

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos



**Arquitectura software para la
automatización de vehículos y
plataformas terrestres**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Alfredo Valle Barrio

Ingeniero de Computadores

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Informáticos

Doctorado en Inteligencia Artificial

Arquitectura software para la automatización de vehículos y plataformas terrestres

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Alfredo Valle Barrio

Ingeniero de Computadores

Bajo la dirección de:

Dr. José Eugenio Naranjo Hernández

Dtpo. Sistemas Informáticos - ETS Ingeniería de Sistemas Informáticos - UPM

Madrid, 2024

Título: Arquitectura software para la automatización de vehículos y plataformas terrestres

Autor: Alfredo Valle Barrio

Programa de Doctorado: Doctorado en Inteligencia Artificial

Dirección de tesis:

- Dr. José Eugenio Naranjo Hernández, Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid (Director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

A mi familia.

Agradecimientos

Tras todos estos años de diversión desarrollando esta tesis y sufrimiento para escribirla llega la hora de escribir estas últimas líneas, que concluyen este largo camino y abren la puerta a un nuevo avance.

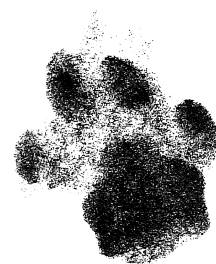
En primer lugar y como no puede ser de otra manera debo agradecer a mi director de tesis José Eugenio Naranjo. Lo que comenzó con unas simples prácticas curriculares han acabado en una carrera académica y una amistad que nos ha llevado a las profundidades del océano, casi al borde de la muerte.

A todo el equipo SIMCA, aquellos que han pasado, los que están y todas las nuevas incorporaciones que dan sentido a esta tesis y han sido un pilar fundamental en estos años de desarrollo académico y personal.

A mi familia, que siempre ha estado a mi lado, brindándome su amor incondicional y motivándome en los momentos más difíciles. Su confianza en mí ha sido una fuente inagotable de energía.

A Bárbara, por estar a mi lado en esas interminables noches de escritura y en los momentos más duros de estrés. Tu paciencia, cariño y constante apoyo han sido esenciales para que pudiera seguir adelante. Gracias por ser mi compañera de vida, dentro y fuera del agua, en cada aventura y cada inmersión.

Finalmente, una mención especial a mi abuelo, quien no solo me ha acompañado durante toda esta tesis con su cariño y sabiduría, sino que también fue mi primer revisor. Gracias, abuelo, por tu apoyo incondicional y por ser siempre una fuente de inspiración en mi vida.



Manguito

El verdadero progreso es el que pone la tecnología al alcance de todos.

Henry Ford

Resumen

El auge de los vehículos autónomos en los últimos años ha generado un notable interés tanto en la industria como en el ámbito académico. Diariamente, diversas marcas anuncian avances significativos, presentando nuevos prototipos y tecnologías innovadoras. Sin embargo, detrás de cada avance existe un extenso trabajo de investigación. La intensa competitividad en este campo impulsa el desarrollo constante de nuevas soluciones, lo que representa un desafío considerable para universidades y centros de investigación que deben mantenerse a la vanguardia con recursos limitados en comparación con las grandes compañías comerciales.

En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo principal diseñar y validar una arquitectura de software de control para la automatización de vehículos y plataformas terrestres, enfocada en la flexibilidad y adaptabilidad. Se propone el desarrollo de una arquitectura universal y modular, capaz de adaptarse a distintos tipos de vehículos y sistemas con el mínimo ajuste necesario. Para alcanzar este objetivo, se ha desarrollado una arquitectura basada en ROS2, implementada y validada en una variedad de vehículos, enfrentando múltiples retos en cuanto a la integración de sistemas de control, actuadores y modelos dinámicos.

Además de la automatización de vehículos, esta investigación busca fomentar la colaboración entre universidades y centros de investigación. La arquitectura propuesta ofrece una plataforma abierta que facilita el desarrollo y validación de soluciones de control, navegación y otros módulos esenciales para la conducción autónoma.

En conclusión, esta tesis contribuye significativamente al campo de la automatización de vehículos mediante el desarrollo de una arquitectura de control modular y universal que sirve como base para la investigación colaborativa. Los resultados obtenidos demuestran que esta arquitectura cumple con los objetivos planteados y permite acelerar el progreso en el área de los vehículos autónomos, facilitando el desarrollo de nuevas investigaciones.

Palabras clave: Automatización, Vehículos Autónomos, Arquitectura software, Control de Vehículos, Navegación Autónoma, Sistemas de Transporte, Interoperabilidad.

Abstract

The rise of autonomous vehicles in the recent years has generated considerable interest in both industry and academic field. Every day, various brands announce significant advances, presenting new prototypes and innovative technologies. However, behind each breakthrough there is extensive research work. The intense competition in this field drives the constant development of new solutions, which represents a considerable challenge for universities and research centers that must remain at the forefront with limited resources compared to large commercial companies.

In this context, the main objective of this thesis is to design and validate a control software architecture for the automation of ground vehicles and platforms, focused on flexibility and adaptability. It is proposed to develop a universal and modular architecture, able to adapt to different types of vehicles and systems with the minimum necessary adjustment. To achieve this goal, an architecture based on ROS2 has been developed, implemented and validated in a variety of vehicles, facing multiple challenges regarding the integration of control systems, actuators and dynamic models.

In addition to vehicle automation, this research seeks to foster collaboration between universities and research centers. The proposed architecture provides an open platform that facilitates the development and validation of control solutions, navigation and other essential modules for autonomous driving.

In conclusion, this thesis contributes significantly to the field of vehicle automation by developing a modular and universal control architecture that serves as a basis for collaborative research. The results obtained demonstrate that this architecture meets the stated objectives and allows accelerating progress in the area of autonomous vehicles, facilitating the development of new research.

Keywords: Automation, Autonomous Vehicles, Software Architecture, Vehicle Control, Autonomous Navigation, Transport Systems, Interoperability.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	v
Resumen	ix
Abstract	xi
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tablas	xix
Abreviaturas y Acrónimos	xxi
1. Introducción	1
1.1. Marco general de la tesis	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Estructura de la tesis	4
2. Estado de la cuestión	7
2.1. Arquitecturas de control vehículos autónomos.....	7
2.1.1. Arquitectura Hardware.....	7
2.1.2. Arquitectura Software	8
2.1.3. Modelo Físico de Referencia	9
2.2. Framework ROS	12
2.2.1. ROS2: Estructura y componentes.....	14
2.2.2. Elección del DDS	14
2.2.3. Ventajas de ROS2 en la arquitectura distribuida.....	15
2.3. Navegación de vehículos autónomos	15
2.4. Inteligencia Artificial en Vehículos Autónomos	17
2.5. Limitaciones del estado actual.....	18
2.5.1. Limitación en la disponibilidad de vehículos autónomos para investigación	18
2.5.2. Limitación de la interoperabilidad de vehículos autónomos	19
2.5.3. Limitación de la estandarización del software en vehículos autónomos.....	19
2.5.4. Limitaciones propias del framework ROS2	20
3. Arquitectura de control	21
3.1. Metodología de automatización	21
3.1.1. Actuadores.....	22
3.1.2. Distribución de potencia y comunicaciones CAN	32
3.1.3. Sensores	36

3.2. Evolución de la arquitectura software	48
3.3. Arquitectura software	52
3.3.1. Dispositivos del vehículo	55
3.3.2. Comunicaciones CAN.....	55
3.3.3. Drivers	57
3.3.4. Controladores de dispositivo	60
3.3.5. Multiplexor de control.....	62
3.3.6. Controladores de alto nivel	63
3.3.7. Sistema de decisión de bajo nivel y sistema de seguridad.....	64
3.3.8. Interfaz estándar.....	66
3.3.9. Teleoperación.....	67
3.3.10. Planificador local.....	68
3.3.11. Navegación mediante GPS	69
3.3.12. Estaciones remotas	72
3.4. Plataforma de investigación	76
3.4.1. Visión General de la Arquitectura	76
3.4.2. Plataforma de Colaboración e Investigación	77
3.5. Limitaciones de la metodología propuesta	78
4. Aplicación y resultados	81
4.1. Funcionamiento sin estudio del modelo dinámico	81
4.2. Plataformas	82
4.2.1. Vehículos convencionales	84
4.2.2. Vehículos para el transporte de pasajeros	90
4.2.3. Vehículos pesados.....	96
4.2.4. Plataformas de cadenas.....	100
4.3. Validación de control y resultados	106
4.3.1. Plan de validación	106
4.3.2. Resumen de resultados de la validación	109
4.4. Investigaciones adicionales realizadas en las plataformas automatizadas	113
4.4.1. Integración de sistemas cooperativos de transporte.....	113
4.4.2. Validación de la confianza de la población en la conducción autónoma.....	115
4.4.3. Plataforma de investigación para el desarrollo de controladores de algoritmos de decisión y navegación	116
4.4.4. Integración de navegación mediante Lidar en entornos sin cobertura GPS.....	118
5. Conclusiones y Trabajos futuros	121
5.1. Conclusiones.....	121
5.2. Trabajos futuros.....	122
6. Conclusions and future work	125
6.1. Contributions and conclusions.....	125

6.2. Future work	126
7. Difusión de resultados	129
7.1. Publicaciones en revistas indexadas en JCR	129
7.2. Comunicaciones en congresos.....	129
7.3. Trabajos de fin de grado tutorizados.....	131
Referencias	133
Anexo A	145

Lista de Figuras

Ilustración 1: BDD ilustrativo de la A2SAT.....	11
Ilustración 2: Arquitectura de la API de ROS 2.....	12
Ilustración 3: Comparativa entre las arquitecturas de ROS1 y ROS2	13
Ilustración 4: Controladora programable Maxon EPOS 4.....	23
Ilustración 5: Detalle del equipo para controlar la dirección.....	24
Ilustración 6: Placa electrónica para el control del acelerador CANADAC.....	26
Ilustración 7: CANADAC Versión 2 para la gestión de señales analógicas	27
Ilustración 8 : Motor empleado para la actuación sobre el pedal del freno	28
Ilustración 9: Detalle de la automatización del pedal del freno.....	29
Ilustración 10: Caja de relés para la gestión de marchas	30
Ilustración 11: Dispositivo para el control del movimiento del volquete	30
Ilustración 12: Detalle de la maleta de distribución de potencia	32
Ilustración 13: Tarjetas de comunicaciones CAN/Ethernet	34
Ilustración 14: Cámara Mobileye.....	37
Ilustración 15: Imagen LiDAR obtenida del proyecto Tunnelad	38
Ilustración 16: GPS Trimble 992.....	39
Ilustración 17: Diagrama de red simple	43
Ilustración 18: Diagrama de red de un vehículo automatizado ideal.....	44
Ilustración 19: Diagrama de red de una estación de monitorización.....	45
Ilustración 20: Modulo de comunicaciones Radio Persistent MPU5	48
Ilustración 21: Arquitectura software original al inicio de la tesis.....	50
Ilustración 22: Esquema simplificado de la arquitectura de control.....	51
Ilustración 23: Diagrama detallado de la arquitectura de control.....	54
Ilustración 24: Consola táctica de teleoperación	68
Ilustración 25: Interfaz de monitorización	73
Ilustración 26: Interfaz básica de gestión de grabación y seguimiento de rutas	74

Ilustración 27: Estación de control con integración de software externo	75
Ilustración 28: URO VAMTAC (Ejercito de Tierra)	84
Ilustración 29:Mitsubishi iMiev (INSIA)	84
Ilustración 30: Toyota RAV 4 de la Johannes Kepler Universität	84
Ilustración 31: Vehículo automatizado de la universidad Carlos III de Madrid	84
Ilustración 32: Ruta del ensayo del Misubishi iMiev en Somosaguas	86
Ilustración 33: Gráficos de resultados del ensayo del Mitsubishi iMiev.....	87
Ilustración 34: Ruta realizada durante los ensayos con el Toyota RAV 4	89
Ilustración 35: Gráfica de resultados del ensayo JKU	90
Ilustración 36: Minibús Gulliver de la EMT.....	91
Ilustración 37: Ruta realizada en el ensayo con el autobús Gulliver de la EMT.....	92
Ilustración 38: Gráfico de resultados del ensayo con el autobús Gulliver de la EMT .	93
Ilustración 39: Control de un vehículo convencional (PID a la izquierda) (Red neuronal a la derecha)9	94
Ilustración 40: Control de un vehículo de transporte de pasajeros mediante red neuronal95	95
Ilustración 41: Volvo A-25 de la empresa Sacyr-Cavosa (Lagarto).....	96
Ilustración 42: Ruta seguida en los ensayos del vehículo de obras públicas.....	98
Ilustración 43: Resultados del control y la navegación del recorrido mediante GPS del vehículo de obras públicas.....	99
Ilustración 44: Plataforma de cadenas PT6 ASCOD	100
Ilustración 45: Plataforma MUTT	102
Ilustración 46: MUTT simulado en Webots realizando una ruta en autónomo entre arboles103	103
Ilustración 47: Ruta del ensayo realizado con la plataforma ASCOD	104
Ilustración 48: Resultados de los ensayos realizados con la plataforma ASCOD	105
Ilustración 49: Grafica comparativa de los errores lateral, de velocidad y de volante para cada uno de los vehículos	111
Ilustración 50: Ruta seguida durante los ensayos	114
Ilustración 51: Perfil de velocidad obtenido al aplicarse los eventos	114
Ilustración 52: Detalle de la maniobra de cambio de carril en la zona de influencia del evento115	115
Ilustración 53: Ratio de duración de fijaciones y diámetro de la pupila.....	116

Ilustración 54: Recorrido propuesto para tareas de aparcamiento, repostaje y mantenimiento	117
Ilustración 55: Estimación del elemento de referencia con diferentes ubicaciones del sensor	119
Ilustración 56: Ejemplo de detección de obstáculos mediante LIDAR	119

Lista de Tablas

Tabla 1: Tabla comparativa de los resultados de validación obtenidos por los vehículos más representativos.....	111
---	-----

Abreviaturas y Acrónimos

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
API	Application Programming Interface
ASCOD	Austrian Spanish Cooperation Development
CAN	Controller Area Network
DBC	DataBase Container
DDS	Data Distribution Service
ECU	Electronic Control Unit
EMT	Empresa Municipal de Transportes
GDELS	General Dynamics European Land Systems
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphics Processing Unit
INSIA	Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (UPM)
JKU	Johannes Kepler Universität
LAN	Local Area Network
LIDAR	Light Detection and Ranging
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PCB	Printed Circuit Board
PID	Proportional Integral Derivative (Controlador)
ROS	Robot Operating System
RTI	Real-Time Innovations
RTK	Real-Time Kinematic
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
V2X	Vehicle to Everything

1. Introducción

1.1. Marco general de la tesis

La investigación en conducción autónoma representa un área de interés creciente y de gran relevancia para investigadores, instituciones académicas y fabricantes de vehículos a nivel mundial. Este campo promete transformaciones significativas en los sistemas de transporte y movilidad en los próximos años, ofreciendo potenciales beneficios en eficiencia, seguridad y sostenibilidad(Halin et al., 2021). Sin embargo, la exploración y el desarrollo en esta área enfrentan una serie de desafíos y limitaciones significativas.

Por un lado, los aspectos burocráticos y regulatorios presentan un obstáculo considerable. Las normativas y leyes actuales no están completamente adaptadas para acomodar y regular la integración de vehículos autónomos en entornos reales, lo que resulta en una barrera para probar y desarrollar estas tecnologías en situaciones cotidianas(Liu et al., 2008). Este desafío burocrático es crucial, ya que asegurar un marco legal y de seguridad adecuado es fundamental para la implementación exitosa de vehículos autónomos en la sociedad.

Por otro lado, muchos centros de investigación y universidades enfrentan la limitación de recursos, lo que afecta su capacidad para llevar a cabo pruebas y desarrollos en escenarios del mundo real. Esta escasez de recursos ha llevado a una inclinación hacia el uso de simuladores(Hussein et al., 2018; Morais & Aguiar, 2022) como herramienta principal en la investigación y el desarrollo de la conducción autónoma. Si bien los simuladores son herramientas valiosas y permiten un control detallado de las variables, también tienen limitaciones. La simulación no puede replicar completamente la complejidad y la imprevisibilidad de los entornos reales, lo que puede resultar en una brecha entre los resultados de las pruebas simuladas y el desempeño real de los vehículos en las carreteras.

Esta Tesis Doctoral se centra en el desarrollo de una arquitectura marco para dar soporte a la de automatización de diversas plataformas terrestres, que incluyen desde vehículos convencionales hasta camiones de obras públicas y vehículos militares. El alcance de esta tesis abarca varios aspectos del proceso de automatización, comenzando con la automatización mecánica de los vehículos. Esto

implica la gestión y control de los actuadores mecánicos, esenciales para la operación autónoma de estas plataformas.

Además, abarca niveles más altos de automatización, como la toma de decisiones de bajo nivel y la incorporación de medidas de seguridad para manejar situaciones como desconexiones o fallos. Culminando en la implementación del guiado autónomo, utilizando tecnología GPS, para proporcionar a estos vehículos la capacidad de navegar y operar de manera independiente en sus respectivos entornos.

1.2. Motivación

La era de los vehículos autónomos, que una vez fue un sueño representado en series y películas, parece estar cada vez más cerca. A pesar de los avances significativos, como la introducción de asistencias a la conducción y grados medios de automatización, que comienzan a verse cada vez más en nuestro parque automovilístico, queda un largo camino por investigar.

Esta tesis doctoral se sitúa en el epicentro de una transformación tecnológica y social sin precedentes, donde la movilidad autónoma promete hacer evolucionar nuestro concepto de desplazamiento, así como remodelar nuestras ciudades, nuestras leyes y nuestra forma de vida.

Un desafío clave en el desarrollo de la conducción autónoma es la falta de plataformas abiertas y accesibles que permitan a los centros de investigación y universidades experimentar y avanzar en el campo de los vehículos autónomos y que dicha investigación no quede restringida a compañías automovilísticas cuyo desarrollo queda plasmado en una caja negra dentro del vehículo.

Existen algunos simuladores y entornos de prueba, que resultan extremadamente útiles en ciertos aspectos de la conducción autónoma, pero a menudo carecen de la complejidad y la diversidad de situaciones del mundo real, limitando así el alcance de la investigación. Especialmente en tareas de más bajo nivel como control o toma de decisiones y se centran en tareas de alto nivel como navegación o detección de obstáculos.

Este escenario crea una oportunidad única para esta tesis doctoral, al desarrollar una arquitectura de control que pueda ser implementada en vehículos convencionales, se abre un nuevo camino para los centros de investigación. Esta plataforma no solo facilitará un entorno de pruebas más realista y diverso, sino

que también permitirá a los investigadores explorar y mejorar aspectos clave como algoritmos de control y navegación, sistemas de percepción y aprendizaje automático, y su integración en entornos urbanos y rurales.

Además, este enfoque extiende la investigación en vehículos autónomos, permitiendo a las instituciones con menos recursos participar activamente en el avance de esta tecnología. Lo cual no solo acelera el desarrollo de soluciones innovadoras y prácticas, sino que también fomenta una colaboración más amplia entre académicos, ingenieros y la industria, esencial para superar los desafíos actuales y llevar los vehículos autónomos a un uso cotidiano más amplio.

En resumen, esta tesis doctoral tiene el potencial de cambiar el paradigma de investigación en vehículos autónomos, proporcionando una plataforma accesible y adaptable para explorar nuevas soluciones y avanzar en el campo de manera más inclusiva y colaborativa.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis consiste en proponer una solución de arquitectura software de control y decisión que permita automatizar cualquier tipo de vehículo para dotarle de las capacidades autónomas necesarias (Barrio et al., 2023). De esta forma, obtener un método para la creación de plataformas de investigación autónomas (Joshi et al., 2002) que permitan ser la base de todo tipo de desarrollos científicos en el campo de los vehículos autónomos.

Los requisitos definidos para este desarrollo son:

- La arquitectura software sea universal para cualquier tipo de vehículo independientemente de sus características mecánicas.
- La arquitectura software sea modular, que sus componentes estén divididos de la forma más independiente a la vez que optima posible, haciendo que puedan realizarse actualizaciones y ensayos con modificaciones en módulos específicos sin necesidad de modificar el resto de la arquitectura.
- La arquitectura software sea open-source, abierta a otros centros y universidades para poder realizar un desarrollo colaborativo.
- La arquitectura aplique criterios de estandarización obteniendo un resultado final interoperable con software externo y estableciendo unas pautas de comunicación y control.

El desarrollo de este objetivo se ha realizado en base a un conjunto de proyectos de investigación, que han permitido, por un lado, financiar este trabajo y por otro lado, identificar las necesidades específicas de diferentes tipos de plataformas, haciendo que la arquitectura evolucione a lo largo del desarrollo de la Tesis y se adapte al requisito de arquitectura universal mencionado anteriormente.

Esta evolución ha llevado a abordar una serie de objetivos secundarios que complementan la implementación de la arquitectura y permiten validarla.

- Validar la arquitectura en diferentes plataformas
- Integrar la arquitectura con soluciones ya existentes de forma que permita ampliar sus capacidades
- Servir de soporte para validar investigaciones no relacionadas con el control de vehículos autónomos
- Ampliar las capacidades de ROS fuera de su rango habitual de acción, red local
- Hacer de sistema integrador para desarrollos en las que varias empresas participan

En el transcurso del desarrollo de la tesis, se ha procedido a la evolución y adaptación de la arquitectura a fin de satisfacer los requerimientos estipulados por cada iniciativa. Dicha adaptación incluye la conformidad con un diseño lógico preestablecido por el Ministerio de Defensa de España, cuya adhesión es obligatoria para la elegibilidad en sus convocatorias de proyectos. Adicionalmente, se ha utilizado un modelo específico de comunicaciones, conocido como DDS (Data Distribution Service), dentro del entorno ROS (Robot Operating System) para proyectos afiliados a la OTAN.

1.4. Estructura de la tesis

Esta tesis se ha estructurado en varios capítulos que cubren de manera progresiva los aspectos más importantes del desarrollo y aplicación de una arquitectura de control para vehículos autónomos en entornos no estructurados. A continuación, se ofrece un resumen de cada uno de los capítulos, destacando los temas tratados y su relevancia en el contexto de la investigación.

Capítulo 2: Estado de la cuestión

Este capítulo ofrece una revisión completa del panorama actual en el ámbito de los vehículos autónomos, centrándose particularmente en el proceso de automatización de vehículos. Se examinan las tecnologías más relevantes, como los sistemas de control autónomo basados en sensores como LIDAR, GPS y cámaras, destacando las limitaciones de estas tecnologías en entornos cerrados o subterráneos donde la cobertura de GPS es limitada o inexistente (Levinson et al., 2011). También se analiza el uso de ROS (Robot Operating System) como un marco de trabajo open-source ampliamente adoptado en la investigación robótica, lo que permite una rápida integración y desarrollo de soluciones autónomas. En este contexto, se identifican las brechas tecnológicas actuales, como la falta de interoperabilidad y la dificultad de aplicar estas soluciones en vehículos industriales pesados.

Capítulo 3: Desarrollo de la Arquitectura de Control

En este capítulo se describe el proceso de desarrollo de la arquitectura de control, abordando tanto los aspectos mecánicos como los de software que permiten la automatización de los vehículos. El enfoque adoptado es de abajo hacia arriba, comenzando con la automatización de los componentes mecánicos como la dirección, los frenos y el acelerador. A continuación, se explica cómo estos elementos se integran con los sistemas de control mediante actuadores eléctricos y sensores. Se detalla la implementación del sistema ROS, que actúa como la columna vertebral del software, gestionando la comunicación entre los distintos subsistemas del vehículo y facilitando el control autónomo.

Capítulo 4: Aplicación y resultados

Este capítulo presenta los diferentes proyectos en los que se ha aplicado la arquitectura desarrollada, proporcionando una visión detallada de cada una de las plataformas utilizadas. Se describen los vehículos que han sido equipados con el sistema de automatización. Los resultados de cada ensayo son analizados en profundidad, incluyendo métricas de rendimiento como la precisión en la navegación, la detección de obstáculos y la capacidad del sistema para realizar tareas autónomas sin intervención humana.

Capítulo 5-6: Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo ofrece una evaluación crítica de los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de la tesis. Se reflexiona sobre las ventajas y limitaciones de la

arquitectura propuesta, destacando los logros en términos de automatización de vehículos en entornos no estructurados y la mejora de la seguridad operativa. También se identifican áreas que requieren mayor investigación, como la mejora en la integración de la capacidad de detección de obstáculos o la integración de nuevos sensores que permitan una mayor autonomía en escenarios más complejos. Se sugieren varias líneas de trabajo futuro, incluyendo la extensión del sistema a otros tipos de vehículos y la exploración de tecnologías de comunicación V2X para mejorar la coordinación entre vehículos autónomos en obras.

Capítulo 7: Difusión de resultados

Este capítulo está dedicado a la divulgación de los resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis. Se detallan las publicaciones científicas generadas a partir de la investigación, así como las conferencias en las que se han presentado los avances, tanto en congresos nacionales como internacionales. Además, se mencionan los trabajos fin de grado que han sido dirigidos como parte del desarrollo de esta tesis.

2. Estado de la cuestión

2.1. Arquitecturas de control vehículos autónomos

El desarrollo de vehículos autónomos ha evolucionado de manera significativa, llevando a cabo avances notables en áreas clave como la percepción, la toma de decisiones y el control(Chen et al., 2021). Una parte fundamental de este avance es el diseño de arquitecturas de control que optimicen la interacción entre sensores, actuadores y los algoritmos que gobiernan el comportamiento autónomo de los vehículos. La seguridad, eficiencia y capacidad de adaptación son cruciales en estos sistemas, especialmente en entornos dinámicos y no estructurados. Esta sección explora las arquitecturas de control utilizadas en vehículos autónomos, tanto en el ámbito del hardware como del software, y presenta un análisis del marco de comunicaciones más adecuado, ROS, así como los sistemas DDS utilizados en ROS(Profanter et al., 2019).

2.1.1. Arquitectura Hardware

La arquitectura hardware en vehículos autónomos determina cómo se distribuye el procesamiento de la información y cómo interactúan los componentes del sistema. Se pueden distinguir dos grandes tipos de arquitecturas en función de la distribución del procesamiento: centralizadas y descentralizadas. Cada una de ellas tiene ventajas y desventajas dependiendo de la complejidad del sistema, el tipo de vehículo y los requisitos de rendimiento(Plaza, 2018).

2.1.1.1. Arquitecturas Centralizadas

En una arquitectura centralizada(Plasberg et al., 2022), todo el procesamiento se realiza en una unidad central. Esto implica que un solo ordenador o un conjunto de ordenadores conectados controlan la mayor parte de las operaciones críticas del vehículo. Un ejemplo notable de este tipo de arquitectura es el sistema de Tesla Autopilot, el cual utiliza un procesador NVIDIA especializado para centralizar el procesamiento de datos de los sensores, tomar decisiones y controlar los actuadores en tiempo real.

Las principales ventajas de este enfoque incluyen la simplicidad de diseño y la facilidad para supervisar y coordinar todas las tareas desde un único punto. Sin embargo, las desventajas son evidentes en cuanto a la escalabilidad: cualquier fallo

en el controlador principal puede causar un fallo total del sistema, y manejar grandes volúmenes de datos de múltiples sensores de alta frecuencia puede generar cuellos de botella en el procesamiento.

2.1.1.2. Arquitecturas Descentralizadas

Por otro lado, las arquitecturas descentralizadas, también conocidas como distribuidas, dividen el procesamiento entre varios módulos o nodos. En este enfoque, cada nodo se encarga de una tarea específica del vehículo autónomo, como el procesamiento de imágenes, la fusión de sensores o el control del vehículo. El sistema Waymo es un ejemplo emblemático de una arquitectura descentralizada, donde múltiples módulos gestionan los datos de sensores como LIDAR, cámaras y radares de manera independiente, pero sincronizada (Gopalswamy & Rathinam, 2018).

Ventajas de este enfoque incluyen una mayor flexibilidad, escalabilidad y resiliencia: un fallo en un nodo no afectará el rendimiento global del sistema, y los módulos adicionales se pueden integrar con facilidad. Desventajas: la coordinación y sincronización entre nodos pueden generar desafíos de latencia y complejidad en la gestión de las comunicaciones.

Ejemplos de dispositivos en una Arquitectura Hardware distribuida:

- PC Fanless embarcado: Utilizado en vehículos con baja capacidad de procesamiento gráfico pero excelente conectividad y robustez en ambientes extremos.
- NVIDIA Jetson: Equipo diseñado para procesamiento gráfico e inteligencia artificial, con un enfoque en el reconocimiento de imágenes y sensores visuales (Cho et al., 2022).
- Intel Nuke: Ideal para procesamiento en tiempo real de algoritmos de inteligencia artificial, con alta potencia computacional.

2.1.2. Arquitectura Software

El hardware debe estar complementado por una arquitectura de software que permita gestionar eficientemente el procesamiento distribuido. Al igual que el hardware, la arquitectura de software se puede dividir en modelos centralizados y distribuidos. Para vehículos autónomos, un modelo centralizado de software

resulta inviable debido a su gran complejidad y a los requisitos de sincronización en tiempo real(Yang & Azumi, 2020).

Por ello, se emplean arquitecturas distribuidas de software, donde los nodos de software corren de manera independiente pero sincronizada a través de un middleware de comunicación(Bishop & Karne, 2003) que permite la transmisión de mensajes entre módulos.

2.1.2.1. Framework y Middleware para Arquitecturas Distribuidas

Uno de los principales retos de un sistema distribuido es la gestión de la comunicación entre nodos de procesamiento. El uso de DDS(Thomas et al., 2014) (Data Distribution Service) en ROS 2(Maruyama et al., 2016; Quigley et al., s. f.) ha sido un avance clave para solucionar esta problemática, permitiendo que los nodos intercambien datos de manera eficiente, segura y en tiempo real, tal como se detalla más adelante. Frameworks(Bishop & Karne, 2003) como ROS permiten una distribución sencilla del procesamiento y permiten que cada nodo realice tareas específicas del sistema.

2.1.3. Modelo Físico de Referencia

En el contexto de vehículos autónomos, el modelo físico de referencia no solo cubre los componentes principales del vehículo, sino también los sistemas externos necesarios para gestionar la comunicación y el control remoto del vehículo. El diseño de este modelo debe tener en cuenta tanto las exigencias del entorno en el que operará el vehículo como los requisitos de interoperabilidad y colaboración con otros sistemas, como los centros de mando y los sistemas de control distribuidos(Kokogias et al., 2018).

Para el desarrollo de esta tesis se ha tomado como modelo físico de referencia el desarrollado por el Ministerio de Defensa para Sistemas Autónomos Terrestres. Esto permite realizar una transferencia de conocimiento entre el entorno militar al entorno civil aprovechando los recursos invertidos y conocimientos adquiridos en el desarrollo de este modelo.

Componentes principales del modelo físico de referencia:

1. Vehículo autónomo

El vehículo autónomo es el componente central del modelo físico de referencia. Este vehículo integra diversos subsistemas que se encargan de realizar

tareas críticas como la percepción del entorno, la toma de decisiones, y la ejecución de acciones. Estos subsistemas incluyen:

- **Sensores:** Los sensores(Rana & Kaur, 2021) son los ojos y oídos del vehículo. Incluyen cámaras, LIDAR, radares, GPS, y otros dispositivos que proporcionan datos sobre el entorno del vehículo. Los sensores permiten al vehículo reconocer su ubicación y detectar obstáculos o cambios en su entorno.
- **Unidad de procesamiento de percepción:** Esta unidad es responsable de interpretar los datos proporcionados por los sensores(Kayaduman et al., 2019). Es uno de los módulos más intensivos en términos de procesamiento, ya que necesita trabajar con grandes volúmenes de datos, especialmente en escenarios dinámicos o no estructurados. Los vehículos avanzados utilizan procesadores con capacidades gráficas avanzadas, como GPUs (Unidades de Procesamiento Gráfico), para manejar el procesamiento en tiempo real de imágenes y datos 3D.
- **Unidad de control y toma de decisiones:** Aquí es donde se toman las decisiones sobre qué acciones debe realizar el vehículo(Lim et al., 2019). Los algoritmos de toma de decisiones se basan en modelos de inteligencia artificial (IA) o lógica basada en reglas. Este subsistema es responsable de enviar comandos a los actuadores, que permiten controlar el movimiento y las operaciones del vehículo.
- **Actuadores:** Son los encargados de ejecutar las órdenes generadas por los módulos de control y toma de decisiones. Los actuadores incluyen los motores del vehículo, los frenos, el volante y cualquier otro mecanismo que permita controlar el movimiento del vehículo o la interacción con su entorno.

2. Puesto de mando

El puesto de mando es el interfaz humano para supervisar y, en caso necesario, controlar el vehículo autónomo de forma remota. Desde este puesto se puede obtener toda la información relevante sobre el estado del vehículo, incluyendo su ubicación, velocidad, nivel de batería, entre otros. El puesto de mando también es responsable de enviar comandos al vehículo, ya sea para corregir su trayectoria o realizar ajustes en sus operaciones.

El puesto de mando se conecta con el vehículo a través de una red inalámbrica de baja latencia, lo que asegura una comunicación rápida y eficiente. La integración con el vehículo autónomo se realiza generalmente a través de ROS, que facilita el intercambio de información entre los diferentes módulos del sistema y permite controlar el vehículo de manera remota sin interferencias.

3. Sistema C2 (Comando y Control)

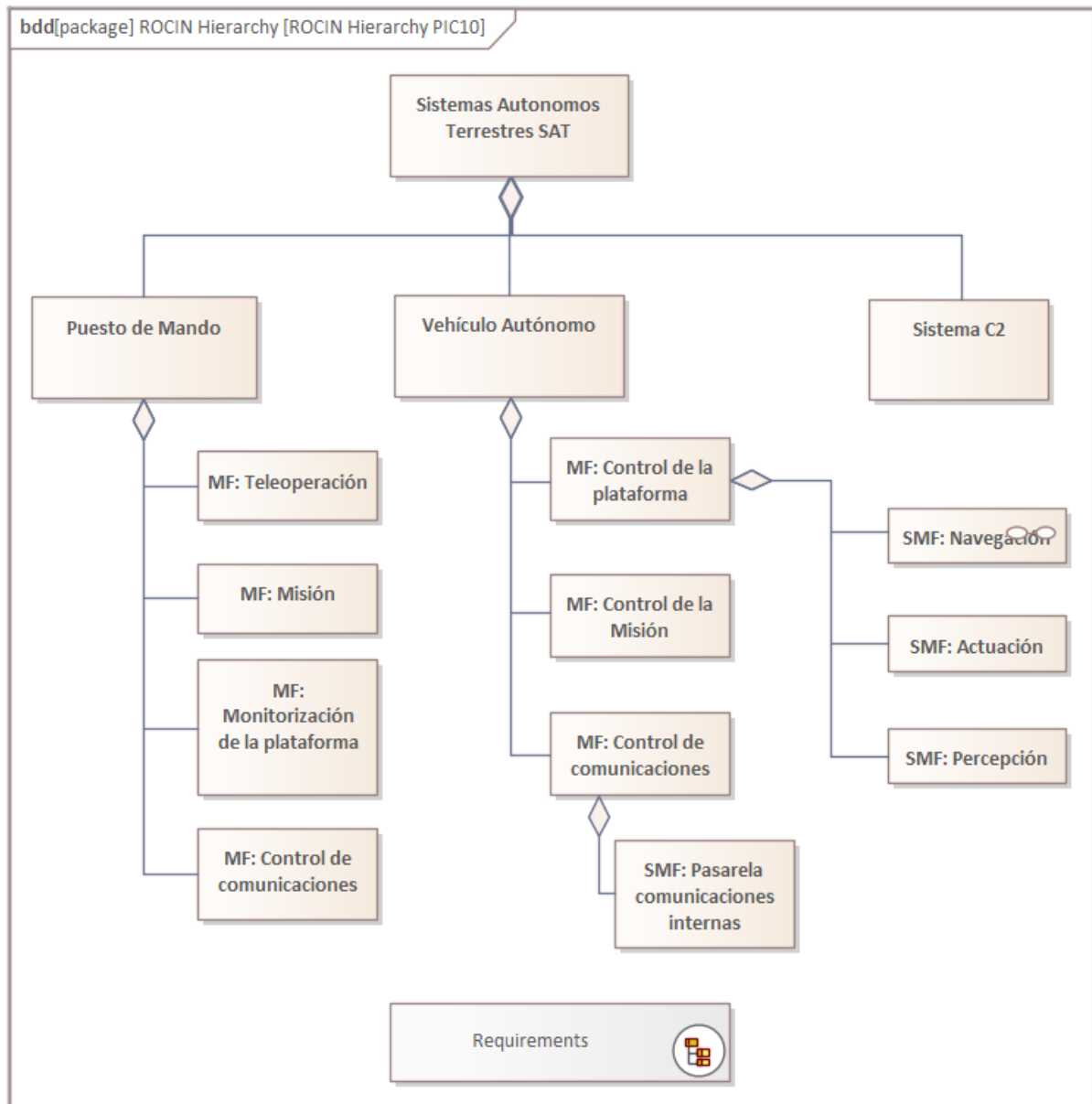


Ilustración 1: BDD ilustrativo de la A2SAT

El Sistema C2 es un componente crítico en la arquitectura de vehículos autónomos que opera en escenarios complejos o de grandes dimensiones, como entornos militares o industriales. Este sistema se encuentra conectado tanto con el puesto de mando como con los vehículos, y permite la coordinación y supervisión

de múltiples vehículos autónomos simultáneamente, extendiendo el control y monitoreo a nivel global mediante redes distribuidas.

