



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio del impacto de los ADAS en la siniestralidad
en España.

Autor: Juan Antonio Urieta Lozano

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio del impacto de ADAS y vehículos autónomos en la siniestralidad en España
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Juan Antonio Urieta Lozano

Fecha: ...26.../ ...08.../ ...2025...



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norberto Moriñigo

Fecha: ...26.../ ...08.../ ...2025...

**DE NORVERTO
MORIÑIGO JUAN -
09746499L**

Firmado digitalmente por DE
NORVERTO MORIÑIGO JUAN -
09746499L
Fecha: 2025.08.26 10:42:53
+02'00'



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio del impacto de ADAS en la siniestralidad en
España

Autor: Juan Antonio Urieta Lozano

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

ESTUDIO DEL IMPACTO DE ADAS Y VEHÍCULOS AUTÓNOMOS EN LA SINIESTRALIDAD EN ESPAÑA

Autor: Urieta Lozano, Juan Antonio.

Director: Norverto Moriñigo, Juan.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo analiza el impacto de los Sistemas Avanzados de Asistencia a la Conducción (ADAS) en la reducción de accidentes en España, combinando evidencia científica y datos estadísticos de la DGT. Se han evaluado distintos tipos de ADAS, estimando su potencial de reducción de siniestralidad y su rentabilidad económica. Los resultados muestran que una implantación masiva podría prevenir un porcentaje significativo de víctimas y generar ahorros sustanciales en costes sanitarios y de seguros. Además, se proponen mejoras y desarrollos futuros para optimizar su efectividad.

Palabras clave: ADAS, DGT, Siniestro.

1. Introducción

El propósito de este TFM es ir más allá de la teoría y proponer mejoras en los sistemas de seguridad de los coches, las ADAS. La base del trabajo es un análisis profundo de la situación de la siniestralidad en España. Para ello, se ha llevado a cabo una doble investigación: por un lado, se han estudiado en detalle las bases de datos de la DGT para ver dónde y por qué ocurren los accidentes más comunes. Por otro lado, se ha revisado literatura y papers científicos para entender el estado actual de la tecnología y su impacto. Con este enfoque, el objetivo es identificar las carencias de las ADAS que ya existen y usar esa información para proponer nuevos sistemas más efectivos.

2. Definición del proyecto

El proyecto, titulado "Estudio del impacto de los ADAS y vehículos autónomos en la siniestralidad en España", busca evaluar el efecto que estas tecnologías tienen en la seguridad vial. No es un trabajo solo de análisis de datos, sino que también incluye un estudio económico para justificar la inversión en estas tecnologías. La investigación se apoya en el conocimiento técnico extraído de la literatura científica, que sirve de marco para el análisis cuantitativo de los accidentes y para la posterior propuesta de nuevos sistemas. En resumen, el proyecto combina el análisis de la situación actual, el estudio de la tecnología y una valoración económica para ofrecer conclusiones bien fundamentadas.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El trabajo se centra en los sistemas ADAS, que son los componentes clave para la seguridad activa de los vehículos. Para realizar el estudio y el análisis cuantitativo, se utilizó el lenguaje de programación Python, junto con librerías especializadas como Pandas para el procesamiento y manipulación de los datos de la DGT, y Plotly para la

visualización de los gráficos. En el plano teórico, se describe cómo estos sistemas funcionan como un conjunto de sensores (como radares, cámaras y LiDAR) que recogen información del entorno. Esta información se procesa en una unidad de control central que toma decisiones rápidas y las ejecuta a través de actuadores que, por ejemplo, activan el frenado. Se explica también la importancia de la arquitectura electrónica (E/E) del vehículo, mencionando cómo protocolos de comunicación como las redes CAN y Ethernet son fundamentales para que los distintos sistemas ADAS se comuniquen entre sí de forma fiable y segura, permitiendo una respuesta coordinada en situaciones críticas.



Ilustración 1 – ADAS (Chery)

4. Resultados

El estudio de los datos de la DGT ha arrojado resultados claros sobre los accidentes más comunes en España. Los siniestros más frecuentes incluyen caída (8.458 casos), vuelco (3.676) y atropello a animales (676), categorías que no están del todo cubiertas por las ADAS convencionales. Además, se ha descubierto que la mayoría de los accidentes (un 69.88%) ocurre durante el día, lo que apunta a la distracción del conductor como un factor clave. El análisis económico, por su parte, demuestra el impacto positivo de la tecnología: se estima que, con la adopción masiva de ADAS, la reducción de siniestros podría situarse entre el 35% y el 40%, lo que generaría ahorros económicos muy significativos al reducir costes médicos, daños materiales y pérdidas de productividad.

