde se instala. Este tipo de sensor es capaz de medir corrientes en un rango de 0 a 100 A, proporcionando una forma precisa y no invasiva de monitorear la corriente eléctrica en diversas aplicaciones [20].

2.2.2. Pedal de acelerador

En los vehículos comunes, la posición del pedal del acelerador se mide mediante el módulo de control del motor (por sus siglas en inglés ECM) [21]. Este módulo procesa las señales emitidas por el pedal, dependiendo del modelo del vehículo. En algunos casos, los vehículos tienen un circuito adicional que mejora la lectura del voltaje analógico entregado por el pedal. Otros vehículos están equipados con varios potenciómetros para mejorar la calidad de la señal. Finalmente, el ECM procesa esta señal y determina la posición exacta del pedal.

En [22] se realiza un estudio simulado del control de pedal de aceleración y frenado en VE. Utilizan la lectura de la señal de voltaje que emite cada pedal, tanto el del acelerador como el del freno. Luego, se filtra esta mediante su algoritmo para mejorar la precisión de la posición de los pedales, evitando cambios bruscos que puedan afectar la conducción del vehículo. Para mejorar el control del pedal del acelerador, se ha diseñado un mecanismo electromecánico que previene la presión del pedal en situaciones de

2.2 Sensores y adquisición de datos.

peligro [23]. Este mecanismo incluye un actuador lineal conectado al pedal del acelerador. Cuando los sensores del vehículo detectan una situación peligrosa, el actuador se activa, bloqueando el pedal del acelerador e impidiendo que se presione. En situaciones no peligrosas, el actuador permanece desactivado, permitiendo el uso normal del acelerador.

2.2.3. Pedal freno

El proceso de frenado en un vehículo depende en gran medida del tipo de sistema de frenos que se utilice. Por ejemplo, en [24], se describe un enfoque innovador en el que se utiliza un motor para activar el sistema de frenos en las llantas del vehículo. Este mecanismo se basa en un sistema de control programado en un microcontrolador PIC, que recibe una señal de activación. Una vez que el microcontrolador envía la señal, el motor se activa y ejerce una fuerza sobre las llantas, lo que resulta en la detención del movimiento del vehículo. Este sistema busca ofrecer una solución efectiva y precisa para el frenado al integrar componentes electrónicos y mecánicos.

En otro estudio [4], se analizan dos tipos principales de frenado: el frenado de emergencia autónomo y el frenado preventivo automático. El frenado de emergencia autónomo actúa de manera binaria, es decir, está en estado 0 cuando el freno no está presionado y en estado 1 cuando se activa el frenado. Además, se evalúa el rendimiento del frenado de emergencia autónomo en cuatro niveles diferentes de presión del freno, proporcionando una visión detallada sobre su efectividad en diversas condiciones. En contraste, el frenado preventivo automático opera de manera gradual, permitiendo una aplicación progresiva de la presión al freno hasta alcanzar su máxima capacidad. El análisis comparativo de estos dos sistemas muestra que el frenado de emergencia autónomo ofrece mejores resultados en términos de respuesta y eficacia. Además, se han desarrollado modelos que analizan la fuerza necesaria para aplicar al pedal del acelerador y cómo esta fuerza debe reducirse al soltar el pedal. Estos modelos se crean y evalúan mediante simulaciones, lo que permite ajustar y optimizar la respuesta del sistema de aceleración para mejorar la experiencia de conducción [25].

2.3 Métodos de Procesamiento de Datos.

2.2.4. Medición de velocidad

En [26], se analizan dos enfoques principales para la medición de velocidad. El primer método utiliza encoders instalados en las llantas de un vehículo agrícola. Estos encoders registran el número de revoluciones de las llantas, permitiendo calcular la velocidad en función de la rotación y las características del neumático. El segundo método se basa en la geolocalización a través de un GPS, utiliza señales de satélites para determinar la posición del vehículo y calcular su velocidad en función de los cambios en la ubicación a lo largo del tiempo. Los resultados del estudio muestran que el método de geolocalización mediante GPS ofrece una mayor precisión en la medición de la velocidad en comparación con los encoders de llanta. Es importante considerar la calidad de los sensores, por ejemplo, un dispositivo de baja gama puede proporcionar resultados imprecisos y menos fiables, mientras que uno de alta gama mejora significativamente la precisión de la geolocalización y la medición de la velocidad.

2.3. Métodos de Procesamiento de Datos.

Las tecnologías para la transmisión y procesamiento de datos suelen ser costosas, aumentando el precio de los vehículos. La mayoría de los sistemas en VCA utilizan conexiones como Wi-Fi, LTE o 5G para la transmisión de datos. Estas conexiones permiten una comunicación rápida y eficiente entre el vehículo y las infraestructuras o servidores externos, facilitando la transferencia de grandes volúmenes de información. En [27], se propone el uso de Wi-Fi para la transmisión de datos junto con la implementación de procesamiento en el borde de la nube (edge computing) como una alternativa a los métodos tradicionales. El procesamiento en el borde de la nube implica realizar el procesamiento de datos cerca de la fuente de datos en lugar de enviar toda la información a un servidor centralizado. Esto puede reducir la latencia y mejorar la eficiencia del sistema al permitir decisiones más rápidas y reducir la carga sobre la red.

Otra opción para el procesamiento de datos en VCA es mediante el diseño de software que lea la información proveniente de los múltiples sensores del

2.4 Lógica difusa

vehículo. Este software debe cumplir con la nueva normativa ISO 23150, que establece estándares para la comunicación entre sensores y las unidades de procesamiento. En [28], se describe cómo los datos recopilados por los sensores se envían a un servidor para su procesamiento. Esta implementación permite un análisis centralizado y puede mejorar la precisión y la eficacia de las decisiones basadas en datos del vehículo. Una técnica común es el uso de sistemas de transporte inteligente cooperativo [29]. En este enfoque, los VCA están equipados con varios sensores, un módulo que recopila los datos y los envía a un módulo de procesamiento, y un módulo de almacenamiento. Estos componentes trabajan conjuntamente para formar un sistema integral que contribuye a la prevención de accidentes y a la conducción segura del vehículo. La cooperación entre estos módulos permite una mejor integración de los datos para la toma de decisiones.

Las redes neuronales también se han utilizado para la toma de decisiones en diversas aplicaciones. En [30], se emplea un sistema de frenado regenerativo que prioriza el confort del pasajero. Este sistema es un ejemplo de cómo se pueden integrar métodos avanzados de procesamiento de datos, para mejorar la experiencia de conducción en VCA. Por último, la lógica difusa, a diferencia de los sistemas binarios tradicionales que operan con resultados estrictos de sí o no, permite obtener resultados que representan una gama de valores intermedios. Esto es especialmente útil en situaciones donde los datos de entrada no son precisos o exactos. Un ejemplo de su aplicación se encuentra en el modelo desarrollado en [31], que ilustra cómo la lógica difusa puede manejar incertidumbres y variaciones en los datos para tomar decisiones más flexibles.

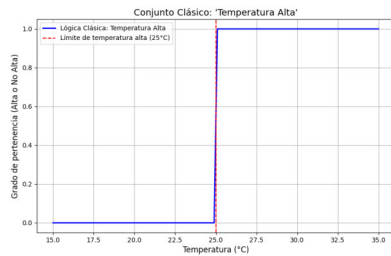
2.4. Lógica difusa

La lógica difusa es una extensión de la lógica clásica, diseñada para manejar la incertidumbre y la vaguedad en situaciones donde los datos no son completamente precisos o están incompletos. A diferencia de la lógica clásica, que opera con valores binarios estrictos (verdadero o falso, 1 o 0), la lógica difusa permite que las variables tomen un espectro continuo de valores entre

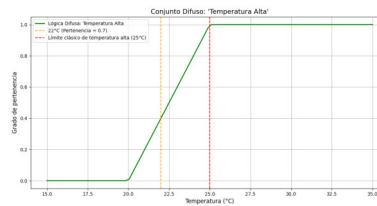
2.4 Lógica difusa

0 y 1. Esto refleja grados de verdad y proporciona una mayor flexibilidad en la representación de la información. En la lógica clásica, los conjuntos se definen de manera clara y estricta con un nivel fijo, como se ilustra en la figura 2.3. En contraste, en la lógica difusa, un elemento puede pertenecer a un conjunto en diferentes grados. Si definimos una temperatura alta como un conjunto difuso, una temperatura de 22 °C podría tener una pertenencia de 0.7 al conjunto de temperaturas altas, como se muestra en la figura 2.3. Esto sugiere que la temperatura es algo alta, pero no completamente alta. Este enfoque es más representativo de la realidad en muchos escenarios cotidianos, donde los límites y categorías no son tan claros y definidos.

Los conjuntos difusos se definen mediante funciones de pertenencia, que son funciones matemáticas que asignan a cada elemento un valor entre 0 y 1. Este valor representa el grado en que el elemento pertenece al conjunto difuso. Por ejemplo, una función de pertenencia para el conjunto de temperaturas altas podría asignar un valor de 0.7 a 22 °C, indicando que la temperatura tiene un grado de pertenencia de 0.7 al conjunto de temperaturas altas. Este enfoque permite una representación más matizada y realista de las variables y sus relaciones en muchos contextos prácticos.



Lógica clásica



Lógica difusa

Figura 2.3: Lógica clásica y difusa

Un sistema de inferencia difusa es un marco que utiliza lógica difusa para tomar decisiones o controlar un sistema. Consiste en tres etapas principales:

- **Fuzzificación:** En esta etapa, las entradas precisas del sistema se con-

2.4 Lógica difusa

vierten en grados de pertenencia a conjuntos difusos. Por ejemplo, una temperatura medida de 22 °C se convierte en un grado de pertenencia a los conjuntos difusos 'baja', 'media', y 'alta'.

- **Motor de inferencia difusa:** Aquí es donde se aplican reglas difusas para derivar conclusiones. Estas reglas suelen estar en la forma de 'Si-Entonces'. Por ejemplo, una regla podría ser: 'Si la temperatura es alta, entonces reducir el calentamiento'. El motor de inferencia toma las entradas difusas y las procesa según estas reglas para generar salidas difusas.
- **Defuzzificación:** La etapa final convierte las salidas difusas en una acción precisa. En el ejemplo anterior, si la salida difusa sugiere una acción parcial (como reducir la calefacción en un 70%), la defuzzificación traduciría esto en un comando concreto para el sistema.

La lógica difusa es ampliamente utilizada en sistemas de control, donde las decisiones deben adaptarse a condiciones variables y a menudo imprecisas. Un ejemplo común de su aplicación es el control de temperatura en sistemas de climatización. En lugar de simplemente encender o apagar un calentador en función de un umbral fijo, un sistema de control difuso puede ajustar la cantidad de calor emitido de manera más gradual y precisa. Esto mejora la eficiencia energética al evitar el encendido y apagado brusco del calentador, y también incrementa el confort del usuario al mantener una temperatura más estable y ajustada a sus necesidades específicas. Otro campo de aplicación relevante es el control de VCA. En estos sistemas, la lógica difusa puede manejar decisiones complejas basadas en datos provenientes de múltiples sensores, que a menudo pueden ser imprecisos o ruidosos. La capacidad de la lógica difusa para trabajar con grados de verdad en lugar de valores binarios permite que los sistemas autónomos operen de manera más segura y adaptativa en entornos cambiantes, como en carreteras con diferentes condiciones meteorológicas o en situaciones de tráfico congestionado.

Una de las principales ventajas de la lógica difusa es su capacidad para imitar el razonamiento humano, que rara vez es absoluto. Los humanos tienden a tomar decisiones basadas en juicios graduales, utilizando términos como 'un poco', 'más o menos' o 'casi', en lugar de absolutos estrictos. La lógica difusa captura esta ambigüedad y permite que los sistemas informáti-

2.5 Microcontroladores y actuadores

cos y de control operen de manera más natural y efectiva en situaciones complejas, reflejando la forma en que los humanos perciben y responden a la incertidumbre. A diferencia de los métodos estadísticos o probabilísticos, que también abordan la incertidumbre, la lógica difusa se centra en la representación y manipulación de conceptos vagos y subjetivos. Mientras que los métodos probabilísticos expresan la incertidumbre sobre la ocurrencia de un evento específico, la lógica difusa se preocupa por el grado en que una proposición es verdadera. Este enfoque permite una modelización más flexible y detallada de situaciones donde los datos no son exactos o están sujetos a interpretaciones múltiples [32].

2.5. Microcontroladores y actuadores

Los VE y VCA están equipados con sistemas embebidos más avanzados debido a su necesidad de manejar una mayor cantidad de sensores y sistemas de control. Estos sistemas avanzados les permiten operar de forma autónoma y realizar tareas complejas que no son posibles en los vehículos tradicionales. En los VE, se emplean microcontroladores basados en la arquitectura ARM debido a su alta eficiencia y capacidad para manejar múltiples tareas en tiempo real. Los microcontroladores ARM permiten una gestión eficiente de las funciones del vehículo, desde la regulación de la energía y el control de motores hasta la comunicación entre diferentes componentes del sistema.

En vehículos que incorporan motores en las ruedas, los microcontroladores ARM también juegan un papel crucial. Estos sistemas permiten un control independiente de cada rueda, lo que mejora la distribución del torque y la estabilidad del vehículo. Este tipo de control avanzado permite una mayor precisión en la gestión de la tracción y la adherencia, resultando en una conducción más segura y eficiente [33]. Además, los VE y VCA pueden utilizar métodos innovadores para mejorar aún más el control y la eficiencia. Estos métodos incluyen técnicas avanzadas de procesamiento de datos, control adaptativo y algoritmos de optimización que permiten a los vehículos ajustarse de manera dinámica a las condiciones de conducción cambiantes y a las necesidades específicas del entorno. La implementación de estos métodos in-

2.6 Evaluación de Riesgos y Prevención de Colisiones.

novadores puede mejorar significativamente el rendimiento y la seguridad de los VE y VCA, marcando un avance importante en la tecnología de control vehicular.