En el Sistema C2, los operadores pueden gestionar múltiples vehículos desde una única plataforma. Esto es especialmente útil en situaciones de convoyes de vehículos autónomos, donde varios vehículos deben coordinarse para realizar tareas conjuntas. Este concepto no solo es útil para entornos militares o industriales, también para la gestión de flotas en entornos civiles como puede ser en el uso de taxis autónomos donde este sistema sería el gestor externo en caso de que el vehículo se encuentre una situación que no es capaz de resolver.

2.2. Framework ROS

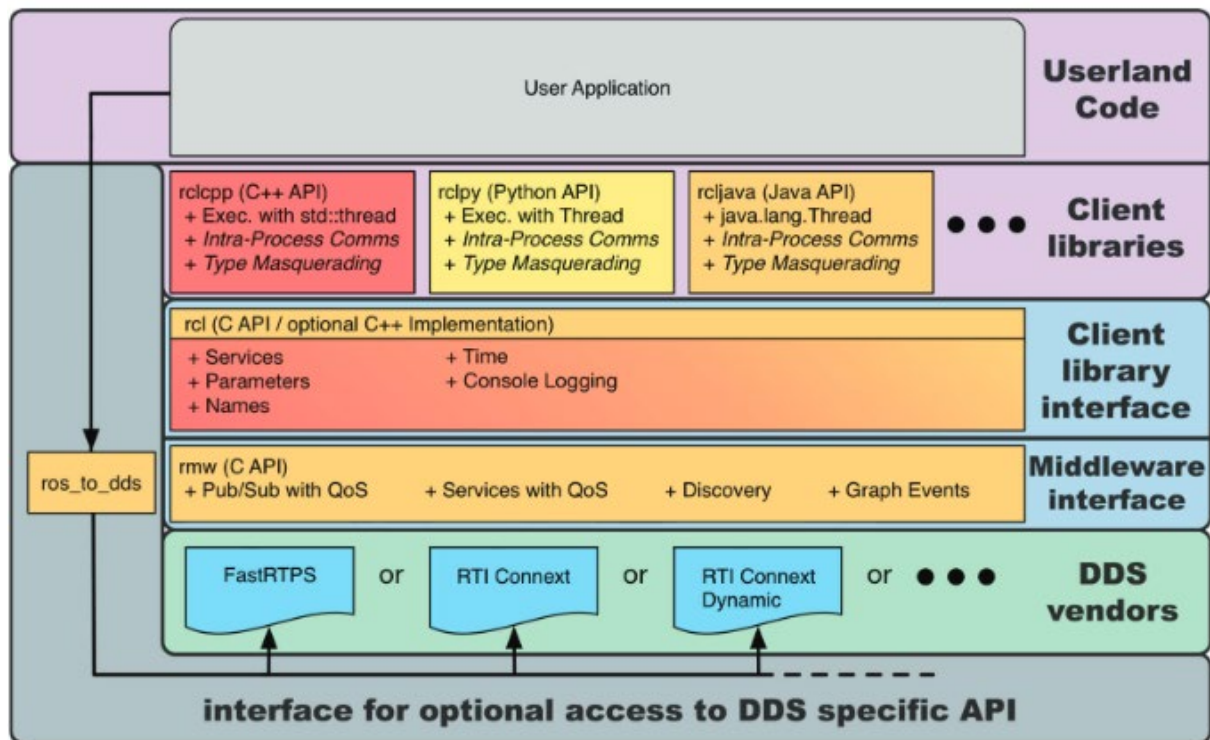


Ilustración 2: Arquitectura de la API de ROS 2

El desarrollo de vehículos autónomos ha experimentado un importante empuje en los últimos años gracias entre otras cosas al uso de frameworks modulares y escalables que facilitan la gestión de sensores, actuadores y algoritmos de toma de decisiones. Uno de los frameworks más utilizados en el desarrollo de robótica y vehículos autónomos es ROS, el cual ha evolucionado en su segunda versión, ROS2, para abordar las limitaciones encontradas en su predecesor en términos de rendimiento en tiempo real, comunicaciones

distribuidas y soporte para sistemas críticos (San et al., 2018). ROS fue diseñado originalmente como una plataforma para la investigación en robótica, proporcionando una infraestructura modular que permite a los desarrolladores construir complejas arquitecturas software de manera distribuida. La principal característica de ROS es su modelo de nodos y mensajes, donde diferentes nodos (componentes de software independientes) se comunican entre sí mediante la publicación y suscripción de mensajes en topics específicos (Comito, 2018).

A pesar de la adopción masiva de ROS en entornos de investigación y desarrollo, su primera versión presentaba limitaciones en términos de rendimiento en sistemas críticos, especialmente en aplicaciones donde la sincronización de datos en tiempo real es esencial, como los vehículos autónomos. Estas limitaciones dieron lugar a ROS2 (H. Cui et al., 2020), que adopta una nueva arquitectura basada en DDS para asegurar la interoperabilidad y la comunicación en tiempo real, además de ofrecer compatibilidad nativa con sistemas de seguridad y fiabilidad.

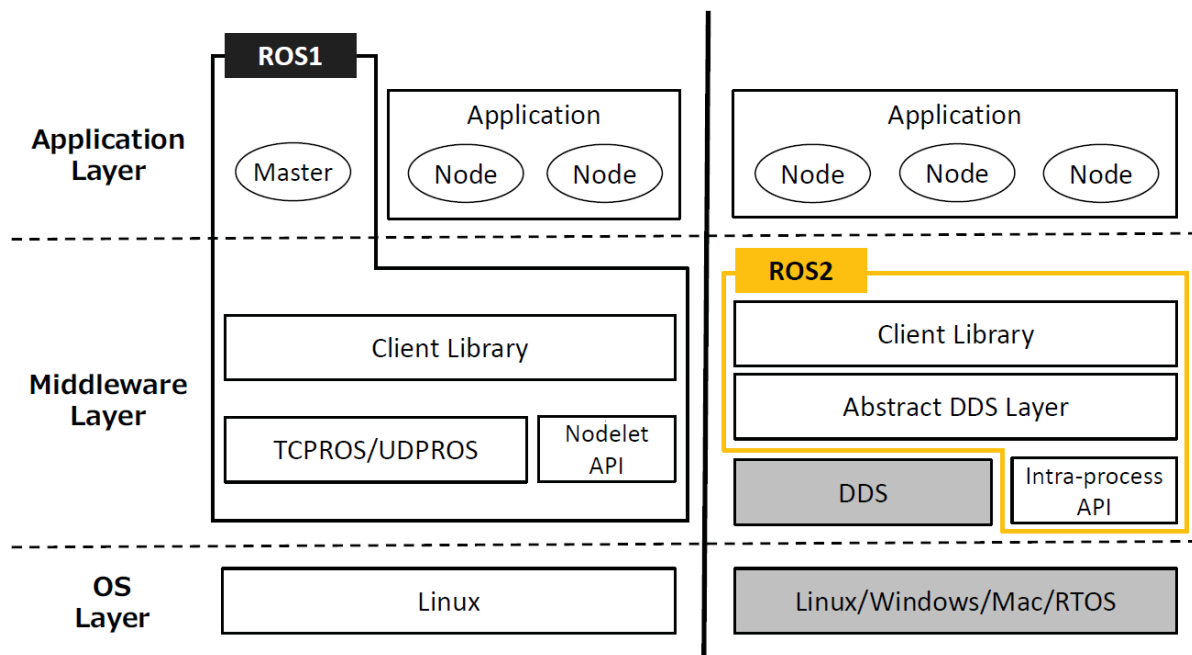


Ilustración 3: Comparativa entre las arquitecturas de ROS1 y ROS2

2.2.1. ROS2: Estructura y componentes

ROS2 se distingue de su predecesor no solo por mejorar la comunicación entre nodos, sino por ofrecer una infraestructura más robusta para aplicaciones en tiempo real. Entre sus principales mejoras, ROS2 introduce:

- Soporte para sistemas distribuidos: La comunicación entre nodos se gestiona mediante DDS, lo que permite una mejor distribución de procesos y la posibilidad de ejecutar nodos en diferentes dispositivos sin pérdida de rendimiento.
- Capacidad en tiempo real: En ROS2, el rendimiento en tiempo real es una prioridad, lo que hace posible su uso en aplicaciones críticas como vehículos autónomos.
- Sistemas de calidad de servicio (QoS): ROS2 permite establecer diferentes niveles de QoS, lo cual es crucial para asegurar la entrega de mensajes en entornos dinámicos y cambiantes.

2.2.2. Elección del DDS

Uno de los componentes más importantes de ROS2 es el sistema de comunicaciones DDS (Data Distribution System), que asegura la transmisión de datos entre los diferentes nodos del sistema en tiempo real. DDS es una especificación estándar de middleware que facilita la comunicación distribuida, empleando un modelo publish-subscribe, el cual es adecuado para sistemas autónomos con alta demanda de transmisión de datos y precisión en tiempo real (Bode et al., 2023).

En ROS2, se usa FastDDS como implementación predeterminada para gestionar las comunicaciones en tiempo real. La elección de FastDDS permite a ROS2 alcanzar una transmisión rápida y confiable entre nodos, siendo útil en aplicaciones autónomas que requieren un alto rendimiento y estabilidad en redes distribuidas (Plasberg et al., 2022).

2.2.2.1. RTI y sus aplicaciones en la arquitectura distribuida

Aunque ROS2 utiliza FastDDS(Deng et al., 2022) como sistema de comunicaciones por defecto, es posible configurar otras implementaciones de DDS que ofrezcan mayor rendimiento y seguridad en escenarios específicos, como se puede ver en la Ilustración 2. RTI Connex DDS(Aartsen et al., 2022) es una de las

opciones más robustas, especialmente diseñada para aplicaciones críticas como las militares. RTI, además, cumple con los estándares de la OTAN (RTI NATO), lo que lo convierte en una opción confiable para aplicaciones que requieren altos niveles de seguridad y comunicaciones en tiempo real.

La elección de DDS es fundamental para garantizar la integridad de la comunicación entre los nodos del sistema en aplicaciones autónomas. La robustez de RTI Connex DDS ha sido validada en diversas aplicaciones militares, donde la fiabilidad y la baja latencia son requisitos esenciales. En esta tesis, se ha optado por usar RTI debido a su capacidad para manejar sistemas de comunicación en tiempo real y su capacidad para adaptarse a las demandas del proyecto

2.2.3. Ventajas de ROS2 en la arquitectura distribuida

ROS2 es el framework ideal para esta tesis debido a su enfoque modular y distribuido, que permite la fácil integración de nodos que controlan diferentes componentes del vehículo autónomo, tales como sensores, actuadores y módulos de navegación. La capacidad de ROS2 para trabajar en sistemas distribuidos permite escalar la arquitectura de control a múltiples dispositivos, optimizando el rendimiento y la fiabilidad del sistema.

Entre las principales ventajas del uso de ROS2 en esta tesis se encuentran:

- **Modularidad:** Facilita el desarrollo y la integración de nuevos componentes sin afectar el rendimiento del sistema global.
- **Comunicación en tiempo real:** A través de DDS, ROS2 asegura que los mensajes entre los diferentes nodos se entreguen con la mínima latencia posible (Ye et al., 2023).
- **Escalabilidad:** Gracias a su naturaleza distribuida, ROS2 permite que los desarrolladores agreguen o eliminen nodos según sea necesario sin comprometer la arquitectura general del sistema.

2.3. Navegación de vehículos autónomos

La navegación en vehículos autónomos ha evolucionado con el uso extendido de GNSS de precisión como herramienta primaria para la localización y el guiado de rutas. En entornos abiertos, el GPS permite a los vehículos obtener datos de ubicación en tiempo real, lo que resulta crucial para calcular trayectorias precisas y ajustarse a rutas predefinidas. Sin embargo, presenta desafíos, especialmente en

áreas urbanas y subterráneas, donde las señales pueden sufrir interferencias. Para solventar estas limitaciones, los investigadores han comenzado a combinar GPS con otras tecnologías de navegación para mejorar la precisión y robustez de los sistemas de posicionamiento en áreas de señal débil o interrumpida (Min et al., 2019).

Para incrementar la precisión de la navegación basada en GPS en entornos difíciles, se utilizan técnicas de fusión de sensores (Ruggaber et al., 2023), integrando datos de GPS con información proveniente de sistemas de percepción, como cámaras, LiDAR y sensores inerciales. Este enfoque permite mantener la precisión de la posición incluso cuando el GPS no está disponible, como en túneles o áreas urbanas cerradas. La fusión de GPS con sensores inerciales y sistemas de posicionamiento mediante filtros de Kalman ha demostrado mejorar la precisión de los vehículos autónomos, reduciendo los errores de localización en condiciones de señal débil o intermitente (Khosy'i'n et al., 2021).

Un enfoque adicional para mejorar la navegación en vehículos autónomos consiste en utilizar mapas de alta definición (HD Maps) junto con GPS. Estos mapas contienen información detallada del entorno, como la posición de carriles y señales de tráfico, lo que ayuda al vehículo a situarse de manera más precisa en relación con el entorno y a planificar rutas seguras. Este tipo de mapas, combinados con GPS, permite a los vehículos autónomos navegar de forma eficaz, especialmente en áreas urbanas densas, donde los detalles de la infraestructura son esenciales para la conducción segura y precisa (Seo et al., 2023).

La integración de GPS con algoritmos de percepción y mapeo también ha facilitado el desarrollo de técnicas de navegación cooperativa, donde múltiples vehículos intercambian datos de posición y trayectorias para mejorar la precisión de la navegación. Esta colaboración entre vehículos, utilizando GPS y comunicación vehículo a vehículo (V2V), permite reducir los errores de localización y mejora la seguridad en la conducción autónoma, especialmente en convoyes o zonas con tráfico elevado (Piperigkos et al., 2021). Estudios recientes, como el de (Doan et al., 2023), han explorado cómo la planificación de rutas integrada en red puede optimizar estas interacciones, incrementando la seguridad y eficiencia en escenarios colaborativos.

2.4. Inteligencia Artificial en Vehículos Autónomos

La inteligencia artificial (IA) ocupa un papel fundamental en el desarrollo de vehículos autónomos al habilitar sistemas de toma de decisiones que funcionan de manera eficiente en entornos altamente dinámicos y en condiciones de incertidumbre. La implementación de IA en vehículos autónomos abarca múltiples niveles operativos, desde la percepción y el procesamiento de información sensorial hasta la planificación de trayectorias y el control preciso de los actuadores del vehículo. Las técnicas de aprendizaje profundo, junto con las redes neuronales, son ampliamente utilizadas en estas áreas, desempeñando un papel esencial en la detección y clasificación de objetos, el reconocimiento de señales y la predicción de comportamientos de otros usuarios en la carretera, lo que permite una conducción más segura y proactiva. Este enfoque integrador hace que los vehículos autónomos logren operar de manera más eficaz en entornos cambiantes y optimicen la experiencia de conducción segura.

En particular, las redes neuronales convolucionales (CNN) se han consolidado como una herramienta crucial para el procesamiento de datos de imágenes y LIDAR (Caltagirone et al., 2019), mejorando notablemente la precisión en la detección y clasificación de objetos en el entorno. Esta capacidad de procesamiento visual avanzada permite que el sistema identifique vehículos, peatones y otros elementos relevantes, creando un panorama completo del entorno que contribuye a la toma de decisiones de manera eficiente. Complementariamente, los modelos de redes neuronales recurrentes (RNN), incluyendo redes LSTM (Long Short-Term Memory), son aplicados con éxito en la predicción de trayectorias (Altche & De La Fortelle, 2017), permitiendo anticipar movimientos de objetos en el entorno cercano. Estas predicciones mejoran la capacidad del vehículo para responder a posibles colisiones o cambios repentinos en el entorno.

Además de la percepción y clasificación, los modelos de IA desempeñan un rol clave en la planificación de rutas y toma de decisiones en tiempo real. Las técnicas avanzadas de optimización de trayectorias permiten que los vehículos autónomos generen rutas que minimicen el riesgo de colisión, optimicen el consumo energético y maximicen la seguridad. Esto resulta fundamental en la navegación autónoma, donde cada maniobra debe calcularse con precisión para evitar obstáculos y realizar ajustes en la ruta. La integración de IA fomenta un

aprendizaje continuo, permitiendo al sistema mejorar sus capacidades y adaptarse a condiciones y escenarios nuevos a medida que acumula experiencias.

En el ámbito de control de bajo nivel, diversas técnicas de IA (Duan et al., 2023) están ganando relevancia al integrarse en controladores avanzados que van desde la lógica difusa hasta redes neuronales adaptativas. Estas tecnologías permiten que el sistema de control del vehículo ajuste sus parámetros y mejore su rendimiento en función de las condiciones cambiantes del entorno, como las variaciones de la superficie de la carretera o condiciones meteorológicas. Con el avance de la inteligencia artificial explicable (Chamola et al., 2023), se incrementa el interés en su aplicación dentro de los sistemas de conducción autónoma, ya que proporciona una visibilidad detallada de las operaciones de la red neuronal y ayuda a los ingenieros a monitorizar y validar las decisiones del sistema en tiempo real. Este enfoque no solo facilita la identificación de errores o ajustes necesarios, sino que también contribuye a aumentar la seguridad y confiabilidad del sistema en aplicaciones prácticas, allanando el camino hacia una implementación más segura y robusta de vehículos autónomos.

2.5. Limitaciones del estado actual

Tras el análisis detallado en el apartado anterior sobre el estado de la cuestión en vehículos autónomos, arquitecturas de control y sistemas de automatización, se han identificado las siguientes limitaciones en el estado actual, las cuales serán abordadas a lo largo de esta tesis.

2.5.1. Limitación en la disponibilidad de vehículos autónomos para investigación

Una de las principales barreras que enfrentan los investigadores en el ámbito de los vehículos autónomos es la escasa disponibilidad de plataformas automatizadas para desarrollar sus trabajos. Aunque muchos fabricantes cuentan con sistemas automatizados integrados en sus vehículos de producción, estos sistemas suelen ser cerrados, lo que limita la posibilidad de interactuar con ellos desde el exterior. La investigación en este ámbito a menudo está restringida a los desarrollos internos de los propios fabricantes, como se muestra en (Barrio et al., 2023). En el caso de que un investigador desee realizar una investigación externa, es necesario establecer una colaboración con el fabricante, lo cual puede ser complicado y no siempre factible, o bien recurrir a un largo proceso de ingeniería

inversa para acceder y controlar los sistemas integrados del vehículo. Además, los vehículos que disponen de las características necesarias para una automatización completa suelen ser modelos relativamente modernos, lo que implica un elevado coste. Este factor representa un desafío para las universidades y centros de investigación, los cuales a menudo no cuentan con los recursos suficientes para adquirir este tipo de plataformas.

2.5.2. Limitación de la interoperabilidad de vehículos autónomos

Una vez identificadas las plataformas automatizadas disponibles para la investigación, surge el problema de la interoperabilidad entre vehículos. La comunicación efectiva entre vehículos autónomos y entre estos y los sistemas de gestión es una tarea compleja debido a la falta de estandarización. Actualmente, no existe una norma común que permita operaciones conjuntas entre diferentes vehículos autónomos. Las interfaces de comunicación, tanto entre los propios vehículos como con los sistemas de gestión, utilizan tecnologías diversas y protocolos incompatibles, y en muchos casos el contenido de los mensajes no es público o no está estandarizado. Esta falta de interoperabilidad limita la posibilidad de coordinar acciones entre múltiples vehículos y de integrarlos en sistemas más amplios de gestión del tráfico o la automatización industrial.

2.5.3. Limitación de la estandarización del software en vehículos autónomos

Otro problema significativo que enfrentan los investigadores es la falta de estandarización en las arquitecturas de control y la escasa modularidad de los sistemas de automatización de los vehículos autónomos. Esta situación obliga a los investigadores a adaptar sus desarrollos a cada vehículo o plataforma específica, lo que aumenta el tiempo necesario para llevar a cabo los trabajos de investigación y dificulta enormemente el proceso. Una posible solución a este problema es la adopción del framework ROS2, el cual permite estandarizar las comunicaciones y facilita la gestión de las interfaces entre los diferentes módulos del sistema. Además, la arquitectura de control propuesta en esta tesis, basada en la modularización, ayuda a que los investigadores solo tengan que centrarse en el desarrollo del módulo específico en el que trabajan, sin necesidad de gestionar todo el sistema global.

2.5.4. Limitaciones propias del framework ROS2

Si bien el framework ROS2 se presenta como una solución para mitigar algunas de las limitaciones previamente descritas, también tiene limitaciones propias. Una de las principales dificultades identificadas es la capacidad de ROS2 para gestionar comunicaciones externas a la red local. Esto se debe a que, por diseño, la comunicación entre los nodos de ROS2 debe realizarse dentro de una red local, lo que limita su capacidad para integrarse con dispositivos o sistemas externos. En esta tesis, se proponen soluciones para superar esta limitación, permitiendo la comunicación segura de la arquitectura de control basada en ROS2 con dispositivos externos, incluyendo aquellos que se encuentran fuera de la red local e incluso a través de Internet, sin comprometer la seguridad de un sistema crítico como el control de vehículos autónomos.

3. Arquitectura de control

Este capítulo se centra en el desarrollo y la implementación de una arquitectura de control diseñada para la automatización de vehículos en entornos no estructurados. La automatización vehicular exige la integración de diversos subsistemas que permitan el control de los principales elementos del vehículo, como la dirección, aceleración y frenado, así como de sistemas secundarios, como el cambio de marchas y otros dispositivos específicos. Para lograr esta integración, se ha adoptado un enfoque modular y escalable que facilita la reutilización de componentes y la adaptación a diferentes tipos de vehículos.

En este capítulo, se describirán en detalle los componentes físicos y electrónicos que permiten la automatización de los vehículos, desde los actuadores hasta los sistemas de control, y como estos se conectan y comunican mediante la red de comunicación CAN. También se abordará la arquitectura de software que gestiona la interacción entre los actuadores y los controladores de alto nivel, garantizando que el sistema funcione de manera coherente y eficiente.

Además, se analizarán las metodologías empleadas para diseñar una arquitectura flexible y adaptable, capaz de ser implementada en distintos contextos vehiculares. Esto incluye desde la integración de hardware comercial hasta la creación de controladores específicos para los vehículos utilizados en los experimentos de esta tesis. Finalmente, se presentarán los mecanismos de seguridad implementados en la arquitectura, que permiten la operación segura de los vehículos automatizados en situaciones de emergencia o fallo del sistema.

3.1. Metodología de automatización

El presente capítulo aborda un aspecto fundamental para alcanzar el objetivo principal del proyecto: la implementación práctica de los desarrollos teóricos en un entorno real. Para ello, es imprescindible establecer un sistema de control eficaz que permita gestionar de manera precisa los diferentes elementos del vehículo. La necesidad de adaptar este control varía en función de las especificaciones técnicas de cada vehículo, lo que implica la incorporación, modificación o eliminación de distintos actuadores según las características particulares de cada caso. Esta variabilidad subraya la complejidad inherente al diseño y personalización del sistema de control, destacando la importancia de un

enfoque flexible y modular para garantizar la integración adecuada de los desarrollos teóricos en aplicaciones prácticas dentro de una amplia gama de contextos automotrices.

En primer lugar, se examinan los componentes esenciales para lograr una conducción autónoma efectiva. Entre estos, se incluyen el volante, encargado del control lateral, y los sistemas de aceleración y frenado(Vivek et al., 2020), responsables del control longitudinal(Raza & Ioannou, 1997). Además, se ha procedido a la integración de sistemas de control adicionales para la gestión de funciones secundarias, como el cambio de marchas y la manipulación de dispositivos específicos, tales como el volquete en camiones de obras públicas. Estos elementos serán clave en el diseño de bajo nivel de la arquitectura software, ya que permitirán la reutilización de módulos funcionales en diferentes actuadores, minimizando el esfuerzo de desarrollo.

Es importante destacar que la propuesta de automatización planteada en esta tesis busca ser aplicable a cualquier tipo de vehículo, independientemente de los sistemas de control con los que esté equipado. La intervención sobre los sistemas del vehículo se realiza de manera externa al fabricante, permitiendo una flexibilidad total en su integración. No obstante, la arquitectura diseñada es compatible con la utilización de ciertos sistemas preinstalados de fábrica, como se evidenciará en uno de los proyectos presentados en capítulos posteriores.

3.1.1. Actuadores

3.1.1.1. Volante

Para ejercer control sobre la dirección del vehículo(Naranjo et al., 2005), es posible intervenir tanto en el sistema de asistencia de la dirección como directamente en la columna de dirección. Resulta esencial realizar un estudio detallado de las características técnicas del sistema para cada caso específico.

En el marco de los proyectos descritos en la sección 4.2.1, el sistema desarrollado facilita el control de la dirección mediante la utilización del motor del sistema de dirección asistida. La implementación de dicho control requiere una intervención en el circuito de alimentación eléctrica de este motor, que está gestionado originalmente por la unidad de control electrónico (ECU) del vehículo. La intervención sobre este sistema se lleva a cabo en dos etapas distintas.

Inicialmente, es necesario modificar la fuente de alimentación del motor, delegando su control a un dispositivo externo. Este proceso de redirección se lleva a cabo mediante la incorporación de un selector electrónico equipado con relés dobles en la línea de alimentación, permitiendo así la transferencia del control del motor de la ECU a un sistema de control externo.

A continuación, se procede a regular la rotación del motor. Para este propósito, se ha seleccionado el controlador Maxon EPOS 4, el cual es capaz de ajustar la rotación del motor basándose en el torque, mostrado en la Ilustración 4.

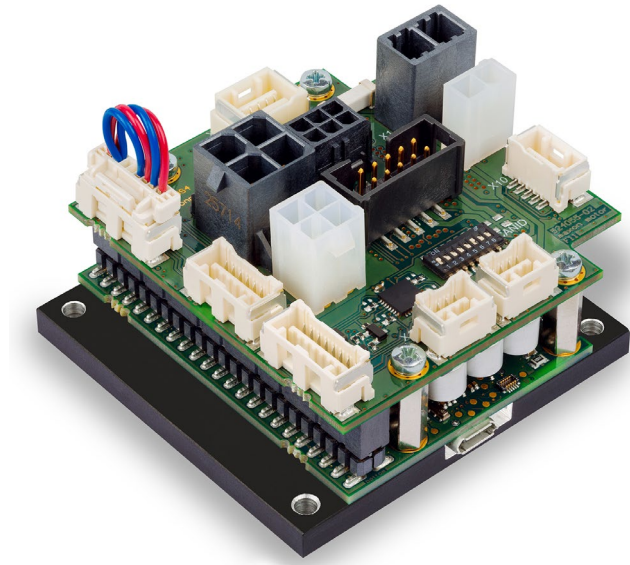


Ilustración 4: Controladora programable
Maxon EPOS 4

Dicho ajuste se realiza exclusivamente a través del control de la corriente suministrada al motor, por lo que no requiere sensórica adicional en la columna de dirección ni en el motor.

Sin embargo, el sistema descrito enfrenta una limitación significativa ya que el control del giro del motor se basa únicamente en la gestión de voltaje y corriente, desaprovechando la capacidad del controlador para realizar ajustes de posición de alta frecuencia. Por tanto, se hace necesaria la implementación de un sistema de control de posición externo, aprovechando la retroalimentación proporcionada por el sensor de posición del volante instalado en el vehículo.

Para los demás proyectos abarcados en esta tesis, descritos en la sección Aplicación y resultados, se ha requerido hacer uso de un dispositivo específico para intervenir en el control de la columna de dirección. Este dispositivo es el "Equipo para controlar automáticamente la dirección de un vehículo", registrado bajo el número de patente ES2516568 (Jiménez et al, 2013; Naranjo, Jiménez, et al., 2020), mostrado en la Ilustración 5.

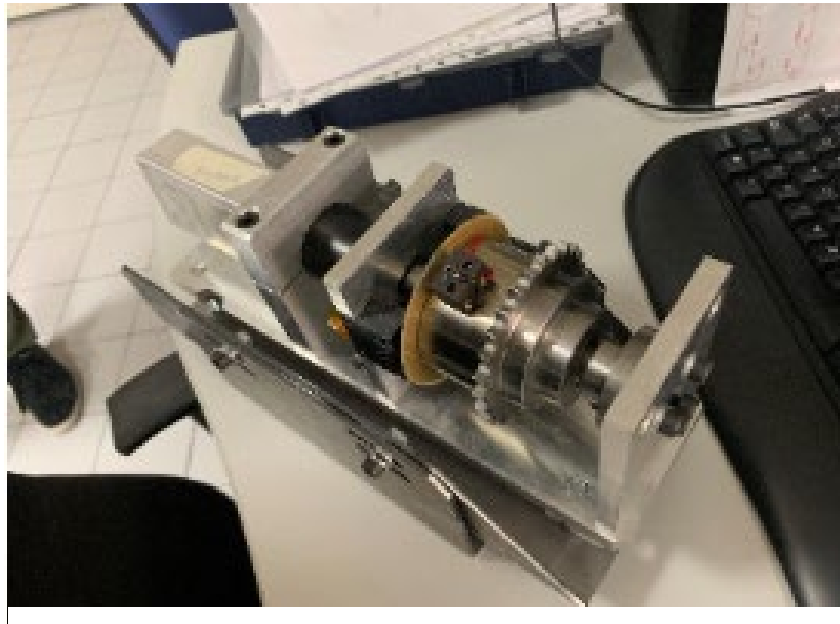


Ilustración 5: Detalle del equipo para controlar la dirección.

El funcionamiento del equipo utilizado se desglosa en varios componentes esenciales: El eje del motor está conectado a una corona dentada mediante un electroimán de alta potencia, que se activa o desactiva por una señal digital proveniente de la electrónica del motor, logrando así una unión temporal entre el eje del motor y la corona dentada. Esta corona, a su vez, está enlazada mediante una cadena a otra corona fijada de forma semipermanente a la columna de dirección, permitiendo el control del giro de la columna a través de la comunicación con el motor por medio de CAN (Controller Area Network).

La elección de estos sistemas de control de dirección se ha realizado de forma meticulosa enfocándose en los mecanismos de seguridad incorporados en su diseño, destacando dos aspectos fundamentales. En primer lugar, ambos sistemas son configurables de manera que, si la actuación sobre el volante resulta en la aplicación de un torque que exceda un umbral preestablecido, cesará automáticamente la aplicación de torque sobre la columna de dirección. Permitiendo así redirigir la trayectoria en caso de emergencia, garantizando así una capa adicional de seguridad.

En segundo lugar, ante un corte inesperado del suministro eléctrico, ya sea accidental o intencionado, como en una parada de emergencia, los relés responsables de la conmutación de la alimentación eléctrica al motor de la dirección asistida revierten instantáneamente a su estado de reposo. Esto restablece de forma automática el control de la dirección a la centralita del vehículo, o bien, el electroimán que facilita el acoplamiento de la corona dentada al eje del motor se desactiva, liberando la columna de dirección.

3.1.1.2. Acelerador

Para la realización de control del acelerador(Naranjo, Jiménez, et al., 2020; Vivek et al., 2020) se ha realizado un estudio del funcionamiento del sistema de aceleración en vehículos, sin adentrarse en los aspectos mecánicos como inyectores, bombas de combustible o propulsiones eléctricas. Tradicionalmente, el acelerador envía una señal analógica a la unidad de control electrónico (ECU) del vehículo, la cual, a su vez, modula la respuesta mecánica del motor. Es en este punto de interacción donde se identifica la oportunidad de intervención.

Desde el laboratorio de electrónica del INSIA, se ha desarrollado una innovadora solución electrónica capaz de intervenir en la señal original del acelerador. Este desarrollo se fundamenta en la implementación de un sistema de doble relé, análogo al descrito en la sección 3.1.1.1, capaz de generar una señal analógica alternativa, con el propósito de modular de manera controlada la señal percibida por la ECU.

La complejidad de esta intervención aumenta al considerar los sistemas de seguridad integrados por los fabricantes, diseñados para verificar la funcionalidad correcta del acelerador. Entre los mecanismos más frecuentes se encuentran el uso de señales analógicas complementarias o la emisión de una señal secundaria al 50% de su valor. Específicamente en vehículos pesados, se han identificado mecanismos adicionales, tales como piones para determinar la no activación o el final de recorrido del pedal.

Ante este escenario, el laboratorio de electrónica del INSIA ha concebido y desarrollado un dispositivo electrónico con la capacidad de reemplazar funcionalmente al pedal de acelerador, permitiendo su control remoto a través de comunicación CAN. Este dispositivo ha sido materializado en dos versiones distintas:

La primera versión de la placa denominada CANADAC, se caracteriza por su robustez y gran capacidad para recibir instrucciones mediante comunicación CAN y generar señales analógicas y digitales, se muestra en la Ilustración 6.



Ilustración 6: Placa electrónica para el control del acelerador CANADAC

Sin embargo, esta versión enfrenta desafíos significativos, tales como su susceptibilidad a la actual crisis de componentes electrónicos, lo que incrementa tanto su costo de producción como los plazos de entrega, llegando en ocasiones a limitar su fabricación.

Adicionalmente, la reconfiguración de su comportamiento para adecuarse a los diferentes vehículos, a pesar de ser técnicamente posible, resulta compleja y demanda conocimientos especializados en software específico de PEAK, lo cual no es común en todos los centros de investigación o entre los estudiantes.

Ante estos retos, se ha optado por un rediseño del componente, mostrado en la Ilustración 7, buscando superar las dificultades mencionadas y promoviendo una

mayor accesibilidad para investigadores y estudiantes. La nueva versión incorpora como elemento central el microcontrolador Arduino, conocido por su facilidad de uso por personal no especializado en electrónica. A pesar de esta elección, no se ha realizado ningún recorte en la funcionalidad antes descrita, aumentando de echo la precisión de las señales analógicas y la posibilidad de generar señales secundarias para el control y monitorización de otros actuadores circundantes.

Esta elección no solo agiliza los procesos de desarrollo y prototipado, sino que también ofrece ventajas en términos de modularidad, posibilitando una rápida evolución del diseño y su adaptación para otros usos vehiculares.

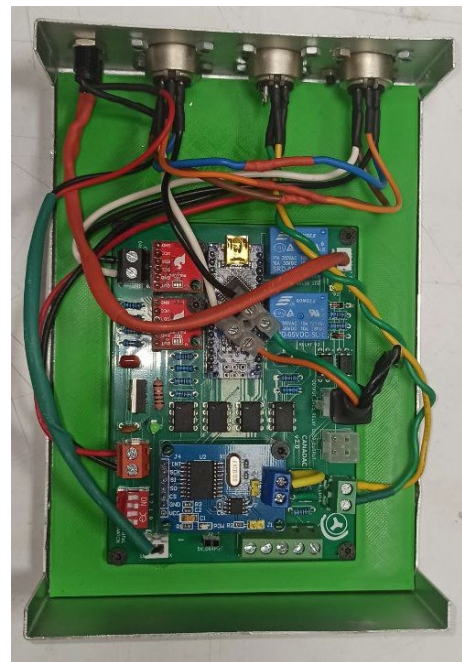
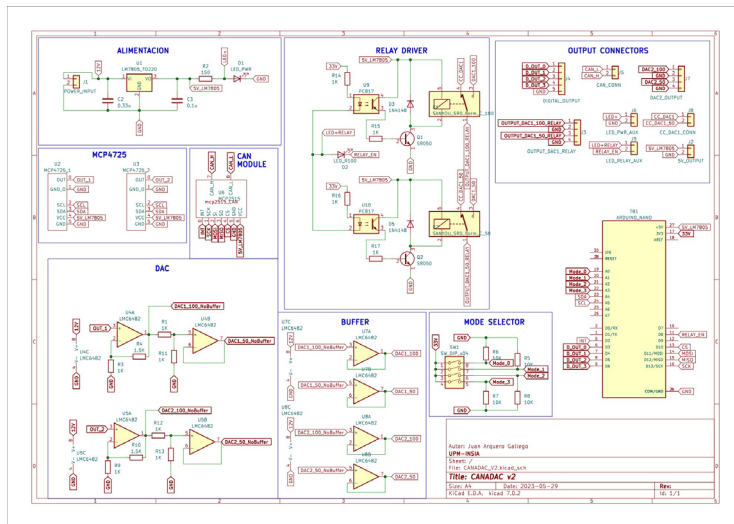


Ilustración 7: CANADAC Versión 2 para la gestión de señales analógicas

3.1.1.3. Freno

Se han explorado diversas metodologías para la intervención en el sistema de frenado de vehículos (Ioannou & Xu, 1994). La actuación directa sobre el circuito hidráulico de frenos (Milanés et al., 2010) se identificó inicialmente como una solución de gran robustez y fiabilidad. No obstante, esta opción fue eventualmente descartada debido a su elevada complejidad de implementación y a la necesidad de introducir modificaciones significativas en la estructura del vehículo. Estas alteraciones podrían requerir procesos de homologación y generar complicaciones de importancia si no se ejecutan de manera adecuada. Adicionalmente, dadas las

orientaciones investigativas de esta tesis, dicha implementación se consideró inviable.

Por ello se ha propuesto una solución simple pero igualmente efectiva, que facilita tanto la modificación como la actualización del sistema para su utilización en centros de investigación. La solución adoptada implica la utilización de un motor eléctrico para ejercer fuerza sobre el pedal de freno, tal como se detalla en la Ilustración 8.