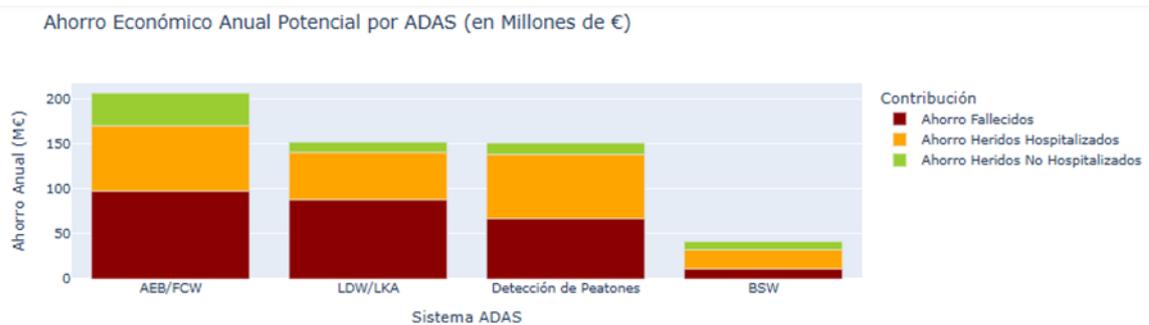


Ilustración 2 – Ahorro económico (elaboración propia)

5. Conclusiones

El trabajo concluye que, a pesar de la eficacia de las ADAS actuales, todavía existen importantes áreas de mejora. El análisis de los accidentes más frecuentes y el estudio económico justifican la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías. Para ello, se proponen tres sistemas ADAS de nueva generación:

- 1) Sistema de Detección de Terreno y Estabilidad Activa (SDTEA): Para prevenir siniestros por caída y vuelco, que son muy comunes y están relacionados con la pérdida de control.
- 2) ADAS Urbano Integral (ADASI): Un sistema de 360 grados, optimizado para el entorno urbano, que aborda la alta incidencia de accidentes en calle.
- 3) Asistente Predictivo de Conducción (APC): Un sistema que monitorea al conductor para detectar fatiga o distracción, enfocado en reducir los accidentes que ocurren de día y que están ligados al error humano.

Estas propuestas tecnológicas están pensadas para cubrir los vacíos de seguridad detectados, ofreciendo un camino claro para mejorar la seguridad vial de forma estratégica y con un alto impacto económico.

6. Referencias

- [1] DGT. "Estadísticas de accidentes de tráfico en España, año 2023". Dirección General de Tráfico. 2024. <https://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes.shtml>.
- [2] Kimbrough, L., Wittmann, J., Böhme, S., Nordbruch, S., Haffner, R. & Riedel, R.. "Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials". *International Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 101-115. 2020.
- [3] Abellán Perpiñán, J. M., Martínez Pérez, J. E., Méndez Martínez, I., Pinto Prades, J. L. & Sánchez Martínez, F. I.. "El valor monetario de una vida estadística en España: Estimación en el contexto de los accidentes de tráfico". *Informe financiado por la Dirección General de Tráfico*. 2021.

STUDY OF THE IMPACT OF ADAS AND AUTONOMOUS VEHICLES ON ROAD ACCIDENTS IN SPAIN.

Author: Urieta Lozano, Juan Antonio.

Supervisor: Norverto Moriñigo, Juan.

ABSTRACT

This work analyzes the impact of Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS) on reducing accidents in Spain, combining scientific evidence with statistical data from the DGT. Different types of ADAS have been evaluated, estimating their potential to reduce accidents and their economic profitability. The results show that widespread implementation could prevent a significant percentage of casualties and generate substantial savings in healthcare and insurance costs. Furthermore, future improvements and developments are proposed to optimize their effectiveness.

Keywords: ADAS, DGT, Accidents.

1. Introducción

The purpose of this Final Master's Project is to move beyond theory and propose improvements in car safety systems, namely ADAS. The work is based on a deep analysis of the accident situation in Spain. To this end, a two-fold investigation has been carried out: on the one hand, the DGT's databases have been studied in detail to see where and why the most common accidents occur. On the other hand, literature and scientific papers have been reviewed to understand the current state of the technology and its impact. With this approach, the objective is to identify the shortcomings of existing ADAS and use that information to propose new, more effective systems.