2.6. Evaluación de Riesgos y Prevención de Colisiones.

En la actualidad, se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la implementación de carriles exclusivos para VCA. La presencia de un carril exclusivo permite que los VCA operen sin la interferencia de vehículos convencionales, lo que reduce las posibilidades de conflictos y mejora el flujo general del tráfico. Sin embargo, los resultados han sido aún más favorables cuando se implementan dos carriles exclusivos en lugar de uno. La disposición de dos carriles reduce significativamente las interacciones entre VCA y convencionales, disminuye la congestión y optimiza el flujo de tráfico, proporcionando un entorno más predecible y controlado para los VCA [34]. Además, se han realizado estudios sobre los posibles accidentes que pueden ocurrir en carreteras con el objetivo de prevenir colisiones, estableciendo cuatro niveles de riesgo que permiten clasificar la probabilidad de que ocurra un accidente. El nivel más bajo se corresponde con situaciones en las que no existe un riesgo significativo de colisión, mientras que el nivel más alto se refiere a escenarios con una alta probabilidad de que ocurra un accidente. Esta clasificación de riesgos es esencial para desarrollar estrategias de prevención y para diseñar sistemas de control que puedan mitigar los riesgos asociados con la conducción en diferentes condiciones [35].

Otro estudio relevante se centró en el análisis de accidentes de tráfico reales, los cuales fueron causados principalmente por errores humanos. Para evaluar estos accidentes, los investigadores emplearon un modelo estadístico conocido como modelo logit. Este modelo se utiliza para analizar y predecir eventos binarios, como la ocurrencia o no de un accidente, en función de diversas variables. Los resultados del análisis mostraron que los VCA tienen el potencial de evitar aproximadamente el 61 % de los accidentes. Esta reducción significativa en el número de accidentes se debe a la capacidad de

2.6 Evaluación de Riesgos y Prevención de Colisiones.

los VCA para eliminar factores asociados con el error humano, como la distracción del conductor, la fatiga, la toma de decisiones erróneas y el tiempo de reacción insuficiente [36].

2.6.1. Detección y Evaluación de Riesgos de Colisión.

Los (VCA) emplean modelos de predicción avanzados basados en aprendizaje profundo por transferencia, como se detalla en [37]. Este enfoque permite a los vehículos aprender continuamente de las situaciones que experimentan en su entorno. Mediante la transferencia de conocimientos adquiridos de situaciones anteriores a nuevas experiencias, los modelos de aprendizaje profundo se adaptan y mejoran con cada nueva interacción. Este proceso continuo de aprendizaje permite a los VCA identificar y anticipar posibles riesgos de colisión de manera más precisa, lo que a su vez mejora su capacidad para tomar decisiones de manera más segura y eficiente. Posteriormente, la red neuronal convolucional es capaz de aprender y reconocer patrones complejos en las imágenes, generando un modelo que calcula la probabilidad de evitar una colisión con otros vehículos o peatones. Este enfoque basado en redes neuronales convolucionales permite una evaluación precisa y en tiempo real de los riesgos potenciales, mejorando significativamente la capacidad de los VCA para evitar accidentes [38].

2.6.2. Acciones Preventivas Basadas en Niveles de Riesgo.

Los VCA dependen de un sistema de toma de decisiones (DecSs) que facilita su interacción con otros agentes en las rutas por las que transitan, tales como peatones, ciclistas y vehículos. El DecSs se encarga de interpretar la información proveniente de diversos sensores y sistemas de percepción, para planificar y ejecutar maniobras que optimicen la seguridad y el flujo del tráfico. A pesar de los avances significativos en la tecnología de VCA, las DecSs aun les falta la capacidad de adaptarse a situaciones imprevistas, la comprensión precisa de comportamientos humanos complejos y la toma de decisiones en escenarios de alta incertidumbre o riesgo. Estas áreas presentan desafíos que deben ser abordados para alcanzar un nivel óptimo de seguridad y confiabilidad [39].

2.7 Integración de Sistemas.

El análisis de tráfico requiere modelos de movimiento conscientes de la interacción, redes bayesianas dinámicas y clasificadores de aprendizaje automático. Los modelos de movimiento conscientes de la interacción permiten anticipar las acciones de otros agentes en la carretera, mientras que las redes bayesianas dinámicas facilitan la evaluación de probabilidades en escenarios cambiantes. Los clasificadores de aprendizaje automático procesan grandes volúmenes de datos para identificar patrones y riesgos potenciales. Al predecir situaciones de riesgo a nivel de red y vehículo, el sistema ajusta las acciones de VCA, como la velocidad y la dirección, para evitar posibles colisiones y mejorar la seguridad en la carretera [40].

2.7. Integración de Sistemas.

La integración de sistemas en VCA combina sensores, IA e IoT para que los autos puedan tomar decisiones en tiempo real. Todo esto funciona en conjunto para que los vehículos puedan moverse de manera más segura y eficiente sin intervención humana [41]. Al fusionar los datos provenientes de diferentes tipos de sensores, como cámaras, RADAR, y LiDAR, se mejora la precisión, fiabilidad y robustez de las decisiones de conducción. Este enfoque permite a los VCA tener una visión más completa y detallada de su entorno, reduciendo la posibilidad de errores y aumentando la seguridad en la carretera. En [42], se revisa el estado actual de los VCA en términos de capacidad, impactos, planificación y desafíos tecnológicos. La computación en el borde (edge cloud computing) utiliza datos de sensores en los vehículos y en la infraestructura para tomar decisiones en tiempo real, lo que reduce la latencia y mejora la eficiencia. La computación en el borde, al trabajar a nivel local, permite una respuesta rápida en aplicaciones críticas como la seguridad vial y la gestión del tráfico. Mediante redes 5G, la computación en el borde supera las limitaciones de la nube tradicional, especialmente en términos de movilidad y ancho de banda, permitiendo un procesamiento y comunicación más ágiles [43].

Las herramientas tradicionales de simulación a menudo no integran completamente aspectos clave como los retrasos en la comunicación de datos, la

2.8 Aplicaciones

seguridad y la integración de simulaciones de software/hardware en el proceso. En este contexto, los autores en [44] proponen un middleware basado en SmartData para integrar simuladores de VCA y herramientas externas. Este middleware crea una capa intermedia que gestiona las entradas y salidas mediante SmartData, permitiendo la comunicación entre componentes a través de un bus de mensajes y un protocolo específico, pero es independiente del protocolo en sí. Además, presenta un diseño centrado en los datos para los VCA, estandarizando las interfaces de datos entre componentes como sensores, percepción, planificación, toma de decisiones y actuación.

2.8. Aplicaciones

Las aplicaciones de los VCA incluyen: el transporte público y privado, exploración y logística. Se presentan dos escenarios distintos para el uso de camiones autónomos. En el primer escenario, los camiones autónomos reemplazan completamente a los camiones manuales, lo que resulta en un aumento del transporte por carretera en un 22% y una reducción significativa de los costos del sistema. En el segundo escenario, los camiones autónomos operan únicamente en carreteras principales, lo que lleva a un incremento del transporte en un 11% y a una disminución de los costos. Este enfoque más limitado aún muestra una mejora en la eficiencia y en la reducción de costos, aunque en menor medida en comparación con el primer escenario. Ambos escenarios indican un aumento en la demanda de transporte por carretera y sugieren que la adopción de camiones autónomos podría transformar significativamente el sector del transporte [45].

Respecto a los vehículos personales hoy en día existe el crucero adaptativo el cual tiene la función de analizar la dirección longitudinal, transversal, permanencia en un carril y el seguimiento de obstáculos que se encuentran frente al vehículo, permitiendo la desaceleración y aceleración de un vehículo en su ruta por la que transita [46].

En el ámbito agrícola, los VCA están revolucionando la forma en que se llevan a cabo tareas como la siembra, el control de malezas y la cosecha, reduciendo la dependencia de la mano de obra humana. A través de técnicas de agricultura de precisión, los VCA optimizan el uso de recursos, lo que

2.8 Aplicaciones

incrementa la productividad y minimiza el impacto ambiental. La implementación de esta tecnología en la agricultura representa un avance significativo hacia prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes [47]. Además, se ha desarrollado un pedal combinado de freno y acelerador especialmente diseñado para conductores con discapacidades. Este diseño innovador facilita la conducción al permitir a los conductores manejar ambas funciones con un solo pedal. La aplicación de este pedal combinado en VCA mejora la seguridad, la ergonomía y la eficiencia, lo que resulta especialmente útil para conductores con discapacidades [48].

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se detalla el diseño y desarrollo del sistema de control para la navegación autónoma (NA) en un vehículo eléctrico (VE). Como se mencionó en el capítulo 1, el objetivo principal de este trabajo es proporcionar asistencia inteligente en las funciones de aceleración, desaceleración y frenado del vehículo. Para lograr esta implementación, se recurrió al uso de diversos tipos de sensores, se usaron técnicas de procesamiento de datos para interpretar correctamente la información obtenida y traducirla en acciones de control eficientes. Además, se diseñaron circuitos electrónicos para la adquisición y manejo de los datos. A fin de facilitar la interacción con el sistema y la visualización de los datos, se diseñó una interfaz gráfica intuitiva, que permite al usuario monitorear en tiempo real el rendimiento y las condiciones del vehículo. La integración de hardware y software requirió una coordinación entre los componentes físicos del vehículo y los algoritmos de control implementados en el sistema. Esto incluye no solo la gestión de la información proveniente de los sensores, sino también la activación de los actuadores electrónicos para llevar a cabo las acciones de aceleración, desaceleración y frenado.

3.1. Diagrama General

En esta sección se presenta el diagrama general en la figura 3.1 respecto a la implementación de acciones en un VE para NA basada en eventos. El

3.1 Diagrama General

sistema comienza con el monitoreo de cinco variables: medición del riesgo, velocidad mediante una IMU/GPS, medición de corriente en el motor eléctrico, voltaje en el pedal del acelerador y el posicionamiento de los actuadores en el acelerador (actuador 1) y el freno (actuador 2) . Las variables son ingresadas en un modelo de lógica difusa, que permite realizar diferentes acciones basadas en el resultado de los conjuntos difusos y las reglas estipuladas. El resultado de la lógica difusa es el accionamiento de los actuadores, ya sea activando o desactivando los actuadores lineales para presionar el acelerador o el freno. Esto se valida mediante la distancia y el posicionamiento en el que se encuentran los actuadores, asegurando que la retroalimentación de los valores que detecta el ultrasónico sean correctos evitando una posición diferente de los actuadores lineales al precionar el acelerador y el freno. Finalmente, se ejecuta un módulo basado en Internet de las Cosas (IoT) el cual recibe las cinco variables (Nivel de riesgo, velocidad, corriente del motor, voltaje del acelerador y posición de los actuadores) y envía los datos a procesar para después mostrar en una interfaz gráfica el control de las variables mediante un servidor web y un punto de acceso.

3.2 Diseño del Sistema

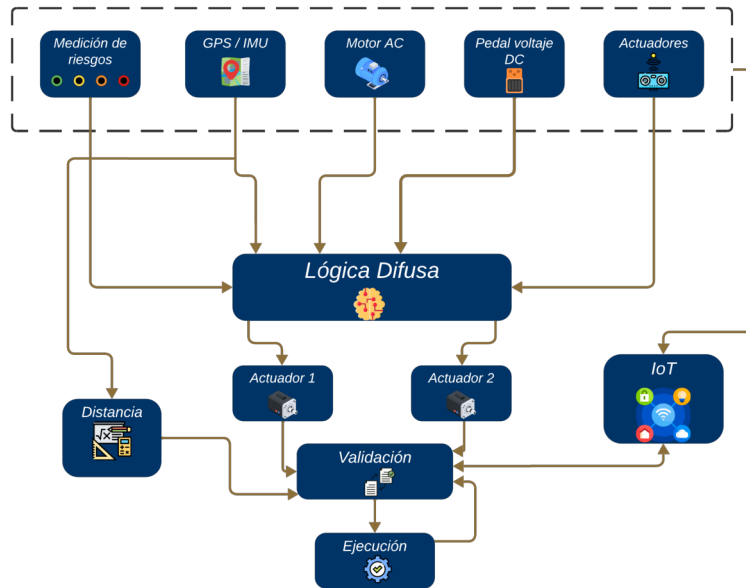


Figura 3.1: Diagrama general para navegación autónoma basada en eventos de un vehículo eléctrico

3.2. Diseño del Sistema

El módulo de control y toma de decisiones se presenta en la figura 3.2. El desarrollo de este sistema se divide en dos partes: hardware y software.

3.2.1. Hardware

Describe todo el diseño realizado, incluyendo los sensores utilizados, los controladores seleccionados y los circuitos implementados. Toda esta información se presenta de manera detallada desde una perspectiva física.

1. **Actuadores Lineales:** Se utilizaron dos actuadores lineales, los cuales son los encargados de acelerar y frenar el VE. Estos actuadores fueron montados en una base diseñada específicamente para el vehículo, esto se describe en la sección 3.3.
2. **Sensores:**
 - Se eligieron tres sensores SCT-013-100 para medir la corriente alterna del motor, esto se describe en la sección 3.4.1.

3.2 Diseño del Sistema

- Se decidió utilizar el convertidor analógico-digital del controlador ATMEGA 2560 para medir el voltaje del pedal del acelerador, esto se describe en la sección 3.4.4.
 - Se uso una IMU/GPS para la medición de la velocidad y distancia, las características del sensor se describen en la sección 3.4.3.
 - Se utilizaron dos sensores ultrasónicos para determinar la posición del bastago del actuador en el acelerador y freno respectivamente, esto se describe en la sección 3.4.2
3. **Controladores:** Se decidió utilizar el microcontrolador ESP32 descrito en la sección 3.6.1 y el microcontrolador Arduino ATMEGA 2560 descrito en la sección 3.6.2, encargados de leer los datos de los sensores y accionar los actuadores.
4. **Circuitos:** Se desarrollaron tres diferentes circuitos para la adquisición de datos, el control de los actuadores y la alimentación de los sensores:
- Circuito para la adquisición de los valores del sensor SCT-013-100 descrito en la sección 3.7.1.
 - Circuito para el control de encendido y apagado de los actuadores lineales, el circuito se describe en la sección 3.7.2.
 - Circuito para la alimentación de los sensores, lo cual se describe en la sección 3.7.3.