Este motor se instala fijamente en la estructura del vehículo, ubicado en la zona posterior del pedal de freno, y ejerce tracción sobre este mediante un mecanismo compuesto por una cadena y una corona dentada, mostrado en la Ilustración 9.

Este mecanismo, a diferencia del sistema hidráulico, permite la integración con los sistemas preexistentes del vehículo, diseñados para garantizar una frenada efectiva mediante la aplicación de una fuerza razonable. Además, esta solución posibilita la intervención manual sobre el sistema de frenado en cualquier momento, incluso bajo condiciones de conducción autónoma, lo que representa una medida de seguridad adicional (Naranjo, Jiménez, et al., 2020).



Ilustración 8 : Motor empleado para la actuación sobre el pedal del freno

Específicamente en el contexto de vehículos eléctricos, los fabricantes integran un mecanismo de seguridad adicional por el cual, al detectar la activación del pedal de freno, incluso de forma leve, el sistema de aceleración queda automáticamente deshabilitado. Esto ocurre aun cuando el acelerador esté siendo manipulado mediante el sistema descrito en la sección 3.1.1.2, proporcionando una capa adicional de seguridad en la interacción entre los sistemas de control del vehículo.



Ilustración 9: Detalle de la automatización del pedal del freno

3.1.1.4. Marchas y dispositivos específicos

La gestión automatizada del cambio de marchas representa un desafío significativo en el campo de la automatización, un ámbito en el cual numerosos centros de investigación y desarrollos comerciales han optado tradicionalmente por resignarse al control manual. No obstante, en el Instituto Universitario de Investigación del Automovil (INSIA), donde se ha desarrollado la presente tesis doctoral, se ha decidido abordar este reto mediante la propuesta de una solución para vehículos cuya gestión de marchas es electrónicamente controlable.

Esta solución se basa en el uso de un conjunto de relés gestionados a través del bus CAN, Ilustración 10, que permiten generar las combinaciones de señales digitales y secuencias necesarias para ejecutar el cambio de marchas de manera automática. Este enfoque, personalizado para cada vehículo, sigue una metodología similar a la empleada en la segunda versión del dispositivo de control del acelerador, con la particularidad de que, en lugar de desarrollar circuitos impresos (PCB) específicos, se optó por la integración de módulos comerciales disponibles.

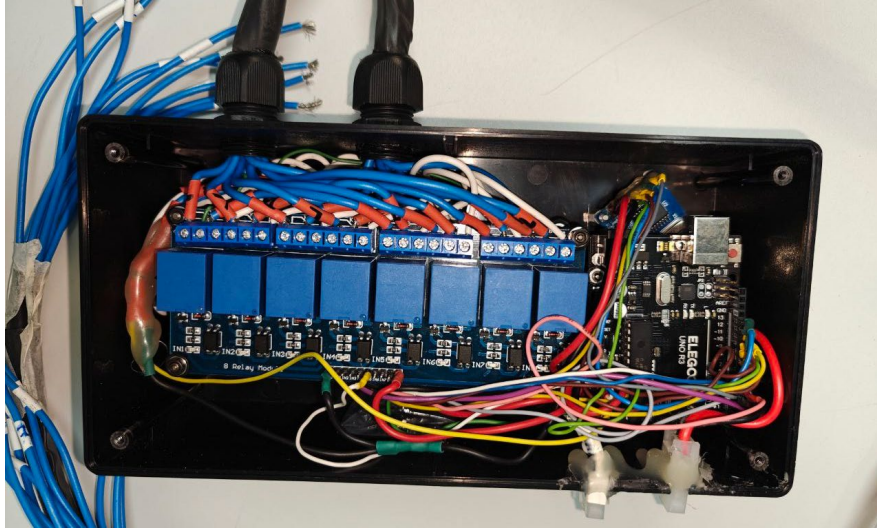


Ilustración 10: Caja de relés para la gestión de marchas

La automatización del cambio de marchas es solo un ejemplo de cómo se puede extender esta lógica de funcionamiento para abarcar otros sistemas. Un caso ilustrativo se aplica al proyecto detallado en la sección 4.2.3 de esta tesis, donde se automatizó el sistema de volquete de un vehículo. En este caso, se utilizó una plataforma Arduino para procesar las instrucciones recibidas a través de CAN, junto con un sistema mecánico compuesto por un husillo y un motor paso a paso. Este conjunto mecánico estaba destinado a ajustar la palanca de control del volquete a la posición deseada, como se evidencia en la Ilustración 11.



Ilustración 11: Dispositivo para el control del movimiento del volquete

Dado que el sistema de control del volquete carecía de un mecanismo de retroalimentación para monitorear la posición de la palanca, se hizo imprescindible la incorporación de un sensor de fin de carrera. Este sensor juega un papel crucial durante el proceso de calibración, permitiendo determinar con precisión la posición del motor y asegurando la correcta ejecución de las funciones automatizadas.

Este enfoque hacia la automatización de sistemas vehiculares no solo destaca por su capacidad para superar complejidades técnicas inherentes al control de cambio de marchas, si no el potencial de adaptación de un sistema tan simple, como el que se propone, a múltiples aplicaciones en la automatización de vehículos.

Adicionalmente, presenta enormes ventajas de cara al control de los actuadores automatizados con esta lógica a nivel software. Ya que con la arquitectura software de control propuesta, la gestión de todos actuadores de este tipo se realiza mediante un solo módulo software que no requiere ninguna modificación más allá de la carga de parámetros, como se detallará en la sección 3.3.

3.1.1.5. OpenPilot

Excepcionalmente, para el vehículo de la universidad JKU detallado en la sección 4.2.1, y ante la imposibilidad de instalar los actuadores especificados en la sección 3.1, se optó por emplear el software de código abierto OpenPilot(*comma.ai* — *make driving chill*, s. f.; FONTANA, 2023) para la gestión del control del vehículo. Este software, desarrollado por Comma.ai, facilita un nivel de automatización avanzado al interactuar directamente con el sistema de control de cruce de determinados modelos de vehículos¹, inyectando comandos a través del bus CAN del vehículo.

La integración de OpenPilot en el proyecto JKU(Barrio et al., 2023) representa un enfoque pragmático hacia la automatización vehicular, aprovechando las capacidades de un sistema operativo abierto para superar limitaciones técnicas específicas del vehículo en cuestión. Esta solución no solo demuestra la versatilidad y la potencialidad del software de código abierto en aplicaciones de ingeniería automotriz, sino que también subraya la importancia de

¹ <https://comma.ai/vehicles>

adaptar y personalizar las soluciones tecnológicas para cumplir con los objetivos de investigación específicos.

Sin embargo, la implementación de OpenPilot no está exenta de desafíos. Uno de los inconvenientes más notables radica en las limitaciones de compatibilidad con diferentes modelos de vehículos, ya que el software requiere acceso a sistemas de control específicos que no están uniformemente disponibles o son completamente accesibles en todos los vehículos. Además, la dependencia de la infraestructura existente del vehículo para la recopilación de datos y la ejecución de comandos implica que cualquier deficiencia en los sistemas originales de sensores o de control del vehículo puede afectar negativamente la eficacia y la seguridad del sistema automatizado.

3.1.2. Distribución de potencia y comunicaciones CAN

3.1.2.1. Alimentación



Ilustración 12: Detalle de la maleta de distribución de potencia

La integración de múltiples actuadores exige una gestión meticulosa de la distribución de energía para asegurar un funcionamiento eficaz y seguro de todos los componentes. En este contexto, desde el INSIA se ha diseñado un esquema eléctrico que facilita la alimentación diferenciada a diversos voltajes, incorporando

además fusibles de seguridad específicamente dimensionados para cada actuador. Este diseño se ha materializado en la creación de una placa de circuito impreso, distintiva por su color rojo, tal como se ilustra en la Ilustración 12.

Este circuito impreso, en conjunto con transformadores de color negro, permite una alimentación individualizada a cada uno de los actuadores, garantizando su protección frente a posibles picos de corriente que pudieran surgir de cortocircuitos o fallos en el sistema. La implementación de fusibles, dimensionados cuidadosamente para cada circuito, constituye una medida de seguridad crítica que previene daños a los actuadores y al sistema eléctrico en su conjunto.

Este enfoque asegura que cada componente reciba el suministro de energía adecuado para su óptimo funcionamiento, al tiempo que se minimiza el riesgo de incidencias eléctricas, contribuyendo así a la integridad y la eficiencia del proyecto en su conjunto.

3.1.2.2. Red de comunicación CAN



Ilustración 13: Tarjetas de comunicaciones CAN/Ethernet

Como se ha introducido de forma preliminar en la sección 3.1, la coordinación y control de los distintos actuadores implicados en este proyecto se gestionan a través de comunicaciones CAN(Farsi et al., 1999), seleccionadas por su prevalencia en el entorno vehicular y por las ventajas que ofrece en términos de simplificación del cableado y facilidad de diagnóstico en caso de averías o fallos operativos.

Aunque no es estrictamente necesario, dado que la comunicación CAN entre los actuadores, denominada de aquí en adelante como CAN de Control, opera en una línea CAN independiente, se ha decidido estructurar todas las comunicaciones siguiendo el estándar CANOpen(Farsi & Ratcliff, 1997). Este estándar promueve la interoperabilidad entre dispositivos, así como una gestión y monitorización eficientes de los mismos. El estándar CANOpen es un protocolo de comunicación de alto nivel para sistemas embebidos utilizado para permitir la comunicación

entre distintos dispositivos dentro de redes CAN. Se caracteriza por su arquitectura abierta y su modelo de datos orientado a objetos, lo que facilita la implementación de una amplia gama de funcionalidades de control y automatización.

La arquitectura de automatización se estructura de la siguiente manera a nivel CAN: por una parte, se utiliza una tarjeta de adquisición CAN-Ethernet independiente para capturar datos del CAN del vehículo (Buscemi et al., 2023), ya que frecuentemente estos operan a tasas de bits distintas a las empleadas en el CAN de Control y por la limitación mencionada anteriormente que restringe la comunicación por ese CAN a los mensajes predefinidos en la ECU del vehículo. Por otra parte, se emplea una segunda tarjeta de adquisición para facilitar la comunicación bidireccional con los dispositivos de automatización. En ocasiones, se requiere el uso de líneas CAN adicionales para resolver incompatibilidades entre dispositivos, ya sea por diferencias en las tasas de bits o por saturación de las tarjetas de adquisición CAN internas de los dispositivos.

Las pruebas de rendimiento llevadas a cabo sobre las tarjetas de adquisición CAN, instaladas en el sistema de distribución de potencia, han demostrado que su capacidad es adecuada para gestionar simultáneamente las comunicaciones de todos los dispositivos implicados.

Desde una perspectiva de investigación y en el ámbito de la colaboración con otros centros, el empleo de estas tarjetas de adquisición simplifica en gran medida la interacción con el sistema de automatización, ya que toda la comunicación se canaliza a través de una conexión TCP/IP, encapsulando los mensajes CAN directamente en paquetes Ethernet.

3.1.2.2.1 Información del vehículo

En las secciones previas de este documento, se han expuesto con detalle los actuadores requeridos para interactuar con diversos sistemas de control vehicular. Sin embargo, la efectividad de tales intervenciones depende en gran medida de la capacidad para obtener retroalimentación en tiempo real sobre el estado del vehículo, incluyendo aspectos críticos como la velocidad para el control longitudinal, la posición del pedal de freno para su adecuada gestión, y la orientación del volante para asegurar una dirección precisa.

Para recabar esta información esencial del estado del vehículo, se ha decidido, siempre que sea viable, aprovechar los sistemas nativos provistos por el fabricante. Esto implica acceder a los datos a través de la línea CAN del vehículo, una tarea que conlleva ciertas complejidades. Dado que la línea CAN del vehículo está destinada exclusivamente para el tráfico de mensajes especificados por el fabricante, ha sido necesario separar las comunicaciones CAN de los actuadores de la línea CAN secundaria, dedicada únicamente a la lectura de estos parámetros críticos sin interferir con la comunicación primaria del vehículo.

El proceso de extracción de datos de la línea CAN no es trivial, ya que los fabricantes de vehículos suelen ser reticentes a compartir abiertamente la estructura de sus protocolos de comunicación CAN. Por lo tanto, se requiere un análisis manual exhaustivo de la línea CAN (Buscemi et al., 2023) para identificar aquellos mensajes que contienen la información de retroalimentación necesaria para el correcto funcionamiento de nuestros sistemas de control. En algunos casos, los fabricantes pueden ofrecer, ya sea total o parcialmente, los detalles de los mensajes de su línea CAN en forma de archivos DBC, lo que significativamente facilita y agiliza el proceso de implementación de nuestras soluciones.

3.1.3. Sensores

La incorporación de capacidades autónomas a un vehículo, como se aborda en el desarrollo de esta tesis, requiere una consideración detallada de una serie de sensores esenciales para la conducción autónoma (Shanbhag & Jacob, 2023). En esta sección, se examinan los sensores más comúnmente empleados en vehículos autónomos, con el objetivo de integrarlos adecuadamente en la arquitectura de comunicaciones que se detallará en la sección 3.1.3.5.

3.1.3.1. Cámaras

Las cámaras constituyen un pilar fundamental en la conducción autónoma, proporcionando a través de la visión e inteligencia artificiales, capacidades para el reconocimiento de obstáculos, la identificación de la vía transitable, y la estimación de velocidades y trayectorias de otros elementos en el entorno.

La ventaja principal de las cámaras radica en su costo relativamente bajo en comparación con otras tecnologías, así como su habilidad para capturar información espacial y semántica del entorno. No obstante, las cámaras pueden verse afectadas por variaciones en la iluminación o en la visibilidad, lo cual ha

llevado a la adopción de cámaras operativas fuera del espectro visible, como las térmicas o infrarrojas(Thakur & Thakur, 2017), para mejorar el rendimiento en condiciones de baja visibilidad.

Entre los diversos modelos de cámaras utilizados en la conducción autónoma, merece especial atención la cámara Mobileye(Yoffie, 2014), mostrada en la Ilustración 14.

. Este dispositivo se distingue por ser una cámara de propósito general equipada con un procesador integrado, capaz de procesar in situ las imágenes capturadas. Este procesamiento en tiempo real permite que la cámara Mobileye entregue información ya analizada al sistema de control del vehículo, minimizando de este modo la carga computacional requerida por el resto del sistema.



Ilustración 14: Cámara Mobileye

La capacidad de la cámara Mobileye para realizar análisis de imagen avanzado, incluyendo la detección de carriles, señales de tráfico, peatones, y otros vehículos, la convierte en un componente clave en los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) y en aplicaciones de conducción autónoma(Technology & 2017, 2017). Al proporcionar datos precisos y relevantes directamente al sistema del vehículo, facilita una toma de decisiones más rápida y eficiente, mejorando significativamente la seguridad y la fiabilidad de la conducción autónoma.

3.1.3.2. LiDAR

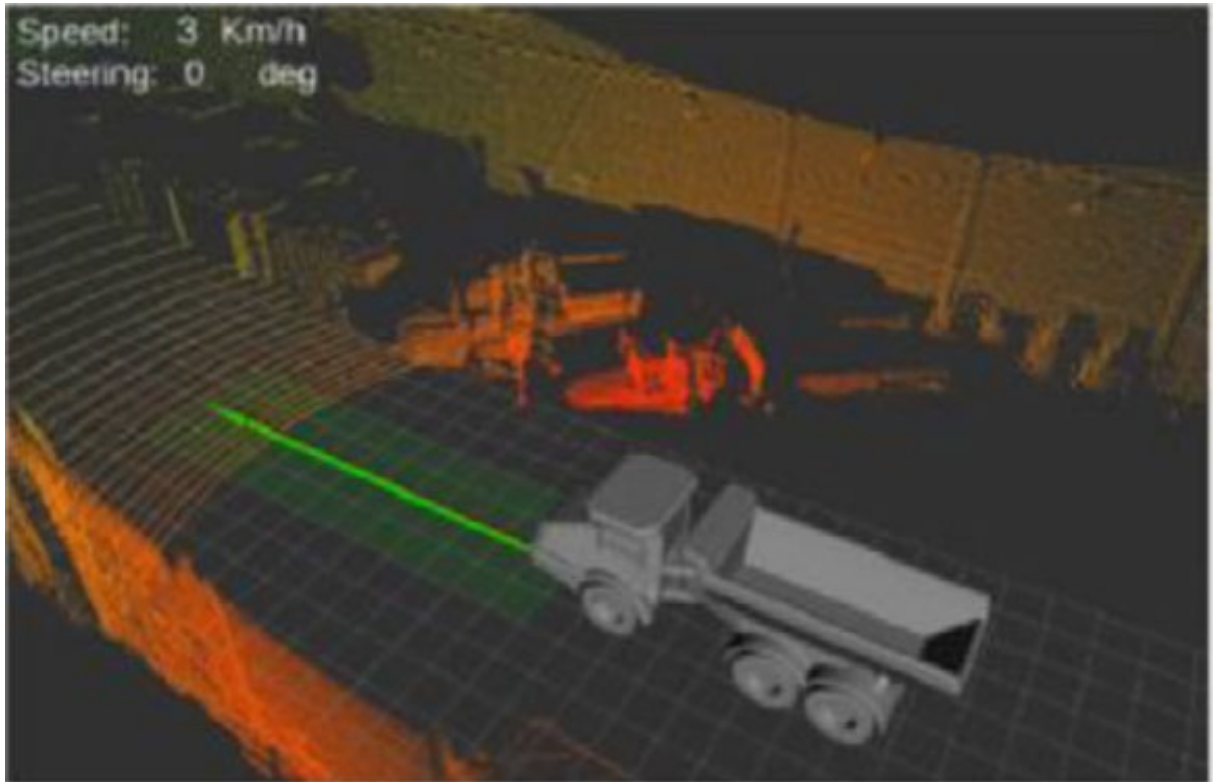


Ilustración 15: Imagen LiDAR obtenida del proyecto Tunnelad

La tecnología LiDAR (Laser Imaging, Detection, and Ranging) emerge como una herramienta crucial en el ámbito de la conducción autónoma, proporcionando una capacidad excepcional para medir distancias a objetos con gran precisión. A través del análisis de los datos obtenidos por LiDAR, es posible realizar una identificación detallada de objetos, así como determinar su trayectoria y velocidad, aunque esto implica un considerable consumo de recursos computacionales.

Esta tecnología, que ha encontrado aplicaciones extensivas en el campo de la robótica, especialmente en tareas de identificación de objetos y localización y mapeo simultáneos (SLAM)(Aulinas et al., 2008), se ha adaptado eficazmente para su uso en vehículos autónomos. Su capacidad para generar un modelo tridimensional detallado del entorno vehicular facilita la navegación precisa y la toma de decisiones autónomas en tiempo real.

Sin embargo, la implementación de LiDAR no está exenta de desafíos. Uno de los principales inconvenientes radica en su relativa baja resolución en comparación con otros sistemas de percepción, como las cámaras de alta definición.

Además, el coste de los sistemas LiDAR ha sido tradicionalmente elevado, aunque este aspecto ha experimentado una mejora significativa gracias al avance tecnológico, haciéndolos más accesibles para su incorporación en vehículos autónomos a gran escala.

3.1.3.3. GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) constituye un elemento crucial en el desarrollo de tecnologías para la navegación y la conducción autónoma, representando el sensor principal en el marco de esta tesis doctoral. La importancia de este sensor radica en su capacidad para proporcionar datos de localización precisos, indispensables para la navegación en entornos abiertos y la planificación de trayectorias en vehículos autónomos.

La precisión es un factor determinante en la eficacia del GPS para aplicaciones de conducción autónoma. Los dispositivos GPS estándar, como aquellos integrados en smartphones y dispositivos comerciales, presentan un margen de error promedio de aproximadamente 15 metros (Magiera et al., 2022). Tal nivel de imprecisión resulta inaceptable para los requisitos de exactitud necesarios en la conducción autónoma y en la recopilación de datos de trayectoria detallados.

En respuesta a esta necesidad de alta precisión, se ha seleccionado el sistema GPS Trimble BD935, mostrado en la Ilustración 16, para su implementación en esta tesis, tras un meticuloso proceso de evaluación de las



Ilustración 16: GPS Trimble 992

tecnologías GPS disponibles en el mercado. Este dispositivo se distingue por incorporar tecnologías avanzadas de corrección, como la Corrección Diferencial, la Corrección Inercial y Real-Time Kinematic (RTK) (Ochalek et al., 2018), y por su capacidad para sincronizarse con las principales constelaciones de satélites disponibles, incluyendo GPS, Glonass, Galileo y Beidou. Estas características le permiten alcanzar márgenes de error inferiores a tres centímetros, lo cual lo convierte en una herramienta excepcionalmente precisa para la navegación y la recopilación de datos geoespaciales en la investigación de conducción autónoma.

No obstante, es importante reconocer que, incluso con la avanzada tecnología del GPS Trimble, existen circunstancias bajo las cuales el margen de error puede incrementarse significativamente. Un ejemplo notable es el efecto de cañón urbano (Y. Cui & Ge, 2003), que ocurre en áreas con edificaciones altas, donde la señal GPS puede ser obstruida o reflejada, provocando desviaciones en la precisión de la localización. Este fenómeno subraya la necesidad de implementar sistemas complementarios de navegación y sensores adicionales para asegurar la confiabilidad y la precisión en la localización, especialmente en entornos urbanos complejos.

3.1.3.4. Radar

Aunque el radar no se emplea directamente en los proyectos de esta tesis, su relevancia en el contexto de los vehículos autónomos merece ser destacada. El radar, mediante el uso de ondas electromagnéticas y el efecto Doppler —este último se manifiesta cuando las ondas reflejadas por un objeto en movimiento experimentan un cambio en frecuencia—, permite la medición precisa de distancias hasta objetos. Esta capacidad de detección es crucial para identificar la posición y la velocidad relativa de objetos circundantes (Metrics et al., 2023), facilitando así la toma de decisiones en tiempo real por parte de sistemas de conducción autónoma.

La inclusión de tecnología radar en vehículos autónomos se justifica por varias ventajas significativas. Primero, el radar es notablemente resiliente ante condiciones atmosféricas y visuales adversas, tales como niebla, lluvia intensa o polvo, donde otras tecnologías de percepción, como cámaras y LiDAR, pueden ver reducida su eficacia. Además, el alcance extenso del radar permite una detección temprana de potenciales peligros en la vía, contribuyendo a una anticipación y reacción más efectivas ante situaciones imprevistas.

Sin embargo, la tecnología radar también enfrenta limitaciones. Su sensibilidad a la reflectividad de los materiales puede influir en la precisión de las mediciones. Por ejemplo, superficies metálicas pueden reflejar las ondas de manera que amplifiquen la señal recibida, dando lugar a percepciones erróneas sobre el tamaño real de un objeto. Esta característica implica que, si bien el radar es una herramienta valiosa por su robustez y capacidad para funcionar en diversas condiciones ambientales, no puede considerarse infalible. Su eficacia se maximiza cuando se utiliza en conjunto con otros sistemas de sensores, permitiendo una interpretación más completa y matizada del entorno vehicular.

3.1.3.5. Red de comunicación de TCP/IP

Para avanzar hacia la realización de plataformas autónomas de investigación, esta tesis propone dos arquitecturas de red distintas (Walrand et al., 2021), diseñadas para adecuarse a diferentes niveles de complejidad y capacidades requeridas en el desarrollo de vehículos autónomos.

La primera es una arquitectura simplificada, destinada a facilitar la creación y puesta en marcha de la plataforma autónoma, mientras que la segunda es una arquitectura más compleja, diseñada para optimizar el rendimiento y expandir las funcionalidades de la plataforma.

3.1.3.5.1 Diagrama de red simple

La arquitectura de red simple se centra en la eficiencia y la simplicidad, adecuada para situaciones donde la plataforma autónoma se limita a un único vehículo o cuando se buscan soluciones más accesibles en términos de implementación y mantenimiento. Los componentes esenciales de esta red incluyen:

Ordenador de Control: Equipado con una interfaz de red, actúa como el cerebro de la operación, gestionando las tareas de control, navegación y percepción.

Tarjetas de Comunicaciones CAN/Ethernet: Dos unidades que facilitan la comunicación entre el ordenador de control y los sistemas del vehículo a través de la red CAN, traduciendo los datos a Ethernet para su procesamiento y análisis.

Sensores Requeridos: Incluyen GPS, IMU (Unidad de Medida Inercial), Lidar, entre otros, proporcionando datos críticos sobre el entorno y el estado del vehículo.

Switch de Red: Con puertos suficientes para conectar todos los sensores y dispositivos, sirve como el punto central de conexión en la red del vehículo, asegurando una comunicación fluida entre los componentes.

Todos los dispositivos se configuran dentro de la misma subred, tal como se indica en la Ilustración 17, para permitir una comunicación directa y eficiente, y se provee acceso a internet al GPS. Esta configuración simplificada permite una integración y un despliegue rápidos de la plataforma, aunque todos los nodos de ROS —control, navegación y percepción— deben ejecutarse en el mismo ordenador. Esta limitación podría llevar a una saturación del procesador y la red, especialmente en aplicaciones que requieren un alto volumen de datos o procesamiento en tiempo real.

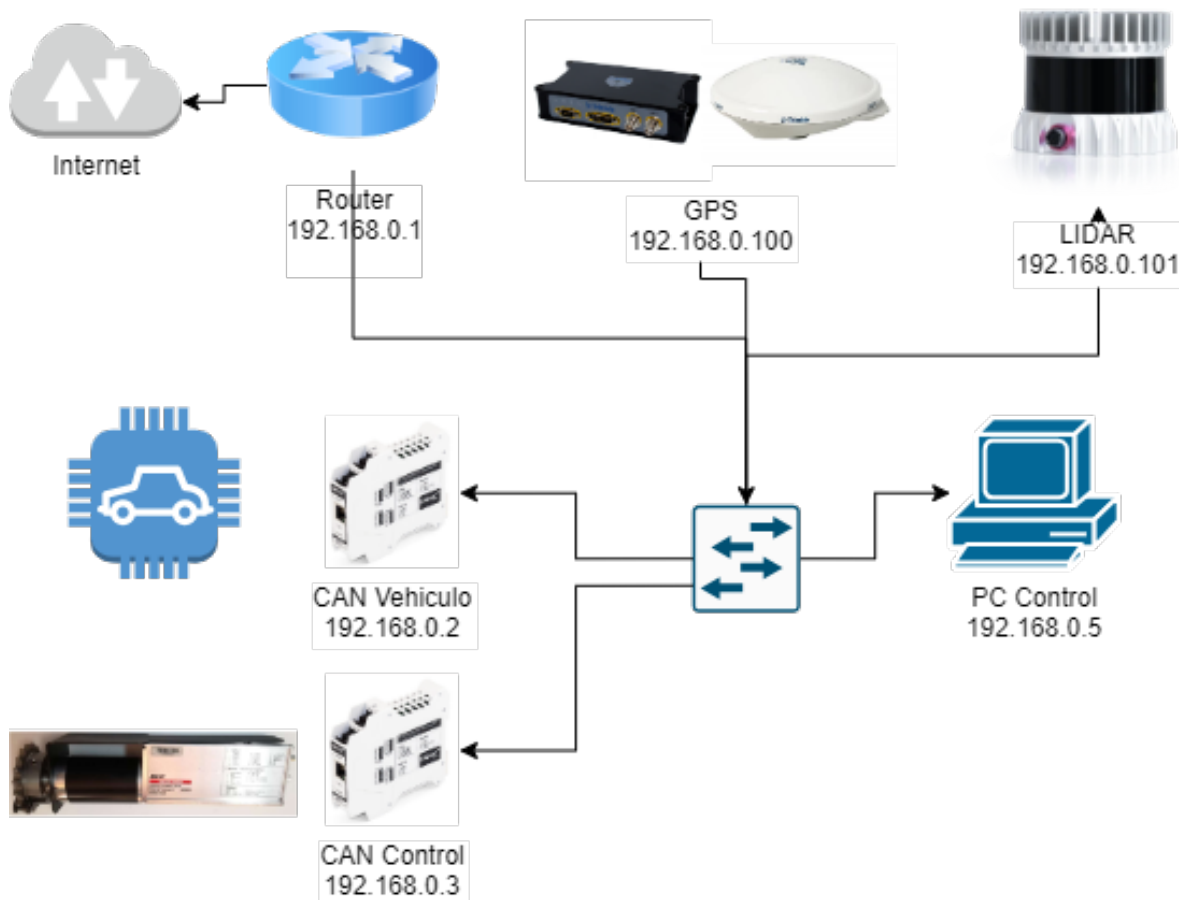


Ilustración 17: Diagrama de red simple

3.1.3.5.2 Diagrama de red ideal

Para diseñar un diagrama de red que pueda ser utilizado en un entorno real, debemos definir primero cuáles son los objetivos del sistema y las restricciones derivadas del uso de ROS como framework de comunicaciones. En este contexto, trabajos como el de (Lienen et al., 2023) resaltan la optimización hardware-software en arquitecturas distribuidas mediante el uso de ROS, lo que inspira las configuraciones propuestas en este apartado.

El caso de uso que vamos a plantear pretende replicar un entorno real tiene los siguientes objetivos:

- Optimizar el tráfico de red para no saturar equipos, tráfico de ROS y tráfico de red
- Poder disponer de varios vehículos en el entorno capaces de comunicarse entre ellos usando ROS

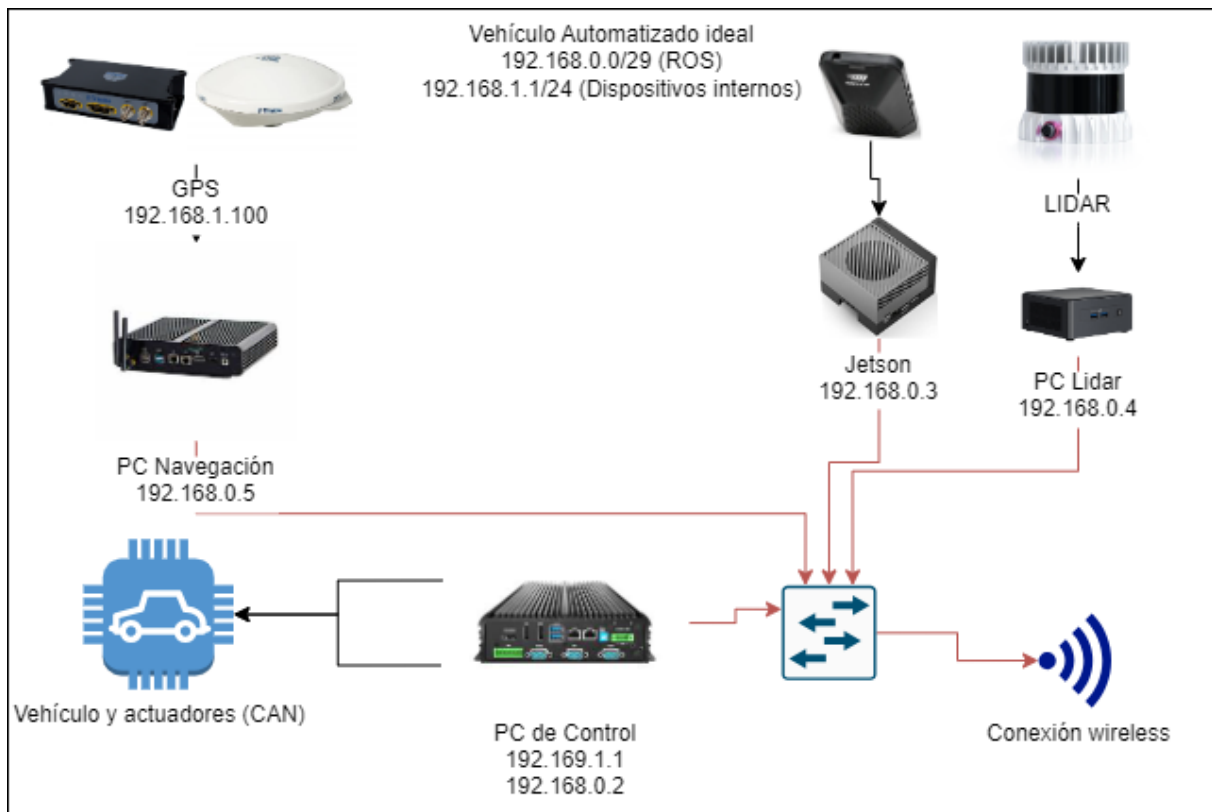
- Equipos de control/monitorización puedan controlar cualquier vehículo desde dentro o fuera del mismo, a través de ROS

Pero para poder cumplir los objetivos planteados se debe tener en cuenta el funcionamiento interno de ROS y las restricciones que implica. La principal restricción que debemos tener en cuenta es que ROS, en principio, únicamente se puede comunicar con otros nodos de ROS, si estos se encuentran en la misma subred.

3.1.3.5.2.1 Caso de uso

El caso de uso ideal propuesto para la implementación de una red es capaz de gestionar y comunicar múltiples vehículos autónomos y estaciones de monitorización y control. El diseño de la red se enfoca en distribuir el procesamiento entre los equipos ubicados en los vehículos, maximizando la robustez del sistema al minimizar los cuellos de botella y posibles fallos críticos en los sistemas de control y percepción.

En la Ilustración 18, se identifican cuatro equipos clave en el esquema ideal de la red de un vehículo automatizado: el ordenador de control, el de navegación, el de percepción mediante cámaras, y el de percepción mediante LIDAR. Cada equipo tiene la responsabilidad de procesar la información de sus respectivos



sensores y enviar únicamente los datos relevantes a través de la arquitectura de comunicaciones de ROS, con el fin de optimizar el rendimiento de la red.

El ordenador de control es el núcleo del sistema, donde se ejecuta la arquitectura software de control desarrollada en esta tesis. Este ordenador debe estar operativo en todo momento, incluso si otros equipos del vehículo fallan, para garantizar la seguridad y el funcionamiento del vehículo. El ordenador de navegación es imprescindible para la autonomía del vehículo, proporcionando las rutas que este debe seguir. Además, el procesamiento de las imágenes de las cámaras se delega a un equipo especializado con una GPU potente, mientras que el procesamiento del LIDAR se asigna a otro equipo con capacidad computacional elevada, separando la carga de trabajo para evitar congestiones en la red.

Se hace hincapié en la necesidad de que la red de comunicación inalámbrica no fragmente la red lógica de ROS. Para que la comunicación entre nodos de diferentes vehículos y estaciones de control sea efectiva, se proponen opciones como conexiones punto a punto, redes mesh (Biggie & McGuire, 2022) o comunicaciones tácticas (Tanwar et al., 2019), que aseguran que los vehículos y las estaciones puedan interactuar sin interrupciones.

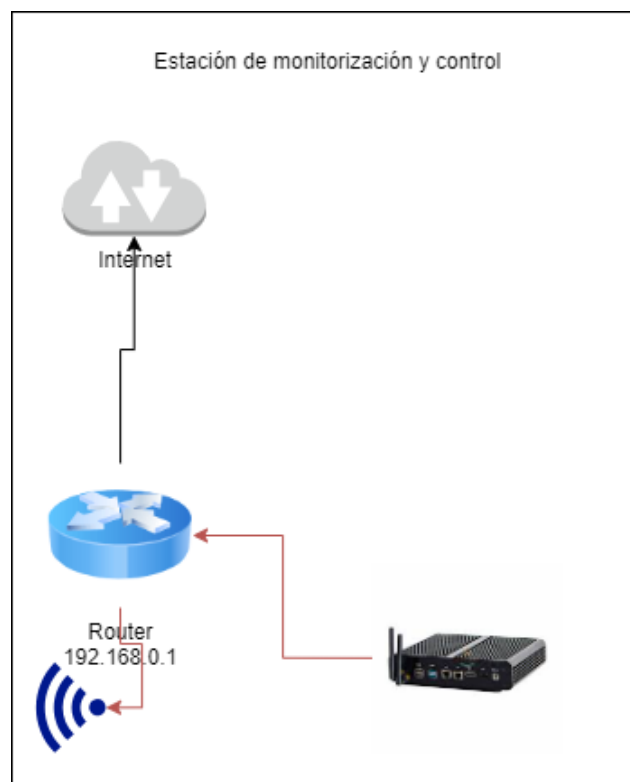


Ilustración 19: Diagrama de red de una estación de monitorización

Las estaciones de monitorización, como la mostrada en la Ilustración 19, son mucho más simples en su configuración. Cada estación cuenta con un único equipo encargado de recibir los datos de los nodos ROS y gestionar la comunicación con los vehículos. Se propone que una de las estaciones incluya un router con acceso a internet, pero en caso de que este no sea necesario, se puede sustituir por un switch, eliminando la conexión a internet, pero manteniendo la comunicación interna.

En cuanto al direccionamiento IP, se plantea el uso de una red de clase C con dirección de red 192.168.0.0, que mediante subnetting, permite asignar hasta 29 subredes, una para cada vehículo, con 8 direcciones IP por vehículo para asegurar margen de expansión. Además de las 29 subredes, se reservan las primeras 23 direcciones IP para las estaciones de monitorización y control, exceptuando la 192.168.0.1 reservada para el router.

La implementación de este direccionamiento asegura que los dispositivos mantengan una estructura lógica de subred, pero para no perder la conectividad necesaria para la comunicación mediante ROS, se debe utilizar una máscara /24 en los dispositivos para garantizar que todos permanezcan en la misma red.

3.1.3.5.2.2 Wifi

La tecnología Wifi se presenta como una opción accesible y de implementación relativamente sencilla para establecer comunicaciones dentro de la red LAN extendida. Durante el desarrollo de esta tesis, se evaluaron dos enfoques principales utilizando wifi:

Router Wifi con Tarjeta SIM: Esta solución permite una fácil configuración y acceso a internet para los dispositivos conectados. Sin embargo, el principal inconveniente radica en el limitado alcance de la señal wifi, restringiendo el control del vehículo a distancias cortas, generalmente no superiores a 15 metros en condiciones de línea de visión directa.

Comunicación Wifi Direccional Punto a Punto: La implementación de puntos de acceso wifi direccionales ha demostrado ser eficaz para extender el alcance de la comunicación, permitiendo el control en tiempo real y la transmisión de video a distancias cercanas a 1km en línea de visión directa (De Carvalho et al., 2010). A pesar de sus ventajas, esta configuración es susceptible a la pérdida de calidad de la señal cuando los dispositivos no están perfectamente alineados o cuando se interrumpe la línea de visión directa.

3.1.3.5.2.3 Radio

La comunicación por radio ofrece una alternativa prometedora para superar las limitaciones de distancia y obstrucciones físicas inherentes al uso de wifi. Este sistema ofrece varias características que lo convierten en una gran opción para la extensión de la red local utilizada por ROS, facilitando así una comunicación eficaz incluso en condiciones desafiantes.

Ventajas del sistema de radio Persistent MPU5:

- **Comunicación MESH:** El sistema MPU5 establece una red MESH entre todas las unidades de radio, permitiendo una comunicación dinámica y robusta que se autoconfigura y adapta a cambios en el entorno, asegurando que la conexión se mantenga incluso si algunas radios se mueven o se desconectan.
- **Alcance Superior:** Comparado con las tecnologías wifi-tradicionales, el MPU5 ofrece un alcance significativamente mayor, lo que permite una comunicación efectiva sobre distancias extensas y en entornos donde el wifi resulta insuficiente.
- **Alta Velocidad de Transmisión:** La capacidad de transmitir datos a altas velocidades hace del MPU5 una herramienta eficiente para el intercambio de información en tiempo real, esencial para la operación de vehículos autónomos y la coordinación entre múltiples unidades y puestos de control.
- **Enlaces Transparentes de Red Ethernet:** Mediante un adaptador, el MPU5 se integra fácilmente en la red Ethernet existente, creando enlaces transparentes entre dispositivos conectados a distintas radios, lo que simplifica enormemente la configuración y gestión de la red.

A pesar de sus notables ventajas, el sistema de radio MPU5 presenta ciertos desafíos, como su costo elevado, que puede limitar su accesibilidad para algunos proyectos. Además, la necesidad de un router adicional para proporcionar acceso a internet puede considerarse un inconveniente. Sin embargo, esta limitación puede transformarse en una ventaja estratégica en escenarios donde la cobertura de internet es limitada.

Ubicar una unidad de radio MPU5 junto con un router en una localización con buena cobertura de internet permite extender el acceso a internet a toda la red,

incluidos vehículos en movimiento en áreas con poca o ninguna cobertura directa. Esta configuración asegura la disponibilidad de servicios críticos como la corrección diferencial del GPS, mejorando significativamente la precisión de la localización y navegación del vehículo.

En conclusión, el sistema de radio Persistent MPU5 se erige como una solución potente para superar las limitaciones inherentes a las comunicaciones inalámbricas en aplicaciones de vehículos autónomos. Su capacidad para establecer redes MESH robustas, su alcance extendido y la integración transparente con la infraestructura de red existente lo convierten en un componente valioso para la implementación de sistemas autónomos avanzados. La adopción de esta tecnología facilita la realización de operaciones autónomas



Ilustración 20: Modulo de comunicaciones Radio Persistent MPU5

complejas, promoviendo la innovación y la colaboración en el campo de la investigación vehicular autónoma.

3.2. Evolución de la arquitectura software

El desarrollo de esta tesis doctoral parte de los avances realizados en trabajos de grado y máster, que dieron lugar a una versión inicial de la arquitectura software de control, tal como se muestra en la Ilustración 21. Esta primera iteración, aunque funcional, adolecía de ser excesivamente específica y poco flexible, limitando su uso a un único tipo de vehículo y dificultando su adaptación a otros modelos y plataformas. Las principales limitaciones de esta versión inicial que impulsaron el desarrollo de esta tesis son:

- Necesidad de sistemas de interconexión específicos: La arquitectura inicial requería interfaces de comunicación personalizadas para interactuar con ordenadores externos, lo que generaba complejidad adicional.
- Interfaces de control y monitorización incompletas: Las herramientas desarrolladas no permitían una gestión integral del vehículo, limitando su capacidad para operar en entornos más exigentes.
- Dificultad para integrar nuevos módulos: La arquitectura no estaba preparada para la adición de módulos para nuevos actuadores o equipos, lo que restringía su escalabilidad.
- Paquete de control monolítico: La estructura del software agrupaba todo el control de actuadores y la toma de decisiones en un solo módulo, lo que dificultaba la identificación y corrección de errores, además de comprometer la escalabilidad del sistema.
- Mensajes de control no estandarizados: El uso de mensajes cerrados y específicos impedía la colaboración con otros grupos de investigación y la integración de módulos externos a nivel de control.

Con el objetivo de solucionar estos problemas y mejorar la arquitectura inicial, se emprendió el desarrollo de esta tesis, abordando estos y otros retos que surgieron al intentar aplicar la arquitectura en nuevos vehículos y plataformas.

El resultado de este trabajo es una arquitectura de control avanzada, cuyo esquema simplificado se muestra en la Ilustración 22. Como se observa en la imagen, lo que antes era un único módulo de control ha sido desglosado en múltiples paquetes y nodos de ROS, lo que permite una mayor adaptabilidad a distintos vehículos y facilita la integración con otros centros y grupos de investigación. Esto no solo mejora la capacidad de gestión remota del vehículo, sino que también promueve la investigación colaborativa en áreas como el control, la toma de decisiones y la navegación autónoma.

Cada uno de los módulos de esta arquitectura será detallado en la sección 3.3, donde se explicarán las soluciones implementadas para superar las limitaciones iniciales, permitiendo así una arquitectura más robusta, escalable y colaborativa.

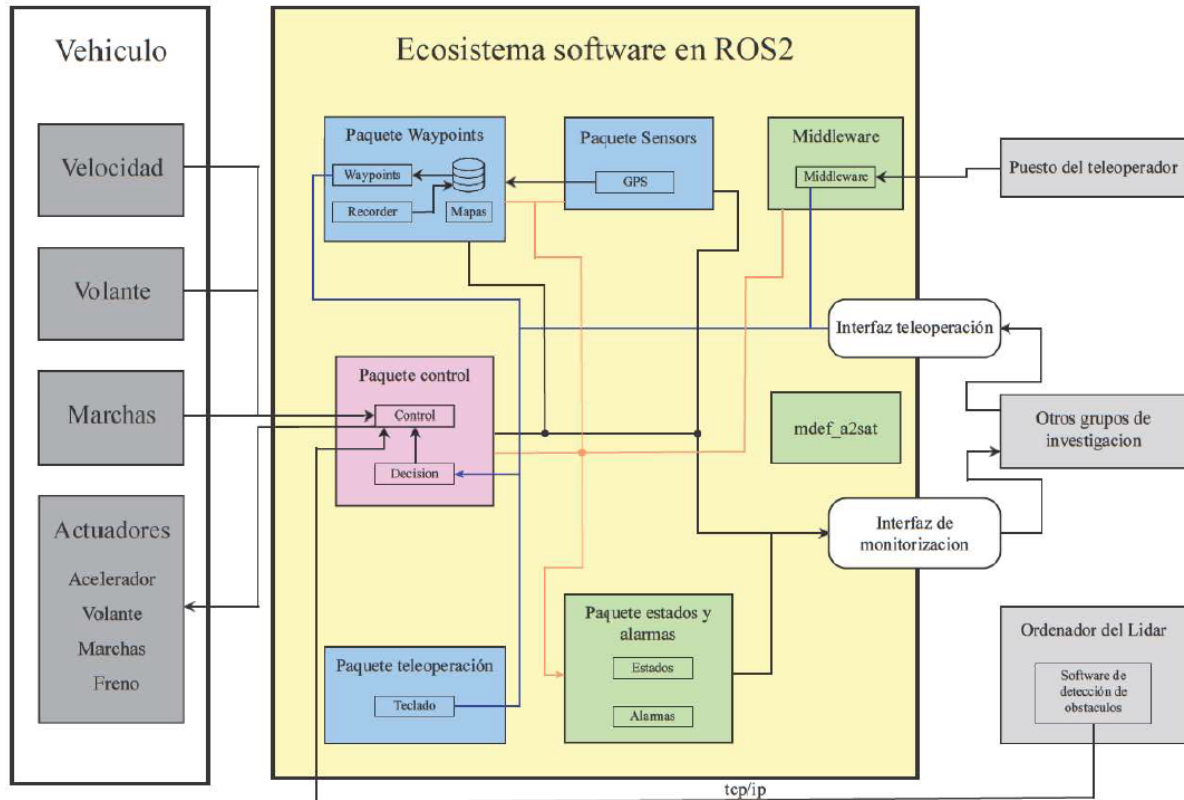


Ilustración 21: Arquitectura software original al inicio de la tesis

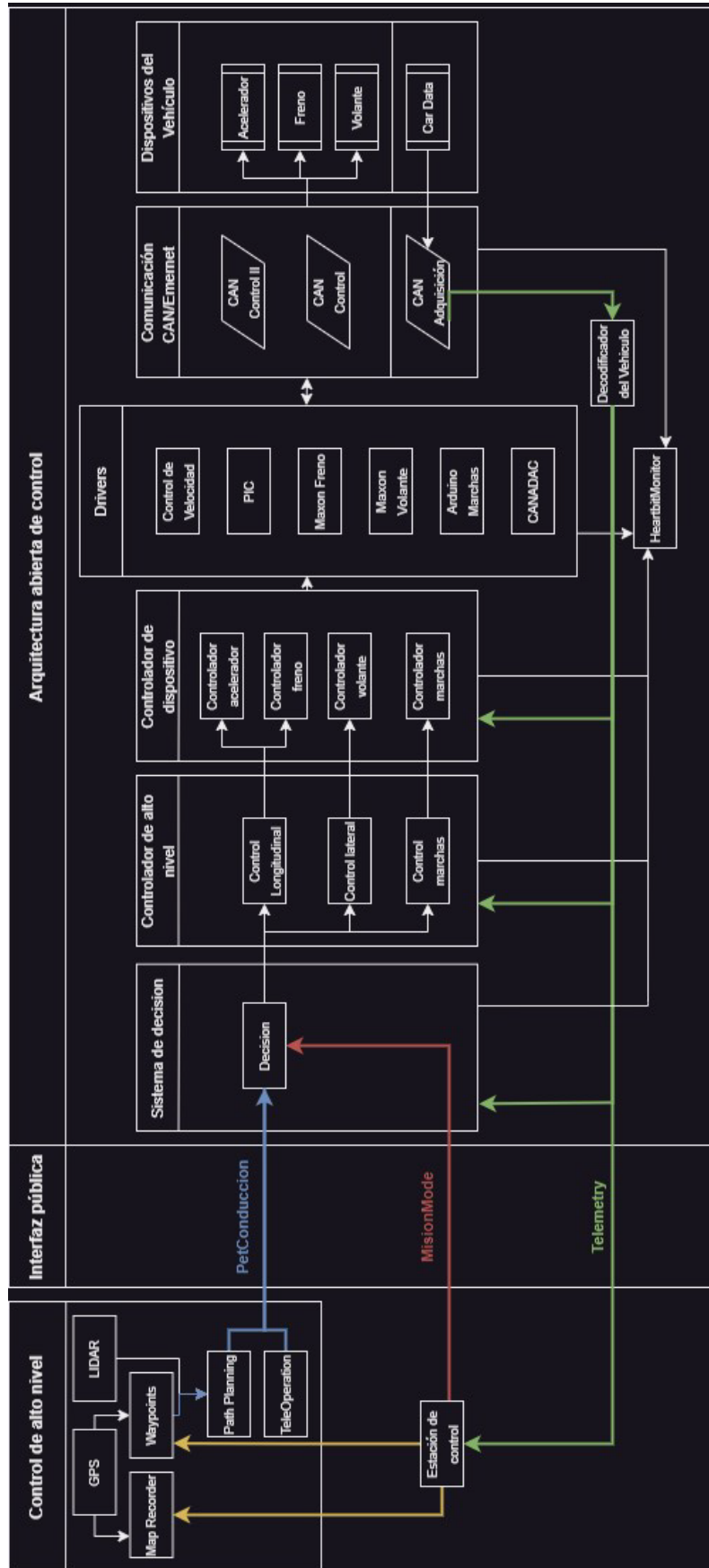


Ilustración 22: Esquema simplificado de la arquitectura de control

3.3. Arquitectura software

En esta sección de la tesis, se presenta la arquitectura de software desarrollada, cuya importancia radica en ser el núcleo que permite la integración de los diferentes sistemas de control y navegación autónoma implementados en los vehículos. Cada uno de los módulos que forman parte de esta arquitectura ha sido diseñado para abordar de manera eficiente las distintas necesidades de control de los vehículos, desde el nivel más bajo de los actuadores hasta los niveles más altos de toma de decisiones y navegación autónoma. Esta modularidad permite que cada módulo sea implementado como uno o varios nodos de, lo que facilita la flexibilidad y escalabilidad del sistema, características clave para el éxito del desarrollo.

La arquitectura se desarrolla siguiendo un enfoque ascendente, comenzando desde el control de los actuadores físicos del vehículo. Estos actuadores incluyen componentes esenciales como el volante, el acelerador y los frenos, los cuales son gestionados mediante nodos dedicados que aseguran el control preciso de la movilidad del vehículo. La correcta implementación de estos nodos es crítica para garantizar que los algoritmos de control puedan interactuar de manera efectiva con los sistemas físicos, traduciendo las consignas de control en acciones tangibles.

A medida que se avanza en la abstracción del sistema, se incorporan capas intermedias como el sistema de toma de decisiones. Este sistema es el responsable de gestionar las órdenes provenientes de los sistemas de navegación y percibir el entorno del vehículo, integrando múltiples fuentes de información para asegurar una conducción segura y autónoma. A continuación, se explica la interfaz pública de control, un elemento de gran importancia en esta arquitectura. Esta interfaz permite la interacción de otros centros de investigación y grupos de trabajo con la plataforma de control desarrollada en esta tesis, facilitando la colaboración externa y la expansión del sistema para investigaciones futuras. Esta capacidad de interoperabilidad es un valor añadido de la arquitectura, ya que permite que la plataforma sea utilizada por otros actores de la comunidad científica, potenciando el intercambio de conocimientos y mejoras tecnológicas.

La última capa de la arquitectura aborda los niveles más altos de abstracción, donde se encuentran los sistemas de conducción autónoma. Estos sistemas se encargan de la navegación, utilizando sensores como el GPS y el LiDAR para asegurar que el vehículo siga una trayectoria precisa y reaccione de manera eficiente a los cambios en su entorno. La navegación autónoma es un componente

crucial para validar la eficacia de la arquitectura en entornos reales, lo que refuerza su aplicabilidad en escenarios complejos y no estructurados.

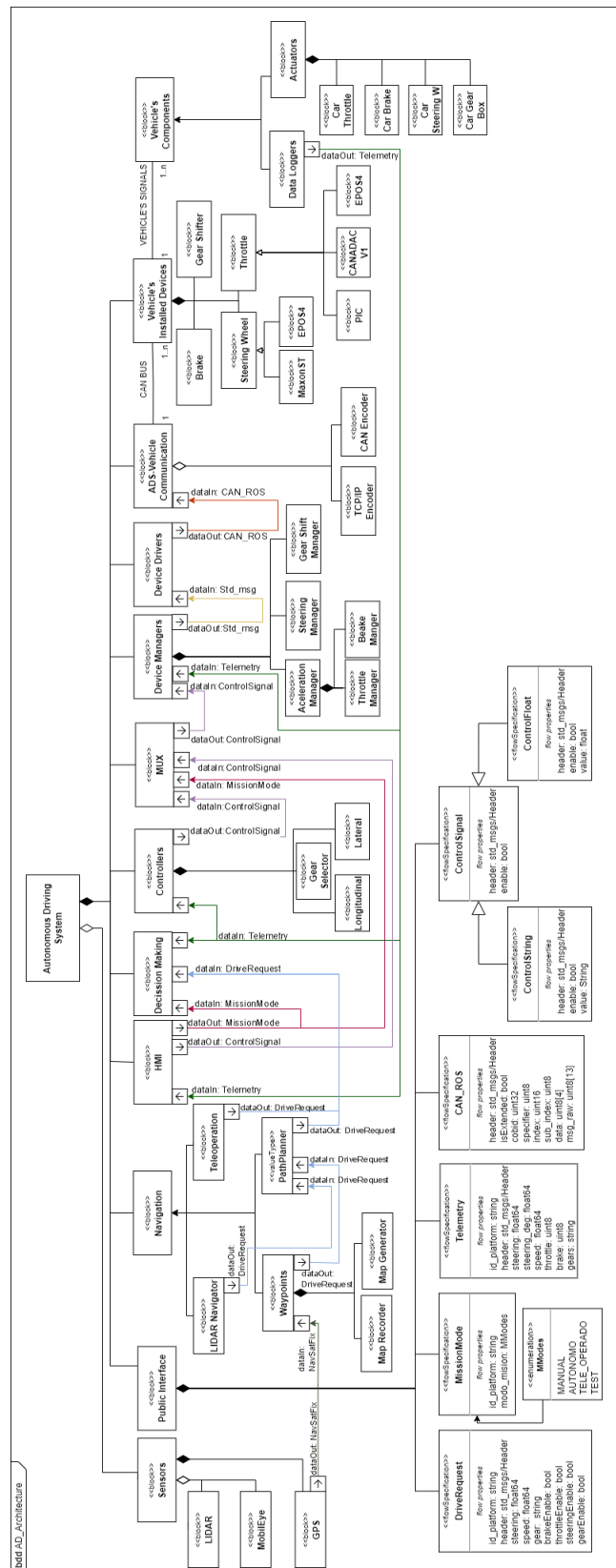


Ilustración 23: Diagrama detallado de la arquitectura de control

3.3.1. Dispositivos del vehículo

La definición y el control de los dispositivos en el vehículo son cruciales para habilitar capacidades autónomas y asegurar una gestión eficiente del mismo. Los dispositivos esenciales que se consideran para la automatización incluyen aquellos responsables del control longitudinal y lateral del vehículo, así como controles adicionales necesarios para una operación completa. Estos dispositivos forman la base para el desarrollo de sistemas de conducción autónoma, permitiendo una interacción dinámica y precisa con el entorno vehicular.

- Control longitudinal
 - Acelerador
 - Freno
- Control lateral
 - Volante
- Controles adicionales
 - Cambio de Marchas

Además de estos controles primarios, es esencial integrar un sistema de adquisición de datos que funcione como un dispositivo más dentro del vehículo. Esta integración es fundamental para el cierre del lazo de control, permitiendo que el sistema autónomo reciba retroalimentación continua sobre el estado y el rendimiento del vehículo. La recopilación de datos abarca información crítica como la velocidad del vehículo, la posición del volante, el estado del acelerador y del freno, entre otros parámetros relevantes.

La organización y gestión de estos dispositivos se conciben a nivel lógico, no requiriendo inicialmente una implementación de software específica para su manejo. Sin embargo, para facilitar la comprensión y visualización del sistema en su conjunto, se representan esquemáticamente en la Ilustración 23.

3.3.2. Comunicaciones CAN

En el diseño de la arquitectura para la automatización de vehículos, la capa de comunicaciones constituye el nivel más bajo. Esta capa es responsable de establecer y gestionar la comunicación entre el ordenador central de control y los dispositivos específicos encargados de realizar las acciones de control en cada una de las situaciones previstas por el sistema.

La selección y diseño de actuadores para la automatización de vehículos, como se menciona en la sección 1 de esta tesis, han sido objeto de un esfuerzo considerable con el objetivo de estandarizar el medio de comunicación con estos componentes. La decisión de adoptar la comunicación CAN como el estándar para la interacción entre el ordenador de control y los actuadores responde a múltiples ventajas estratégicas y técnicas inherentes a este protocolo.

La comunicación CAN es ampliamente reconocida por su robustez y eficiencia en entornos automotrices, ofreciendo un medio fiable para la transmisión de datos entre diferentes componentes del vehículo. Este protocolo permite que múltiples dispositivos compartan el mismo canal de comunicación, reduciendo significativamente la necesidad de cableado complejo y facilitando la integración y mantenimiento del sistema. Al unificar el medio de comunicación bajo el estándar CAN, se logra una simplificación notable del cableado distribuido por el vehículo, lo que aporta claras ventajas en términos de reducción de peso, complejidad y costos asociados al sistema de cableado.

Además, la implementación de la comunicación CAN mejora la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y sistemas dentro del vehículo, permitiendo una mayor flexibilidad en la configuración y expansión del sistema de automatización. La estandarización de la comunicación facilita la incorporación de nuevos actuadores y sensores al sistema, así como la compatibilidad con futuras actualizaciones y mejoras tecnológicas.

La adopción de este protocolo también contribuye a la fiabilidad del sistema de control autónomo, ya que la comunicación CAN es capaz de manejar altas tasas de transmisión de datos con un bajo riesgo de interferencia o pérdida de información, aspecto crítico para la seguridad y el rendimiento en aplicaciones de conducción autónoma.

Para los proyectos contemplados en esta tesis, se ha optado por la utilización de tarjetas CAN/Ethernet como medio principal para la comunicación con los dispositivos de control detallados anteriormente. Esta elección responde a la necesidad de asegurar una transmisión de datos fiable y eficiente entre el ordenador de control y los actuadores y sensores del vehículo, tales como el acelerador, freno, volante, y el sistema de cambio de marchas, entre otros.

Además, se contempla la utilización de ordenadores diseñados específicamente para aplicaciones vehiculares, los cuales están equipados de manera estándar con conectores CAN, generalmente en forma de conector DB9. El

uso de este tipo de ordenadores ofrece una integración directa con la red vehicular, facilitando la conexión con los sistemas embarcados del vehículo sin necesidad de adaptadores adicionales.

3.3.3. Drivers

Ubicada inmediatamente por encima de la capa de comunicaciones, se encuentra la capa de drivers o controladores. Esta capa juega un papel fundamental en el sistema, ya que es aquí donde se implementan los drivers de los actuadores instalados. Los drivers son las piezas de software que actúan de intermediario entre un ordenador y un dispositivo físico y necesarios para gestionar cada uno de los actuadores que controlan los dispositivos del vehículo.

Un aspecto destacado en el diseño de los actuadores, tal como se ha estudiado previamente, es su universalidad. Esto significa que los actuadores implementados para la automatización vehicular han sido diseñados para ser genéricos y reutilizables, de modo que los mismos actuadores puedan ser empleados en diferentes vehículos sin necesidad de implementaciones múltiples. Esta universalidad en el diseño asegura que, una vez implementados, los drivers permitan que el dispositivo sea compatible con varios modelos de vehículos, facilitando la integración y reduciendo los tiempos de desarrollo y los costes asociados.

Durante el desarrollo de la tesis, se ha requerido la implementación de drivers específicos para los actuadores mencionados en la sección 3.1.1. Cada uno de estos drivers ha sido diseñado para comunicarse eficazmente con su respectivo actuador, traduciendo las instrucciones de alto nivel provenientes del software de control en comandos específicos que el hardware puede ejecutar. La especificación y el desarrollo detallado de estos drivers forman parte esencial del trabajo realizado, asegurando que los actuadores respondan de manera precisa y fiable a las demandas del sistema de automatización vehicular.

3.3.3.1. Driver de motores de uso vehicular/industrial

Posiblemente, el controlador más complejo que se ha implementado durante el desarrollo de esta tesis es el que gestiona los motores utilizados para la automatización del vehículo. Este tipo de motores comparten una definición de mensajes CAN estándar, basado en CANOpen. Lo que ha permitido que un mismo

Driver sea reutilizado para el motor encargado del giro de volante como para el encargado del pedal de freno.

Este tipo de motores no solo ofrecen una definición estandarizada de mensajes necesarios para operaciones básicas como el giro o la selección de posición, sino que también brindan un amplio conjunto de comandos para la monitorización del estado del motor, su configuración y la gestión en tiempo real.

Inicialmente, la implementación se centró en la capacidad de resetear el motor y activar su modo de funcionamiento estándar, permitiendo así la gestión básica de su posición, cuyo control es gestionado por el propio motor, lo que facilita la gestión del sistema. Sin embargo, el avance de la tesis reveló la necesidad de una implementación más detallada y completa, que incluyera funciones avanzadas como:

- Cambio de Modo de Funcionamiento: Se implementaron varios modos para adaptarse a diferentes requisitos operativos:
 - Homming Mode: Esencial para definir la posición cero del motor y realizar calibraciones iniciales. Esto es particularmente importante dado que, aunque los motores cuentan con sensores de posición absolutos, la inicialización a cero se efectúa al alimentar el motor.
 - Position Mode: Utilizado para mover el motor a una posición específica.
 - Torque Mode: Aplicado en situaciones que requieren un torque específico, como en la calibración inicial para garantizar que el motor inicie siempre en una posición predeterminada.
- Control de Posición Relativo y Absoluto: La adaptabilidad del driver para manejar tanto el control de posición relativa como absoluta es crucial, especialmente en aplicaciones como el volante de un vehículo, donde el control absoluto es generalmente más eficiente. Sin embargo, en proyectos con requisitos mecánicos únicos donde el volante no aplica un movimiento línea a las ruedas o al movimiento general del vehículo, se necesitan adaptaciones específicas.

- **Gestión Automática de Fallos:** Los motores Maxon están equipados con múltiples sistemas de protección para manejar fallos comunes, como seguimiento erróneo, exceso de torque o picos de tensión. La capacidad del driver para reanudar automáticamente el funcionamiento normal tras un fallo es vital para la fiabilidad del sistema y para mantener la capacidad de conducción en todo momento a pesar de un fallo fortuito

3.3.3.2. Driver CANADAC

El driver diseñado para la gestión del dispositivo CANADAC ha sido desarrollado con el objetivo de gestionar tanto las entradas y salidas analógicas como los relés integrados en la placa, cuya disposición está específicamente diseñada para el control de aceleradores. Sin embargo, la placa CANADAC tiene una capacidad de gestión mucho más amplia, por lo que el driver se ha diseñado para optimizar su funcionalidad mediante la organización y gestión adecuada de los mensajes CAN.

El driver tiene varias funciones clave:

1. **Gestión de Entradas y Salidas Analógicas:** El dispositivo CANADAC es capaz de recibir y procesar señales analógicas provenientes del acelerador del vehículo. El driver se encarga de interpretar estas señales, ajustando las salidas en función de las consignas recibidas desde el sistema de control principal.
2. **Control de Relés:** El driver también gestiona los relés incluidos en la placa, que permiten conmutar las señales analógicas o activar otros componentes relacionados con el sistema de aceleración. Los relés se activan y desactivan en función de las consignas recibidas a través del bus CAN
3. **Modularidad y Flexibilidad:** Aunque el driver está optimizado para gestionar aceleradores, la placa CANADAC tiene un gran potencial para ser utilizada en otros sistemas de control. Por esta razón, el driver ha sido diseñado de manera que es capaz de adaptar su funcionamiento en función del dispositivo controlado y de las características del acelerador en cuestión

En conclusión, este driver proporciona un control robusto y flexible del dispositivo CANADAC, permitiendo una gestión eficiente del acelerador y otros

componentes del vehículo a través de su arquitectura de comunicación CAN, manteniendo el modularidad para futuras expansiones y aplicaciones.

3.3.3.3. Driver basado en diccionarios

Además de los demás drivers explicados en esta sección, durante el desarrollo de esta tesis y tras la automatización de diferentes vehículos, se ha identificado la necesidad de crear un driver genérico para todos aquellos dispositivos que, a pesar de tener configuraciones específicas, no requieren la transmisión de valores continuos como señales analógicas. Este tipo de control es aplicable a numerosos dispositivos en un vehículo, incluyendo marchas, luces, retrovisores, puertas automáticas, y otros actuadores discretos, especialmente en vehículos de mayores dimensiones como autobuses o camiones. En muchos casos, estos sistemas tienen un número limitado de estados o posiciones predeterminadas que se pueden gestionar mediante mensajes CAN simples.

El enfoque de este driver genérico es proporcionar una solución eficiente para manejar dispositivos discretos mediante un diccionario que actúa como un formato clave-valor. Este diccionario, que puede implementarse en formatos comunes como YAML, JSON o incluso una base de datos, define los mensajes CAN necesarios para controlar cada posición o estado del dispositivo en cuestión. El driver es transparente en su funcionamiento, limitándose a recibir consignas desde ROS y traducirlas en comandos CAN que se envían al dispositivo correspondiente.

Gracias a este diseño modular y flexible, es posible integrar nuevos dispositivos o modificar la configuración de los existentes sin necesidad de desarrollar un nuevo código o driver, simplemente ajustando el archivo de configuración. De esta manera, cualquier dispositivo con esta estructura discreta de funcionamiento puede ser gestionado de forma eficaz, optimizando el desarrollo y facilitando la integración de nuevas funcionalidades en la automatización de vehículos.

3.3.4. Controladores de dispositivo

En la sección 3.3.3 del documento, se ha detallado como se realiza la gestión individual mediante software de cada uno de los dispositivos disponibles para la automatización de un vehículo. Cada uno de estos drivers irá siempre asociado a un dispositivo real que haya sido instalado en el vehículo y no requiere modificación alguna de un vehículo a otro.

A diferencia de los anteriores, los módulos funcionales a tratar en esta sección son los únicos que necesitan un conocimiento profundo del estado del hardware del vehículo en cuestión, lo que implica que deben ser diseñados de forma específica para cada tipo de vehículo, aunque pueden ser reutilizables en ciertas circunstancias.

Los controladores de dispositivo se han diseñado para que su implementación sea lo más estructurada y simplificada posible, a pesar de necesitar modificaciones específicas para cada vehículo. Estos controladores siguen una estructura donde se han estandarizado mensajes universales que facilitan su manejo, independientemente del dispositivo específico que estén controlando. Estos mensajes incluyen una cabecera con un timestamp para controlar el envío y recepción, un interruptor booleano que permite la activación o desactivación inmediata del dispositivo, y una consigna de control que generalmente es un número decimal normalizado dentro de un rango $[-1,1]$ o $[0,1]$, o en situaciones especiales, un texto para seleccionar entre diferentes estados o marchas.

Aunque estos mensajes estandarizan la gestión de los controladores frente a los nodos superiores, la salida desde estos controladores no es tan sencilla debido a la diversidad de los dispositivos y sus respectivos drivers. La mayor parte de la gestión de dispositivos físicos se realiza a través de los drivers, incluyendo la resolución de errores y la monitorización de los dispositivos, pero es crucial que los controladores mantengan un conocimiento actualizado del estado físico del sistema. Esto abarca no solo datos como la posición o el estado del dispositivo, sino también detalles como la posición de montaje de los motores, sus límites operativos y la relación de movimiento entre el motor y el actuador del vehículo, añadiendo una capa de complejidad al desarrollo de estos nodos.

Para facilitar y acelerar la implementación de estos sistemas, se ha buscado estandarizar la relación entre los controladores y los dispositivos. A continuación, se presentan dos ejemplos de esta estandarización:

1. Dispositivos diseñados en el INSIA:

Los dispositivos del INSIA han sido equipados con capacidades de gestión interna en su programación, permitiendo que el controlador para estos dispositivos sea casi estándar, independientemente de las funciones que desempeñen. El driver del dispositivo se encarga de toda la gestión necesaria.

2. Instalación de motores en la columna de dirección:

En el caso de los motores instalados en la columna de dirección, se ha tratado de estandarizar el montaje como se indica en la sección 3.1.1.1, mediante el cual se simplifica en gran medida la gestión de los mismos ya que la única variación de un vehículo a otro son las siguientes variables:

- Sentido de giro del motor
- Sentido de instalación del sensor de giro
- Relación de giro entre motor y columna de dirección

Dichos parámetros introducidos al nodo en su inicialización permiten la perfecta gestión del giro del vehículo con las posibles diferentes configuraciones de instalación y de coronas instaladas en el mismo. Cabe destacar que esta gestión sencilla solo es posible cuando el motor y la columna de dirección establecen una relación de giro lineal, algo que no ocurre en proyectos como el mencionado en la sección 4.2.4, lo que requerirá de una adaptación específica al vehículo.

3.3.5. Multiplexor de control

A continuación, se presenta el módulo MUX, cuya integración en la arquitectura propuesta, si bien podría considerarse opcional, demuestra ser de extraordinaria utilidad en el contexto de un entorno de desarrollo e investigación. Este módulo ofrece la flexibilidad necesaria para alternar entre la entrada de control estándar del sistema autónomo y una entrada de control manual para los actuadores. La principal ventaja que proporciona este bloque funcional es la capacidad de realizar pruebas unitarias de los actuadores en cualquier momento, sin la necesidad de desactivar toda la arquitectura o de implementar una estructura de prueba específica.

Este bloque redirige eficazmente los mensajes recibidos de las capas superiores hacia el manejador de dispositivo correspondiente, realizando esta operación mediante la simple selección del mensaje apropiado, sin requerir modificaciones adicionales. Esta capacidad de redirección garantiza una implementación eficiente y flexible de las pruebas, favoreciendo la evaluación y ajuste de los actuadores de forma rápida y sin interrupciones en el funcionamiento global del sistema.

Es importante destacar que la implementación de este módulo funcional ha sido desarrollada por el ROS 2 Tooling Working Group. Con lo que no se requiere

implementación adicional, de hecho, ni siquiera requiere la especificación individual de cada tipo de mensaje, si no que es detectado automáticamente.

3.3.6. Controladores de alto nivel

Los controladores de alto nivel integrados en esta arquitectura de control desempeñan un papel crucial, ya que son responsables de interpretar las consignas de movimiento derivadas de sistemas avanzados como el guiado por GPS, LIDAR o teleoperación, y trasladarlas efectivamente al movimiento físico del vehículo. Estos controladores constituyen uno de los componentes más críticos y perceptibles de la arquitectura, especialmente evidente cuando su funcionamiento no es óptimo.

A lo largo de esta investigación, se han explorado diversos enfoques para la implementación de estos controladores, observando variaciones en los resultados según el tipo de controlador y las características específicas del vehículo. Se identifican principalmente tres tipos de controladores de alto nivel en la arquitectura:

- **Control de Marchas:** Este es el más sencillo de los controladores, funcionando principalmente como un canal para transmitir órdenes de cambio de marcha, con implementación de medidas de seguridad básicas, como evitar cambios en movimiento.
- **Control Lateral:** Este controlador maneja el giro del volante (Arifin et al., 2019). Dado que el movimiento del volante es lineal y generalmente gestionado por un único motor, un controlador lineal resulta adecuado para regular este movimiento. A nivel superior, este controlador ajusta la dirección del vehículo según la trayectoria deseada.
- **Control Longitudinal:** Este ha sido identificado como el controlador de mayor complejidad dentro de la tesis. Aunque el control de la aceleración y la frenada puede parecer sencillo, pues es un sistema común en vehículos modernos, la precisión requerida en el movimiento y como las características específicas del vehículo impactan su funcionamiento elevan su complejidad. A diferencia del control lateral, el control longitudinal involucra dos dispositivos —el freno y el acelerador— lo que implica una gestión no lineal de su funcionamiento. Además, en vehículos reales, ya sean de combustión

o eléctricos, se debe considerar la influencia del freno motor, un aspecto que los simuladores suelen omitir.

En el desarrollo de los controles lateral y longitudinal, se han aplicado diversas metodologías. Los controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo) son comúnmente utilizados por su simplicidad de implementación y ajuste. Sin embargo, para abordar desafíos más complejos como el control longitudinal, donde las dimensiones y el peso del vehículo influyen significativamente en su funcionamiento, se han explorado técnicas más avanzadas como la lógica difusa y algoritmos de inteligencia artificial. Estos enfoques permiten un control más refinado y preciso del vehículo.

Los avances logrados con la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en el control de vehículos autónomos han sido significativos, destacando la adaptabilidad de estos controladores avanzados a las características específicas de diferentes tipos de vehículos. Este enfoque innovador ha permitido minimizar tanto el tiempo como la complejidad asociada a la configuración y ajuste de controladores para su operación en variados vehículos.

En un caso práctico dentro de esta tesis, se empleó una red neuronal que originalmente se entrenó utilizando un vehículo convencional. Posteriormente, este modelo de red neuronal se utilizó en un minibús, un vehículo que presenta retos adicionales debido a su mayor propensión a experimentar inercias y complejidades en el frenado. La capacidad de la red neuronal para ajustarse a estos nuevos parámetros demuestra la versatilidad y eficacia de los controladores basados en inteligencia artificial.

La transferencia de conocimientos aprendidos de un modelo a otro ha sido crucial en este contexto. Este enfoque no solo acelera el proceso de implementación al evitar el largo y costoso entrenamiento desde cero para cada nuevo tipo de vehículo

3.3.7. Sistema de decisión de bajo nivel y sistema de seguridad

En el desarrollo de esta tesis, se ha abordado el nivel de toma de decisiones como un proceso de decisión de bajo nivel, estrechamente vinculado al control. Esta estructura configura al sistema de toma de decisiones como un módulo simple, cuya

función principal es la selección y validación de las entradas procedentes de fuentes de alto nivel, incorporando una capa adicional de seguridad.