3.2 Diseño del Sistema

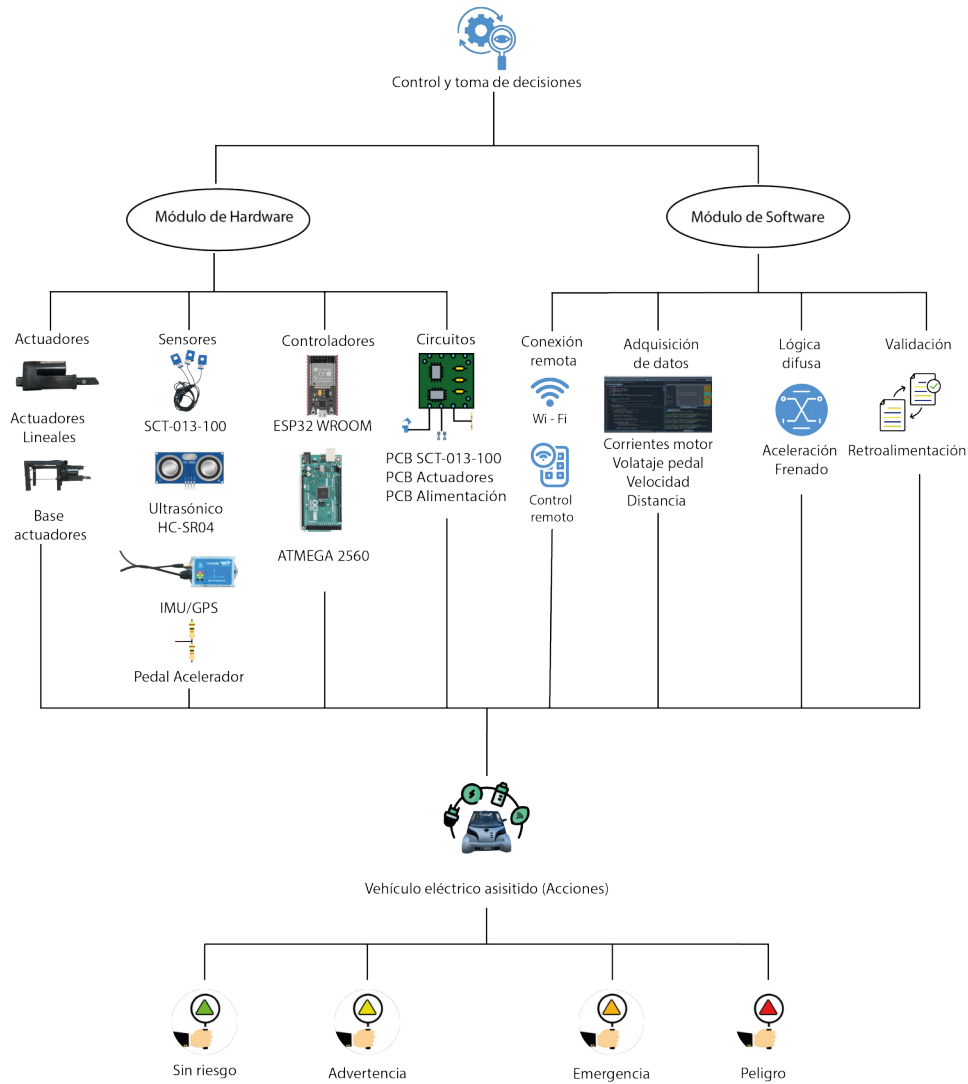


Figura 3.2: Diagrama general para navegación autónoma basada en eventos

3.2.2. Software

Incluyendo la conexión remota, la adquisición de datos, la instrumentación de los sensores, los modelos de lógica difusa y la validación de los datos.

1. **Conexión Remota:** Se desarrolló una interfaz gráfica para el monitoreo de los sensores y el control de un simulador de un módulo de

3.3 Módulo de aceleración y frenado

niveles de riesgo. Esto se detalla en la sección 3.8.

2. **Adquisición de Datos e Instrumentación:** Se desarrolló código en python y arduino para el guardado de los datos y la adquisición de los valores sensados:
 - Se adquieren los valores de velocidad y distancia con el IMU/GPS mediante arduino utilizando el microcontrolador ATMEGA 2560, descrito en la sección 3.9.1.
 - Se adquieren los valores del voltaje del pedal del acelerador mediante arduino utilizando el microcontrolador ATMEGA 2560, descrito en la sección ??.
 - Se adquieren los valores de posición del actuaor del acelerador y freno en los ultrasónicos mediante arduino utilizando el microcontrolador MEGA 2560.
 - Se envían los valores capturados por el ATMEGA 2560 al ESP32, descrito en la sección 3.9.1.
 - Se adquieren los valores del sensor SCT-013-100 mediante arduino utilizando el microcontrolador ESP32, descrito en la sección 3.9.2.
 - Se envían los valores de niveles de riesgo mediante arduino utilizando el microcontrolador ESP32 simulando un módulo de medición de riesgos, descrito en la sección 3.9.2.
3. **Lógica Difusa:** Modelos para los sensores de encendido y apagado de los actuadores 3.10.
4. **Validación:** Asegura que los datos sean leídos correctamente y que los sensores y actuadores estén operando dentro de los rangos correctos para un funcionamiento adecuado de la navegación asistida 3.11.

3.3. Módulo de aceleración y frenado

El sistema de actuadores se divide en dos partes. La primera es el diseño y construcción de una base que permita montar los actuadores. La segunda consiste en la selección del actuador adecuado para realizar las funciones de acelerar, desacelerar, frenar y liberar el freno.

3.3 Módulo de aceleración y frenado

3.3.1. Base de los actuadores

La base de los actuadores se colocó entre el asiento del conductor y los pedales del acelerador. La figura 3.3 muestra la base fabricada con perfil tubular cuadrado de PTR de 1 pulgada. La vista frontal y trasera de la base destacan sus dimensiones de ancho y altura. En la vista frontal se pueden observar dos soportes, mientras que en la trasera se ven otros dos, los cuales están en contacto directo con el piso del VE. La vista superior e inferior muestran tanto el ancho como el largo de la base. En la vista inferior, se aprecia una solera de 4 mm de espesor en el lado derecho, con una perforación de 8 mm de diámetro. Esta solera se utiliza para mantener la base fija y evitar que gire debido al movimiento de los actuadores. En la vista superior se señala la posición de la perforación donde se coloca el actuador del freno en la parte superior de la base. Finalmente, las vistas laterales muestran la ubicación de la solera que evita la rotación de la base, la cual se fija a un soporte del asiento del conductor. En la vista lateral izquierda, se observa una perforación de 8 mm para el actuador del acelerador.

3.3.2. Actuadores

Para cumplir con las dimensiones requeridas entre la base y los mecanismos de aceleración y frenado, se necesita un actuador que pueda extenderse hasta 30 *cm*. Por ello, se eligió un actuador lineal de 12 *V* y 4.6 *A*, como se muestra en la figura 3.4. Este actuador tiene una longitud máxima de 20.5 *cm* cuando está completamente extendido y una longitud mínima de 15.5 *cm* cuando está contraído. Opera a una velocidad de 0.010 $\frac{m}{s}$ y soporta una carga máxima de 1500 *N*. Para permitir que cada actuador presione los pedales adecuadamente, se agregó una solera de 10 *cm*. Esta solera facilita la acción de presionar el pedal y asegura que el actuador inicie el proceso de aceleración o frenado al ser activado.

3.4 Sensores

3.4.1. Sensor de corriente

La medición de la corriente alterna suministrada al motor es fundamental para evaluar su correcto funcionamiento. Para este propósito, se utilizaron 3 sensores SCT-013-100, como se muestra en la figura 3.5. Este sensor funciona como un transformador: en su devanado primario mide corrientes de hasta 100 A , por donde circula la corriente alta, y en su devanado secundario transforma esa alta corriente en un rango de 0 a 50 mA . La corriente que sale del secundario es alterna. En la siguiente sección se explicará el circuito que interpreta la señal emitida por el sensor y cómo puede ser leída como una señal de voltaje analógico en un controlador.

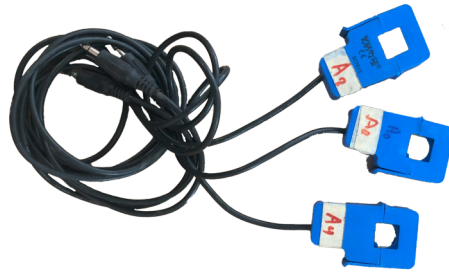


Figura 3.5: Sensor SCT-013-100

3.4.2. Sensor ultrasónico

Se utilizaron dos sensores ultrasónicos del tipo HC-SR04, como el mostrado en la figura 3.6. Este sensor funciona emitiendo ondas ultrasónicas que rebotan en los objetos dentro de su rango de operación y regresan al sensor, lo que permite medir la distancia entre el sensor y el objeto. El rango de medición de estos sensores es de 1.7 a 40 cm. Los sensores están ubicados en la base de los actuadores para medir hasta 5 cm de extensión de cada uno. Además, se ha colocado una pared para que las ondas emitidas por el sensor reboten en ella, capturando con precisión la posición del actuador cuando está extendido.

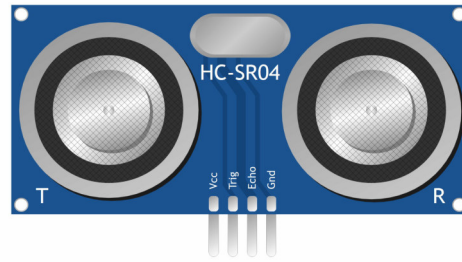


Figura 3.6: Sensor ultrasónicos HC-SR04

3.4.3. IMU/GPS

El sensor IMU/GPS se utiliza principalmente para medir la inclinación y los movimientos del vehículo, así como para su geolocalización mediante GPS. En este caso, se empleó un dispositivo IMU/GPS de la compañía WitMotion, modelo WTGAHRS1, como se muestra en la figura 3.7. De todos los datos que este dispositivo puede proporcionar, se utilizó principalmente la medición de la velocidad del vehículo. La adquisición de datos se realizó a través del protocolo de comunicación TTL y el protocolo GPS NMEA0183. Este sensor opera con una alimentación de 3.3 a 5 V, consume un máximo de 40 mA, y tiene una frecuencia de salida que varía entre 0.2 y 200 Hz. La velocidad de transmisión es de 9600 (por defecto), con una precisión de posición de 2.5 m, una precisión de velocidad de $0.36 \frac{Km}{h}$, y una velocidad máxima de $1854 \frac{Km}{h}$.



Figura 3.7: Sensor IMU/GPS

3.5 Circuito electrónico

3.4.4. Voltaje del Pedal

El pedal del acelerador en los vehículos envía una señal al módulo de control del motor, que luego acciona el motor para que el vehículo avance. El funcionamiento del acelerador varía según el modelo, y en este caso, se utilizó un acelerador que opera como un divisor de voltaje mediante un potenciómetro. Este potenciómetro ajusta el voltaje que transmite el acelerador para proporcionar corriente al motor. El sistema se alimenta con 5 V y su rango de operación es de 1.2 a 4.2 V, donde 1.2 V corresponde a una ligera presión del pedal y 4.2 V a cuando el pedal está completamente presionado. Para interpretar estos valores de voltaje como entrada, se decidió tomar el voltaje como una señal analógica y convertirla en una señal digital, que será leída por la entrada del controlador ATMEGA 2560, del cual se habla en la sección 3.6.2.

3.5. Circuito electrónico

El circuito electrónico utilizado se muestra en la figura 3.8. Este circuito funciona como sistema de control, alimentación y adquisición de datos de los diferentes componentes para la asistencia del VE. Se divide en 4 bloques, los cuales se detallarán en las secciones de microcontroladores 3.6 y adquisición de datos de sensores 3.7. El primer bloque trata sobre el controlador ATmega2560, el cual gestiona la conexión de los dos sensores ultrasónicos, la IMU/GPS y la lectura de voltaje del acelerador al microcontrolador, así como la transferencia de datos que realiza. El segundo bloque se refiere al microcontrolador ESP32, encargado de recibir los datos de los sensores de corriente del microcontrolador anterior, mostrando los sensores conectados y las señales que envía y recibe. El tercer bloque trata sobre el circuito desarrollado para la adquisición de datos del sensor SCT-013-100. El cuarto bloque corresponde al control de los relevadores para encender o apagar los actuadores lineales responsables de la aceleración y frenado.

3.6 Microcontrolador

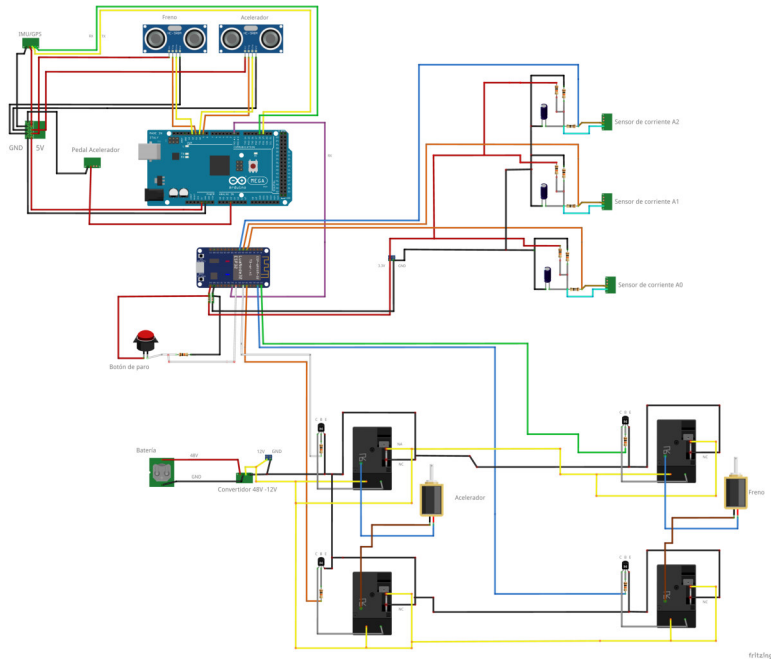


Figura 3.8: Circuito electrónico

3.6. Microcontrolador

El control de un sistema requiere el uso de microcontroladores, que actúan como pequeñas computadoras encargadas de procesar los datos obtenidos de los sensores del sistema y activar los actuadores para realizar un proceso específico. Para que un microcontrolador funcione correctamente en un sistema, es necesario el desarrollo de software utilizando un lenguaje de programación adecuado para dicho microcontrolador. Se trabajó con dos microcontroladores, el ESP32 y el ATMEGA 2560, cada uno con características diferentes que aportan beneficios específicos al proyecto.

3.6.1. ESP32

La tarjeta de desarrollo ESP32 desarrollada por Espressif Systems [49] con un sistema en chip. Este dispositivo cuenta con las características descritas en la tabla 3.1.

3.6 Microcontrolador

Características	
Conectividad	Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2
Procesador	Dual-core Xtensa LX6
Velocidad	240 MHz
Memoria	520 KB de SRAM
Entradas/Salidas	30 Pines (GPIO, ADCs, DACs, SPI, I2C, UART)
Alimentación/Corriente	3.3 V/500 mA

Tabla 3.1: Características básicas de la tarjeta desarrollo ESP32

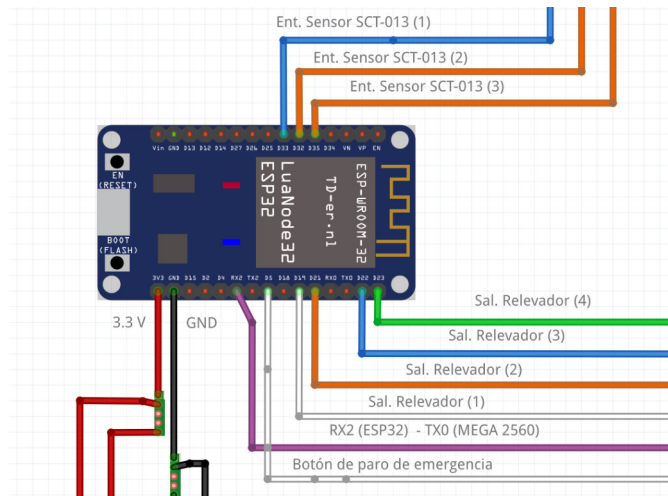


Figura 3.9: Diagrama de conexión de la tarjeta desarrollo ESP32

La tarjeta de desarrollo ESP32 se utilizó para varias funciones clave en el proyecto y en la figura 3.9 se muestra las conexiones del ESP32. Una de sus principales tareas fue la adquisición de los datos del sensor SCT-013-100, como se describe en la sección 3.4.1. Estas lecturas fueron procesadas a través del circuito implementado en la sección 3.7.1, que convierte la señal analógica para su posterior análisis. Las señales ingresan al ESP32 por los

3.6 Microcontrolador

pinos 32, 33 y 35, y su procesamiento se detalla en la sección 3.9.2. Otra función importante del ESP32 es la recepción de la señal digital de paro de emergencia, que llega al pin 5 a través de un botón con configuración pull-up. Cuando se presiona este botón, se envía un 1 , lo que reinicia el sistema; al soltarlo, el sistema retoma su operación normal, el procesamiento del botón se describe en la sección 3.9.2.

La tarjeta de desarrollo ESP32 también recibe datos enviados desde la tarjeta de desarrollo ATMEGA 2560 por el pin TX2. Estos datos son fundamentales para el control de los actuadores, lo cual se explica en detalle en la sección 3.9.1. Adicionalmente, el ESP32 controla la activación de los actuadores mediante cuatro relés conectados a los pines 19, 21, 22, y 23. Estos relés permiten el cambio de polaridad y el encendido del motor, como se describe en la sección 3.9.2. Por último, el ESP32 actúa como un servidor web que transmite información a una IP y funciona como una interfaz gráfica para el monitoreo y simulación del proyecto de tesis. Este aspecto se discute más a fondo en la sección 3.8.

3.6.2. ATMEGA 2560

La tarjeta de desarrollo arduino Mega 2560 es un microcontrolador desarrollado por Arduino [50]. Este dispositivo cuenta con las siguientes características que se muestran en la tabla 3.2.

3.6 Microcontrolador

Características	
Procesador	ATmega2560
Velocidad	16 MHz
Memoria	8 KB de SRAM
Entradas/Salidas	54 pines (PWM, entradas analógicas, UART, SPI e I2C)
Alimentación/Corriente	5 V/50 mA

Tabla 3.2: Características básicas de la tarjeta de desarrollo arduino MEGA 2560

La tarjeta de desarrollo arduino Mega 2560 se utilizó para varias funciones clave en el proyecto y en la figura 3.10 se muestra las conexiones.

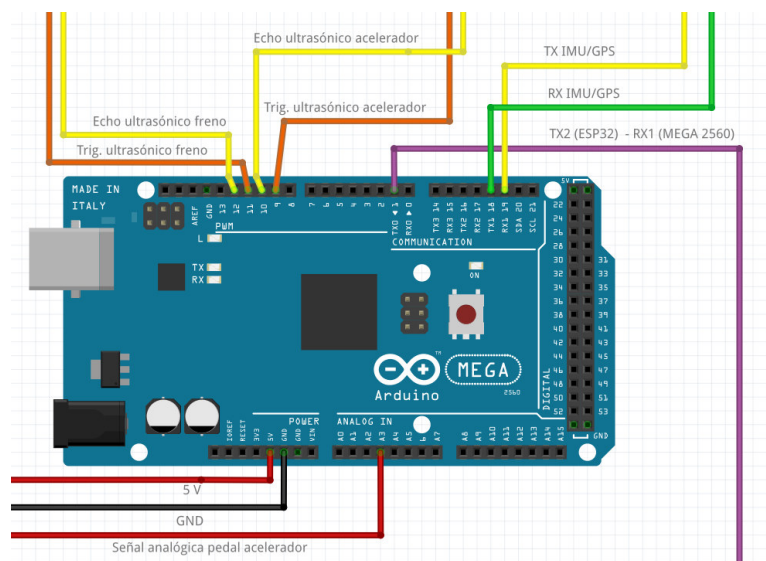


Figura 3.10: Diagrama de conexión de la tarjeta de desarrollo arduino MEGA 2560

La tarjeta de desarrollo arduino MEGA 2560 tiene varias funciones importantes. Entre ellas, se encarga de recibir y enviar datos al dispositivo

3.7 Adquisición de datos (Sensores)

IMU/GPS mencionado en la sección 3.4.3. La configuración e inicialización de este dispositivo se realiza mediante el SDK de WitMotion, como se detalla en la sección 3.9.1. La transmisión y recepción de datos se lleva a cabo a través de los pines TX1 y RX1 del ATMEGA 2560. Otra función clave es el procesamiento de las distancias medidas por los sensores ultrasónicos, que corresponden al acelerador y al freno. El pin 9 y el pin 10 están conectados al sensor ultrasónico del acelerador, mientras que el pin 11 y el pin 12 se utilizan para el sensor del freno. El procesamiento de estos datos. El ATMEGA 2560 también recibe un valor a través de su pin analógico, el cual es convertido a valor digital, como se describe en la sección ???. Finalmente, el pin TX0 se utiliza para enviar los datos de interés, incluyendo la información extraída de la IMU/GPS, las distancias medidas por los sensores ultrasónicos, y el valor de voltaje del pedal del acelerador.

3.7. Adquisición de datos (Sensores)

En este proyecto, fue necesario diseñar circuitos electrónicos que gestionan el procesamiento de las señales de los sensores y suministran la energía adecuada para su funcionamiento. Además, se desarrolló un sistema electrónico específico para el control eficiente de los actuadores.

3.7.1. Circuito para el sensor SCT-013-100

Se requirió desarrollar un circuito para la medición del voltaje ha analizar, ya que el sensor únicamente entrega corriente, mientras que el ESP32 solo puede leer señales analógicas o digitales. Por lo tanto, se utilizó el circuito de adquisición de datos de [51], que se muestra en la figura 3.11. Este circuito emplea una resistencia de carga de 18Ω para obtener el valor de tensión, donde una de las salidas de la resistencia se conecta al ESP32. La otra salida se conecta a la resistencia de carga compuesto por dos resistencias de $10 K\Omega$, el capacitor se utilizó para reducir el ruido en la señal analógica. Además, se ha añadido un capacitor de $10 \mu F$ para filtrar aún más el ruido. Esta configuración se repite tres veces, una para cada uno de los tres sensores instalados en el motor trifásico. El circuito se alimenta con $3.3 V$, y las señales de los sensores se envían a los pines 32, 33 y 35 del ESP32.

3.7 Adquisición de datos (Sensores)

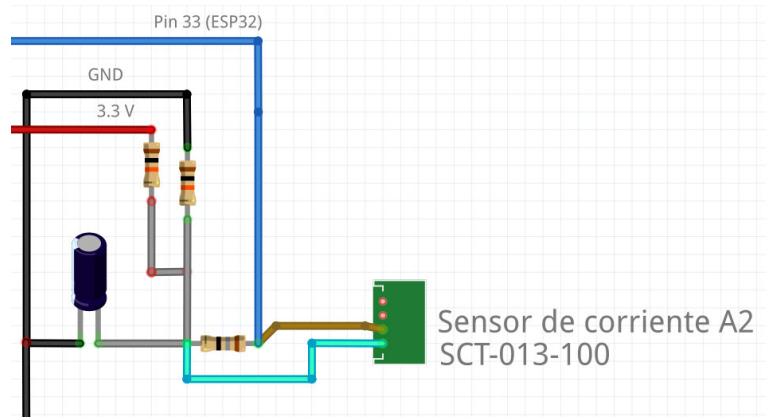


Figura 3.11: Circuito para la adquisición de datos de un sensor SCT-013-100

3.7.2. Circuito para el control de actuadores

Se desarrolló un circuito para controlar los actuadores, el ESP32 envía las señales para encender o apagar los actuadores. Es importante tener en cuenta que los actuadores son eléctricos, por lo que es necesario realizar cambios de polaridad en su alimentación para que puedan contraerse o extenderse. El circuito diseñado se muestra en la figura 3.12. Para esto, se utilizó el transistor 2N2222 como un interruptor de encendido y apagado, lo que permite cerrar el circuito cuando se recibe una señal en la base. El transistor tiene la configuración de emisor común en el ESP32 y el colector va a la entrada de un relevador mecánico. Cuando se envía la señal a la base, el circuito se cierra y activa el relevador. Este se encuentra conectado a una fuente de 12 V, el común del relé va a uno de los dos cables de alimentación del actuador, y los pines de normalmente abierto y normalmente cerrado están conectados a GND y 12 V, respectivamente.

3.7 Adquisición de datos (Sensores)

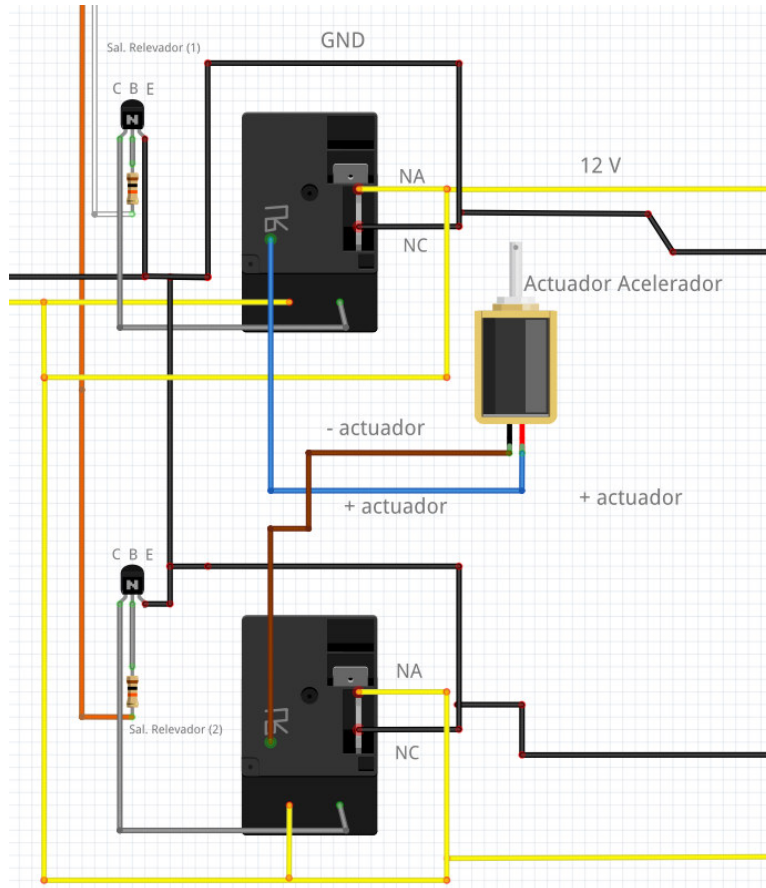


Figura 3.12: Circuito para la activación y desactivación del actuador

Lo anterior describe solo el diseño necesario para cambiar entre 12 V y GND. Para invertir la polaridad y controlar completamente el actuador, se debe duplicar el circuito. La lógica booleana, como se muestra en la tabla 3.3, ilustra cuándo y cómo se extiende o contrae el actuador.

3.7.3. Circuito para la alimentación de los sensores

Se diseñó un circuito con solo dos líneas: una para el voltaje de 5 V y otra para GND. Este circuito se utiliza para alimentar la IMU/GPS y los dos sensores ultrasónicos, utilizando el voltaje y la conexión a tierra (GND) del ATMEGA 2560.

3.8 Interfaz de control y monitoreo

Señal 1	Señal 2	Acción
0	0	Inactivo
0	1	Extender
1	0	Contraer
1	1	Inactivo

Tabla 3.3: Características básicas del ESP32

3.8. Interfaz de control y monitoreo

Una interfaz gráfica ayuda al usuario a visualizar de mejor forma lo que está sucediendo en el sistema, en lugar de simplemente ver números en una pantalla negra. Por esta razón, se propuso mostrar datos de los sensores y el control del vehículo mediante una interfaz gráfica. Esta interfaz también funciona como un simulador de los niveles de riesgo, lo cual suple a un módulo de visión para este trabajo. La interfaz gráfica, como se muestra en la figura 3.13, se diseñó en un servidor web utilizando el ESP32 programado con HTML.



Figura 3.13: Interfaz de monitoreo y control del VE

3.8 Interfaz de control y monitoreo

3.8.1. Botones

Esta interfaz gráfica incluye botones, barras de progreso, etiquetas e indicadores de encendido y apagado. Tiene 7 botones. Los primeros botones pertenecen al sistema: el botón de inicio ejecuta las acciones de los actuadores, el botón reiniciar contrae los actuadores en caso de fallos durante las pruebas, y el botón de freno de emergencia detiene el vehículo si no responde correctamente. Los siguientes cuatro botones están relacionados con los niveles de riesgo y ejecutan las siguientes acciones al ser activados:

- **Sin riesgo:** Indica que no hay ningún obstáculo frente al vehículo en un rango determinado. Al activarse, cambia a color verde, y la acción es presionar el acelerador hasta el fondo sin presionar el freno.
- **Advertencia:** Indica la presencia de un obstáculo lejano al vehículo. Al activarse, cambia a amarillo, y la acción que realiza es retroceder el pedal del acelerador 2 cm y presionar el pedal de freno 2 cm.
- **Emergencia:** Indica que un obstáculo se está acercando al vehículo. Al activarse, cambia a naranja, y la acción que realiza es retroceder el pedal del acelerador 4 cm y presionar el pedal de freno 4 cm.
- **Peligro:** Indica la proximidad de un obstáculo muy cerca del vehículo. Al activarse, cambia a rojo, y la acción que realiza es retroceder el pedal del acelerador 6 cm (dejándolo sin presión) y presionar el pedal de freno 6 cm hasta el fondo.