Este módulo se ha implementado como un sistema modular, que permite configurar múltiples entradas a través de un solo archivo de configuración. Las entradas básicas utilizadas en los vehículos estudiados en esta tesis incluyen: el modo manual, que actúa como un modo de seguridad por defecto en caso de fallo, devolviendo el control al conductor; el modo de teleoperación, que recibe comandos desde una ubicación remota; y el modo autónomo, que procesa y verifica las consignas de los sistemas de alto nivel antes de transmitirlos a los controladores correspondientes.

En términos de seguridad, este módulo implementa varias medidas críticas:

- **Monitoreo de Entradas:** Vigila constantemente las señales de entrada, verificando los tiempos de recepción y envío de cada consigna. Establece un tiempo de caducidad para cada consigna, controlando así cualquier interrupción o pérdida de conexión con los sistemas remotos o fallas en los ordenadores de alto nivel. Esto garantiza que, ante la pérdida de señal de cualquier sistema, el control se revertirá automáticamente al modo manual.
- **Detección de Anomalías en las Consignas:** Identifica cualquier malformación en los mensajes, descartando consignas que no sean válidas, como aquellas que están fuera de rango o que no son aplicables en el estado actual del vehículo, como un cambio de marcha durante el movimiento o una velocidad negativa.
- **Respuestas de Emergencia:** El módulo también supervisa las alertas de seguridad y dispositivos de emergencia instalados en el vehículo, activando frenadas de emergencia si se presiona una seta de emergencia o se detecta un obstáculo inminente en el camino. Esta capacidad permite una respuesta vehicular más rápida y efectiva, minimizando la intervención de otros módulos que podrían retrasar las acciones necesarias en situaciones críticas.

Este enfoque integrado para la toma de decisiones de bajo nivel en el sistema de control vehicular no solo fortalece la seguridad operativa, sino que también facilita la interacción eficiente entre diferentes módulos y sistemas, asegurando una operación coherente y segura del vehículo bajo diversas condiciones.

3.3.8. Interfaz estándar

Como se muestra en la Ilustración 22, este punto marca el cierre de lo que se considera propiamente la arquitectura de control dentro de la tesis. Sin embargo, esta demarcación no significa el final de la arquitectura global que abarca la tesis. El objetivo inicial del proyecto era desarrollar una arquitectura de control capaz de gestionar un vehículo automatizado y proporcionar una interfaz pública, permitiendo así que otros centros de investigación o universidades puedan conectarse y utilizar las plataformas automatizadas para sus propias investigaciones. A lo largo del desarrollo de la tesis, surgió la necesidad de expandir esta arquitectura a un nivel más alto, abordando el guiado y la creación de vehículos autónomos completamente funcionales para realizar pruebas de validación y las implementaciones finales del proyecto. Las siguientes secciones detallarán cómo se ha llevado a cabo esta implementación de los sistemas de alto nivel.

La interfaz estándar de comunicaciones se ha diseñado para ser lo más simple posible, facilitando la conexión externa para la gestión del vehículo por parte de actores externos, como otras universidades y centros de investigación. Esta simplificación asegura que la integración con la plataforma no resulte una tarea tediosa. Conforme se muestra en la Ilustración 22, únicamente se requieren tres mensajes para gestionar el vehículo, y estos están detallados en la Ilustración 23:

- **Telemetry:** Este mensaje de salida proporciona datos esenciales en tiempo real sobre el vehículo. Incluye información crítica sobre los dispositivos de control principales como el volante, el acelerador, el freno y el sistema de marchas. Estos datos son vitales para monitorear el estado operativo del vehículo y ajustar los parámetros de control en tiempo real.
- **Modo Misión:** Este mensaje permite cambiar entre los modos de funcionamiento del vehículo: Manual, TeleOperación y Autónomo. Facilita la flexibilidad operativa y permite la adaptación a diferentes escenarios de investigación o situaciones de prueba.
- **DriveRequest:** Este es el mensaje principal de control del vehículo, permitiendo gestionar el movimiento completo del vehículo. Se divide en dos partes principales: la activación de cada uno de los actuadores

del vehículo y el control de alto nivel mediante consignas específicas para el volante, la velocidad y las marchas.

El diseño de esta interfaz de comunicación pretende facilitar la colaboración interinstitucional e impulsar la investigación en el campo de los vehículos autónomos proporcionando un mayor número de plataformas autónomas disponibles.

3.3.9. Teleoperación

Como se menciona anteriormente, por encima de la interfaz pública de comunicaciones que se enlaza con la arquitectura de control, se identifican dos principales fuentes de consignas de control para el vehículo. En esta sección específica, nos centraremos en la teleoperación (Tener & Lanir, 2022; T. Zhang, 2020).

Durante el desarrollo de esta tesis, se implementó una opción de teleoperación diseñada específicamente para permitir el control manual del vehículo en tiempo real desde una estación remota. Esta funcionalidad es esencial para cumplir con los requisitos regulatorios y de seguridad aplicables a vehículos autónomos de alta automatización, especialmente aquellos utilizados en el transporte público de personas. La capacidad de teleoperación remota es fundamental, ya que proporciona un medio de intervención en caso de fallos en los sistemas autónomos o durante situaciones complejas que el vehículo podría enfrentar en su entorno operativo.

Dependiendo del proyecto y sus requerimientos específicos, se han utilizado diversos sistemas de teleoperación. Lo más común es el uso de dispositivos de entrada como teclados o mandos de consola para capturar las consignas de movimiento necesarias. Para este fin, se utiliza el nodo público Joy, que facilita la captura de estas entradas. A través de un traductor de señales del nodo Joy, estas entradas se convierten en el mensaje estándar definido previamente, en formatos de petición de conducción y modo de misión, conforme a la estructura comunicacional establecida en la arquitectura.

Para proyectos más avanzados, se ha optado por la utilización de una consola táctica, la cual se ilustra en la Ilustración 24. Esta consola no solo está diseñada para facilitar la interacción con el sistema de teleoperación, sino que también cuenta con certificaciones de seguridad y está ruggedizada para soportar condiciones operativas más exigentes. La robustez de esta consola garantiza que pueda ser empleada en entornos difíciles, proporcionando una fiabilidad y durabilidad aumentadas, aspectos críticos para operaciones de campo o situaciones donde la integridad del equipo es primordial.



Ilustración 24: Consola táctica de teleoperación

3.3.10. Planificador local

La otra fuente principal de consignas de control para el vehículo proviene del sistema autónomo. Durante el desarrollo de esta tesis, se ha elaborado un sistema de conducción autónoma basado en GPS, cuyos detalles se explorarán a continuación. El resultado de este sistema de navegación GPS de alto nivel se dirige a un nodo denominado planificador local, descrito en esta sección, que

integra los datos obtenidos del sistema de navegación GPS con los datos de navegación por LIDAR.

El planificador local (Garrido & Resende, 2022) puede operar de forma básica utilizando únicamente la consigna del sistema de navegación por GPS o, alternativamente, puede emplear la consigna del sistema de navegación por seguimiento de paredes o delimitación de la zona transitable detectada por LIDAR. Además, existe la posibilidad de combinar ambas consignas para un enfoque más integrado. En esta modalidad, se recopila el mapa completo de la ruta desde el nodo de navegación por GPS y se complementa con información sobre obstáculos circundantes capturada mediante LIDAR. Esto permite una respuesta de navegación más precisa y adaptativa, donde la ruta predefinida por el sistema de navegación por GPS se ajusta ligeramente para evitar obstáculos detectados.

Es importante destacar que, en situaciones de emergencia, como la presencia de un obstáculo peligroso directamente en la trayectoria del vehículo, el nodo de LIDAR puede comunicarse directamente con el nodo de Decisión para indicar la necesidad de una parada de emergencia, lo que acelera significativamente la respuesta del vehículo ante potenciales peligros.

Dado que el desarrollo de algoritmos para la planificación local no estaba dentro del alcance inicial de esta tesis, estos no se han optimizado completamente. Actualmente, la mejora de estos algoritmos representa una línea activa de investigación y se considera fundamental para la evolución futura del proyecto.

3.3.11. Navegación mediante GPS

El desarrollo del módulo de navegación mediante GPS se ha planteado como una solución complementaria para dotar a los vehículos automatizados de la capacidad de operar de manera autónoma en entornos reales. Aunque este trabajo excede ligeramente el alcance principal de la tesis, su inclusión permite validar la arquitectura de control propuesta. El sistema de navegación no contempla el cálculo dinámico de rutas sobre un mapa global, sino que sigue una serie de coordenadas GPS predefinidas, con velocidades máximas asociadas para cada punto de la trayectoria. En algunos casos, esta trayectoria puede ajustarse ligeramente en función de los datos obtenidos de sensores de percepción del entorno como cámaras o LIDAR.

El sistema de navegación se estructura en dos partes clave: la adquisición de mapas y su reproducción, cada una de las cuales se detalla a continuación:

3.3.11.1.1 Adquisición de mapas

Para que el sistema de navegación funcione, es fundamental disponer de un mapa de la ruta a seguir. Se ha optado por un formato de archivo sencillo y eficiente, en este caso un archivo de texto en formato CSV (‘.rou’), que contiene tres columnas: latitud, longitud y velocidad. Este formato ha sido elegido para facilitar las modificaciones rápidas y para evitar la complejidad de otros formatos estandarizados como el GPX o archivos aeroespaciales como ARINC 424.

Para crear estos mapas, se pueden utilizar dos métodos:

1. Carga de mapas desde una fuente externa: Una opción viable es crear mapas en software externo como OpenStreetMap, exportando los archivos GPX y luego convirtiéndolos al formato definido. Esta opción es ideal para simulaciones, pero puede no ser suficientemente precisa para entornos reales debido a pequeños desplazamientos en los datos GPS.
2. Grabación de mapas en tiempo real: La solución adoptada en los ensayos realizados en esta tesis consiste en grabar la ruta exacta utilizando un GPS de alta precisión. Esta opción asegura que la ruta grabada sea la misma que se seguirá en la reproducción, con una precisión muy alta. Además, es necesario definir la velocidad objetivo en cada punto de la ruta, lo cual se puede hacer de dos maneras:
 - Velocidad estática: Se define una velocidad constante para toda la ruta, que se puede ajustar antes o después de la grabación.
 - Velocidad dinámica: Se graba la velocidad real a la que circula el vehículo durante la grabación, reproduciéndola de manera idéntica durante el recorrido.

Este enfoque garantiza la creación de mapas precisos y replicables, facilitando el desarrollo y las pruebas de la arquitectura sin depender de soluciones externas.

3.3.11.1.2 Reproducción de mapas

La fase de reproducción del mapa en esta arquitectura es un proceso crucial que permite que el vehículo automatizado siga de manera precisa la ruta previamente grabada. Para asegurar la flexibilidad y adaptabilidad del sistema, el mapa grabado se guarda de forma completa, dejando la optimización para el

momento de la reproducción, lo que permite elegir el mejor método según las necesidades de cada ensayo. Esta fase se puede dividir en los siguientes pasos:

1. Carga del mapa

El proceso de reproducción comienza con la carga completa del mapa en memoria. Aunque los mapas no son excesivamente extensos debido a la naturaleza de los ensayos, se emplea un servicio de carga que recibe el nombre del mapa y el algoritmo de optimización deseado. Entre los algoritmos probados están:

- Mapa en crudo (sin optimización).
- Suavizado del mapa sin reducir puntos.
- Generación de puntos equidistantes.
- Interpolación de puntos para mejorar la resolución.
- Eliminación de puntos redundantes: Definición de rectas y curvas por sus puntos mínimos

Para este trabajo, la opción más eficiente ha sido generar mapas con puntos equidistantes a 2 metros, optimizando tanto la precisión del GPS como la frecuencia de actualización, lo que asegura una buena resolución sin errores en la grabación.

2. Cálculo de la ventana de actuación

Tras cargar el mapa, el siguiente paso es identificar la ventana de actuación del vehículo, es decir, el segmento de la ruta más cercano a su posición actual. Para evitar errores, se implementa una medida de seguridad que no permite la reproducción si la ruta no está al alcance. La ventana de actuación se ajusta de modo que siempre busque el punto más cercano en la ruta y evite confusiones en rutas con bucles o curvas cerradas.

3. Cálculo del error de trayectoria

Con la ventana de actuación definida, el sistema puede concentrarse en un segmento reducido de la ruta, lo que permite trabajar con algoritmos de planificación de trayectorias, si hubiera sensores de percepción adicionales. En esta tesis, se ha decidido validar el sistema solo con GPS, y este nodo se encarga de calcular el error de trayectoria del vehículo. El cálculo puede realizarse mediante métodos geométricos, como el error lateral y longitudinal, o con algoritmos avanzados como las curvas de Bézier o spline cúbico que asegura que el cálculo de la curva pasa por los puntos dados.

4. Cálculo de la consigna de control

Una vez determinado el error en la trayectoria, esta información se envía a otro nodo responsable de generar la consigna de control. Este nodo toma en cuenta las características específicas del vehículo y define las acciones de control necesarias (aceleración, frenado, giro) para que el vehículo siga la trayectoria deseada con la menor desviación posible.

Este enfoque modular y adaptable asegura que la arquitectura desarrollada pueda aplicarse en diversos vehículos y situaciones, garantizando un alto nivel de precisión en la navegación autónoma.

3.3.12. Estaciones remotas

Para finalizar con la estructura de software diseñada para el control de vehículos, se han desarrollado dos tipos de estaciones remotas. Estas estaciones están divididas en estaciones de control, que permiten operar el vehículo de manera remota, y estaciones de monitorización, que facilitan la visualización de parámetros básicos del vehículo, como su posición, telemetría, o la visualización en tiempo real de sus cámaras(J. Zhang et al., 2021).

3.3.12.1. Estación de Monitorización

Las estaciones de monitorización proporcionan capacidades básicas de visualización. Desde ellas, los operadores externos pueden acceder a todos los parámetros básicos del vehículo. Para el desarrollo de estas estaciones, se han utilizado herramientas propias de ROS y de Foxglove. Foxglove(*Foxglove - Visualization and observability for robotics developers.*, s. f.) es un software que permite monitorizar topics, servicios y otros parámetros de ROS en tiempo real, de manera más visual y accesible que herramientas básicas de ROS como RQT. Esto

permite a los usuarios personalizar la interfaz para visualizar solo los parámetros que necesitan, creando un entorno de monitorización más claro y eficiente.

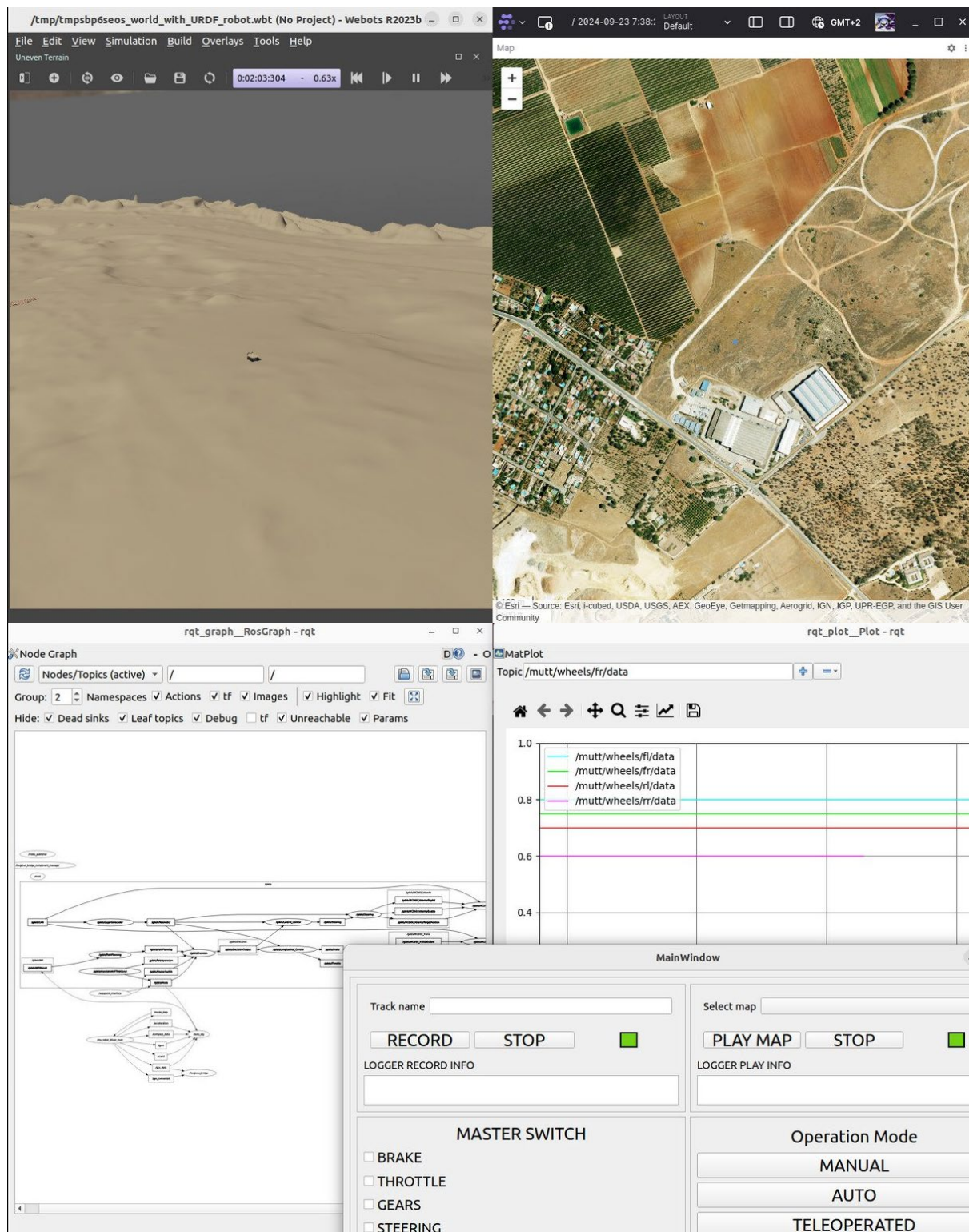


Ilustración 25: Interfaz de monitorización

3.3.12.2. Estación de Control

Las estaciones de control son fundamentales para la gestión activa del vehículo en tiempo real, ya sea mediante teleoperación o activación de sistemas autónomos. Es crucial que cada vehículo esté asociado con una única estación de control activa en todo momento para prevenir fallos del sistema. Esto se asegura mediante un servicio que limita a una sola la conexión activa en cada momento.

Además, estas estaciones pueden integrar todas las funcionalidades de las estaciones de monitorización, permitiendo a los operadores ver en tiempo real las cámaras del vehículo, su posición sobre un mapa topográfico y la telemetría del vehículo.

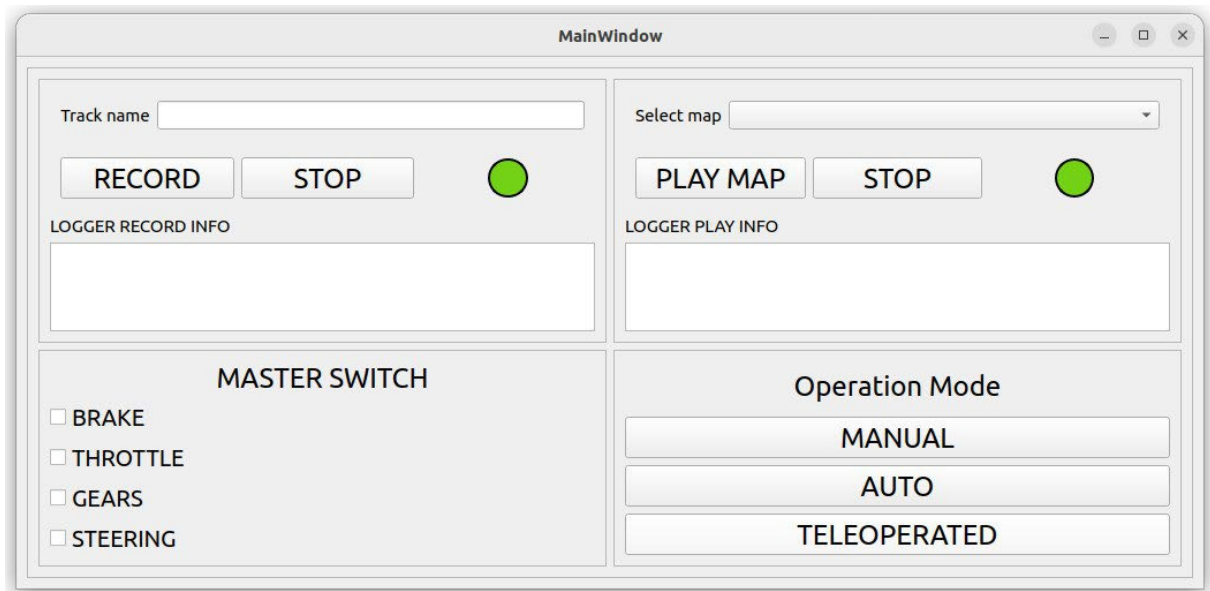


Ilustración 26: Interfaz básica de gestión de grabación y seguimiento de rutas

También es posible integrar la estación de control con software externo consiguiendo sistemas de monitorización más complejos como el utilizado en el proyecto de GDELS, mostrado en la siguiente ilustración.



Ilustración 27: Estación de control con integración de software externo

3.3.12.3. Estaciones Web

Actualmente en desarrollo, las estaciones web representan una alternativa moderna para el control y monitorización de vehículos. Estas estaciones funcionan como páginas web con un backend conectado a ROS, operado desde un servidor en el propio ordenador de control del vehículo. Mediante un sistema de autenticación, estas páginas web ofrecen a los usuarios la opción de controlar o simplemente monitorizar el vehículo, eliminando la necesidad de instalar software adicional y solucionando incompatibilidades con diferentes sistemas operativos o dispositivos móviles.

3.4. Plataforma de investigación

El diseño de la arquitectura software detallado en esta tesis se centra en crear una plataforma altamente colaborativa y modular para la investigación de vehículos autónomos. Este diseño facilita la interacción e integración con otras instituciones de investigación, con el objetivo de fomentar un entorno colaborativo más amplio donde diferentes centros pueden compartir y utilizar las plataformas desarrolladas para avanzar en las tecnologías de vehículos autónomos.

3.4.1. Visión General de la Arquitectura

1. Arquitectura de Software y Niveles de Control:

La arquitectura se explica metódicamente desde la base, comenzando con el control fundamental de los actuadores, avanzando a través de controladores de nivel superior, sistemas de decisión y culminando con sistemas de guiado avanzados como la navegación GPS. Este enfoque estructurado permite una comprensión clara y una división de funcionalidades, lo que simplifica la integración y colaboración.

2. Gestión de Dispositivos y Adquisición de Datos:

En el núcleo de la arquitectura se encuentra la gestión de varios dispositivos del vehículo cruciales para la automatización, como el volante, los frenos y el acelerador. Un sistema integrado de adquisición de datos recopila datos telemétricos esenciales, permitiendo que el sistema autónomo reaccione dinámicamente al estado actual del vehículo y a las condiciones ambientales. Esta configuración es esencial para desarrollar mecanismos de control precisos que pueden ser estandarizados y compartidos entre diferentes plataformas.

3. Protocolos de Comunicación:

La adopción del estándar de comunicación CAN (Red de Área del Controlador) facilita un intercambio de datos robusto y eficiente entre el ordenador de control del vehículo y sus actuadores. Esta estandarización minimiza la complejidad del sistema, reduce el cableado y mejora la capacidad de expansión y compatibilidad del sistema con futuras actualizaciones tecnológicas, facilitando a entidades externas la integración y adaptación de la arquitectura para diversos fines de investigación.

4. Controladores y Drivers Modulares:

Los drivers y controladores están diseñados para ser universales, lo que significa que pueden ser utilizados en diferentes modelos de vehículos sin requerir modificaciones extensas. Esta universalidad apoya la reutilización de componentes de software, reduciendo el tiempo de desarrollo y los costos, lo que es crucial para proyectos colaborativos que pueden involucrar múltiples tipos de vehículos.

3.4.2. Plataforma de Colaboración e Investigación

1. Estaciones Remotas para Control y Monitoreo:

La arquitectura incluye estaciones de control y monitoreo remotas. Las estaciones de control permiten la operación en tiempo real del vehículo, esencial para modos de teleoperación o cuando los sistemas autónomos fallan. Las estaciones de monitoreo permiten a los investigadores externos visualizar parámetros básicos del vehículo y alimentaciones de cámaras en tiempo real, facilitando diagnósticos remotos y actividades de investigación.

2. Estaciones Basadas en Web:

El desarrollo de estaciones basadas en web representa un enfoque progresista para el control y monitoreo de vehículos, permitiendo a los investigadores interactuar con los sistemas del vehículo a través de una interfaz web sencilla. Esta configuración no solo hace la plataforma más accesible para investigadores usando varios sistemas operativos, sino que también elimina la necesidad de instalaciones de software complejas, fomentando una mayor colaboración a través de diferentes límites geográficos y técnicos.

3. Integración de Alto Nivel e Investigación Futura:

El diseño de la arquitectura anticipa futuras expansiones e integraciones, como sistemas de navegación mejorados basados en GPS y LIDAR. Las capas de planificación y toma de decisiones están construidas para incorporar entradas de estos sistemas avanzados, permitiendo operaciones autónomas más precisas y seguras. Esta flexibilidad asegura que la plataforma pueda evolucionar a medida que surgen nuevas tecnologías y metodologías en el campo de los vehículos autónomos.

Al crear una plataforma estandarizada, modular y fácilmente accesible para la investigación, la tesis apoya un ecosistema colaborativo donde las innovaciones en tecnología de vehículos autónomos pueden ser desarrolladas, compartidas y

refinadas de manera eficiente. Este enfoque no solo acelera los avances tecnológicos, sino que también disemina conocimientos y experiencia a través de las instituciones, catalizando más investigación y desarrollo en el campo.

3.5. Limitaciones de la metodología propuesta

La presente investigación se ha desarrollado con el propósito de superar, en la mayor medida posible, las limitaciones identificadas en el estado del arte actual en la automatización de vehículos y plataformas terrestres. Este trabajo ha logrado abordar muchos de estos desafíos, facilitando significativamente la conversión de vehículos convencionales en plataformas de investigación autónomas y promoviendo el avance en el campo de la conducción autónoma. Sin embargo, aún existen aspectos que requieren atención y desarrollo adicional.

Tras completar la implementación y validación de la arquitectura de control propuesta, se han identificado varias áreas de mejora y limitaciones que deben abordarse en trabajos futuros. Entre las más relevantes se encuentran:

- **Algoritmos de alto nivel:** Aunque en esta tesis se han desarrollado e integrado aproximaciones iniciales a algoritmos de navegación y planificación, estos han sido diseñados principalmente para validar la funcionalidad de la arquitectura de control. Sin embargo, para dotar a las plataformas de capacidades autónomas avanzadas en entornos dinámicos y complejos, es necesario desarrollar e integrar algoritmos de navegación y toma de decisiones más sofisticados, que permitan manejar situaciones imprevistas y optimizar la interacción del vehículo con su entorno.
- **Colaboración entre plataformas:** Una de las principales limitaciones identificadas es la ausencia de sistemas avanzados de comunicación entre vehículos o plataformas autónomas. Mientras que en el caso de los conductores humanos se utilizan señales visuales o auditivas para coordinarse, en las plataformas autónomas es imprescindible incorporar sistemas de comunicación V2X. Esto permitiría la comunicación en tiempo real entre vehículos y con la infraestructura, acercando las capacidades de las plataformas autónomas a los escenarios del mundo real.
- **Adaptación automática del sistema de control a la plataforma:** Uno de los objetivos clave de esta tesis ha sido la universalidad de la arquitectura para diferentes tipos de vehículos y plataformas físicas. Aunque se ha logrado que la arquitectura sea adaptable a una amplia variedad de plataformas, el

ajuste de los algoritmos de control aún requiere de intervenciones manuales específicas para cada vehículo. Esta necesidad de ajustes manuales limita parcialmente la escalabilidad y eficiencia del sistema, y resalta la importancia de desarrollar mecanismos automáticos de configuración y calibración de la arquitectura según las características dinámicas y mecánicas de cada plataforma.

Estas limitaciones no representan un fracaso en los objetivos planteados, sino áreas de oportunidad que pueden ser abordadas en investigaciones futuras. En la sección de trabajos futuros, se detallan las estrategias y líneas de acción propuestas para superar estas debilidades y llevar la arquitectura de control desarrollada a un nuevo nivel, maximizando su utilidad, flexibilidad y aplicabilidad en escenarios más diversos y complejos.

4. Aplicación y resultados

En esta sección se detallarán las plataformas en las que se ha aplicado la arquitectura de control desarrollada en esta tesis. Para cada una de estas plataformas se describirán las investigaciones realizadas y las publicaciones asociadas. El proceso comienza con la automatización de cada vehículo mediante diversas técnicas, como se ha explicado en la sección de desarrollo de la arquitectura de control. Dependiendo de los actuadores, se han utilizado diferentes motores y técnicas de control. Una vez completada la automatización, se procede a la implementación del software y la adaptación de la arquitectura de control al funcionamiento específico de cada vehículo. Como resultado, se obtiene un vehículo completamente automatizado, equipado con todas las funciones necesarias para su control autónomo o teleoperado, lo que permite su uso como plataforma de investigación.

Posteriormente, según el caso de uso de cada vehículo, se han desarrollado diferentes líneas de investigación. Estas pueden estar enfocadas exclusivamente en el control, en el uso del vehículo como plataforma para otras investigaciones (como la interacción humano-máquina en el control autónomo), en la navegación, o en la integración de sensores y sistemas de comunicación.

4.1. Funcionamiento sin estudio del modelo dinámico

Uno de los aspectos clave de la arquitectura desarrollada en esta tesis es su capacidad para funcionar sin un estudio previo detallado del modelo dinámico específico de cada vehículo. Normalmente, obtener un modelo dinámico preciso de un vehículo requiere una comprensión profunda de sus características físicas y operativas, lo que incluye parámetros como la distribución de peso, la geometría del chasis, las propiedades de los neumáticos, y la dinámica de sus actuadores (como frenos, acelerador y dirección). Sin embargo, estos parámetros son difíciles de determinar únicamente a partir de pruebas experimentales, especialmente sin acceso directo a la información técnica proporcionada por el fabricante del vehículo.

La dificultad radica en que los vehículos están diseñados con múltiples sistemas y subsistemas interdependientes, lo que hace que su comportamiento sea altamente no lineal y sensible a una variedad de condiciones operativas, como la velocidad, la superficie de la carretera, o la carga del vehículo. La creación de un modelo dinámico a partir de experimentos requiere realizar una serie de pruebas

exhaustivas en condiciones controladas, que son difíciles de replicar en escenarios del mundo real, además de requerir un equipo de medición especializado y un tiempo considerable para procesar y ajustar los datos obtenidos.

Debido a estas complicaciones, la arquitectura de control propuesta en esta tesis se ha diseñado para ser altamente adaptable, permitiendo que el sistema se ajuste automáticamente a las características de cada vehículo sin necesidad de un modelo dinámico previo. Esta adaptabilidad se logra mediante el uso de controladores avanzados que pueden calibrarse en tiempo real, utilizando datos obtenidos directamente durante la operación del vehículo. Los controladores están equipados con algoritmos capaces de interpretar las respuestas del vehículo a diferentes entradas y ajustarse para optimizar el rendimiento del sistema de control autónomo.

4.2. Plataformas

Durante el desarrollo de esta tesis, se han utilizado múltiples plataformas, que se han dividido en función de sus características principales:

- **Vehículos Convencionales:** Esta categoría incluye los vehículos más simples, como automóviles convencionales. Se destacan tres vehículos principales en esta sección, en los cuales se aplicaron las técnicas de automatización y control descritas previamente.
- **Vehículos para el transporte de pasajeros:** El siguiente en orden de magnitud es un minibús perteneciente a la EMT. Aunque su comportamiento es similar al de un vehículo convencional, se ha clasificado en una sección aparte debido a que su modelo dinámico es significativamente diferente, debido principalmente a su diferencia de masa, lo que ha dado lugar a investigaciones específicas para abordar estas diferencias.
- **Vehículos Pesados:** En esta categoría se encuentra un camión de obras públicas, un vehículo pesado de 25 toneladas. Este tipo de vehículo presenta un desafío adicional, ya que su movimiento no sigue el modelo Stanley tradicional. Además, este camión tiene la capacidad de doblarse sobre sí mismo para establecer su orientación. En este vehículo también se han automatizado actuadores específicos, como la cuba de la parte trasera del camión.

- **Vehículos de Cadenas:** Finalmente, en colaboración con General Dynamics, se ha automatizado un vehículo militar, específicamente un tanque. Este vehículo no utiliza un sistema de tracción estándar de ruedas, como en los vehículos pesados de cuatro o seis ruedas, sino que emplea un sistema de tracción por cadenas, lo que cambia completamente su modelo dinámico. Dentro de esta sección también se incluye un vehículo teleoperado de pequeñas dimensiones que, aunque no utiliza cadenas, emplea un sistema de ruedas solidarias que imita el movimiento de un vehículo de cadenas.

4.2.1. Vehículos convencionales

En el apartado de vehículos convencionales, destacan cuatro vehículos clave que han sido fundamentales para el desarrollo y aplicación de la arquitectura de control propuesta en esta tesis.



Ilustración 29: Mitsubishi iMiev (INSIA)



Ilustración 28: URO VAMTAC (Ejercito de Tierra)



Ilustración 31: Vehículo automatizado de la universidad Carlos III de Madrid



Ilustración 30: Toyota RAV 4 de la Johannes Kepler Universität

1. Mitsubishi iMiev del Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA), Universidad Politécnica de Madrid:

Este vehículo ha sido el principal banco de pruebas para la mayor parte de la investigación realizada en esta tesis. Propiedad del Instituto de Investigación del Automóvil de la Universidad Politécnica de Madrid, el Mitsubishi iMiev ha servido como plataforma para el desarrollo de toda la arquitectura de control y ha sido utilizado en múltiples investigaciones paralelas llevadas a cabo por otros

investigadores del INSIA. Su rol central en esta tesis lo convierte en un vehículo esencial para validar y refinar las técnicas y métodos propuestos.

2. Mitsubishi iMiEV de la Universidad Carlos III de Madrid:

Similar al vehículo del INSIA, este Mitsubishi iMiEV es propiedad de la Universidad Carlos III de Madrid y ha sido utilizado en estrecha colaboración con su grupo de investigación en vehículos autónomos. En este caso, la arquitectura de control desarrollada en esta tesis se ha aplicado para proporcionar un control de bajo nivel, el cual se comunica eficazmente con el sistema de control desarrollado por el grupo de la Universidad Carlos III. Este vehículo ejemplifica perfectamente el objetivo principal de esta tesis: crear plataformas de investigación que puedan ser compartidas y utilizadas por otros grupos y centros de investigación, facilitando así la colaboración y el avance conjunto en el campo de los vehículos autónomos.

3. Vehículo VAMTAC:

El VAMTAC es un vehículo militar convencional que, a diferencia de los anteriores, ha sido automatizado también en su sistema de cambios de marcha, permitiendo un control completamente teleoperado desde una ubicación remota. Aunque este vehículo no presenta dificultades adicionales en comparación con los demás, ya que sigue el mismo modelo dinámico y utiliza los mismos actuadores para gestionar el movimiento, su capacidad para ser completamente teleoperado añade un nivel adicional de versatilidad en aplicaciones militares y de defensa.

4. Toyota RAV4 de la Johannes Kepler Universität, Linz, Austria:

Este vehículo, propiedad de la Johannes Kepler Universität en Linz, Austria, fue objeto de un desarrollo particular durante una estancia internacional realizada en el marco de esta tesis. A diferencia de los otros vehículos, el Toyota RAV4(Certad et al., 2022) no fue equipado con componentes mecánicos externos para su automatización. En su lugar, se integró la arquitectura de control desarrollada en esta tesis con un sistema ya existente, el OpenPilot, que había sido instalado previamente en el vehículo por investigadores de dicha universidad. A través de una API y un puente (bridge) que conectó el desarrollo previo con los nodos de la nueva arquitectura de control, se logró dotar al vehículo de características autónomas completas sin necesidad de añadir actuadores mecánicos externos. Sin embargo, esta integración presentó desafíos adicionales, como una mayor probabilidad de eventos inesperados, pérdidas de control o desconexiones del sistema, debido a que parte del control escapaba de la gestión directa de la arquitectura. A pesar de estos retos, se obtuvieron resultados muy

satisfactorios, permitiendo que el vehículo fuera utilizado como base para una investigación en factor humano.

4.2.1.1. Resultados de automatización de vehículos convencionales

En este apartado se detallan los resultados de los ensayos de automatización realizados en algunos de los vehículos convencionales mencionados en secciones anteriores, con el objetivo de validar la arquitectura de control desarrollada en esta tesis.