Estos niveles se determinan mediante un módulo de visión, pero para este trabajo se simulan mediante los botones mencionados anteriormente.

3.8.2. Barras de progreso

Se han establecido 10 barras de progreso para mostrar de manera gráfica y numérica los valores recibidos por el servidor web desde el ESP32. Todos los datos se actualizan segundo a segundo en la interfaz. Cada barra de progreso está marcada con cuatro colores distintos que indican la proximidad del valor medido al rango operativo deseado: verde para valores dentro del primer cuarto del rango, amarillo para el segundo cuarto, naranja para el tercer cuarto, y rojo para la parte final del rango. Los parámetros medidos y sus respectivos rangos son los siguientes: distancia (0–10m), voltaje (0–5V), corrientes Irms1, Irms2, e Irms3 (0–100A cada una), actuador A (5–10cm),

3.9 Lectura y Procesamiento de Datos

actuador F (10 – 15cm), y distancia de frenado/tiempo de frenado (suma del tiempo y la distancia necesarios para frenar el vehículo).

3.8.3. Funcionamiento de la interfaz gráfica

La interfaz del sistema se conecta inicialmente a través de la dirección IP del ESP32. Una vez establecida la conexión, la interfaz gráfica comienza a mostrar los valores en las barras de progreso. Sin embargo, no se ejecutan acciones en el VE hasta que se presiona el botón *Iniciar pruebas*. Al activar las pruebas, el ESP32 queda a la espera de recibir una señal correspondiente a uno de los niveles de riesgo: sin riesgo, advertencia, emergencia o peligro. Dependiendo de la señal recibida, el vehículo actúa en consecuencia, ajustando su comportamiento según los datos proporcionados por los sensores y el nivel de riesgo detectado. El sistema puede detenerse de varias formas: presionando nuevamente el botón *Iniciar pruebas*, mediante el botón de reinicio o activando el freno de emergencia. En las siguientes subsecciones, se detallarán las características y funcionalidades de la interfaz.

3.9. Lectura y Procesamiento de Datos

La lectura y el procesamiento de los datos son aspectos fundamentales en este trabajo, ya que permiten obtener la información necesaria para operar el sistema. Además, son esenciales para la comunicación entre microcontroladores, facilitando el análisis y la ejecución de las acciones correspondientes. En esta sección se detalla este proceso de la siguiente manera: primero, se describen los datos que el ATMEGA2560 y el ESP32 leen, procesan y envían. Luego, se explica cómo los datos son recibidos, procesados y enviados por el sistema, asegurando una interacción eficiente entre los microcontroladores.

3.9.1. Tarjeta de desarrollo arduino MEGA 2560

IMU/GPS

La IMU/GPS es responsable de medir la velocidad del vehículo. Estos datos se obtienen mediante un SDK desarrollado por WitMotion para los sistemas de arduino [52]. El sensor se conecta a los pines 18 (TX1) y 19

3.9 Lectura y Procesamiento de Datos

(RX1) del ATMEGA 2560, y el código asociado se encarga de inicializar el sensor y transmitir los datos. Para este trabajo, el código fue modificado para que únicamente enviara la información de la velocidad y el número de satélites. A partir de estos datos, se calcula la distancia recorrida multiplicando la velocidad muestreada obtenida desde la IMU/GPS por el tiempo de muestreo del ATMEGA 2560. El voltaje del pedal del acelerador se decidió leer a través del pin analógico número 3 del ATMEGA2560, ya que el rango de operación del acelerador es de 0 a 5 V, y este pin puede medir dentro de ese rango. Utilizando el convertidor analógico-digital de 10 bits del microcontrolador, se pueden obtener valores precisos de voltaje de entrada. Para convertir el voltaje a decimal, el valor leído por el sensor, se emplea la siguiente ecuación:

$$\text{voltaje} = \text{valor del sensor} * \frac{5V}{1023} \quad (3.1)$$

Sensor ultrasónico

El sensor ultrasónico se utilizó para medir la distancia recorrida por el pistón, utilizando la emisión y recepción de sonido. El emisor (trig) envía un pulso de sonido que rebota en una pared colocada al final del recorrido del pistón y luego regresa al receptor (echo). El tiempo que tarda el pulso en viajar de ida y vuelta se emplea para calcular la distancia, considerando la velocidad del sonido en el aire, que es aproximadamente $343 \frac{m}{s}$. Para realizar la medición, se envía un pulso de 10 microsegundos desde el trig, y al regresar, el pulso se convierte en una señal digital que es procesada por el ATMEGA2560. La distancia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{distancia} = \text{tiempo} * \frac{343 \frac{Km}{s}}{2} \quad (3.2)$$

Este proceso se aplica a los dos sensores ultrasónicos, proporcionando la distancia recorrida por los actuadores del acelerador y del freno.

3.9 Lectura y Procesamiento de Datos

Envío de datos

Se utilizó un formato específico para enviar los datos procesados por el ATMEGA2560 al ESP32, con el fin de que este último los analice y los combine con otros datos que también captura. La cadena de caracteres enviada está formada por las siguientes variables: el número de satélites detectados, la distancia recorrida en un segundo, la velocidad medida por el GPS, el voltaje del acelerador, la distancia del actuador del acelerador, y la distancia del actuador del freno. Cada variable en la cadena de caracteres está separada por comas para facilitar su identificación. A continuación, se muestra un ejemplo de la cadena enviada: 9, 1.5, 10.0, 2.8, 7, 10 En este ejemplo:

- **9** : número de satélites detectados.
- **1.5** : distancia recorrida en un segundo.
- **10** : velocidad registrada por el GPS.
- **2.8** : voltaje del pedal del acelerador.
- **7** : distancia del actuador del acelerador.
- **10** : distancia del actuador del freno.

Esta información es transmitida a través del pin 1 (TX) del ATMEGA2560.

3.9.2. ESP32

Recepción de datos

El ESP32 recibe los datos a través del pin 16 (RX), con una cadena que es la misma enviada por el ATMEGA2560. Esta cadena es procesada para separar los valores, que luego se almacenan en variables de acuerdo a su tipo de dato. Los datos como el número de satélites, la distancia del actuador del acelerador y la distancia del actuador del freno se almacenan como enteros, mientras que la distancia recorrida, la velocidad registrada por el GPS y el voltaje del acelerador se guardan como flotantes. Estos datos formarán parte de una nueva cadena que el ESP32 generará a medida que adquiera más información. Esta cadena será utilizada durante las pruebas y para enviar los datos al servidor web.

Procesamiento del SCT-013-100

El sensor de corriente SCT-013-100 entrega un voltaje analógico, que es procesado mediante un circuito para ser leído por un pin analógico del ESP32. En este caso, se utilizan los pines 33 para el sensor 1, 32 para el sensor 2 y 35 para el sensor 3. Para la lectura de los datos, se emplea una librería específica para la extracción de los valores correspondientes a la corriente [53]. La librería ofrece una función que permite calcular la corriente, y se crean tres objetos para cada sensor. Para el cálculo de la corriente se usan dos funciones principales. La primera es `current(pin, calibración)`, donde el parámetro `pin` debe ser un pin analógico, y el valor de calibración inicial recomendado es 101. Luego, se ajusta la calibración utilizando la ecuación 3.3 para obtener valores cercanos a los reales, el valor real se mide mediante un voltímetro. La segunda función es `calcIrms(número de muestras)`, a la cual se le pasa el número de muestras que se analizarán para obtener un cálculo aproximado de la corriente.

$$\text{calibración} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor muestreado}} * \text{Valor de calibración} \quad (3.3)$$

Boton paro de emergencia

El botón de paro de emergencia está conectado al pin 5, configurado como una entrada digital (1 o 0). Este botón actúa como un condicional en varias partes del código, permitiendo bloquear ciertos procesos, como la extensión de los actuadores o la interrupción del envío de datos a la interfaz gráfica.

Salida relevadores actuadores

La activación de los relevadores depende completamente del modelo de lógica difusa, ya que todos los datos leídos por los sensores conectados al ATMEGA2560 y al ESP32 se ingresan en el sistema de lógica difusa. Estos datos son analizados, y a través de las reglas predefinidas, se decide si el actuador debe extenderse o contraerse, ya sea para el acelerador o el freno.

3.9 Lectura y Procesamiento de Datos

Estos valores son corroborados mediante condicionales, los cuales garantizan que el actuador alcance la posición deseada, ya sea extendiéndose o contrayéndose. Para llevar a cabo estas acciones, se crearon funciones que determinan si el ESP32 debe enviar una señal de activación o no. Las acciones específicas que realiza el sistema se explican en la sección 3.11. Una vez que las variables son validadas, el siguiente paso es desactivar los actuadores para mantener su posición establecida.

Interfaz gráfica y monitor serial

La interfaz gráfica funciona a través de dos librerías de Arduino: `Wifi.h`, que habilita la conexión Wi-Fi integrada en el ESP32, y `WebServer.h`, que se encarga de establecer la conexión con el servidor web, mostrar el diseño de la página, enviar datos y recibir valores para su visualización. La interfaz gráfica envía los valores de los botones. Inicialmente, todos los botones tienen valores preestablecidos que indican su estado apagado. Estos valores se almacenan en una variable cada 10 ms, y cuando se cambia el estado de alguno de los botones, el valor de las variables correspondientes se actualiza al valor de encendido. En la siguiente tabla 3.4 se muestran los valores de cada botón en sus dos estados:

3.9 Lectura y Procesamiento de Datos

Boton	Valor inicial	Valor presionado
Iniciar prueba	0	1
Reiniciar	0	1
Freno emergencia	0	1
Sin riesgo	5	1
Advertencia	5	2
Emergencia	5	3
Peligro	5	4

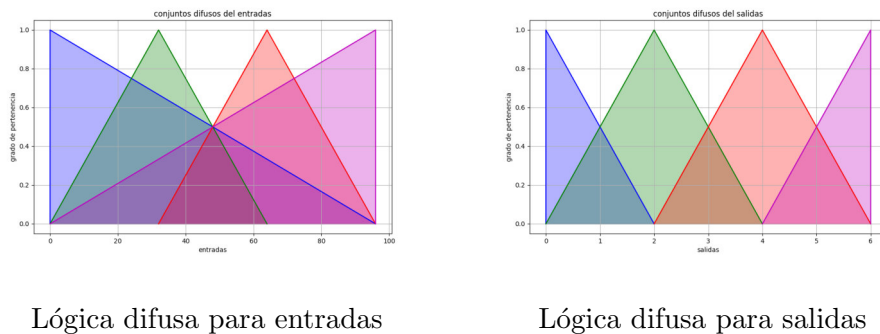
Tabla 3.4: Valores de los botones del servidor web

Procesamiento interno

Cuando se presiona el botón de peligro, se activa una condicional que permite calcular el tiempo y la distancia recorrida por el vehículo hasta que su velocidad llega a 0. Una vez que el vehículo se detiene, los valores de tiempo y distancia se almacenan en variables, que luego se envían al ESP32. Con todas las variables capturadas y analizadas, se genera una nueva cadena de datos para su posterior análisis en las pruebas. Esta cadena se transmite a través del monitor serial del ESP32 e incluye las siguientes variables: número de satélites, distancia recorrida, velocidad, voltaje del pedal del acelerador, corriente del sensor 1, corriente del sensor 2, corriente del sensor 3, distancia del actuador del acelerador, distancia del actuador del freno, tiempo de frenado, distancia de frenado, salida lógica difusa del acelerador, salida lógica difusa del freno, botón sin riesgo, botón de advertencia, botón de emergencia, botón de peligro, estado del último botón presionado y botón de paro de emergencia. Esta cadena se envía al monitor serial para llevar a cabo las pruebas. El programa desarrollado para estas pruebas es sencillo: captura los datos del serial, los guarda y los envía a un archivo CSV. Este proceso se repite hasta que finalicen las pruebas.

3.10. Modelado de Lógica Difusa

Se utilizó un modelo de lógica difusa porque la activación de los actuadores debe realizarse de manera gradual y no de forma binaria. Este modelo recibe como entradas las variables de los sensores, tal como se muestra en la figura 3.14. La salida del modelo corresponde a la posición en la que los actuadores deben situarse, lo cual también se ilustra en la figura 3.14.



Lógica difusa para entradas

Lógica difusa para salidas

Figura 3.14: Modelos de lógica difusa

El modelo de lógica difusa está compuesto por cuatro funciones de membresía de tipo triangular, elegidas debido a los niveles de riesgo que deben ser evaluados. En la tabla 3.5 se muestran los rangos de cada sensor y a qué función triangular pertenecen. Se decidió dividir el rango en cuatro secciones continuas para determinar el nivel en el que se encuentra cada variable.

3.10 Modelado de Lógica Difusa

Variables	Sin riesgo	Advertencia	Emergencia	Peligro
Voltaje pedal acelerador	0.5 - 5	0.5 - 3.5	1.5 - 5	5 - 0.5
Niveles de riesgo	0 - 1	0 - 2	1 - 3	2 - 3
Velocidad	0 - 31	0 - 20	10 - 31	31 - 0
Fases	0 - 96	0 - 64	32 - 96	96 - 0
Freno	0 - 2	0 - 4	2 - 6	4 - 6
Acelerador	0 - 2	0 - 4	2 - 6	4 - 6

Tabla 3.5: Tabla de los rangos por variable acorde a los niveles de riesgo

Las reglas implementadas se establecieron en función del buen funcionamiento del VE. Esto significa que el muestreo de los sensores debe corresponder al nivel de riesgo en el que se encuentran los demás sensores. Se definieron reglas basadas en el nivel de riesgo y la pertenencia de los sensores a ese nivel, lo cual se muestra en la tabla 3.6.

3.10 Modelado de Lógica Difusa

Niv. riesgo	Voltaje	Velocidad	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Acelerador	Freno
0	0	0	0	0	0	0	6
0	1	0	0	0	0	6	0
0	1	5	16	16	16	6	0
1	0.4	0	0	0	0	0	6
1	0	0	0	0	0	0	6
1	1.5	15	48	48	48	4	2
2	1.6	11	33	33	33	2	4
2	3.5	30	95	95	95	2	4
2	2.7	25	80	80	80	2	4
3	0.6	0	0	0	0	0	6
3	2.5	15	45	45	45	0	6
3	4	30	96	96	96	0	6

Tabla 3.6: Acciones respecto a los niveles de riesgo

- **Regla 1:** Si el nivel de riesgo es *sin riesgo* y los sensores también están en este nivel, el acelerador se posiciona en 6 y el freno en 0.
- **Regla 2:** Si el nivel de riesgo es *advertencia* y los sensores corresponden a este nivel, el acelerador está en 4 y el freno en 2.
- **Regla 3:** Si el nivel de riesgo es *emergencia* y los sensores también, el acelerador se ajusta a 2 y el freno a 4.
- **Regla 4:** Si el nivel de riesgo es *peligro* y los sensores también, el acelerador se coloca en 0 y el freno en 6.
- **Regla 5:** Si en cualquiera de los cuatro niveles algún sensor no tiene pertenencia en el mismo nivel que los demás, el acelerador va a 0 y el freno a 6.

Finalmente, este modelo de lógica difusa se implementa en el ESP32 mediante la librería *Fuzzy.h*. Esta implementación se realiza en Arduino, y el microcontrolador es el encargado de procesar las entradas y salidas correspondientes para controlar los actuadores.

3.11. Validación

Para el proceso de validación, se establecieron una serie de condiciones que permiten ejecutar la función adecuada. Se desarrollaron cuatro funciones para el control del vehículo:

- **Presionar acelerar:** extiende el actuador del acelerador.
- **Liberar acelerador:** contrae el actuador del acelerador.
- **Presionar frenar:** extiende el actuador del freno.
- **Liberar freno:** contrae el actuador del freno.

Estas cuatro funciones se utilizan en el proceso de validación, y su ejecución depende del modelo de lógica difusa. Según la posición que entrega la lógica, se ejecutan las funciones correspondientes. Cuando el sensor ultrasónico detecta el mismo valor que proporcionó la lógica, se desactivan los actuadores, manteniéndolos en esa posición. Además, los sensores son parte integral de la validación. Como se explicó en la sección de lógica difusa 3.10, si alguno de los valores de los sensores está fuera del rango establecido, se activa la función de frenado y desaceleración. Este proceso se lleva a cabo de manera continua, lo que proporciona retroalimentación y valida el módulo de control.

3.12. Integración y Comunicación

Se estableció un tramo de camino recto en la zona de talleres para realizar todas las pruebas y experimentaciones. El sistema funciona de la siguiente manera: el circuito se alimenta con 48V provenientes de la batería del VE. Este voltaje pasa por un convertidor que lo reduce a 12V, el cual alimenta los relevadores y los actuadores. Durante las pruebas de experimentación, los microcontroladores están conectados a la computadora mediante un cable USB para adquirir datos que luego se analizan. En modo demostración, los microcontroladores se alimentan con una batería de 5V externa.

A continuación, se explica la integración de todos los componentes dentro del vehículo eléctrico, como se muestra en la figura 3.15. En primer lugar, se debe montar la base, los sensores ultrasónicos y los actuadores entre el asiento y los pedales del vehículo. Es importante que la base esté fijada al asiento para evitar movimientos durante las pruebas. Posteriormente, el

3.12 Integración y Comunicación

sistema de control desarrollado se debe colocar sobre una superficie plana que permita su manipulación con facilidad.

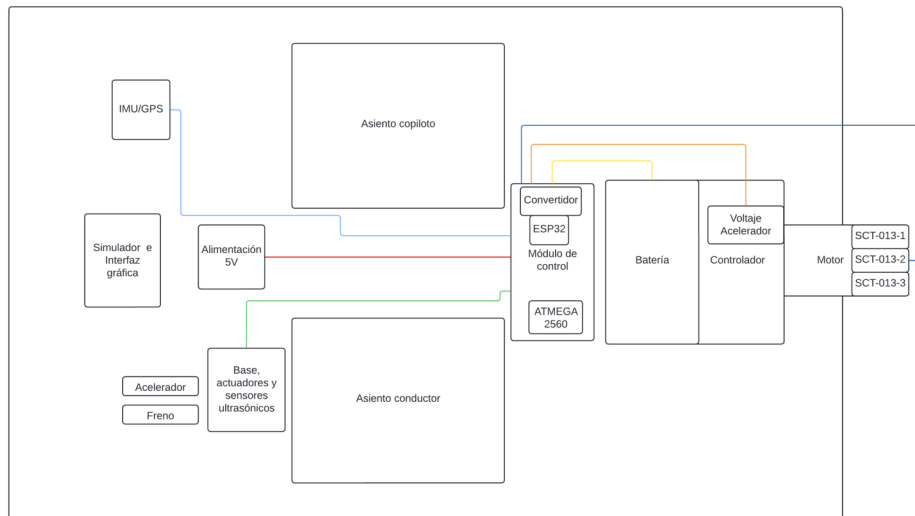


Figura 3.15: Diagrama de ubicación de los componentes en el vehículo

Luego, se conectan los actuadores al sistema de control, seguidos de los sensores de gancho magnético, los cuales se conectan tanto al sistema de control como a las tres fases del motor eléctrico. A continuación, se coloca la IMU/GPS en el tablero del vehículo y la antena en el techo, para luego conectar estos dispositivos a los pines del microcontrolador. Por último, se conectan en paralelo los cables que leen los valores de voltaje del pedal del acelerador.

En el siguiente capítulo se presentan los valores capturados por los sensores, para diferentes pruebas realizadas, con el circuito electrónico conectado al vehículo y fuera de él. También se muestra la conectividad para envío y recepción de datos desde la interfaz de internet para la activación de los diferentes niveles de riesgo establecidos.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del control de acciones derivado del análisis de los sensores y actuadores en relación con los niveles de riesgo establecidos para este trabajo de tesis. Las acciones que ejecutan los actuadores responden a los niveles: 1) sin riesgo; 2) advertencia; 3) emergencia; 4) peligro. Los valores de voltaje y corriente capturados del motor y los pedales de freno y acelerador, fueron caracterizados y modelados con un control difuso que reaccione a los estados de estas variables. Los diferentes resultados presentados aquí, fueron medidos desde la plataforma experimental del vehículo eléctrico que se tiene en la División de Ingenierías.

4.1. Plataforma experimental

La figura 4.1 muestra la plataforma experimental ensamblada desde cero, siguiendo una estructura básica similar a la de cualquier vehículo. Los componentes electromecánicos fueron medidos y caracterizados para el ajuste de un control difuso que selecciona las acciones a realizar para el frenado automático. El motor eléctrico trifásico es el componente principal que opera a 60V con una potencia nominal de 2500W; alcanza hasta 3420 revoluciones por minuto con carga y hasta 3800 sin carga. Mantiene un torque de 11 Newton metro y la corriente que demanda es de hasta 67.5 Amperes (A) con carga y de 7.5 A sin carga. Este motor es controlado por un interruptor que puede abrir o cerrar el flujo de corriente eléctrica. Además, el sistema

4.1 Plataforma experimental

incluye un inversor de voltaje que convierte la corriente directa de 48VDC a 60VAC en tres fases, permitiendo que el motor eléctrico sea alimentado correctamente. El controlador del sistema funciona a 48V y puede soportar hasta 150A. El controlador desempeña funciones esenciales en el sistema eléctrico de la plataforma experimental propuesta. Por un lado, regula la aceleración del vehículo en función del voltaje suministrado por el pedal del acelerador. A medida que el voltaje del pedal enviado al controlador del VE aumenta o disminuye, el controlador varía la corriente suministrada al motor para controlar las revoluciones por minuto (RPM). Además, el controlador también recibe una señal de entrada para cambiar la dirección del motor, permitiendo que el vehículo se desplace hacia adelante o hacia atrás según sea necesario. Finalmente, el sistema cuenta con el respaldo de una batería de litio de 48V con una capacidad de 150A por hora, que proporciona la energía necesaria para alimentar todos los componentes eléctricos del sistema.



Figura 4.1: Plataforma experimental para pruebas del control difuso.

Una vez descritos los componentes eléctricos que permiten la movilidad del motor, presentamos las graficas con las mediciones adquiridas y la toma de decisiones de acuerdo a cada estado de las variables de control.

4.2. Presentación de las mediciones

En las gráficas que se muestran como resultado del muestreo de los sensores y actuadores utilizados respecto al funcionamiento en dirección longitudinal del vehículo eléctrico. En las gráficas los ejes de referencia representan lo siguiente: el eje x es el número de muestras leídas, mientras que el eje y indica los valores de los sensores y actuadores medidos. Debajo de la gráfica, se incluye una tabla con los valores de los sensores utilizados, divididos por colores como se representan en las gráficas:

- **Fase 1:** en color verde oscuro, representa el valor de corriente alterna suministrada por el motor del vehículo en la terminal 1.
- **Fase 2:** en amarillo, representa el valor de corriente alterna suministrada por el motor del vehículo en la terminal 2.
- **Fase 3:** en morado, representa el valor de corriente alterna suministrada por el motor del vehículo en la terminal 3.
- **voltaje del pedal del acelerador:** en color cian, indica el voltaje que envía el pedal del acelerador al controlador.
- **Velocidad:** en color azul oscuro, muestra la velocidad en kilómetros por hora obtenidos por la GPS.
- **posición del pedal del acelerador:** en verde claro, representa la posición en centímetros en que se encuentra el actuador que controla el acelerador.
- **posición del pedal del freno:** en color naranja, representa la posición en centímetros en que se encuentra el actuador que controla el freno.

Cada una de estas mediciones es considerada una variable. A manera de ejemplo, se han marcado puntos de análisis en color rojo, indicados como “Ejemplo *nombre_de_la_variable*”, que serán explicados a detalle para los 4 casos de nivel de riesgo. Es importante mencionar que cada uno de los 4 casos son señales que se podría recibir mediante un sistema de visión compuesto de una cámara estereo y una tarjeta de procesamiento embebido para garantizar la autonomía vehículo y que pueda ser factible de instalar y hacer funcionar en tiempo real.

4.3. Resultados caso 1: Sin riesgo

En el nivel de “sin riesgo”, la acción que debe realizar el vehículo eléctrico es únicamente acelerar, ya que esta condición indica que no hay ningún obstáculo frente al vehículo. Una vez que se recibe esta situación, la acción que se lleva a cabo es la extensión del actuador que conecta con el acelerador, llevándolo hasta su posición máxima de 6 cm. Por otra parte, el actuador que controla el pedal del freno, se retrae completamente hasta 0 cm, dejando solo al acelerador en funcionamiento.

En la figura 4.2 se presentan las gráficas de los sensores y del actuador que controla el pedal del acelerador correspondientes al nivel de “sin riesgo”. Se puede observar que las lecturas de los datos permiten al vehículo acelerar y avanzar de manera controlada hasta alrededor de 25 *Km/hr*

Un primer punto de análisis que es importante resaltar se ubica en la muestra 11. En esta muestra los valores medidos son los siguientes: fase 1 = 44 A, fase 2 = 49.13 A, fase 3 = 53.2 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.938 V, posición del pedal del acelerador = 6 y velocidad = 5.093 *Km/hr*. Los sensores reportan valores dentro de la regla 1 correspondiente al nivel de “sin riesgo”. En consecuencia, el actuador que controla el pedal del acelerador comienza a extenderse, alcanzando una posición de 4 cm. El segundo punto de análisis colocado es correspondiente a la muestra 13, los valores son: fase 1 = 124.66 A, fase 2 = 118.27 A, fase 3 = 115.42 A, voltaje del pedal del acelerador = 2.407 V, posición del pedal del acelerador = 6 y velocidad = 10.223 *Km/hr*. Los sensores continúan indicando valores dentro de la regla 1 del nivel de “sin riesgo”, lo que permite un incremento continuo en la velocidad. En este caso, el actuador que controla el pedal del acelerador ya ha alcanzado su posición máxima de 6 cm, lo que explica el aumento observado en la velocidad del vehículo.

En el tercer punto de análisis, correspondiente a la muestra 23, los valores medidos son: fase 1 = 117.32 A, fase 2 = 117.61 A, fase 3 = 120.39 A, voltaje del pedal del acelerador = 2.583 V, posición del pedal del acelerador = nivel 6 y velocidad = 25.502 *Km/hr*. En este punto, los sensores de corriente alcanzan el límite máximo de lectura y permanecen en ese valor. La velocidad sigue incrementándose debido a la presión continua sobre el pedal del acelerador, pero el cambio en el voltaje del pedal del acelerador

4.3 Resultados caso 1: Sin riesgo

respecto al análisis previo es insignificante, como se observó en los dos primeros análisis. En este caso, el vehículo mantiene una velocidad constante, sin superar los 30 *Km/h*. Por lo tanto, se concluye que en este análisis se cumple adecuadamente la acción de acelerar.

4.3 Resultados caso 1: Sin riesgo

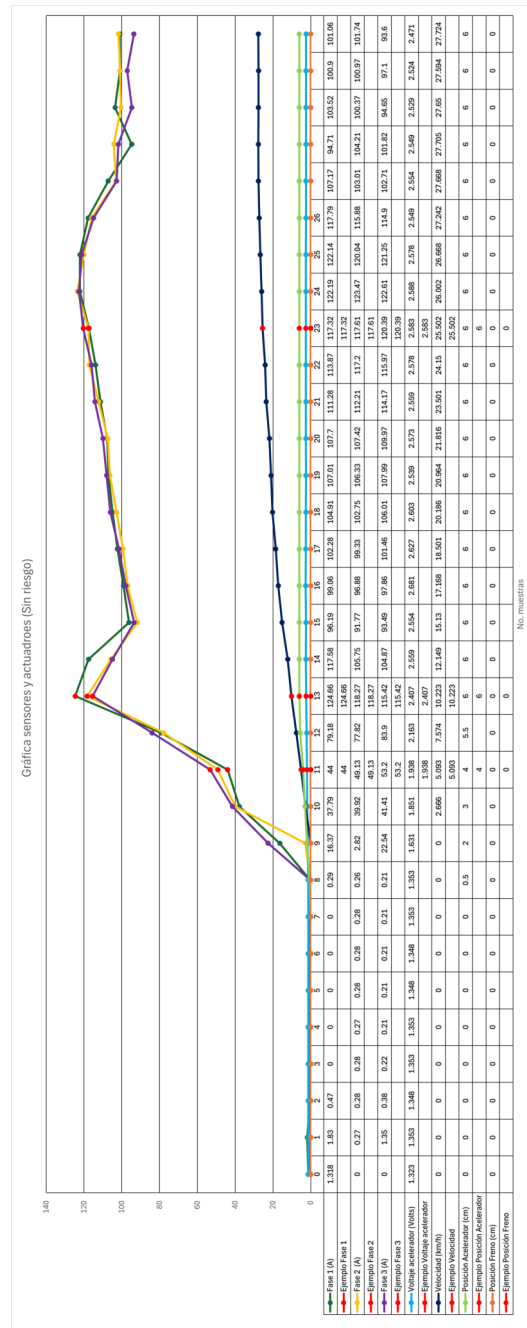


Figura 4.2: Grafica del funcionamiento del nivel sin riesgo respecto a las lecturas de los sensores

4.4. Resultados caso 2: Advertencia

En el nivel de “advertencia”, las acciones que deben realizarse sobre el vehículo eléctrico incluyen acelerar, desacelerar, frenar, no presionar el freno. Este estado indica que el sistema se encuentra en una condición de alerta, preparándose para una transición al nivel de emergencia si la proximidad del obstáculo aumenta, o al nivel de “sin riesgo” si el obstáculo no se visualiza en la trayectoria del vehículo. Para este caso se consideran diferentes condiciones del estado anterior, como pueden ser caer en el estado de advertencia si previamente estábamos en el caso “sin riesgo”.