4.2.1.1.1 Ensayo realizado con el vehículo Mitsubishi iMiev

El ensayo llevado a cabo en las instalaciones de la Universidad Complutense de Madrid, en el campus de Somosaguas, se centró en evaluar la capacidad de la arquitectura de control del vehículo autónomo para mantenerlo dentro del carril designado con la máxima precisión, utilizando una carretera de dos carriles como entorno de prueba. Durante el desarrollo de este ensayo, se simularon dos eventos críticos que evaluaron la capacidad de reacción tanto de la arquitectura de control como del propio vehículo ante situaciones inesperadas, poniendo a prueba su capacidad de maniobra y seguridad.



Ilustración 32: Ruta del ensayo del Misubishi iMiev en Somosaguas

El recorrido del vehículo, tal y como se muestra en la Ilustración 32, muestra la trayectoria seguida y la variación de velocidad durante el ensayo. En este

contexto, se presentan dos eventos clave que permiten llevar al límite el rendimiento del sistema de control.

El primer evento significativo se produce alrededor del segundo 1960, según se observa en la gráfica de control de velocidad de la Ilustración 33. En este punto, el vehículo ejecuta una frenada de emergencia, reduciendo su velocidad de 25 km/h a 0 km/h de manera abrupta. Este evento se debe a la integración del sistema de detección de obstáculos en tiempo real, utilizando sensores LIDAR y cámaras. Para simular una situación de emergencia, se introduce de manera inesperada a una persona que sale desde detrás de un vehículo estacionado en el lateral derecho de la carretera, lo que obliga al vehículo a frenar rápidamente para evitar una colisión. Una vez que la persona abandona la trayectoria del vehículo, este reanuda su marcha de manera controlada.

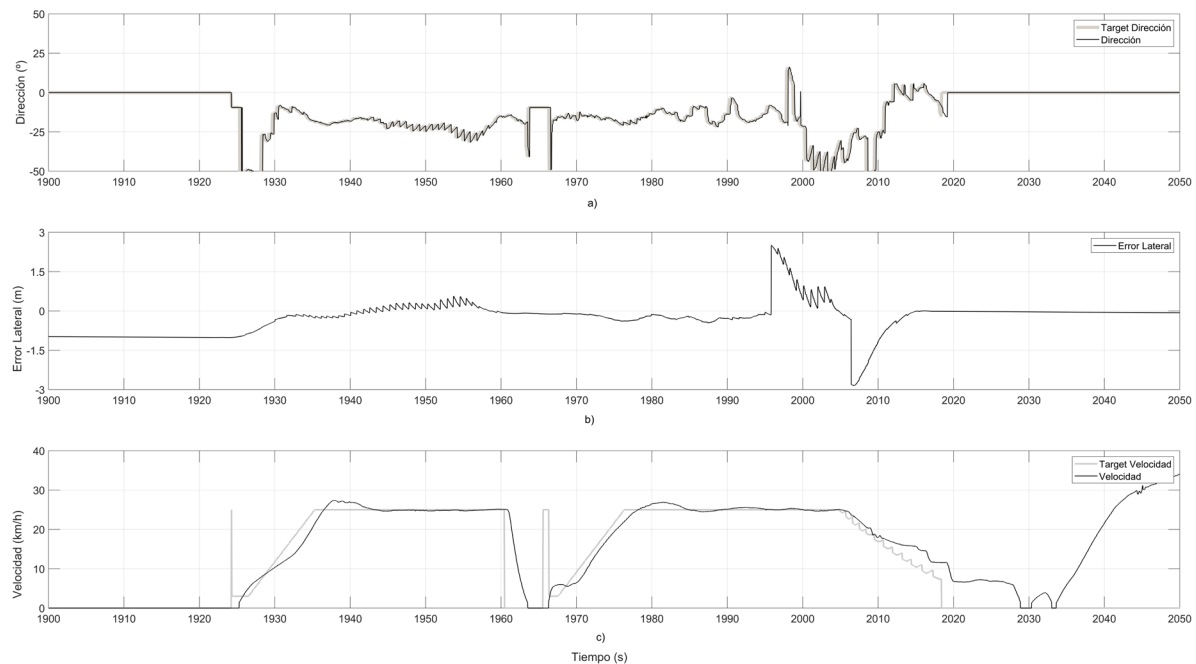


Ilustración 33: Gráficos de resultados del ensayo del Mitsubishi iMiev

El segundo evento se produce aproximadamente en el segundo 1995, como se muestra en la gráfica del error lateral, donde se registra un giro brusco hacia la izquierda. Este evento se genera a partir de una simulación de comunicación V2X, que notifica al vehículo que el carril derecho está bloqueado, por lo que debe realizar un cambio de carril hacia el izquierdo dentro del radio de influencia del evento. Esta maniobra se complica debido a la estrechez de los carriles, lo que exige una mayor precisión del sistema. Además, es necesario que el sistema de detección de obstáculos sea informado del cambio de trayectoria para evitar que el vehículo

estacionado en el carril derecho sea detectado como un obstáculo durante la maniobra de cambio de carril. Después de superar el obstáculo y salir del área de influencia del evento, aproximadamente en el segundo 2007, el vehículo vuelve a su carril original para continuar con su ruta planificada.

Este ensayo demuestra la capacidad de la arquitectura de control para reaccionar a eventos inesperados en tiempo real, validando su eficacia a pesar de la modularidad que caracteriza su diseño. Aunque la naturaleza modular de la arquitectura podría sugerir la posibilidad de retrasos en la cadena de procesamiento debido al número de pasos involucrados, los resultados indican que dicho retardo es mínimo, lo que permite una reacción eficiente y precisa ante situaciones críticas. Este comportamiento reafirma la robustez del diseño, permitiendo una respuesta ágil incluso en situaciones inesperadas.

Además, uno de los aspectos más relevantes de este ensayo es la integración de sistemas externos a la arquitectura de control. La adquisición e identificación de obstáculos a través de tecnologías como LIDAR y cámaras extiende las capacidades del sistema, haciéndolo más versátil y adaptado a entornos complejos. Esto permite a la arquitectura no solo gestionar la conducción autónoma en función de rutas predefinidas, sino también adaptarse a su entorno en tiempo real, mejorando tanto la seguridad como la capacidad operativa del vehículo.

4.2.1.1.2 Ensayo realizado con el vehículo Toyota RAV 4

El ensayo con el Toyota RAV 4 (Barrio et al., 2023) se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad JKU. Estos ensayos se enfocaron en validar tanto el control lateral como el longitudinal, utilizando un control de bajo nivel gestionado mediante el software OpenPilot, que fue integrado con la arquitectura de control propuesta en esta tesis.

Ilustración 34: Ruta realizada durante los ensayos con el Toyota RAV 4

El experimento consistió en seguir una ruta marcada, mostrada en la Ilustración 34, a una velocidad constante. Esta ruta presentaba un margen de tolerancia muy reducido en cuanto al error lateral, debido a la estrechez del camino que rodea las instalaciones de la universidad. Además, se aprovechó una pequeña ampliación en la vía cerca del último edificio de la derecha para simular una maniobra de evasión de obstáculos, lo que permitió evaluar la reacción del sistema de control lateral.

Los resultados de los ensayos se presentan en la Ilustración 35. En la primera gráfica se muestra el control lateral, específicamente la consigna de

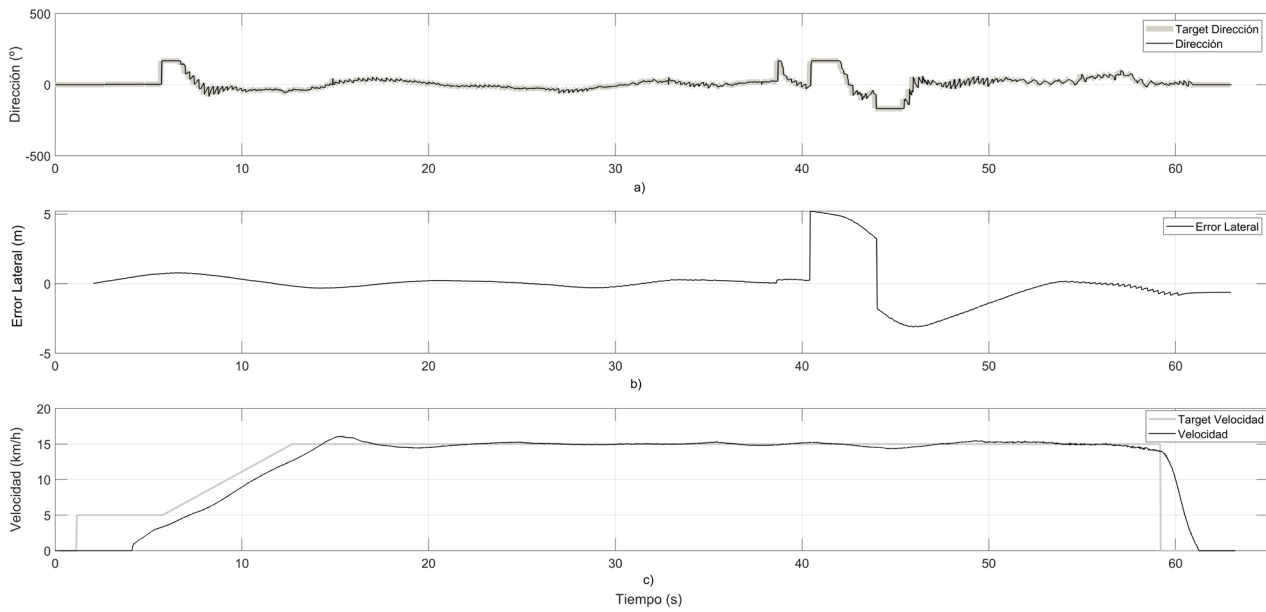


Ilustración 35: Gráfica de resultados del ensayo JKU

dirección y la dirección real aplicada por el vehículo. La segunda gráfica ilustra el error lateral, que se mantuvo cercano a cero durante la mayor parte del ensayo, cumpliendo con la baja tolerancia requerida. No obstante, alrededor del segundo 40 se observa un aumento significativo del error lateral, coincidiendo con la maniobra de evasión de obstáculos mediante un giro pronunciado a la izquierda. Este error se reduce a medida que el vehículo retoma la trayectoria establecida tras evadir el obstáculo.

Finalmente, en la tercera gráfica se presenta la consigna de velocidad y la velocidad real a lo largo del recorrido. El vehículo mantuvo una velocidad media de 15 km/h, con una aceleración progresiva en el inicio de la prueba. La rampa de aceleración comienza a partir de 5 km/h, debido a una limitación del sistema OpenPilot, que no permite activar el control de crucero por debajo de esa velocidad, ya que este fue el sistema empleado para gestionar la velocidad en el ensayo.

4.2.2. Vehículos para el transporte de pasajeros

Como se mencionó anteriormente, el siguiente vehículo en orden de magnitud es un minibús, modelo Gulliver, propiedad de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid (EMT). Aunque este vehículo no difiere significativamente de un vehículo convencional en términos generales, ha presentado un gran desafío en su desarrollo debido a sus características técnicas y mecánicas únicas.

A pesar de que comparte el sistema de automatización utilizado en otros vehículos mencionados, el minibús Gulliver ha requerido ciertas adaptaciones mecánicas específicas. Por ejemplo, se ha tenido que realizar una modificación en el sistema de transmisión de cadena para la dirección, así como una actualización del sistema de control electrónico del acelerador debido a las diferencias de voltaje que presenta este vehículo en comparación con otros. Estas modificaciones han sido necesarias para asegurar la compatibilidad y el funcionamiento eficiente de los sistemas de control autónomo en este minibús.



Ilustración 36: Minibús Gulliver de la EMT

Una de las principales complicaciones al automatizar este vehículo radica en su modelo dinámico, que es notablemente diferente y más lento en comparación con otros vehículos. Este comportamiento se debe a varias características mecánicas, como el hecho de que el sistema de dirección y el freno, ambos de naturaleza hidráulica, comparten la misma bomba hidráulica para su control. Esto significa que, si ambos sistemas se accionan simultáneamente, la fuerza requerida para, por ejemplo, girar el volante, aumenta considerablemente, lo que complica la maniobrabilidad del vehículo.

Además, el acelerador del minibús Gulliver tiene una respuesta mucho más lenta y, al igual que el freno, posee una gran zona muerta en la que no ejerce efecto sobre el vehículo. Estas características complican la tarea de automatizar y controlar eficazmente el movimiento del minibús. Otro aspecto crítico es la

necesidad de un control extremadamente suave del vehículo debido a la disposición de los ocupantes, que suelen viajar de pie, a diferencia de un vehículo convencional donde los pasajeros están sentados y el margen de aceleración es más amplio. Sin embargo, este control suave no puede comprometer la precisión, ya que podría resultar peligroso durante la conducción si no se mantiene un equilibrio adecuado entre comodidad y seguridad.

Estas particularidades del minibús Gulliver han hecho que sirva como una base ideal para el desarrollo y la aplicación de técnicas de control innovadoras. Estas técnicas han sido diseñadas específicamente para adaptarse a las complejidades y peculiaridades de este vehículo, buscando optimizar tanto la seguridad como la comodidad de los pasajeros, sin sacrificar la precisión en el control del vehículo.

4.2.2.1. Resultados de automatización de vehículo para el transporte de pasajeros



Ilustración 37: Ruta realizada en el ensayo con el autobús Gulliver de la EMT

El ensayo del guiado por GPS aplicado al Minibús Gulliver de la Empresa Municipal de Transportes (EMT) de Madrid(Alonso et al., 2023; Madridano et al.,

2023) se realizó en las instalaciones de las cocheras de la EMT, situadas en Carabanchel, Madrid. El objetivo principal de este ensayo fue validar la adaptación de la arquitectura de control desarrollada en esta tesis a un vehículo de mayores dimensiones y diferentes características mecánicas respecto a un vehículo convencional, pero que comparte un modelo dinámico similar. Además, este ensayo plantea la posibilidad de utilizar el minibús en entornos controlados como lanzadera automática, o para realizar labores repetitivas dentro de las cocheras, tales como el paso por la sección de limpieza, la recarga automática mediante pantógrafos invertidos o el traslado del vehículo a centros de reparación sin la intervención de un conductor.

El ensayo se centró en evaluar el comportamiento del minibús a lo largo de un recorrido dentro de las cocheras. En condiciones de terreno llano, el rendimiento del vehículo fue altamente satisfactorio, logrando resultados comparables a los de vehículos convencionales. Sin embargo, para incrementar la dificultad del ensayo, el recorrido incluyó dos pendientes: una bajada pronunciada en el lado derecho y una subida moderadamente pronunciada en la parte izquierda del circuito, las cuales están representadas en la Ilustración 37.

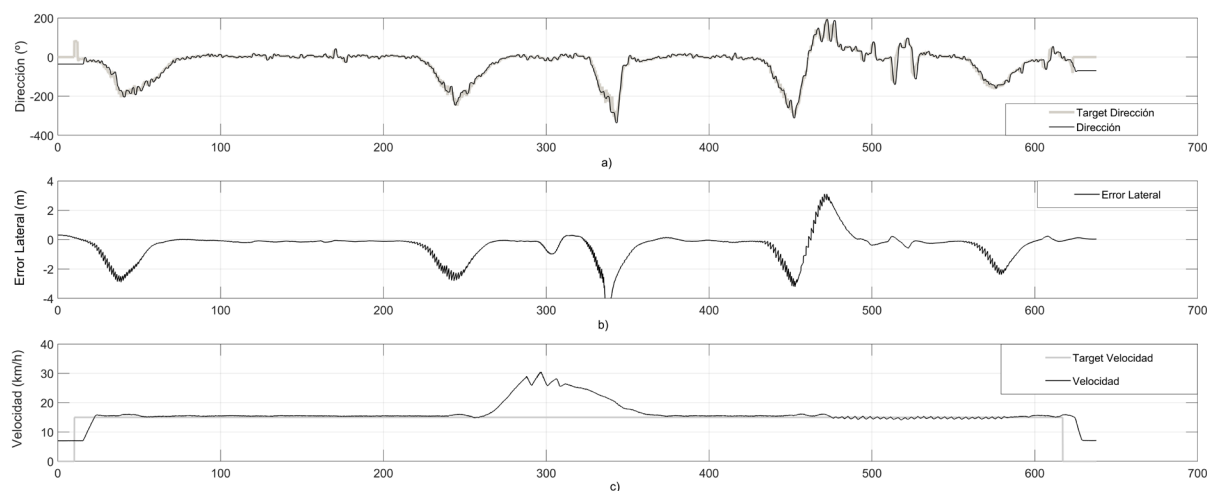


Ilustración 38: Gráfico de resultados del ensayo con el autobús Gulliver de la EMT

El primer reto fue la subida, que resultó ser una prueba sencilla en comparación, pero que destacó las limitaciones del sistema de propulsión del vehículo debido a la degradación de las baterías Zebra instaladas en el minibús. En condiciones normales de conducción manual, el sistema de aceleración original no genera una señal lo suficientemente potente para mantener una velocidad constante en la subida, debido al diseño del acelerador para un voltaje mayor que

el actual de las baterías desgastadas. Sin embargo, al integrar el dispositivo CANADAC como parte de la automatización, que ajusta la señal de entrada independientemente del estado de las baterías, el sistema de control longitudinal pudo mantener la velocidad con una variación mínima de menos de 1 km/h, como se observa en la Ilustración 38 alrededor del segundo 480.

El segundo reto se presentó en la bajada pronunciada, alrededor del segundo 260 de la gráfica. Este desafío es más complejo debido a la naturaleza del sistema hidráulico compartido entre el freno y la dirección del minibús. En situaciones donde la demanda de presión en el freno o en el volante es alta, como en curvas cerradas o frenadas bruscas, el otro sistema se ve afectado. En este caso, el ensayo se centró en estudiar el comportamiento del freno y su relación con el control de velocidad. El sistema PID mostró una alta precisión en la regulación de la velocidad en condiciones normales, pero las fluctuaciones en la presión hidráulica afectaron al rendimiento del frenado en pendientes pronunciadas.

Dado que el minibús está diseñado para transportar pasajeros, muchos de los cuales probablemente viajarán de pie, se decidió permitir un ligero exceso de velocidad en la bajada para evitar frenadas bruscas que pudieran comprometer la comodidad de los pasajeros. Sin embargo, se identificó la necesidad de mejorar este comportamiento, y se propuso la implementación de redes neuronales para el control longitudinal, sustituyendo los controladores PID tradicionales. Las redes neuronales ofrecen una capacidad de adaptación superior en terrenos irregulares y vehículos pesados, ajustando de manera más eficiente la aceleración y el frenado.

La arquitectura de la red neuronal implementada (Frutos, 2024) incluye dos capas convolucionales iniciales que extraen patrones locales de las variables de entrada (velocidad actual, objetivo, variación del ángulo de giro, altitud), seguidas de una capa LSTM bidireccional para capturar las relaciones temporales. Las salidas de la red consisten en una capa de clasificación para determinar la acción (frenar, acelerar, no aplicar presión) y una capa de regresión para ajustar la magnitud de la acción aplicada.

La red neuronal fue inicialmente entrenada con datos obtenidos de un Mitsubishi iMiev sensorizado, debido a la falta de datos precisos del minibús para este tipo de entrenamiento, como por ejemplo una señal de velocidad estable o la retroalimentación de la posición del freno. A pesar de las limitaciones inherentes al sistema de frenos del minibús y la falta de un freno motor, el controlador neuronal demostró un rendimiento superior en comparación con el PID en

vehículos ligeros y, fue capaz de generalizar el aprendizaje consiguiendo mejorar el rendimiento del PID, aunque en menor medida, en vehículos pesados.

Los resultados mostraron que el controlador neuronal podía adaptarse mejor a los terrenos irregulares, con una capacidad notable para reducir la sobrevelocidad en descensos pronunciados, como se muestra en Ilustración 40.

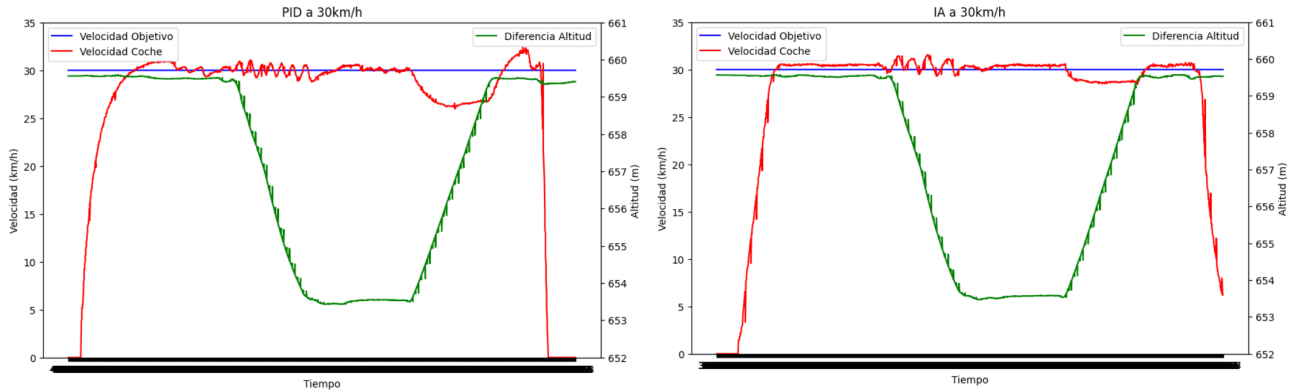


Ilustración 39: Control de un vehículo convencional (PID a la izquierda) (Red neuronal a la derecha)

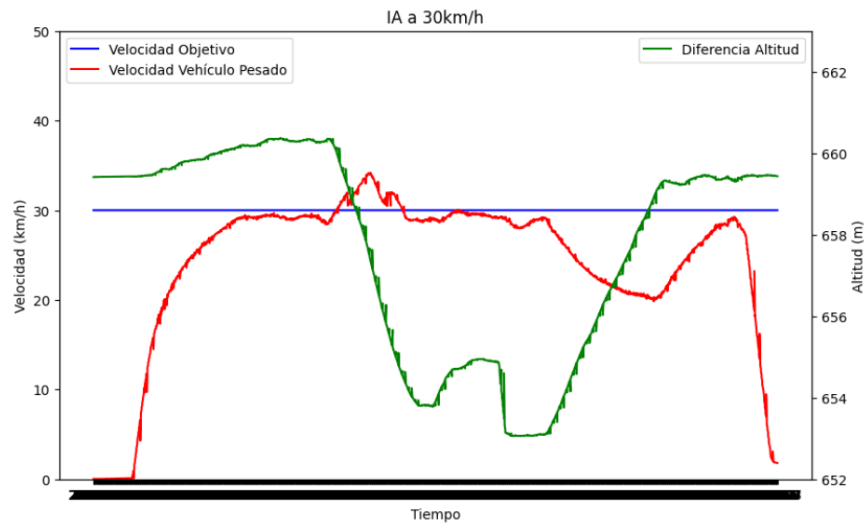


Ilustración 40: Control de un vehículo de transporte de pasajeros mediante red neuronal

Además, destaca que la arquitectura neuronal utilizada para vehículos ligeros puede ser extrapolada y aplicada a vehículos pesados, lo que representa una ventaja considerable en términos de flexibilidad y aplicabilidad del sistema de control propuesto.

4.2.3. Vehículos pesados

Avanzando hacia otro tipo de plataformas, distintas de los vehículos convencionales, encontramos el camión Volvo A25, propiedad de la empresa Sacyr. Este vehículo ha ofrecido una oportunidad única para desarrollar y probar la arquitectura de control en entornos muy diferentes, específicamente en contextos no estructurados. El ámbito de aplicación de este camión difiere significativamente de un vehículo convencional, ya que está diseñado para operar en minas, tanto a cielo abierto como subterráneas.

La automatización de este camión (Dersten et al., 2015) se llevó a cabo de manera similar a otros vehículos, pero con la adición de características específicas como la gestión del volquete y la adaptación del control del vehículo, dado que este camión tiene la capacidad de doblarse sobre sí mismo para girar. Esta capacidad de maniobra presenta un desafío adicional en términos de control y automatización, ya que requiere un sistema que pueda manejar de manera efectiva el movimiento complejo del camión.



Ilustración 41: Volvo A-25 de la empresa Sacyr-Cavosa (Lagarto)

En cuanto a la navegación, este proyecto presentó retos significativos. Mientras que la navegación en cielo abierto en minas podía parecer inicialmente similar a la de otros vehículos, se diferenciaba notablemente en la necesidad de imponer más restricciones al movimiento del vehículo. Esto se debe a que el radio de giro de un camión de estas dimensiones es mucho mayor, y la ruta que sigue es diferente a la de un vehículo convencional debido a su longitud y la posición de sus

ruedas. Además, el camión debía ser capaz de realizar transiciones entre la navegación en cielo abierto y la navegación subterránea, lo que requirió el desarrollo de soluciones innovadoras.

Para abordar este desafío, se comenzó a integrar sistemas de navegación local basados en LIDAR con los sistemas de navegación por GPS que habían sido desarrollados en esta arquitectura. La dificultad aumentaba debido a que, aunque en cielo abierto se contaba con una buena cobertura GPS, no se podía confiar completamente en ella. Esto se debe a que las minas, siendo entornos no estructurados y sujetos a cambios rápidos en un corto período de tiempo, exigían la adquisición de datos de sensores que no fueran fácilmente afectados por las condiciones del entorno. Esto incluyó la integración de sensores adicionales que pudieran proporcionar información confiable para la navegación en estos entornos tan dinámicos.

Este desarrollo tiene como objetivo principal reducir el riesgo al que se exponen las personas al trabajar en entornos tan hostiles como una mina. La automatización de vehículos como el camión Volvo A25 busca minimizar la necesidad de personal en la parte de transporte de materiales dentro y fuera de la mina, disminuyendo así el riesgo de accidentes y errores humanos. Al reducir la intervención directa de operadores humanos, se disminuye también el factor humano, lo que puede ser crítico en entornos donde las condiciones son extremas y el margen de error debe ser mínimo.

Además, es fundamental que este vehículo no dependa de factores o elementos externos, como balizas o señales, para su operación. En un entorno minero, las condiciones y la configuración del terreno pueden cambiar rápidamente, haciendo que cualquier infraestructura fija, como balizas, se vuelva obsoleta e inútil en un corto período de tiempo. Por lo tanto, la automatización de este camión ha sido diseñada para operar de manera autónoma y flexible, utilizando sistemas avanzados de navegación y sensores que permiten adaptarse rápidamente a los cambios en el entorno sin necesidad de depender de señalización externa. Esto asegura que el vehículo pueda operar de manera segura y eficiente, incluso en los entornos más dinámicos y cambiantes, contribuyendo significativamente a la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras.

4.2.3.1. Resultados de automatización del vehículo de obras públicas

En este apartado se describen los resultados del ensayo realizado para la validación de la automatización del vehículo de obras públicas Volvo A25 (Lagarto) (Naranjo et al., 2023). Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de Sacyr-



Ilustración 42: Ruta seguida en los ensayos del vehículo de obras públicas

Cavosa en Noblejas, con el objetivo de simular la navegación de un vehículo de obras utilizado habitualmente en minas, que suelen combinar trayectos a cielo abierto y en tramos cubiertos. Para recrear esta situación, se diseñó una ruta, mostrada en la Ilustración 42, que abarca todo el terreno disponible y finaliza atravesando una nave industrial, que simula el ambiente de una mina subterránea (José Eugenio Naranjo Hernandez et al., 2020; José Eugenio Naranjo Hernandez & Alfredo Valle Barrio, 2020). Durante el ensayo, se combinó la navegación mediante GPS integrada en esta tesis con un desarrollo externo basado en LIDAR y el seguimiento de paredes o puntos de referencia, como se observa en las gráficas adjuntas.

En cuanto al enfoque de esta tesis, los resultados se centran únicamente en la navegación basada en GPS. Este tipo de conducción plantea retos adicionales debido a que el vehículo no se orienta mediante la rotación de las ruedas, como en un vehículo convencional, sino a través de un giro en la articulación entre la cabeza tractora y el remolque. Este comportamiento afecta la precisión del sistema GPS, ya que las dimensiones del vehículo y la ubicación de la antena inflúan negativamente en la lectura de la posición y el avance del vehículo.

Para resolver estos problemas, se realizó un análisis detallado del giro y de la forma del vehículo, concluyendo que la antena GPS debía situarse sobre el eje de las ruedas tractoras, que es la parte menos afectada por la torsión de la cabina. Con esta corrección, el comportamiento del vehículo en movimiento se asemejó mucho al de un vehículo convencional, lo que simplificó el proceso de automatización.

En las gráficas de la Ilustración 43 se muestran los resultados obtenidos durante el ensayo. En la primera gráfica se observa la trayectoria de dirección, donde se destaca el buen desempeño del vehículo al seguir la ruta, con algunos desvíos debido a la complejidad de las curvas cerradas. Estos desvíos, aunque significativos en ciertos momentos, se encuentran dentro de los márgenes aceptables, tal como se puede ver en la segunda gráfica, que muestra el error lateral. Este error se mantuvo relativamente bajo, excepto en zonas de curvas más cerradas, donde la naturaleza del movimiento articulado del Volvo A25 afectó la

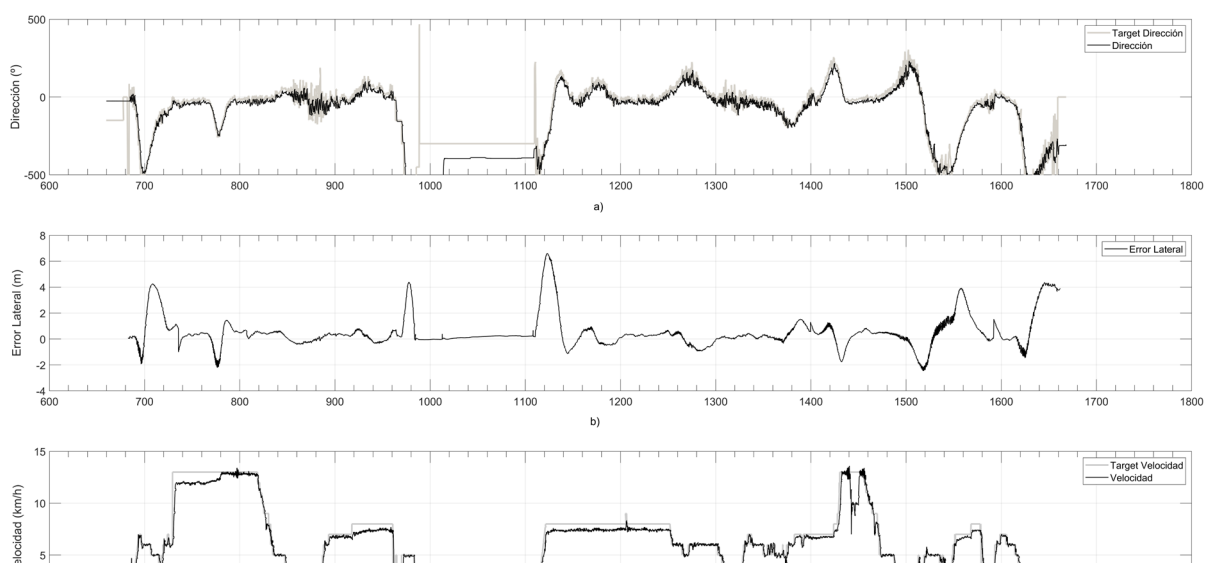


Ilustración 43: Resultados del control y la navegación del recorrido mediante GPS del vehículo de obras públicas

precisión del seguimiento. Teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo un error lateral medio de 0.74m no supone una desviación excesiva.

Cabe destacar que entre los segundos 980 y 1110 se observan maniobras extrañas en la parte superior de la ruta, que coinciden con la operación en modo teleoperado. Este modo se activó para realizar maniobras marcha atrás, necesarias para vaciar la cuba del camión. Una vez finalizada esta tarea, se reactivó la conducción autónoma, lo que se evidencia en la gráfica de error lateral cuando el vehículo reinicia su marcha desde un punto ligeramente separado de la ruta original, debiendo reincorporarse a ella.

En resumen, los resultados muestran que el sistema de control basado en GPS desarrollado en esta tesis fue capaz de gestionar con eficacia la navegación autónoma del Volvo A25, a pesar de sus características técnicas particulares. Aunque hubo momentos en los que se registraron picos de error lateral, estos se mantuvieron en márgenes razonables durante la mayor parte del trayecto.

4.2.4. Plataformas de cadenas

Por último, se aborda el conjunto de vehículos con orugas, compuesto por dos plataformas. El primero de ellos es un vehículo de combate de gran tonelaje, representado en la Ilustración 44, el cual se utiliza como plataforma de investigación cooperativa entre varios países. La automatización de este vehículo se llevó a cabo utilizando un sistema similar al implementado en los demás



Ilustración 44: Plataforma de cadenas PT6 ASCOD

vehículos presentados en esta tesis, con la particularidad de que fue necesario rediseñar el sistema de freno, debido a que el motor original no contaba con la potencia suficiente para accionarlo correctamente. Asimismo, se desarrolló un utillaje específico para el control de la dirección, ya que, al no disponer de un volante convencional, se requirió una solución personalizada para su configuración.

Por otro lado, el vehículo pequeño de apoyo MUTT (Multi-Utility Tactical Transport), mostrado en la Ilustración 45, también se incluye dentro de este grupo. Este vehículo, conocido por su configuración de 6 ruedas que se mueven de forma síncrona en cada lado, se comporta de manera similar a un vehículo de cadenas. El MUTT ha sido diseñado para actuar como multiplicador de fuerza en operaciones militares, ampliando las capacidades de un convoy al funcionar como vehículo de reconocimiento o para la extensión de comunicaciones. A diferencia del ASCOD, el MUTT no requirió una automatización específica, ya que puede ser controlado directamente a través del ordenador de fábrica. Sin embargo, se adaptó la arquitectura de control para comunicarse con el sistema de control propio del vehículo, únicamente integrando sensores externos como GPS y LIDAR para poder dotar el vehículo de capacidades autónomas.



Ilustración 45: Plataforma MUTT

Además, se ha avanzado en el desarrollo de un sistema de integración hardware-software, cuyo objetivo es demostrar la versatilidad de la arquitectura propuesta para gestionar una amplia variedad de sistemas de hardware, que van desde vehículos ligeros hasta plataformas de combate de gran tonelaje. Esta integración es crucial para validar la interoperabilidad de la arquitectura con distintos tipos de plataformas y asegurar su aplicabilidad en diversos escenarios operativos.

Este vehículo se está actualmente utilizando como plataforma para la validación de la creación de un gemelo virtual mediante el simulador Webots, que permite probar los algoritmos de control y navegación en un entorno seguro antes de implementarlos en los vehículos reales. Este enfoque reduce riesgos y acelera el desarrollo, permitiendo ajustar y validar los sistemas sin poner en peligro las plataformas físicas. El gemelo virtual, mostrado en la Ilustración 46, ha sido fundamental para optimizar el diseño de los algoritmos y asegurar su



Ilustración 46: MUTT simulado en Webots realizando una ruta en autónomo entre árboles

funcionalidad en condiciones reales, así como la experimentación con nuevos sensores y configuraciones acelerando el desarrollo.

4.2.4.1. Resultados de automatización de vehículos de cadenas

En este apartado se van a detallar los resultados obtenidos con los ensayos de los vehículos de cadena automatizados. En concreto, se. Resultados del vehículo ASCOD. Mostrado en la primera parte de esta sección.

4.2.4.1.1 Resultados de los ensayos con la plataforma PT6 ASCOD

El ensayo descrito a continuación consiste en un recorrido en un entorno no estructurado "Off Road"(F. Zhang et al., 2021) realizado con la plataforma ASCOD. Este recorrido se compone de varias vueltas, como se muestra en la Ilustración 47, que alternan entre periodos de conducción autónoma y manual, siendo esta última utilizada para la inicialización de la siguiente vuelta. Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de Santa Bárbara Sistemas, perteneciente a General Dynamics Land Systems, situadas en Alcalá de Guadaira, Sevilla.