De acuerdo con esas consideraciones los resultados encontrados son los siguientes. Si el estado previo era “sin riesgo” se detecta una condición de advertencia, el vehículo desacelera contrayendo 2 cm el actuador conectado al acelerador (dejándolo en 4 cm) y extendiendo 2 cm el actuador que controla el pedal del freno (situándolo en 2 cm). Una segunda prueba es, si el estado previo era “emergencia” se detecta una condición de “advertencia”, la acción es extender el acelerador 2 cm (alcanzando 4 cm) y contraer el freno 2 cm (quedando en 2 cm).

En la figura 4.3 se presentan las gráficas de los sensores y del actuador que controla el pedal del acelerador correspondientes al nivel de “advertencia”, ilustrando cómo las lecturas de los datos permiten al vehículo realizar las acciones necesarias para mantener un control seguro. En el primer punto de análisis, correspondiente a la muestra 8, los valores medidos son los siguientes: fase 1 = 84.7 A, fase 2 = 74.92 A, fase 3 = 76.94 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.945 V, posición del pedal del acelerador = 4 cm, posición del pedal del freno = 0 cm y velocidad = 5.093 *Km/hr*. En este punto, los sensores indican valores dentro de la regla 2 correspondiente al nivel de “sin riesgo”. Debido a ello, el actuador que controla el pedal del acelerador comienza a extenderse hasta 4 cm, mientras que el actuador que controla el pedal del freno permanece en 0 cm. Este comportamiento marca la transición del nivel de “sin riesgo” al nivel de “advertencia”.

En el segundo punto de análisis, correspondiente a la muestra 11, los valores son: fase 1 = 81.77 A, fase 2 = 81.7 A, fase 3 = 80.76 A, voltaje del pedal del acelerador = 2.338 V, posición del pedal del acelerador = 4 cm, posición del pedal del freno = 0 cm y velocidad = 10.297 *Km/hr*.

4.4 Resultados caso 2: Advertencia

Los sensores continúan mostrando valores dentro de la regla 2 para el nivel de “advertencia”, lo que permite que la velocidad permanezca constante, como se observa en el gráfico de velocidad respecto al punto anterior. En este estado, es posible una transición rápida hacia el nivel de “sin riesgo”, si las condiciones empeoran, hacia el nivel de “emergencia”.

En el tercer punto de análisis, correspondiente a la muestra 17, los valores medidos son: fase 1 = 2.48 A, fase 2 = 2.28 A, fase 3 = 2.15 A, voltaje del pedal del acelerador = 2.341 V, posición del pedal del acelerador = 2.5 cm, posición del pedal del freno = 2 cm y velocidad = 11.704 *Km/hr*. En este punto, la señal entra a la regla 3 para la señal de “emergencia”. Los valores de los sensores muestran cambios bruscos, saliendo de la regla 2 correspondiente al nivel de “advertencia”. La velocidad comienza a disminuir, junto con los valores de los sensores, indicando una desaceleración controlada del vehículo. Este comportamiento sugiere que el tiempo de frenado será reducido para detener completamente el vehículo en caso necesario.

Se concluye que, en el nivel de “advertencia”, el vehículo puede alternar entre acelerar y frenar en intervalos rápidos, dependiendo de las condiciones detectadas. Esto se refleja en el comportamiento dinámico de los actuadores, que se extienden y contraen en cuestión de segundos, ajustándose a las demandas del sistema para mantener un control seguro.

4.4 Resultados caso 2: Advertencia

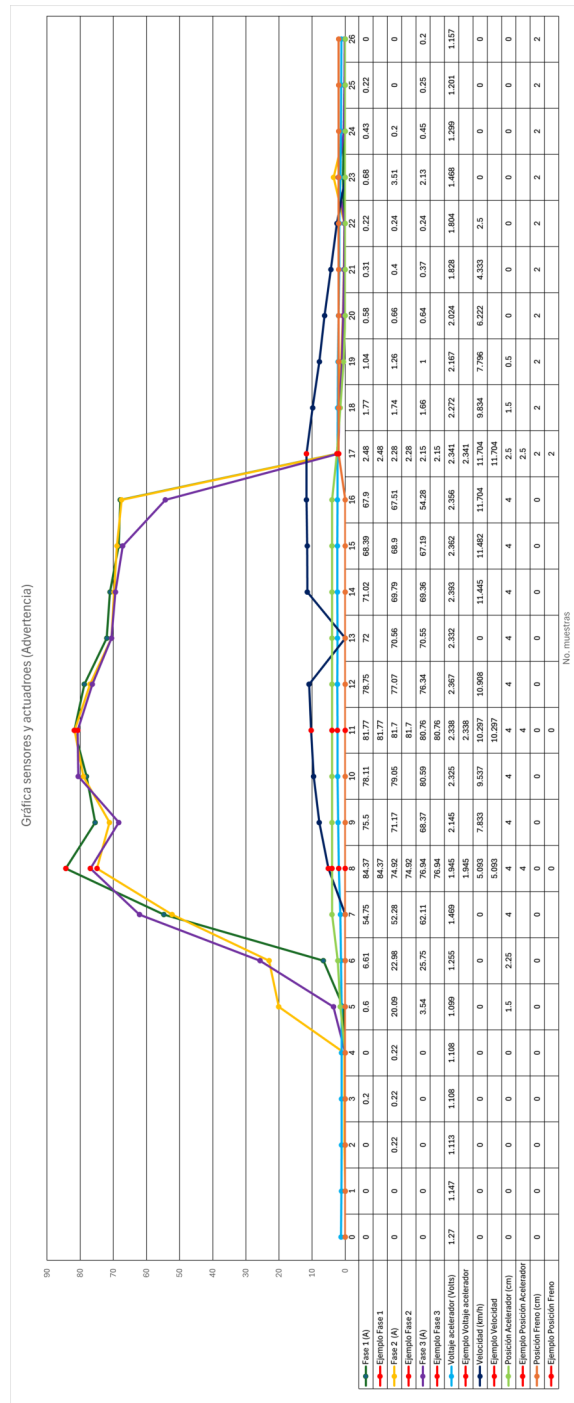


Figura 4.3: Gráfica del funcionamiento del nivel “advertencia” respecto a las lecturas de los sensores

4.5. Resultados caso 3: emergencia

En el nivel de “emergencia”, las acciones que realiza el vehículo eléctrico incluyen acelerar, desacelerar, frenar y no presionar el freno. Este nivel indica que el vehículo está preparándose para detenerse completamente debido a la detección de un obstáculo en su trayectoria.

Las situaciones analizadas en este caso son las siguientes. Si el estado anterior era “advertencia”, el actuador que controla el pedal del freno se extiende de 2 cm a 4 cm, mientras que el actuador que controla el pedal del acelerador se contrae de 4 cm a 2 cm. Esto permite que el vehículo desacelere gradualmente para alcanzar un alto total de forma suave. Por otro lado, si el estado previo era “peligro” cambia a “emergencia”, el sistema ajusta las acciones de los actuadores para priorizar la acción de detener el vehículo de manera rápida y controlada.

En la figura 4.4 se presentan las gráficas de los sensores y los actuadores de aceleración y frenado en relación con el nivel de “emergencia”, ilustrando cómo las lecturas de los datos permiten al vehículo eléctrico desacelerar de manera controlada. En el primer punto de análisis, correspondiente a la muestra 12, los valores medidos son los siguientes: fase 1 = 45.39 A, fase 2 = 37.95 A, fase 3 = 38.62 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.746 V, posición del pedal del acelerador = 2 cm, posición del pedal del freno = 0 cm y velocidad = 4.092 *Km/hr*. En este punto, el estado anterior era “advertencia”, y la acción realizada por el vehículo es desacelerar, preparando la transición hacia el nivel de “peligro”.

En el segundo punto de análisis, correspondiente a la muestra 18, los valores son: fase 1 = 2.56 A, fase 2 = 1.2 A, fase 3 = 1.07 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.001 V, posición del pedal del acelerador = 0.5 cm, posición del pedal del freno = 2 cm y velocidad = 4.926 *Km/hr*. Los sensores muestran valores dentro de la regla 4 para el nivel de “peligro”. En este estado, el vehículo comienza a detenerse utilizando la inercia del vehículo, manteniendo un ligero movimiento residual antes de detenerse completamente. En el tercer punto de análisis, correspondiente a la muestra 21, los valores medidos son: fase 1 = 0 A, fase 2 = 0 A, fase 3 = 0 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.125 V, posición del pedal del acelerador = 0 cm, posición del pedal del freno = 4 cm y velocidad = 0 *Km/hr*. En este punto,

4.5 Resultados caso 3: emergencia

el vehículo se encuentra completamente detenido. La acción de frenado y desaceleración del vehículo permite una detención gradual, aprovechando el peso del vehículo para evitar cambios bruscos.

Se concluye que, en este análisis, el sistema cumple con la acción de detener el vehículo de forma preventiva, garantizando una desaceleración suave y controlada, sin variaciones bruscas en el comportamiento del vehículo.

4.6 Resultados caso 4: peligro

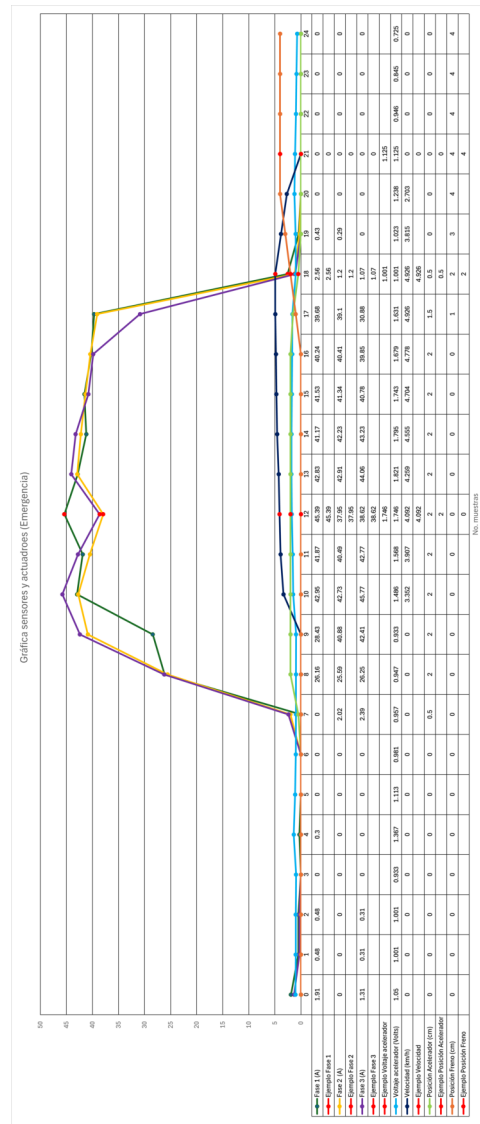


Figura 4.4: Gráfica del funcionamiento del nivel emergencia respecto a las lecturas de los sensores

4.6. Resultados caso 4: peligro

En el nivel de “peligro”, se plantea el caso en el que el vehículo está en una situación “sin riesgo” detecta una señal de peligro. La acción a realizar en este escenario es frenar bruscamente. Entonces, si la señal anterior

4.6 Resultados caso 4: peligro

corresponde a “sin riesgo”, el actuador que controla el pedal del freno se extiende de 0 cm a 6 cm, mientras que el actuador que controla el pedal del acelerador se contrae de 6 cm a 0 cm. Esto permite que el vehículo desacelere rápidamente hasta detenerse completamente.

En la figura 4.5 se presentan las gráficas de los sensores y los actuadores de aceleración y frenado en relación con el nivel de “peligro”. Estas gráficas ilustran cómo las lecturas de los datos permiten al vehículo eléctrico desacelerar y frenar de manera rápida y controlada. En el primer punto de análisis, correspondiente a la muestra 15, los valores medidos son: fase 1 = 97.11 A, fase 2 = 93.29 A, fase 3 = 93.39 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.676 V, posición del pedal del acelerador = 6 cm, posición del pedal del freno = 0 cm y velocidad = 15.704 *Km/hr*. En este punto, la señal corresponde al nivel de “sin riesgo”, y la acción realizada por el vehículo es acelerar. Posteriormente, se detecta la señal de “peligro comienza a desacelerar y frenar.

En el segundo punto de análisis, correspondiente a la muestra 21, los valores son: fase 1 = 5.53 A, fase 2 = 3.87 A, fase 3 = 4.33 A, voltaje del pedal del acelerador = 1.508 V, posición del pedal del acelerador = 4.5 cm, posición del pedal del freno = 3 cm y velocidad = 21.001 *Km/hr*. En este estado, los sensores indican valores dentro de la regla 4 correspondiente al nivel de “peligro”. El vehículo comienza a desacelerar y a frenar; aunque aún conserva algo de movimiento, este se debe únicamente a la inercia del vehículo, mientras el actuador que controla el pedal del acelerador continúa contrayéndose.

En el tercer punto de análisis, correspondiente a la muestra 25, los valores medidos son: fase 1 = 2.07 A, fase 2 = 0.49 A, fase 3 = 0.45 A, voltaje del pedal del acelerador = 0.856 V, posición del pedal del acelerador = 0 cm y posición del pedal del freno = 6 cm. En este punto, el vehículo se encuentra completamente detenido, ya que el actuador que controla el pedal del freno se ha extendido al máximo, lo que asegura una desaceleración efectiva y controlada cumpliendo la regla 5.

En conclusión, este análisis demuestra que el sistema cumple con la acción de detener el vehículo de manera inmediata y segura, acorde con las condiciones del nivel capturado y analizado por la cámara de estereo visión..

Capítulo 5

Conclusiones

Los sistemas inteligentes cada día se incluyen a nuestra vida diaria para facilitar las actividades que realiza el ser humano. Mientras observamos que la conducción nivel totalmente autónomo de vehículos es aún un área de oportunidad debido a la complejidad de los escenarios, tareas y consideraciones que debe tomar en cuenta. En ese contexto, las estrategias propuestas en el estado del arte y en muchos vehículos ya en circulación en las ciudades, es establecer situaciones bajo las cuales la navegación o control si puede ser totalmente autónoma. Así, en este proyecto, si bien el objetivo es llegar a la conducción autónoma de nuestra plataforma experimental, esto puede ser alcanzable mediante una serie de condiciones establecidas para la navegación.

La conducción autónoma es un sistema inteligente integrado en vehículos, los cuales permiten la movilidad eficiente y la reducción de accidentes por el error humano, estos sistemas inteligentes cuentan con un sistema de control el cual les permite realizar acciones respecto a la situación con la que interactúa el vehículo. Por lo tanto, los sistemas de control, son una parte fundamental de los vehículos autónomos. En este proyecto de tesis se trabajó en un sistema de control asistido para un vehículo eléctrico, del cual se analizaron y caracterizaron los componentes electromecánicos principalmente involucrados en el control de movimiento. Se propone una estrategia para realizar más rápidamente y de forma menos compleja la toma de de-

Conclusiones

cisiones respecto a diferentes niveles de riesgo. Además, analizamos que la determinación de niveles de riesgo es uno de los aspectos importantes ya que gracias a estos niveles, se puede tomar en cuenta el riesgo que tiene el vehículo de tener una colisión en una trayectoria recta. Los resultados obtenidos demuestran que puede ser utilizado en trayectorias rectas bajo condiciones controladas, a una velocidad máxima de 30 *Km/hr*.

Para futuros trabajos se puede enfocar aún más en minimizar el tiempo de respuesta de los actuadores, mejorar el hardware encargado del procesamiento de los datos de los sensores, también se puede trabajar en un módulo de detección de peatones para predecir la posición y la distancia en la que se encuentra el peatón, o incluso mejorar el sistema con sensores más sofisticados para mejorar la comunicación entre todos los elementos que integra el sistema. Estos enfoques se proponen ya que fueron puntos difíciles de trabajar en el proyecto por lo que son áreas de oportunidad a desarrollar.

Como parte de los resultados de investigación adicionales que se obtuvieron, son tres publicaciones directamente relacionadas con este trabajo:

- Duarte-Jasso, J.; Medina-Garcia, A.; Ramírez-Lara, M.-J.; Almanza-Ojeda, D.-L.; Garcia-Montoya, M.-A. Towards transportation of people with disabilities: urban two-seater experimental platform. *SFEE*, vol. 1, no. 1, Jul. 2024, doi: 10.61794/SFEE.4ydp9512.
- Duarte-Jasso, J.; Medina-Garcia, A.; et al, “Reconstruction of an outdoor environment during navigation of an electric vehicle prototype” International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE 2023), presentado el 14 de diciembre 2023.
- Medina-Garcia, A.; Duarte-Jasso, J.; Cardenas-Cornejo, J.-J.; Andrade-Ambriz, Y.A.; Garcia-Montoya, M.-A.; Ibarra-Manzano, M.-A.; Almanza-Ojeda, D.-L. Vision-Based Object Localization and Classification for Electric Vehicle Driving Assistance. *Smart Cities 2024*, 7, 33-50. IF:7, Q1, <https://doi.org/10.3390/smartcities7010002>.

Conclusiones

Además, este trabajo de tesis forma parte de diferentes proyectos de investigación apoyados por la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) y por el Instituto de Innovación Desarrollo Emprendimiento Aceleración de Guanajuato (IDEA GTO):

- Proyecto DAIP con número de propuesta CIIC 048/2024: “Implementación de frenado automático de un vehículo eléctrico para personas con discapacidad”, Vigencia: 1 de Enero al 31 de Diciembre de 2024.
- Proyectos Estratégicos de Ciencia, Tecnología, Innovación e Impulso de la Propiedad Industrial para el Valle de la Manufactura, con el proyecto: SOL-1249 “Implementación de vehículo eléctrico biplaza para transporte de personas con discapacidad”, Vigencia: 10 de enero al 7 de octubre 2024.
- CIIC 059/2023: “Detección de obstáculos para la conducción autónoma de un vehículo eléctrico”, Vigencia: 1 de Enero al 31 de Diciembre de 2023.

Bibliografía

- [1] S. for Automotive Engineers, “Sae j3016 - taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles,” 2021.
- [2] “The future of autonomous vehicles,” *FME Transactions*, vol. 49, 2021.
- [3] X. Sun, Z. Li, X. Wang, and C. Li, “Technology development of electric vehicles: A review,” *Energies*, vol. 13, 2019.
- [4] W. Zhou and X. Wang, “Calibrating and comparing autonomous braking systems in motorized-to-non-motorized-vehicle conflict scenarios,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.
- [5] A. Eskandarian, C. Wu, and C. Sun, “Research advances and challenges of autonomous and connected ground vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, 2020.
- [6] P. Girovský, J. Žilková, and J. Kaňuch, “Optimization of vehicle braking distance using a fuzzy controller,” *Energies*, vol. 13, 2020.
- [7] S. S. Gunjate and S. A. Khot, “A systematic review of emergency braking assistant system to avoid accidents using pulse width modulation and fuzzy logic control integrated with antilock braking,” 2023.
- [8] S. Yin, C. Yang, I. Kawsar, H. Du, and Y. Pan, “Longitudinal predictive control for vehicle-following collision avoidance in autonomous driving considering distance and acceleration compensation,” *Sensors*, vol. 22, 2022.
- [9] RACV, “The history and future of evs,” 2024. Accessed: 2024-07-19.

BIBLIOGRAFÍA

- [10] Idaho National Laboratory, “History of electric cars,” 2015. Accessed: 2024-07-19.
- [11] Z. Zhou, Y. Cai, S. Su, X. Tang, and Y. Cao, “Electric vehicles scale evolution model considering social attributes,” *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [12] C. Pozzi, U. Monarca, and G. Surdi, “Electric vehicle evolution: Issues and policy implications,” *Global and local economic review*, vol. 24, 2020.
- [13] J. Mohammed and J. Villegas, “Total impact of electric vehicle fleet adoption in the logistics industry,” 2023.
- [14] J. Zhang, R. Jia, H. Yang, and K. Dong, “Does electric vehicle promotion in the public sector contribute to urban transport carbon emissions reduction?,” *Transport Policy*, vol. 125, 2022.
- [15] J. Duarte-Jasso, A. Medina-Garcia, M.-J. Ramirez-Lara, D.-L. Almanza-Ojeda, and M.-A. Garcia-Montoya, “Towards transportation of people with disabilities: urban two-seater experimental platform,” *SFEE*.
- [16] A. Medina-Garcia, J. Duarte-Jasso, J. J. Cardenas-Cornejo, Y. A. Andrade-Ambriz, M. A. Garcia-Montoya, M. A. Ibarra-Manzano, and D. L. Almanza-Ojeda, “Vision-based object localization and classification for electric vehicle driving assistance,” *Smart Cities*, vol. 7, 2024.
- [17] D. Omeiza, H. Webb, M. Jirotko, and L. Kunze, “Explanations in autonomous driving: A survey,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.
- [18] J. Ondruš, E. Kolla, P. Vertaľ, and Željko Šarić, “How do autonomous cars work?,” in *Transportation Research Procedia*, vol. 44, 2020.
- [19] X. Zhang, Y. Hu, C. Gong, J. Deng, and G. Wang, “Artificial intelligence technique-based ev powertrain condition monitoring and fault diagnosis: A review,” 2023.

BIBLIOGRAFÍA

- [20] T. R. Lin, N. H. O. Khan, and M. Z. Daud, “Arduino based appliance monitoring system using sct-013 current and zmpt101b voltage sensors,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2021, 2021.
- [21] D. Zhang and T. H. Hubing, “Comparison of the accelerator-pedal-to-engine-control-module interfaces on vehicles with low and high reported rates of unintended acceleration,” *IEEE Access*, vol. 3, 2015.
- [22] Y. Li, H. Hong, and L. D’apolito, “Reliability control of electric racing car’s accelerator and brake pedals,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, 2021.
- [23] J. Y. Lee, J. H. Kim, S. M. Woo, and J. W. Lee, “A novel design of active accelerator pedal using linear electromagnetic actuator,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, 2010.
- [24] P. K. Shyamshankar, S. Rajendraboopathy, and R. S. Bhuvaneshwaran, “Design of working model of steering, accelerating and braking control for autonomous parking vehicle,” *Computers, Materials and Continua*, vol. 61, 2019.
- [25] M. Vignati and E. Sabbioni, “Force-based braking control algorithm for vehicles with electric motors,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 58, 2020.
- [26] M. Keskin, Y. E. Sekerli, and S. Kahraman, “Performance of two low-cost gps receivers for ground speed measurement under varying speed conditions,” *Precision Agriculture*, vol. 18, 2017.
- [27] A. Ndikumana, K. K. Nguyen, and M. Cheriet, “Age of processing-based data offloading for autonomous vehicles in multirats open ran,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.
- [28] J. Y. Han, J. H. Park, H. J. Kim, and S. Lee, “Design of sensor data processing software for the iso 23150 standard: Application to autonomous vehicle software,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, 2023.
- [29] A. Yoo, S. Shin, J. Lee, and C. Moon, “Implementation of a sensor big data processing system for autonomous vehicles in the c-its environment,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, 2020.

BIBLIOGRAFÍA

- [30] M. H. Hwang, G. S. Lee, E. Kim, H. W. Kim, S. Yoon, T. Talluri, and H. R. Cha, “Regenerative braking control strategy based on ai algorithm to improve driving comfort of autonomous vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, 2023.
- [31] H. Wu and Z. S. Xu, “Fuzzy logic in decision support: Methods, applications and future trends,” *International Journal of Computers, Communications and Control*, vol. 16, 2021.
- [32] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 3rd ed., 2010.
- [33] K. Indu and M. A. Kumar, “Electric vehicle control and driving safety systems: A review,” 2023.
- [34] J. Zhang, K. Wu, M. Cheng, M. Yang, Y. Cheng, and S. Li, “Safety evaluation for connected and autonomous vehicles—exclusive lanes considering penetrate ratios and impact of trucks using surrogate safety measures,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2020, 2020.
- [35] H. Tu, M. Wang, H. Li, and L. Sun, “Safety risk assessment for autonomous vehicle road testing,” *TRAFFIC INJURY PREVENTION*, vol. 24, no. 7, pp. 652–661, 2023.
- [36] R. Zhou, G. Zhang, H. Huang, Z. Wei, H. Zhou, J. Jin, F. Chang, and J. Chen, “How would autonomous vehicles behave in real-world crash scenarios?,” *ACCIDENT ANALYSIS AND PREVENTION*, vol. 202, JUL 2024.
- [37] S. A. Munoz, J. Park, C. M. Stewart, A. M. Martin, and J. D. Hedengren, “Deep transfer learning for approximate model predictive control,” *Processes*, vol. 11, 2023.
- [38] Z. Zhou, Y. Peng, and Y. Cai, “Vision-based approach for predicting the probability of vehicle–pedestrian collisions at intersections,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 14, 2020.
- [39] Z. Pang, Z. Chen, J. Lu, M. Zhang, X. Feng, Y. Chen, S. Yang, and Y. Cao, “A survey of decision-making safety assessment methods for

- autonomous vehicles,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 16, 2024.
- [40] C. Katrakazas, M. Quddus, and W. H. Chen, “A new integrated collision risk assessment methodology for autonomous vehicles,” *Accident Analysis and Prevention*, vol. 127, 2019.
- [41] G. Bathla, K. Bhadane, R. K. Singh, R. Kumar, R. Aluvalu, R. Krishnamurthi, A. Kumar, R. N. Thakur, and S. Basheer, “Autonomous vehicles and intelligent automation: Applications, challenges, and opportunities,” 2022.
- [42] M. Nawaz, J. K. T. Tang, K. Bibi, S. Xiao, H. P. Ho, and W. Yuan, “Robust cognitive capability in autonomous driving using sensor fusion techniques: A survey,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, 2024.
- [43] P. Arthurs, L. Gillam, P. Krause, N. Wang, K. Halder, and A. Mouzakitis, “A taxonomy and survey of edge cloud computing for intelligent transportation systems and connected vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, 2022.
- [44] J. L. C. Hoffmann, L. P. Horstmann, and A. A. Fröhlich, “Transparent integration of autonomous vehicles simulation tools with a data-centric middleware,” *Design Automation for Embedded Systems*, vol. 28, 2024.
- [45] A. Engholm, I. Kristoffersson, and A. Pernestal, “Impacts of large-scale driverless truck adoption on the freight transport system,” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 154, 2021.
- [46] J. David, P. Brom, F. Starý, J. Bradáč, and V. Dynybyl, “Application of artificial neural networks to streamline the process of adaptive cruise control,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, 2021.
- [47] A. Ghobadpour, G. Monsalve, A. Cardenas, and H. Mousazadeh, “Off-road electric vehicles and autonomous robots in agricultural sector: Trends, challenges, and opportunities,” 2022.

BIBLIOGRAFÍA

- [48] D. L. Mesquita, G. N. Maciel, F. Antonialli, and D. C. de Rezende, “Autonomous vehicles and people with disabilities: A scientometric and integrative analysis of the literature,” *Journal of Scientometric Research*, vol. 11, 2022.
- [49] Espressif Systems, “Espressif Systems Official Website.” <https://www.espressif.com/en>, 2024. Accessed: 2024-08-24.
- [50] Arduino, “Arduino mega 2560 rev3.” <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>. Accessed: 2024-08-24.
- [51] e Gizmo, “Sct013-000 split core transformer.” <https://github.com/e-Gizmo/SCT013-000-Split-Core-Transformer>, 2024. Accessed: 2024-08-26.
- [52] WITMOTION, “Witstandardprotocol_jy901.” https://github.com/WITMOTION/WitStandardProtocol_JY901, 2024.
- [53] e Gizmo, “Sct013-000-split-core-transformer.” <https://github.com/e-Gizmo/SCT013-000-Split-Core-Transformer>, 2024.