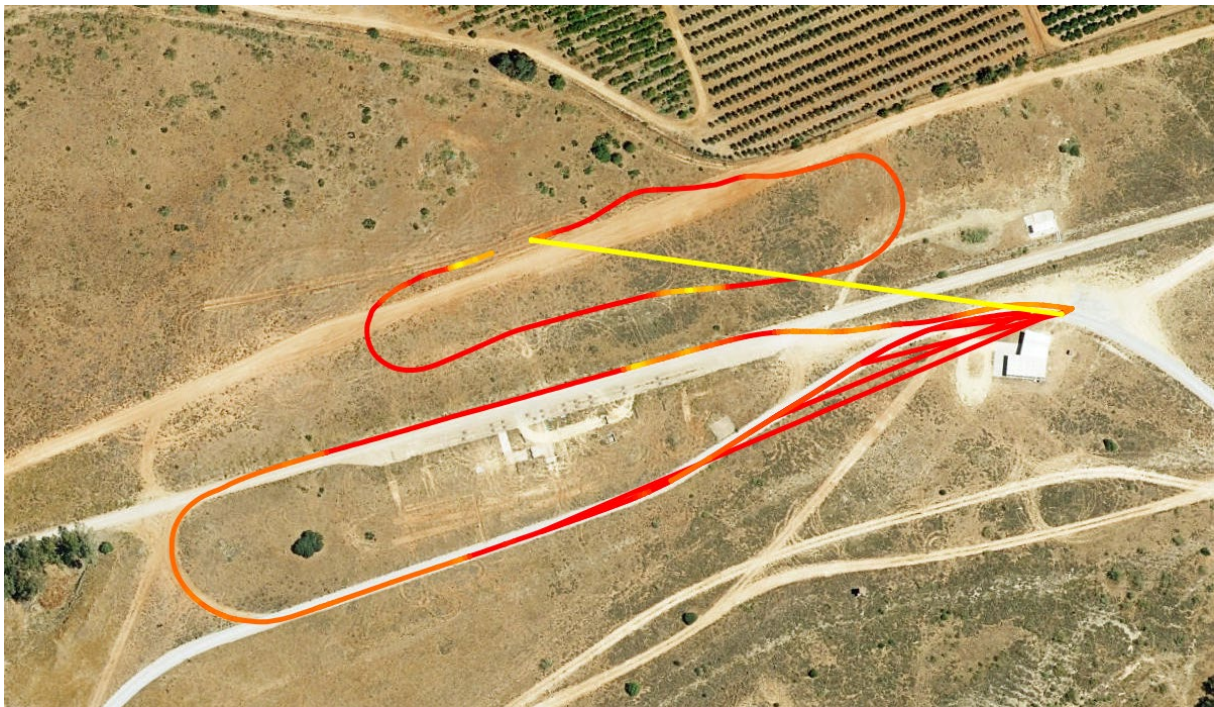


Ilustración 47: Ruta del ensayo realizado con la plataforma ASCOD

Los resultados del control autónomo durante el ensayo se presentan en la Ilustración 48. En estas gráficas se muestran tres parámetros: las consignas de dirección aplicadas, el error lateral, y la velocidad del vehículo. A diferencia de los ensayos previos, los resultados indican que el control de dirección y velocidad no es tan preciso debido a las condiciones propias del vehículo y a la adaptación de los algoritmos de control, los cuales fueron inicialmente diseñados para vehículos convencionales. La mayor dificultad se observó en el sistema de dirección, ya que el ASCOD no cuenta con un volante convencional, sino un sistema de palancas para el giro, lo que requirió un utillaje específico para su control. A pesar de ello, los resultados muestran que, durante los periodos de conducción autónoma, se logró un control preciso del giro, aunque con un mayor número de correcciones de

lo habitual. Estos periodos de conducción autónoma se identifican claramente en la primera gráfica, cuando se registran consignas de dirección.

En lo que respecta al control de la velocidad, aunque el sistema no fue tan preciso en ciertas partes del recorrido, se observaron periodos donde la gestión de la velocidad fue extremadamente precisa, como entre los segundos 400 y 600 o entre los segundos 1200 y 1400.

Por último, el error lateral durante la conducción autónoma no superó los 4 metros, lo cual, considerando las dimensiones del vehículo, es un resultado bastante favorable. El error lateral medio durante la conducción autónoma fue de 0,8982 metros, lo que demuestra una precisión considerable.

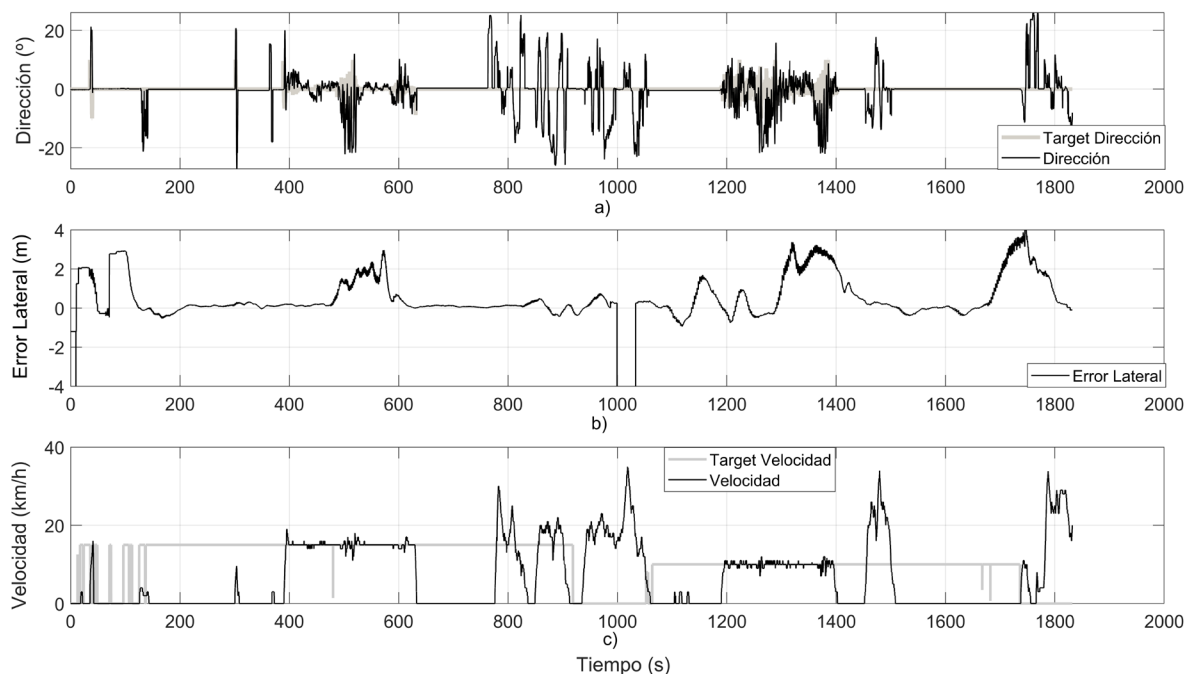


Ilustración 48: Resultados de los ensayos realizados con la plataforma ASCOD

A partir de estos resultados se concluye que la arquitectura de automatización ha sido adaptada adecuadamente para un vehículo con características mecánicas completamente distintas a las de un vehículo convencional. Sin embargo, es recomendable desarrollar un sistema de control específico para este tipo de vehículos con el fin de reducir aún más los errores observados, tomando en cuenta aspectos particulares como su capacidad de girar sobre sí mismos, una característica que no está contemplada en los vehículos convencionales.

4.3. Validación de control y resultados

En esta sección se detalla el proceso de validación realizado tras la automatización de cada uno de los vehículos mostrados en la sección anterior. Dicho proceso de validación abarca los elementos básicos de la arquitectura de control con el fin de asegurar su correcto funcionamiento para servir como base de los futuros desarrollos e investigaciones realizadas sobre las plataformas de investigación creadas mediante el uso de la arquitectura propuesta.

Además de las diferentes investigaciones realizadas en cada uno de los vehículos mostrado en la sección 4.2 se establece un plan de validación y pruebas que asegure el correcto funcionamiento de la arquitectura de control.

4.3.1. Plan de validación

El plan de validación de esta tesis ha sido desarrollado de forma paralela a la evolución de los diferentes módulos que componen el sistema. Este plan ha sido diseñado en cuatro fases incrementales para garantizar una comprobación tanto rápida como exhaustiva de los diversos componentes del vehículo, incluyendo tanto hardware como software, asegurando que ningún fallo potencial pase desapercibido.

La validación comienza con la comprobación de los dispositivos y actuadores a nivel básico. Posteriormente, se realizan pruebas estáticas y dinámicas mediante teleoperación para verificar el control del vehículo. Una vez que se confirma que el comportamiento del vehículo cumple con los requisitos del proyecto o aplicación, se procede a validar su funcionamiento en modo autónomo, lo que incluye la adquisición de datos de los sensores y la respuesta del algoritmo de navegación a estímulos externos. Finalmente, se integra la validación del sistema de toma de decisiones y seguridad, evaluando su eficacia en situaciones críticas.

4.3.1.1. Dispositivos

La primera fase del plan de validación se centra en comprobar que todos los dispositivos, tanto físicos como informáticos, funcionan correctamente. Este proceso comienza asegurando que el sistema de control es accesible desde un ordenador externo, lo cual se puede verificar mediante un comando ping hacia el ordenador de control. Una vez asegurada la conexión remota, se verifica que todos los nodos de ROS necesarios para el control del vehículo están activos, utilizando el comando *ros2 node list*.

Adicionalmente, se verifica el funcionamiento de los dispositivos físicos conectados mediante la comprobación de la conexión con las tarjetas CAN-Ethernet, responsables de la comunicación entre el ordenador de control y los actuadores. El uso de herramientas como EPOS Studio para los motores Maxon o PCAN-View para los dispositivos gestionados mediante mensajes CAN permite realizar una validación detallada de cada actuador, asegurando que estén operativos y correctamente integrados al sistema.

4.3.1.2. Control

Una vez validados los dispositivos, se procede a la fase de pruebas dinámicas. Esta fase evalúa el comportamiento de los actuadores bajo el control de la arquitectura software, enfocándose en la validación del control longitudinal (aceleración y frenado) y del control lateral (giro de volante). Esta etapa es clave para garantizar que el sistema responde adecuadamente a las consignas de velocidad y dirección.

4.3.1.2.1 Consigna de velocidad en aceleración y frenada

El control longitudinal del vehículo se valida activando el modo teleoperado del sistema, lo que permite un control en tiempo real de la aceleración y frenado. A través de consignas de velocidad enviadas desde la interfaz de operación, se evalúa si el sistema responde de acuerdo con los requisitos del proyecto, ajustando en esta fase los controladores PID que gestionan el comportamiento de los actuadores del acelerador y freno. Esto incluye la verificación de la suavidad en los cambios de velocidad, la respuesta del sistema ante diferentes condiciones de carga y la capacidad para realizar frenadas precisas.

4.3.1.2.2 Giro de volante en estático y movimiento

La validación del control lateral sigue un esquema similar al del control longitudinal. Inicialmente, se realiza una prueba estática del sistema de dirección, idealmente elevando el vehículo sobre una plataforma para simular el giro sin movimiento. Se envían consignas de giro para comprobar que el volante responde correctamente y que el sistema puede controlar su rango de operación. Una vez validado en estático, se procede a realizar pruebas dinámicas, donde se establecen velocidades fijas y se envían consignas de dirección para comprobar el comportamiento del sistema en condiciones de movimiento. Durante estas pruebas, se ajustan los controladores del sistema de dirección para optimizar su respuesta.

4.3.1.3. Guiado mediante GPS

En esta fase, se valida la funcionalidad completa del sistema autónomo basado en navegación GPS. Se activa el modo autónomo y el vehículo sigue una ruta predefinida, registrada previamente en el sistema. Durante esta fase, se monitoriza el error lateral, asegurando que los datos GPS se están adquiriendo correctamente y que el sistema de control aplica las consignas adecuadas para mantener la trayectoria planificada. Esta fase también incluye la verificación de la capacidad del vehículo para ajustar su rumbo ante posibles desviaciones, lo que es crucial para validar la robustez del sistema de guiado.

4.3.1.4. Toma de decisiones

La validación del sistema de toma de decisiones, centrado principalmente en la seguridad, se realiza en una etapa posterior a las pruebas de control y navegación, con el objetivo de evitar interferencias en el resto de las validaciones dificultando así la identificación de posibles errores. Esta fase es crítica, ya que permite comprobar que el vehículo puede gestionar situaciones de emergencia y responder a eventos imprevistos. Tres ensayos principales evalúan el comportamiento del sistema de toma de decisiones:

4.3.1.4.1 Frenada autónoma en caso de desconexión

El primer ensayo evalúa la capacidad del sistema para realizar una frenada de emergencia en caso de pérdida de conexión (Shetty et al., 2021). Durante la prueba, el sistema autónomo sigue una ruta GPS pregrabada, y se desconecta de manera abrupta el sistema de teleoperación o monitorización. Se espera que, ante esta desconexión, el sistema detecte la pérdida de comunicación y ejecute una frenada autónoma de emergencia, garantizando la seguridad del vehículo y su entorno.

4.3.1.4.2 Frenada de emergencia por obstáculo en la carretera

Este ensayo valida la capacidad del vehículo para frenar automáticamente ante la detección de un obstáculo. La información del obstáculo puede provenir de comunicaciones V2X (Hussein et al., 2017), que alertan sobre un peligro en la carretera, o de los sensores de visión, como cámaras o LIDAR, que detectan el obstáculo en tiempo real. El sistema de toma de decisiones debe reaccionar rápidamente ante esta información y aplicar una frenada de emergencia para evitar colisiones.

4.3.1.4.3 Cambio de carril/evasión de obstáculos

Finalmente, se valida la capacidad del vehículo para realizar un cambio de carril autónomo en caso de que detecte un obstáculo en su trayectoria (Mehmood et al., 2019). Si se obtiene la información del obstáculo mediante V2X (Hussein et al., 2017; Jung et al., 2018) o sensores, el sistema debe intentar evadir el obstáculo mediante un cambio de carril. En caso de que la maniobra de evasión no sea posible debido a la presencia de otros obstáculos en el carril contiguo, el sistema debe optar por detenerse automáticamente, asegurando así la seguridad del vehículo y los ocupantes.

4.3.2. Resumen de resultados de la validación

En este apartado se detalla el rendimiento final de cada uno de los vehículos involucrados en los ensayos realizados. En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos en dichos ensayos, centrándose en tres errores clave que permiten evaluar el rendimiento de cada vehículo a lo largo de las rutas seguidas. Estos errores se reflejan también en la Ilustración 49, donde se muestran los resultados en un gráfico de cajas que facilita la visualización de la variabilidad y consistencia entre los diferentes vehículos.

A partir de los datos obtenidos, se puede observar una alta consistencia en el rendimiento de los vehículos, lo que evidencia la adaptabilidad de la arquitectura de control a diferentes tipos de plataformas. Los vehículos convencionales obtuvieron los mejores resultados, con errores laterales de entre 15 y 25 cm, lo que les permite mantenerse dentro de un carril estándar sin dificultades. Por otro lado, los vehículos de mayor tamaño y peso presentaron los mayores errores laterales, principalmente debido a las dificultades adicionales para trazar curvas cerradas, lo cual es comprensible dado el tamaño y las limitaciones físicas de estos vehículos.

Respecto al control de la velocidad, todos los vehículos mostraron errores extremadamente bajos. Esto se debe en gran medida al uso de control analógico para la velocidad, lo que minimiza el tiempo de respuesta y, por lo tanto, el error. Sin embargo, cabe destacar que el Toyota RAV 4 presentó un error algo mayor, debido en gran medida a la limitación de su sistema de control de crucero, que no se puede activar a velocidades inferiores a 5 km/h, ya que el control del vehículo se realiza mediante la manipulación de los sistemas ADAS del mismo, haciendo uso

del software OpenPilot. Aun así, este error medio se sitúa en torno a los 2 km/h y disminuye a medida que la velocidad del vehículo aumenta.

En el caso de camión de obras públicas Volvo A-25, se observa un error similar debido a que el recorrido utilizado en el ensayo es irregular en algunos puntos y presenta un importante desnivel. En dicho desnivel el vehículo requiere de bastante tiempo, debido a su peso y dimensiones, para alcanzar la velocidad objetivo, la cual alcanza al llegar a una zona llana. Es por ello por lo que al suponer este desnivel un importante porcentaje del recorrido el error medio es algo más alto. También se hace presente el problema identificado del uso de controladores clásicos para terrenos irregulares lo cual sufre el vehículo especialmente en las frenadas cuesta abajo.

El error en la dirección del volante, expresado en grados de volante, fue inferior a 10° en todos los casos, lo que puede parecer elevado. No obstante, considerando que el rango de movimiento del volante en los vehículos convencionales es de aproximadamente $\pm 900^\circ$, el error real es inferior al 1.1% del recorrido total del volante, lo que equivale a un desvío de tan solo $0,25^\circ$ en la posición de la rueda con respecto a la trayectoria deseada.

De estos resultados, se puede concluir que tanto el control del volante como el control de la velocidad son altamente precisos en todos los vehículos ensayados. Sin embargo, se sugiere una mejora en los algoritmos de navegación para reducir aún más el error lateral, especialmente en los vehículos de mayor tamaño, y así optimizar aún más el rendimiento global del sistema autónomo.

Tabla 1: Tabla comparativa de los resultados de validación obtenidos por los vehículos más representativos

Vehículo	Error lateral medio (m)	Error de Velocidad Medio (km/h)	Error de Volante Medio (°)
ASCOD	0.8982	0.2234	2.9595
Minibus Gulliver EMT	0.5780	0.3120	5.5063
Mitsubishi iMiev	0.1574	0.2150	3.3357
RAV-4 JKU	0.2699	2.0407	7.6400
Volvo A-25	0.7400	1.9480	5.5600

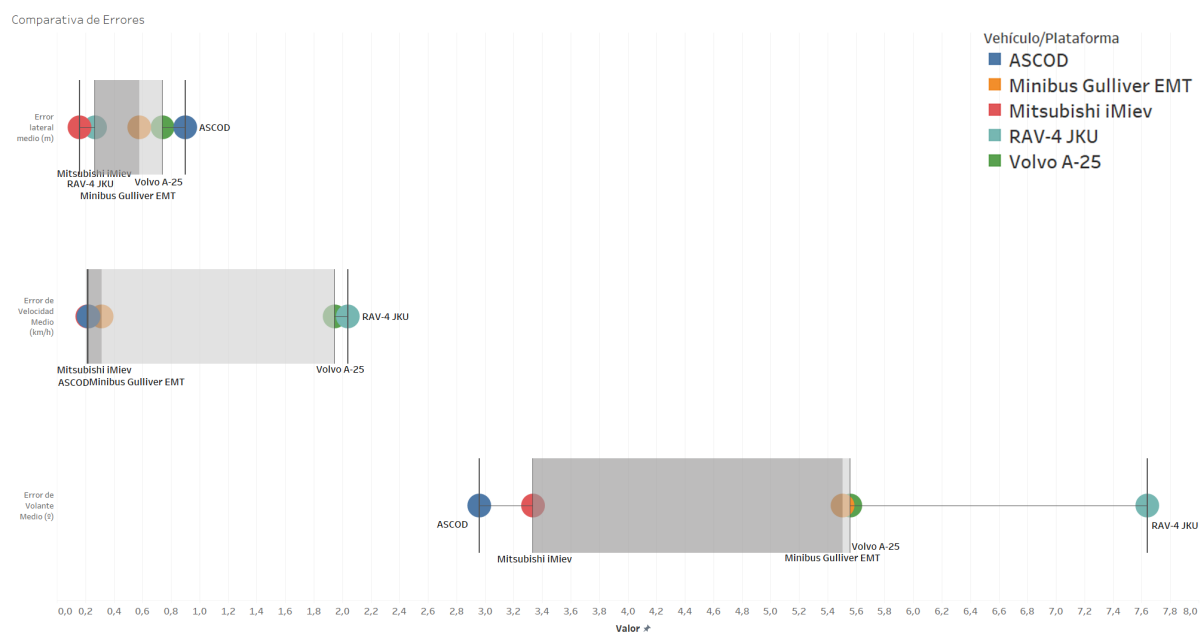


Ilustración 49: Grafica comparativa de los errores lateral, de velocidad y de volante para cada uno de los vehículos

4.4. Investigaciones adicionales realizadas en las plataformas automatizadas

Adicionalmente a las aplicaciones y resultados detallados en la sección anterior, el desarrollo de esta tesis ha servido para su propósito original, automatizar vehículos para soportar nuevas investigaciones al ser utilizado estos como plataformas de investigación. Dichos estudios han servido a su vez para identificar fallos, necesidades y posibles mejoras en la definición e implementación de la arquitectura software de control.

A continuación, se detallan aquellas investigaciones en las cuales a lo largo de esta tesis se ha participado adecuando y desarrollando la arquitectura de control que les da soporte y en el desarrollo de la propia investigación.

4.4.1. Integración de sistemas cooperativos de transporte

Al inicio del desarrollo de esta tesis, en las primeras versiones de la arquitectura de control se participó en el proyecto europeo AUTOCITS (Naranjo, Jimenez, et al., 2020) que consiste en un corredor cooperativo en la autopista A6 de Madrid, con el objetivo de que los vehículos autónomos puedan reaccionar a eventos de tráfico que no pueden ser detectados por sus propios sensores, como accidentes o condiciones adversas en la carretera.

El corredor cooperativo AUTOCITS está equipado con sistemas de comunicación V2X (vehículo-a-todo) y está gestionado por el Centro de Gestión de Tráfico de la Dirección General de Tráfico (DGT)(José Eugenio Naranjo et al., 2021). Este corredor proporciona mensajes C-ITS a los vehículos conectados, permitiendo que estos ajusten su comportamiento de conducción de manera autónoma.

Una parte clave de este trabajo fue la modificación del sistema de toma de decisiones del vehículo autónomo, añadiendo capas específicas para gestionar la información recibida de los C-ITS. Estas capas evalúan si los eventos recibidos son relevantes para la navegación del vehículo y, de ser así, activan las acciones necesarias, como reducir la velocidad, realizar un cambio de carril o detenerse por completo.

Durante los ensayos realizados en el carril bus-VAO de la A6, un vehículo automatizado con la arquitectura de control propuesta, Mitsubishi iMiev, equipado

con sensores como LIDAR, GPS y cámaras, fue sometido a diversas pruebas donde recibió información sobre eventos simulados, como la necesidad de reducir la velocidad debido a una retención o cambiar de carril para evitar obstáculos. La Ilustración 50 muestra la ruta seguida por el vehículo durante las pruebas, así como los eventos situados en la misma, mientras que la Ilustración 51 muestra el perfil de velocidad, destacando cómo el vehículo ajustó automáticamente su



Ilustración 50: Ruta seguida durante los ensayos

velocidad en función de las consignas recibidas.

Los eventos 1 y 3 consisten en una reducción de velocidad a 20 y 40 km/h por diferentes motivos con el fin de validar el funcionamiento de diferentes tipos de mensajes C-ITS(Naranjo, Jimenez, et al., 2020). El evento 2 consiste en un cambio de carril debido a la presencia de ciclistas, cuyo detalle se muestra en la Ilustración 52.

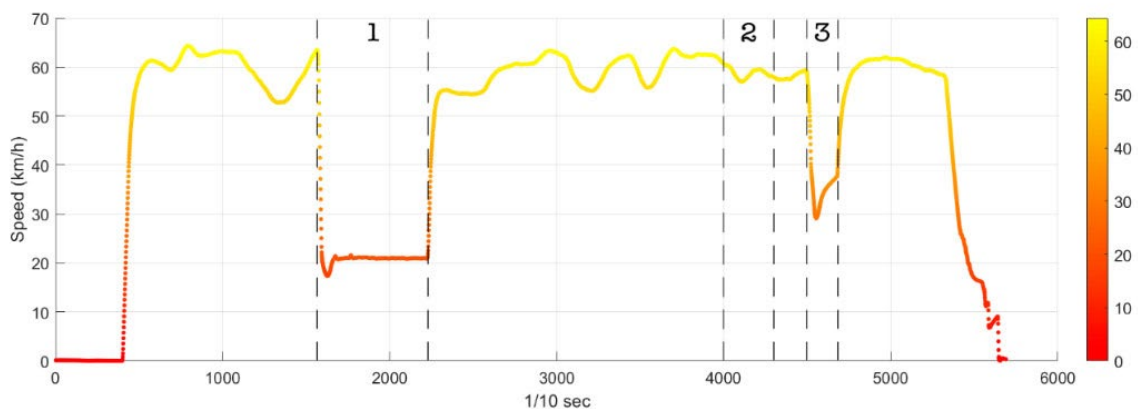


Ilustración 51: Perfil de velocidad obtenido al aplicarse los eventos



Ilustración 52: Detalle de la maniobra de cambio de carril en la zona de influencia del evento

De este ensayo se validan las primeras versiones de la arquitectura de control que consiguen realizar un control efectivo del vehículo tanto en velocidad como dirección, aunque no de forma tan precisa como en los resultados mostrados en la sección 4.3. A su vez se valida la capacidad de la arquitectura para adaptarse a las necesidades de la conducción autónoma mediante la comunicación, adquisición y procesamiento de mensajes C-ITS mediante comunicaciones V2X.

La integración de plataformas conectadas, como se describe en (Teikmanis et al., 2023), refuerza el enfoque modular y escalable de los sistemas autónomos, permitiendo funcionalidades avanzadas en control y monitorización.

4.4.2. Validación de la confianza de la población en la conducción autónoma

Durante la estancia desarrollada en el departamento de Intelligent Transport Systems de la Universidad Johannes Kepler (JKU), la tesis propuso la integración de la arquitectura modular de control diseñada en este trabajo con el sistema OpenPilot, utilizado por el equipo de investigación para la conducción automatizada de un Toyota RAV4. Este proceso implicó la adaptación del sistema de control desarrollado en la tesis con el software OpenPilot que mediante la gestión de los sistemas ADAS del vehículo, permite gestionar tanto la velocidad como la dirección. Una vez completada la integración, y con el objetivo de promover la colaboración con el equipo de investigación de JKU, se llevó a cabo un experimento de factor humano (Alfredo Valle Barrio et al., 2023), en el que dicho equipo receptor son expertos, para evaluar las reacciones de los ocupantes (Carrasco et al., 2023) del vehículo durante la conducción automatizada (Karatas et al., 2018; Strauch et al., 2019).

El experimento consistió en un recorrido a lo largo de un segmento de carretera situado en la parte posterior del campus de JKU, con el vehículo operando en modo autónomo. Los 24 participantes del estudio se sentaron como pasajeros y realizaron una tarea ajena a la conducción (Naujoks et al., 2018) (Del Re et al., 2024) para evaluar sus reacciones ante las maniobras automatizadas. Durante el trayecto, se utilizaron gafas de seguimiento visual (Sánchez-Mateo et al., 2022) para monitorizar las fijaciones oculares y las variaciones en el tamaño de la pupila de los ocupantes, como indicadores de su nivel de estrés o aceptación del sistema de conducción autónoma. Los resultados revelaron una alta aceptación del sistema, con solo leves indicios de nerviosismo ante maniobras más bruscas, lo que indica que los pasajeros se sintieron, en general, seguros y cómodos con el sistema de conducción autónoma implementado.

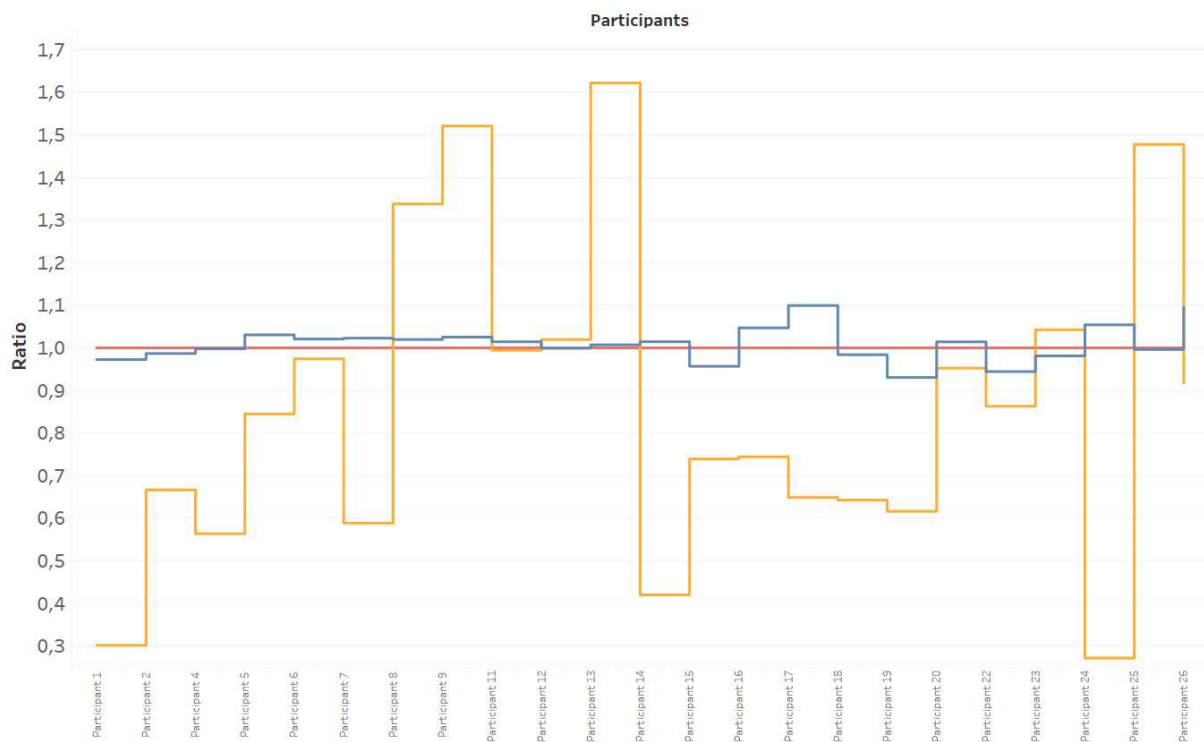


Ilustración 53: Ratio de duración de fijaciones y diámetro de la pupila

4.4.3. Plataforma de investigación para el desarrollo de controladores de algoritmos de decisión y navegación

Esta investigación fue desarrollada en colaboración entre el Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) de la Universidad

Politécnica de Madrid y el Centro de Automática y Robótica (CSIC). En ella, se proporciona una plataforma de investigación autónoma, concretamente un autobús modelo Gulliver de la EMT, cuya automatización fue realizada utilizando el hardware y software detallado en esta tesis. El objetivo de esta colaboración era que el CSIC implementara y desarrollara los sistemas de navegación y toma de decisiones, basados en tecnologías de percepción como el LIDAR.

De manera independiente a los desarrollos realizados en esta tesis, el CSIC presentó una solución avanzada para la autolocalización y navegación autónoma del autobús dentro de las cocheras de la EMT, permitiendo que el vehículo completara su ruta pasando por las diferentes estaciones designadas para sus operaciones de mantenimiento (Madridano et al., 2023). En la ilustración 61 se muestran las diversas rutas establecidas, las cuales podían ser monitorizadas y gestionadas desde un puesto de control interno ubicado en el mismo edificio, permitiendo tanto la operación autónoma como la teleoperación en tiempo real.

Este trabajo colaborativo no solo pone en evidencia la facilidad con la que la arquitectura modular de control diseñada en esta tesis puede adaptarse a diferentes plataformas vehiculares, sino que también destaca su capacidad para integrarse con desarrollos externos. Gracias a la modularidad, otros centros de investigación, como el CSIC, pueden incorporar sus propios algoritmos de control

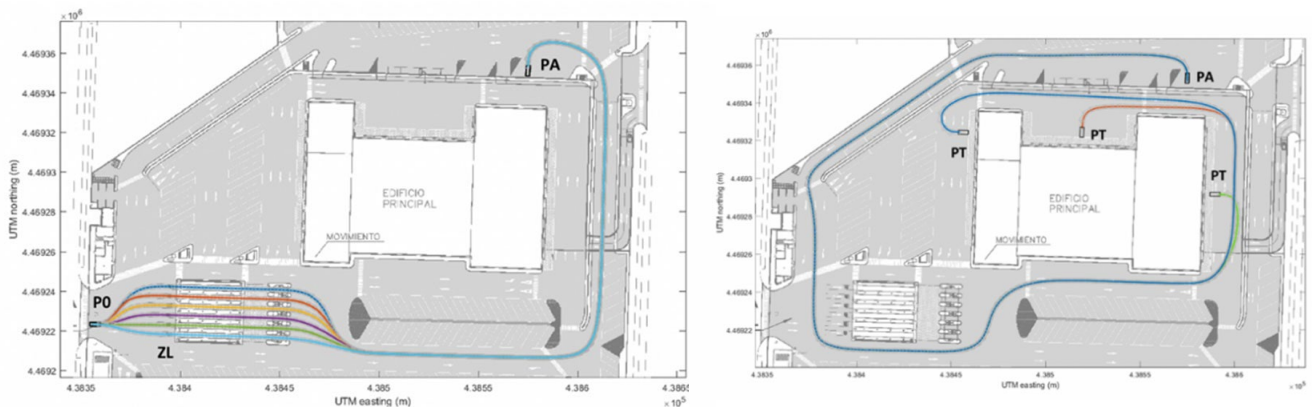


Ilustración 54: Recorrido propuesto para tareas de aparcamiento, repostaje y mantenimiento en diferentes niveles de operación del vehículo, en función de los requerimientos específicos de sus estudios. Este enfoque fomenta un entorno colaborativo y flexible, acelerando así los avances en la investigación y desarrollo de vehículos autónomos mediante la integración de contribuciones de diversos grupos y centros de investigación.

4.4.4. Integración de navegación mediante Lidar en entornos sin cobertura GPS

En la sección 4.2.3 se detalla el rendimiento del camión de obras públicas Volvo A25 durante la simulación de la mina a cielo abierto, y para complementar este desarrollo se ha realizado una investigación paralela, independiente del desarrollo de esta tesis, por parte de otros miembros del equipo de trabajo, pero sobre la misma arquitectura propuesta en este trabajo, centrada en el método de guiado para el segmento de la ruta que simula la mina cubierta. En este entorno simulado, donde se asume que no hay cobertura GPS disponible para la localización y guiado del vehículo, el nodo de planificación de trayectorias (PathPlanning) cambia automáticamente a un modo de "seguimiento de pared".

Este modo de operación permite que el vehículo utilice las consignas de control proporcionadas por la navegación basada en LIDAR, lo que le permite identificar obstáculos y calcular la curvatura de las paredes circundantes. El cálculo de esta curvatura, junto con la medición continua del error lateral y angular respecto a la pared, asegura que el vehículo siga la pared de manera precisa a una distancia constante. Además, el sistema está programado para frenar automáticamente en caso de detectar obstáculos en su trayectoria, ajustándose dinámicamente para evitar imperfecciones en las paredes o en su entorno.

En la Ilustración 55 se muestran los resultados obtenidos en la detección y cálculo de la curvatura de la pared, que son esenciales para la generación de las consignas de control necesarias para el guiado. Por otro lado, en la Ilustración 56 se representa el proceso de detección de obstáculos, lo que permite al vehículo no solo evitar colisiones, sino también ajustar su trayectoria de manera segura y eficiente conforme aparecen obstáculos a lo largo de la ruta.

Este enfoque de guiado en ausencia de GPS asegura que la arquitectura diseñada para el vehículo sea robusta y adaptable a diferentes entornos, aumentando la flexibilidad de la automatización en situaciones donde la señal GPS no está disponible, como en túneles, minas cubiertas u otros entornos subterráneos.

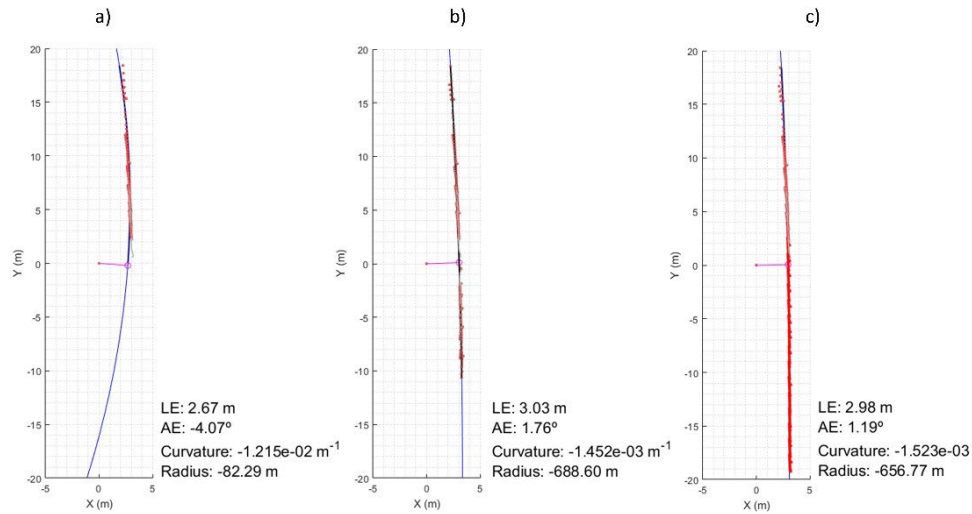


Ilustración 55: Estimación del elemento de referencia con diferentes ubicaciones del sensor

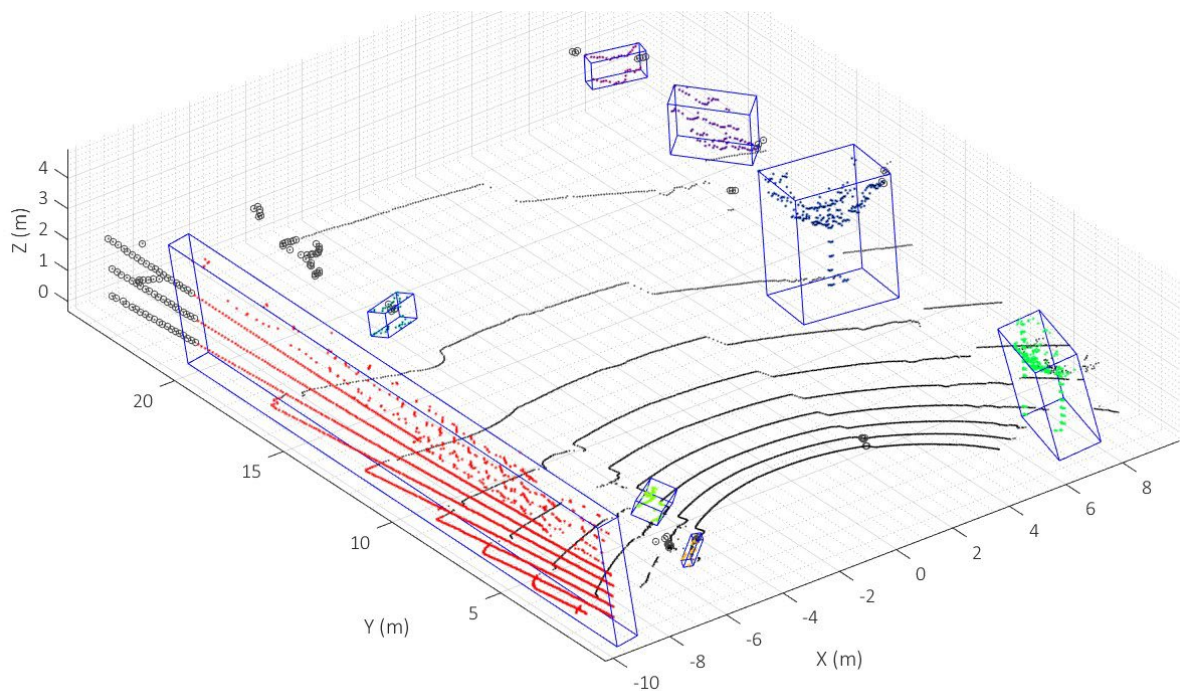


Ilustración 56: Ejemplo de detección de obstáculos mediante LIDAR

5. Conclusiones y Trabajos futuros

En esta sección se van a detallar las conclusiones extraídas del desarrollo de este trabajo en cada uno de los ámbitos de aplicación que han sido necesarios estudiar para la creación de esta arquitectura. Finalmente se proponen las líneas de trabajo futuro pretenden llevar el contenido de esta tesis a la capacidad de crear vehículos autónomos completamente funcionales.

5.1. Conclusiones

A lo largo de esta tesis, se ha desarrollado una arquitectura modular para la automatización de vehículos autónomos en diversos entornos, incluyendo vehículos convencionales, vehículos pesados y plataformas específicas que no siguen los modelos dinámicos tradicionales. El objetivo fundamental ha sido diseñar un sistema versátil y universal que permita integrar de forma eficiente sensores y actuadores, adaptándose a las particularidades de cada plataforma.

Las pruebas realizadas han demostrado no solo la efectividad del sistema en el control autónomo de vehículos, sino también su flexibilidad para ser implementado en diferentes tipos de plataformas. Esto ha validado las hipótesis iniciales y ha permitido extraer conclusiones significativas sobre el diseño de sistemas de control y las posibilidades de integrar tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y los sistemas de percepción autónoma.

A continuación, se resumen las principales aportaciones de esta tesis:

- **Arquitectura Modular Universal:** Se ha creado una arquitectura modular exitosa en términos de flexibilidad y adaptabilidad. Se ha demostrado que es posible implementarla en múltiples tipos de vehículos y plataformas sin realizar cambios significativos en su estructura básica. Esta arquitectura no solo facilita la automatización, sino que también establece una plataforma estándar que puede ser utilizada por investigadores para realizar pruebas en diversos escenarios.
- **Integración de Sensores y Actuadores:** La integración efectiva de sensores como LiDAR, cámaras y GPS con actuadores que controlan acelerador, frenos y dirección ha sido crucial para el éxito de la arquitectura. La modularidad del sistema permite controlar cada

componente de manera independiente, facilitando la personalización según las necesidades específicas de cada plataforma y desarrollo.

- **Interoperabilidad y Colaboración:** La arquitectura ha sido diseñada para ser interoperable con otras plataformas y sistemas, lo que facilita la colaboración entre diferentes centros de investigación. El uso de estándares abiertos como ROS2 y el protocolo CAN permite que universidades y centros de investigación integren fácilmente nuevas funciones y módulos, potenciando la colaboración entre equipos de desarrollo.
- **Validación en Entornos Reales:** Un objetivo clave desde el inicio ha sido la validación de la implementación en entornos reales. Los ensayos realizados han demostrado que la arquitectura es capaz de operar de manera eficiente y precisa en escenarios donde las condiciones son, en muchos casos, impredecibles, manejando situaciones en tiempo real.
- **Enfoque en la Seguridad:** La arquitectura propuesta ha sido desarrollada con un énfasis en la robustez y la seguridad. Se han implementado mecanismos como sistemas de emergencia y algoritmos de recuperación en caso de fallos, efectivos para garantizar la operación segura de los vehículos en situaciones críticas.

5.2. Trabajos futuros

Aunque se han logrado avances significativos, existen áreas que requieren exploración e integración adicionales para crear un vehículo autónomo totalmente funcional. Los siguientes puntos de actuación han sido identificados para acercarse a este objetivo:

- **Mejora del algoritmo de navegación:** Uno de los problemas identificados en los resultados, es el exceso de error lateral cuyo origen se identifica en el algoritmo de navegación utilizado. Para mitigar este problema, es fundamental desarrollar algoritmos de navegación más avanzados que optimicen la precisión en la trayectoria.
- **PathPlanning inteligente:** Es imprescindible implementar un sistema de planificación de rutas en tiempo real que integre información proveniente de múltiples sensores y mapas dinámicos. Este enfoque permitirá una conducción más segura y eficiente al reducir la dependencia exclusiva del

GPS, especialmente en entornos cerrados o aislados donde la cobertura GPS es limitada. Además, se propone la integración de modelos de planificación de trayectorias que combinen datos de múltiples sensores, como LIDAR y cámaras, con sistemas de predicción para mejorar la capacidad de reacción ante entornos dinámicos.

- **Colaboración entre vehículos autónomos:** El siguiente paso lógico es habilitar la colaboración entre múltiples vehículos autónomos para tareas coordinadas o para mejorar la eficiencia en la conducción en carretera. Esto implica no solo el uso de comunicaciones V2X, sino también la integración de estas capacidades en la arquitectura de control. La colaboración entre plataformas permitirá, por ejemplo, realizar maniobras coordinadas, optimizar rutas compartidas y gestionar situaciones complejas en tráfico.
- **Adaptación automática a la plataforma mediante técnicas de IA:** Durante el desarrollo de esta tesis, se ha comenzado a explorar la adaptación automática del sistema de control a la plataforma utilizada, como se explica en el apartado 4.2.2.1. La implementación de redes neuronales en el control longitudinal ha demostrado ser prometedora, pero es necesario expandir esta investigación para abarcar también el control lateral y otros niveles de toma de decisiones. Esto incluye la adopción de modelos explicables de inteligencia artificial que mejoren la confiabilidad y aceptabilidad de las decisiones autónomas.

Al abordar estos puntos, se espera avanzar hacia la realización de vehículos autónomos más seguros, eficientes y capaces de operar en una variedad de entornos y situaciones, contribuyendo así al progreso en el campo de la automatización vehicular.

6. Conclusions and future work

This section will detail the conclusions drawn from the development of this work in each of the application areas that have been necessary to study for the creation of this architecture. Finally, the lines of future work are proposed in order to take the content of this thesis to the capacity of creating fully functional autonomous vehicles.

6.1. Contributions and conclusions

Throughout this thesis, a modular architecture has been developed for the automation of autonomous vehicles in various environments, including conventional vehicles, heavy vehicles and specific platforms that do not follow traditional dynamic models. The main objective has been to design a versatile and universal system that allows the efficient integration of sensors and actuators, adapting to the particularities of each platform.

The tests carried out have demonstrated not only the effectiveness of the system in autonomous vehicle control, but also its flexibility to be implemented in different types of platforms. This has validated the initial hypotheses and has allowed us to draw significant conclusions about the design of control systems and the possibilities of integrating advanced technologies such as artificial intelligence and autonomous perception systems.

The main contributions of this thesis are summarized below:

- **Universal Modular Architecture:** A successful modular architecture has been created in terms of flexibility and adaptability. It has been demonstrated that it is possible to implement it in multiple types of vehicles and platforms without making significant changes to its basic structure. This architecture not only facilitates automation, but also establishes a standard platform that can be used by researchers for testing in a variety of scenarios.
- **Sensor and Actuator Integration:** The effective integration of sensors such as LiDAR, cameras and GPS with actuators that control throttle, brakes and steering has been crucial to the success of the architecture. The modularity of the system allows each component to be controlled independently,

facilitating customization according to the specific needs of each platform and development.

- **Interoperability and Collaboration:** The architecture has been designed to be interoperable with other platforms and systems, facilitating collaboration between different research centers. The use of open standards such as ROS2 and the CAN protocol allows universities and research centers to easily integrate new functions and modules, enhancing collaboration between development teams.
- **Validation in Real Environments:** A key objective from the beginning has been the validation of the implementation in real environments. Tests have shown that the architecture is capable of operating efficiently and accurately in scenarios where conditions are, in many cases, unpredictable, handling real-time situations.
- **Focus on Safety:** The proposed architecture has been developed with an emphasis on robustness and safety. Mechanisms such as emergency systems and failover algorithms have been implemented that are effective in ensuring the safe operation of vehicles in critical situations.

6.2. Future work

Although significant progress has been made, there are areas that require further exploration and integration to create a fully functional autonomous vehicle. The following action items have been identified to approach this goal:

- **Improvement of the navigation algorithm:** One of the problems identified in the results, is the excess of lateral error whose origin is identified in the navigation algorithm used. It is essential to improve the quality of this algorithm to increase the accuracy and efficiency of autonomous navigation.
- **Intelligent PathPlanning:** It is important to develop an intelligent path planning algorithm that integrates information from multiple sensors on a continuous basis. This will enable safer autonomous driving and reduce the sole reliance on GPS.
- **Collaboration between autonomous vehicles:** The next logical step is to enable collaboration between multiple autonomous vehicles for coordinated tasks or to improve efficiency in on-road driving. This involves not only the

use of V2X communications, but also the integration of these capabilities into the control architecture.

- **Automatic adaptation to the platform using AI techniques:** During the development of this thesis, we have started to explore the automatic adaptation of the control system to the platform used, as explained in section 4.2.2.1. After validating the first results, further research is needed to make the architecture a software that adapts automatically and accurately to any platform.

By addressing these points, it is hoped to move towards the realization of autonomous vehicles that are safer, more efficient and capable of operating in a variety of environments and situations, thus contributing to progress in the field of vehicular automation.

7. Difusión de resultados

Los desarrollos expuestos en la Tesis Doctoral han dado lugar a diversas publicaciones en revistas de alto índice de impacto y divulgaciones en congresos, tanto nacionales como internacionales.

7.1. Publicaciones en revistas indexadas en JCR

- Naranjo, J. E., **Valle, A.**, Cruz, A., Martín, M., Anguera, M., García, P., & Jiménez, F. (2023). Automation of haulers for debris removal in tunnel construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 38(14), 2030-2045. DOI: 10.1111/mice.12997
- Elisa Pérez Moreno, José E. Naranjo, María J. Hernández, Trinidad Ruiz, **Alfredo Valle**, Alberto Cruz, Francisco Serradilla and Felipe Jiménez. Perceived risk and acceptance of automated vehicles users to unexpected situations in real driving conditions. *BEHAVIOUR & INFORMATION TECHNOLOGY*

7.2. Comunicaciones en congresos

- **A.V. Barrio**, J. Arquero, J.E. Naranjo, F. Jiménez Alonso, "Arquitectura abierta para la automatización de plataformas de investigación", XXIV Congreso Español Sistemas Inteligentes de Transporte. Madrid, España.
- J. Iglesias, **A.V. Barrio**, J.E. Naranjo, F. Jiménez Alonso, "Control longitudinal multiplataforma mediante redes neuronales", XXIV Congreso Español Sistemas Inteligentes de Transporte. Madrid, España.
- **A. V. Barrio**, W. M. Alvarez, C. Olaverri-Monreal and J. E. N. Hernández, "Development and Validation of an Open Architecture for Autonomous Vehicle Control," 2023 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Anchorage, AK, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IV55152.2023.10186551.
- A. Madridano et al., "Evolution of Bus Shuttle Service in Madrid Towards Autonomous Operation, A Practical Use Case," 2023 IEEE

26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Bilbao, Spain, 2023, pp. 2698-2704, doi: 10.1109/ITSC57777.2023.10422442.

- F. Jiménez Alonso, A. Cruz Ruiz, **A. Valle Barrio**, J. E. Naranjo Hernández, A. Artuñedo García, J. Godoy Madrid, J. Villagra Serrano (2023). Operación autónoma de autobuses en cocheras para tareas de aparcamiento y mantenimiento. XXIV Congreso Nacional Ingeniería Mecánica.
- Sanchez-Mateo, S., **Valle-Barrio, A.**, Díaz-Alvarez, A., Jiménez, F. (2022). Evaluación de modelo determinista para conducción autónoma a través del comportamiento visual. XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Madrid, España.
- Hernández, J. E. N., Alonso, F. J., **Barrio, A. V.**, Ruiz, M. A. C., Pérez, J. G., & Torres, A. G. (2021). Experiencias de sistemas cooperativos como catalizadores para altos niveles de automatización en la conducción. In *R-evolucionando el transporte [Recurso electrónico]: XIV Congreso de Ingeniería del Transporte. Universidad de Burgos 6, 7 y 8 de julio 2021* (pp. 821-832). DOI: 10.36443/10259/6897
- **A. Valle Barrio**, A. Cruz Ruiz, V. San Telesforo García, J.E. Naranjo Hernández, F. Jiménez Alonso. Application of automation of public road works vehicles in unstructured environments. Young Researchers Seminar (YRS) 2021), Portoroz, Slovenia.
- J. E. Naranjo, F. Jiménez, A. Gómez, **A. Valle**, J. González and A. Cruz, "Integration of C-ITS in Autonomous Driving," *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 27-32, doi: 10.1109/IV47402.2020.9304727.
- J.E. Naranjo et al., "Operación autónoma coordinada de vehículos de obras públicas en entornos complejos, III Congreso Iberoamericano Sistemas Inteligentes de Transporte. Virtual, Internacional.
- J.E. Naranjo et al., "Operación autónoma coordinada de vehículos de obras públicas en entornos complejos", XX Congreso Español Sistemas Inteligentes de Transporte. Madrid, España.

7.3. Trabajos de fin de grado tutorizados

- M. Parra Ortega, “Sistema de seguimiento a operarios mediante cámara para vehículos autónomos”, Trabajo Fin de Grado (TFG) Grado en Ingeniería de Computadores, Jul 2024
- S. de Miguel Esteban, “Modelos digitales en un entorno de simulación 3d”, Trabajo Fin de Grado (TFG) Grado en Ingeniería de Software, Jul 2024
- J. Iglesias de Frutos, “Control longitudinal multiplataforma mediante redes neuronales”, Trabajo Fin de Grado (TFG) Grado en Ciencia de Datos, Jul 2024
- A. Gómez Martín, “Luz de freno autónoma interactiva gestionada por CAN-BUS”, Trabajo Fin de Grado (TFG) Grado en Ingeniería del Automóvil, Jul 2024
- S. de Miguel Esteban, “Creación de un modelo de vehículo UGV en un entorno de Simulación 3D”, Trabajo Fin de Grado (TFG) Grado en Ingeniería de Computadores, Jul 2024
- R. Heras García, “Sistema de seta de emergencia integrada en vehículos”, Trabajo Fin de Grado (TFG) Grado en Ingeniería de Computadores, Jul 2023

Referencias

- Aartsen, M., Banga, K., Talko, K., Touw, D., Wisman, B., Meinsma, D., & Bjorkqvist, M. (2022). Analyzing Interoperability and Security Overhead of ROS2 DDS Middleware. *2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2022*, 976-981. <https://doi.org/10.1109/MED54222.2022.9837282>
- Alfredo Valle Barrio, Walter Morales Alvarez, Cristina Olaverri-Monreal, & José Eugenio Naranjo Hernández. (2023). Development and Validation of an Open Architecture for Autonomous Vehicle Control. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186551>
- Alonso, F. J., Ruiz, A. C., Valle Barrio, A., Naranjo Hernández, J. E., Artuñedo García, A., Godoy Madrid, J., & Serrano, J. V. (2023). *Operación autónoma de autobuses en cocheras para tareas de aparcamiento y mantenimiento*.
- Altche, F., & De La Fortelle, A. (2017). An LSTM network for highway trajectory prediction. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-March*, 353-359. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317913>
- Arifin, B., Suprpto, B. Y., Prasetyowati, S. A. D., & Nawawi, Z. (2019). The Lateral Control of Autonomous Vehicles: A Review. *ICECOS 2019 - 3rd International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, Proceeding*, 277-282. <https://doi.org/10.1109/ICECOS47637.2019.8984590>
- Aulinas, J., Petillot, Y., Salvi, J., & Lladó, X. (2008). The SLAM problem: a survey. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 184(1), 363-371. <https://doi.org/10.3233/978-1-58603-925-7-363>
- Barrio, A. V., Alvarez, W. M., Olaverri-Monreal, C., & Hernandez, J. E. N. (2023). Development and Validation of an Open Architecture for Autonomous Vehicle Control. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2023-June*. <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186551>
- Biggie, H., & McGuire, S. (2022). Heterogeneous Ground-Air Autonomous Vehicle Networking in Austere Environments: Practical Implementation of a Mesh Network in the DARPA Subterranean Challenge. *Proceedings - 18th Annual*

- International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2022*, 261-268. <https://doi.org/10.1109/DCOSS54816.2022.00051>
- Bishop, T. A., & Karne, R. K. (2003). A survey of middleware. *CATA*, 254-258.
- Bode, V., Trinitis, C., Schulz, M., Buettner, D., & Preclik, T. (2023). DDS Implementations as Real-Time Middleware - A Systematic Evaluation. *Proceedings - 2023 IEEE 29th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, RTCSA 2023*, 186-195. <https://doi.org/10.1109/RTCSA58653.2023.00030>
- Buscemi, A., Turcanu, I., Castignani, G., Panchenko, A., Engel, T., & Shin, K. G. (2023). A Survey on Controller Area Network Reverse Engineering. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 25(3), 1445-1481. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3264928>
- Caltagirone, L., Bellone, M., Svensson, L., & Wahde, M. (2019). LIDAR-camera fusion for road detection using fully convolutional neural networks. *Robotics and Autonomous Systems*, 111, 125-131. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2018.11.002>
- Carrasco, A. M., Gankhuyag, D., De Miguel Paraiso, M. A., Lorite, M. P., Olaverri-Monreal, C., & Al-Kaff, A. (2023). Evaluating the acceptance of autonomous vehicles in the future. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2023-June*. <https://doi.org/10.1109/IV55152.2023.10186630>
- Certad, N., Morales-Alvarez, W., Novotny, G., & Olaverri-Monreal, C. (2022). JKU-ITS Automobile for Research on Autonomous Vehicles. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 13789 LNCS, 329-336. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25312-6_38/FIGURES/3
- Chamola, V., Hassija, V., Sulthana, A. R., Ghosh, D., Dhingra, D., & Sikdar, B. (2023). A Review of Trustworthy and Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 11, 78994-79015. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3294569>
- Chen, H., Wen, Y., Zhu, M., Huang, Y., Xiao, C., Wei, T., & Hahn, A. (2021). From Automation System to Autonomous System: An Architecture Perspective. *Journal of Marine Science and Engineering 2021, Vol. 9, Page 645, 9(6)*, 645. <https://doi.org/10.3390/JMSE9060645>
- Cho, S., Seo, C., Shin, D.-J., & Kim, J.-J. (2022). A Deep Learning Framework Performance Evaluation to Use YOLO in Nvidia Jetson Platform. *Applied*

- Sciences* 2022, Vol. 12, Page 3734, 12(8), 3734.
<https://doi.org/10.3390/APP12083734>
- Comito, V. (2018). *A ROS-based Platform for Autonomous Vehicles: Foundations and Perception*. <https://webthesis.biblio.polito.it/8187/>
- comma.ai — make driving chill*. (s. f.). Recuperado 26 de octubre de 2024, de <https://comma.ai/openpilot>
- Cui, H., Zhang, J., & Norris, W. R. (2020). An Enhanced Safe and Reliable Autonomous Driving Platform using ROS2. *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2020*, 290-295. <https://doi.org/10.1109/ICMA49215.2020.9233814>
- Cui, Y., & Ge, S. S. (2003). Autonomous vehicle positioning with GPS in urban canyon environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(1), 15-25. <https://doi.org/10.1109/TRA.2002.807557>
- De Carvalho, J. A. R. P., Veiga, H., Gomes, P. A. J., Pacheco, C. F. R., Marques, N., & Reis, A. D. (2010). WI-FI Point-to-Point Links: Performance Aspects of IEEE 802.11a, b, g Laboratory Links. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 60 *LNEE*, 507-514. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8776-8_43
- Del Re, E., Sauer, L., Polli, M., & Olaverri-Monreal, C. (2024). Want a ride? Attitudes towards autonomous driving and behavior in autonomous vehicles. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/S00502-024-01241-W/FIGURES/6>
- Deng, G., Xu, G., Zhou, Y., Zhang, T., & Liu, Y. (2022). On the (In)Security of Secure ROS2. *Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security*, 739-753. <https://doi.org/10.1145/3548606.3560681>
- Dersten, S., Axelsson, J., & Fröberg, J. (2015). An analysis of a layered system architecture for autonomous construction vehicles. *9th Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2015 - Proceedings*, 582-588. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2015.7116814>
- Doan, T. V., Fitzek, F. H. P., & Nguyen, G. T. (2023). In-Network Path Planning for Autonomous Driving. *2023 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks, NFV-SDN 2023 - Proceedings*, 175-177. <https://doi.org/10.1109/NFV-SDN59219.2023.10329603>

- Duan, W., Tang, Z., Liu, W., & Zhou, H. (2023). Autonomous driving planning and decision making based on game theory and reinforcement learning. *Expert Systems*, 40(5), e13191. <https://doi.org/10.1111/EXSY.13191>
- Farsi, M., & Ratcliff, K. (1997). CANopen: The open communication solution. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1, 112-116. <https://doi.org/10.1109/ISIE.1997.651801>
- Farsi, M., Ratcliff, K., & Barbosa, M. (1999). An overview of controller area network. *Computing and Control Engineering*, 10(3), 113-120. <https://doi.org/10.1049/CCE:19990304>
- FONTANA, F. (2023). *Self-driving cars and Openpilot : a complete overview of the framework*. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/181889>
- Foxglove - Visualization and observability for robotics developers*. (s. f.). Recuperado 26 de octubre de 2024, de <https://foxglove.dev/>
- Frutos, J. I. de. (2024). *Control longitudinal multiplataforma mediante redes neuronales*. <https://oa.upm.es/id/eprint/84023>
- Garrido, F., & Resende, P. (2022). Review of Decision-Making and Planning Approaches in Automated Driving. *IEEE Access*, 10, 100348-100366. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3207759>
- Gopalswamy, S., & Rathinam, S. (2018). Infrastructure Enabled Autonomy: A Distributed Intelligence Architecture for Autonomous Vehicles. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2018-June*, 986-992. <https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500436>
- Halin, H., Khairunizam, W., & Ali, H. (2021). Autonomous Vehicle: Introduction and Key-elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 1997(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1997/1/012016>
- Hussein, A., Garcia, F., & Olaverri-Monreal, C. (2018). ROS and Unity Based Framework for Intelligent Vehicles Control and Simulation. *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICVES.2018.8519522>
- Hussein, A., Marín-Plaza, P., García, F., & Armingol, J. M. (2017). Autonomous cooperative driving using V2X communications in off-road environment. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-March*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317790>

- Ioannou, P., & Xu, Z. (1994). THROTTLE AND BRAKE CONTROL SYSTEMS FOR AUTOMATIC VEHICLE FOLLOWING. *I V H S Journal*, 1(4), 345-377. <https://doi.org/10.1080/10248079408903805>
- Jiménez et al. (2013). *Equipo para controlar automáticamente la dirección de un vehículo*.
- José Eugenio Naranjo, Felipe Jiménez Alonso, Alfredo Valle Barrio, Alberto Cruz, Jorge Gonzalez, & Aitor Gomez. (2021). Experiencias de sistemas cooperativos como catalizadores para altos niveles de automatización en la conducción. *CIT*. <https://doi.org/10.36443/10259/6897>
- José Eugenio Naranjo Hernandez, & Alfredo Valle Barrio. (2020, mayo 31). Operación autónoma coordinada de vehiculos de obras públicas en entornos complejos. *III Congreso Iberoamericano Sistemas Inteligentes de Transporte*.
- José Eugenio Naranjo Hernandez, Felipe Jiménez, Miguel Martin, Miguel AngueraçOscar Gómez, Sofía Sanchez, Alfredo Valle Barrio, & Alberto Cruz. (2020, julio 14). Operacion autonoma coordinada de vehiculos de obras publicas en entornos complejos. *XX Congreso Español Sistemas Inteligentes de Transporte*.
- Joshi, R., Bose, A., & Breneman, S. (2002). Software development platforms for autonomous systems. *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.2002-4484>
- Jung, H. G., Lim, K. T., Shin, D. K., Yoon, S. H., Jin, S. K., Jang, S. H., & Kwak, J. M. (2018). Reliability Verification Procedure of Secured V2X Communication for Autonomous Cooperation Driving. *9th International Conference on Information and Communication Technology Convergence: ICT Convergence Powered by Smart Intelligence, ICTC 2018*, 1356-1360. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539617>
- Karatas, N., Tamura, S., Fushiki, M., & Okada, M. (2018). The effects of driving agent gaze following behaviors on human-autonomous car interaction. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11357 LNAI, 541-550. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05204-1_53/TABLES/2
- Kayaduman, A., Arikan, A., Dikmen, I. C., Bakir, H. G., Karadağ, T., & Abbasov, T. (2019). Development and application of sensor network for autonomous

- vehicles. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, IDAP 2018*. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620748>
- Kokogias, S., Svensson, L., Collares Pereira, G., Oliveira, R., Zhang, X., Song, X., & Martensson, J. (2018). Development of Platform-Independent System for Cooperative Automated Driving Evaluated in GCDC 2016. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(4), 1277-1289. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2684623>
- Levinson, J., Askeland, J., Becker, J., Dolson, J., Held, D., Kammel, S., Kolter, J. Z., Langer, D., Pink, O., Pratt, V., Sokolsky, M., Stanek, G., Stavens, D., Teichman, A., Werling, M., & Thrun, S. (2011). Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 163-168. <https://doi.org/10.1109/IVS.2011.5940562>
- Lienen, C., Brede, M., Karger, D., Koch, K., Logan, D., Mazur, J., Philipp Nowosad, A., Schnelle, A., Waizy, M., & Platzner, M. (2023). AutonomROS: A ReconROS-based Autonomous Driving Unit. *Proceedings - 2023 17th IEEE International Conference on Robotic Computing, IRC 2023*, 297-304. <https://doi.org/10.1109/IRC59093.2023.00056>
- Lim, K. L., Drage, T., Zhang, C., Brogle, C., Lai, W. W. L., Kelliher, T., Adina-Zada, M., & Braunl, T. (2019). Evolution of a Reliable and Extensible High-Level Control System for an Autonomous Car. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 4(3), 396-405. <https://doi.org/10.1109/TIV.2019.2919459>
- Liu, D., An, X., Sun, Z., & He, H. (2008). Active safety in autonomous land vehicle. *Proceedings - 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, PEITS 2008*, 476-480. <https://doi.org/10.1109/PEITS.2008.67>
- Madridano, A., Campos, S., Manuel Perez, J., Valle, A., Martín, D., Lattarulo, R. A., Angel De Miguel, M., Naranjo, J. E., & Garcia, F. (2023). Evolution of bus shuttle service in Madrid towards autonomous operation, a practical use case. *ITSC*.
- Magiera, W., Vārna, I., Mitrofanovs, I., Silabrieds, G., Krawczyk, A., Skorupa, B., Apollo, M., & Maciuk, K. (2022). Accuracy of Code GNSS Receivers under Various Conditions. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2615*, 14(11), 2615. <https://doi.org/10.3390/RS14112615>

- Maruyama, Y., Kato, S., ... T. A. conference on embedded, & 2016, undefined. (2016). Exploring the performance of ROS2. *dl.acm.org* Y Maruyama, S Kato, T Azumi *Proceedings of the 13th international conference on embedded software, 2016* • *dl.acm.org*. <https://doi.org/10.1145/2968478.2968502>
- Mehmood, A., Liaquat, M., Bhatti, A. I., & Rasool, E. (2019). Trajectory Planning and Control for Lane-Change of Autonomous Vehicle. *2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2019*, 331-335. <https://doi.org/10.1109/ICCAR.2019.8813737>
- Metrics, and, Felipe Manfio Barbosa, st, Carlos, S., Paulo, S., & Fernando Santos Osório, nd. (2023). *Camera-Radar Perception for Autonomous Vehicles and ADAS: Concepts, Datasets and Metrics*. <https://arxiv.org/abs/2303.04302v1>
- Milanés, V., González, C., Naranjo, J. E., Onieva, E., & de Pedro, T. (2010). Electro-hydraulic braking system for autonomous vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 11(1), 89-95. <https://doi.org/10.1007/S12239-010-0012-6/METRICS>
- Min, H., Wu, X., Cheng, C., & Zhao, X. (2019). Kinematic and Dynamic Vehicle Model-Assisted Global Positioning Method for Autonomous Vehicles with Low-Cost GPS/Camera/In-Vehicle Sensors. *Sensors 2019, Vol. 19, Page 5430, 19*(24), 5430. <https://doi.org/10.3390/S19245430>
- Morais, D. R., & Aguiar, A. P. (2022). Model Predictive Control for Self Driving Cars: A Case Study Using the Simulator CARLA within a ROS Framework. *2022 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2022*, 124-129. <https://doi.org/10.1109/ICARSC55462.2022.9784788>
- Naranjo, J. E., González, C., García, R., & De Pedro, T. (2005). Electric Power Steering Automation for Autonomous Driving. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3643 LNCS, 519-524. https://doi.org/10.1007/11556985_67
- Naranjo, J. E., Jiménez, F., Anguita, M., & Rivera, J. L. (2020). Automation Kit for Dual-Mode Military Unmanned Ground Vehicle for Surveillance Missions. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 12(4), 125-137. <https://doi.org/10.1109/MITS.2018.2880274>

- Naranjo, J. E., Jimenez, F., Gomez, A., Valle, A., Gonzalez, J., & Cruz, A. (2020). Integration of C-ITS in Autonomous Driving. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 27-32. <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304727>
- Naranjo, J. E., Valle, A., Cruz, A., Martín, M., Anguera, M., García, P., & Jiménez, F. (2023). Automation of haulers for debris removal in tunnel construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1111/mice.12997>
- Naujoks, F., Befelein, D., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2018). A Review of Non-driving-related Tasks Used in Studies on Automated Driving. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 597, 525-537. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60441-1_52
- Ochalek, A., Niewiem, W., Puniach, E., & Cwiąkała, P. (2018). Accuracy Evaluation of Real-Time GNSS Precision Positioning with RTX Trimble Technology. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 28(4), 49-61. <https://doi.org/10.2478/CEER-2018-0050>
- Piperigkos, N., Lalos, A. S., & Berberidis, K. (2021). Multi-modal cooperative awareness of connected and automated vehicles in smart cities. *Proceedings - 5th IEEE International Conference on Smart Internet of Things, SmartIoT 2021*, 377-382. <https://doi.org/10.1109/SMARTIOT52359.2021.00070>
- Plasberg, C., Nessau, H., Timmermann, D., Eichmann, C., Roennau, A., & Dillmann, R. (2022). Towards Distributed Real-Time capable Robotic Control using ROS2. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2022-August*, 2205-2210. <https://doi.org/10.1109/CASE49997.2022.9926569>
- Plaza, P. (2018). *Software architecture for self-driving navigation*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=254992>
- Profanter, S., Tekat, A., Dorofeev, K., Rickert, M., & Knoll, A. (2019). OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance evaluation of industry 4.0 protocols. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2019-February*, 955-962. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2019.8755050>
- Quigley, M., Gerkey, B., Conley, K., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Berger, E., Wheeler, R., & Ng, A. (s. f.). ROS: an open-source Robot Operating System.

- lars.mec.ua.pt* M Quigley, K Conley, B Gerkey, J Faust, T Foote, J Leibs, R Wheeler, *AYNgICRA workshop on open source software, 2009* • *lars.mec.ua.pt*. Recuperado 25 de octubre de 2024, de http://lars.mec.ua.pt/public/LAR%20Projects/BinPicking/2016_RodrigoSalgueiro/LIB/ROS/icraoss09-ROS.pdf
- Rana, K., & Kaur, P. (2021). Comparative study of automotive sensor technologies used for unmanned driving. *Proceedings of 2nd International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management, ICCAKM 2021*, 346-350. <https://doi.org/10.1109/ICCAKM50778.2021.9357731>
- Raza, H., & Ioannou, P. (1997). Vehicle following control design for automated highway systems. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2, 904-908. <https://doi.org/10.1109/VETEC.1997.600460>
- Ruggaber, J. ; Ahmic, K. ; Brembeck, J. ; Baumgartner, D. ; Ruggaber, J., Ahmic, K., Brembeck, J., Baumgartner, D., & Tobolář, J. (2023). AI-For-Mobility—A New Research Platform for AI-Based Control Methods. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 2879, 13(5), 2879. <https://doi.org/10.3390/APP13052879>
- San, C., Gutiérrez, V., Usategui, L., Juan, S., Ugarte, Z., & Vilches, V. M. (2018). *Towards a distributed and real-time framework for robots: Evaluation of ROS 2.0 communications for real-time robotic applications*. <https://arxiv.org/abs/1809.02595v1>
- Sánchez-Mateo, S., Valle-Barrio, A., Díaz-Álvarez, A., & Jiménez, F. (2022). Evaluación de modelo determinista para conducción autónoma a través del comportamiento visual. *XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*.
- Seo, H., Lee, K., & Lee, K. (2023). Investigating the Improvement of Autonomous Vehicle Performance through the Integration of Multi-Sensor Dynamic Mapping Techniques. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2369, 23(5), 2369. <https://doi.org/10.3390/S23052369>
- Shanbhag, V., & Jacob, J. (2023). Vehicle Detection and Traffic Control Using Sensor Technology. *2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation, ICAECA 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICAECA56562.2023.10199402>
- Shetty, A., Yu, M., Kurzhanskiy, A., Grembek, O., Tavafoghi, H., & Varaiya, P. (2021). Safety challenges for autonomous vehicles in the absence of

- connectivity. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 128, 103133. <https://doi.org/10.1016/J.TRC.2021.103133>
- Strauch, C., Mühl, K., Patro, K., Grabmaier, C., Reithinger, S., Baumann, M., & Huckauf, A. (2019). Real autonomous driving from a passenger's perspective: Two experimental investigations using gaze behaviour and trust ratings in field and simulator. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 66, 15-28. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2019.08.013>
- Tanwar, S., Tyagi, S., Budhiraja, I., & Kumar, N. (2019). Tactile Internet for Autonomous Vehicles: Latency and Reliability Analysis. *IEEE Wireless Communications*, 26(4), 66-72. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800553>
- Technology, A. S.-E. U. of, & 2017, undefined. (2017). Lateral control using a MobilEye camera for lane keeping assist. *assets.w3.tue.nl*. https://assets.w3.tue.nl/w/fileadmin/content/faculteiten/wtb/Onderzoek/Onderzoeksgroepen/Dynamics_and_Control/Internship_reports/Sudhakaran_DC_2017.003.pdf
- Teikmanis, O., Levinskis, A., MacKus, A. I., Rušinš, A., Elkenawy, A., Tropā, M., & Greitans, M. (2023). Automated Vehicle Platform with Connected Driving Capabilities. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 718-725. <https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10422300>
- Tener, F., & Lanir, J. (2022). Driving from a Distance: Challenges and Guidelines for Autonomous Vehicle Teleoperation Interfaces. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. https://doi.org/10.1145/3491102.3501827/SUPPL_FILE/3491102.3501827-TALK-VIDEO.MP4
- Thakur, R., & Thakur, R. (2017). Infrared Sensors for Autonomous Vehicles. *Recent Development in Optoelectronic Devices*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.70577>
- Thomas, D., Woodall, W., & Fernandez, E. (2014). Next-generation ROS: Building on DDS. *ROSCon Chicago, 2014*.
- Vivek, S., Varsha, B., Vignesh, S. T., Anirudh, K., & Peeyush, K. P. (2020). Design of control systems for ABC and speed control for autonomous vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706(1), 012090. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012090>

- Walrand, J., Turner, M., & Myers, R. (2021). An Architecture for In-Vehicle Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7), 6335-6342. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3082464>
- Yang, Y., & Azumi, T. (2020). Exploring Real-Time Executor on ROS 2. *2020 IEEE International Conference on Embedded Software and Systems, ICESS 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICISS49830.2020.9301530>
- Ye, Y., Nie, Z., Liu, X., Xie, F., Li, Z., & Li, P. (2023). ROS2 Real-time Performance Optimization and Evaluation. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 36(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/S10033-023-00976-5/FIGURES/33>
- Yoffie, D. (2014). *Mobileye: The future of driverless cars*. <https://www.essaywriter-ca.com/material/1898.pdf>
- Zhang, F., Zhu, J., Li, Y., Xu, Q., Wan, Y., Gao, H., & Wang, C. (2021). Lateral Control of Intelligent Driving Vehicles under Extreme Conditions. *Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems, ICUS 2021*, 482-488. <https://doi.org/10.1109/ICUS52573.2021.9641287>
- Zhang, J., Shu, Y., & Yu, H. (2021). Human-Machine Interaction for Autonomous Vehicles: A Review. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12774 LNCS, 190-201. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77626-8_13
- Zhang, T. (2020). Toward Automated Vehicle Teleoperation: Vision, Opportunities, and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(12), 11347-11354. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3028766>

Anexo A

Diagrama detallado de la arquitectura de control