2. Definición del proyecto

The project, titled "Study of the impact of ADAS and autonomous vehicles on road accidents in Spain," seeks to evaluate the effect these technologies have on road safety. It is not just a data analysis project; it also includes an economic study to justify the investment in these technologies. The research is supported by technical knowledge extracted from scientific literature, which serves as a framework for the quantitative analysis of accidents and the subsequent proposal of new systems. In short, the project combines an analysis of the current situation, a study of the technology, and an economic assessment to offer well-founded conclusions.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

The work focuses on ADAS, which are the key components for active safety in vehicles. To carry out the study and quantitative analysis, the Python programming language was used, along with specialized libraries such as Pandas for processing and manipulating DGT data, and Plotly for visualizing the graphs. On a theoretical level, it is described how these systems function as a set of sensors (such as radars, cameras, and LiDAR) that collect information from the surroundings. This information is processed in a central control unit that makes quick decisions and executes them through actuators that, for example, activate the braking. The importance of the vehicle's electronic architecture (E/E) is also explained, mentioning

how communication protocols like CAN and Ethernet networks are fundamental for the various ADAS to communicate with each other reliably and securely, allowing a coordinated response in critical situations.

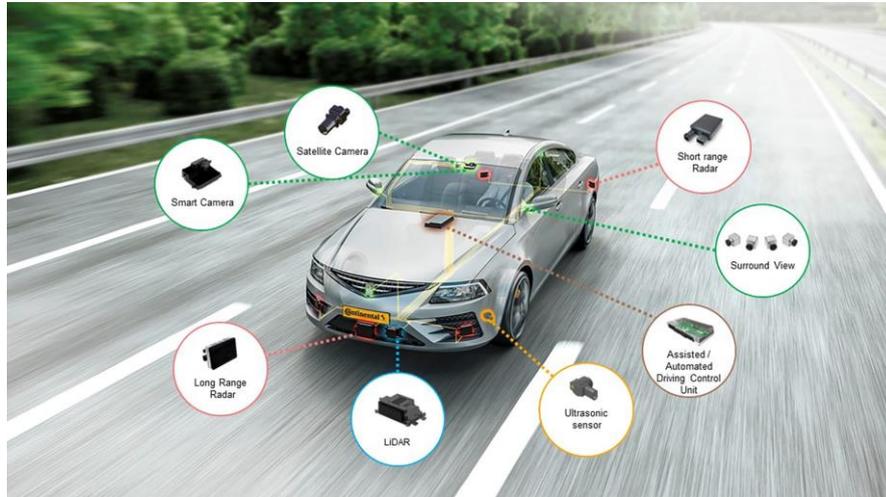


Ilustración 3 Types of ADAS (Blackboxmycar)

4. Resultados

The study of DGT data has yielded clear results on the most common accidents in Spain. The most frequent accidents include falls (8,458 cases), rollovers (3,676), and animal strikes (676), categories that are not fully covered by conventional ADAS. Furthermore, it has been discovered that most accidents (69.88%) occur during the day, which points to driver distraction as a key factor. The economic analysis, for its part, demonstrates the positive impact of the technology: it is estimated that, with the massive adoption of ADAS, the reduction in accidents could be between 35% and 40%, which would generate very significant economic savings by reducing medical costs, material damage, and loss of productivity.

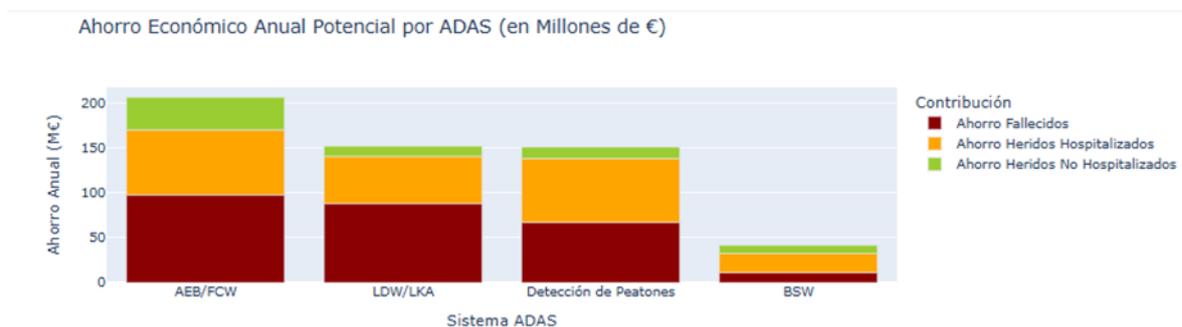


Ilustración 4 – Economics saving (elaboración propia)

5. Conclusiones

The work concludes that, despite the effectiveness of current ADAS, there are still important areas for improvement. The analysis of the most frequent accidents and the economic study justify the need to develop new technologies. To this end, three new-generation ADAS systems are proposed:

- 1) Terrain Detection and Active Stability System (SDTEA): To prevent accidents from falls and rollovers, which are very common and related to loss of control.
- 2) Integral Urban ADAS (ADASI): A 360-degree system, optimized for the urban environment, which addresses the high incidence of accidents on street.
- 3) Predictive Driving Assistant (APC): A system that monitors the driver to detect fatigue or distraction, focused on reducing accidents that occur during the day and are linked to human error.

These technological proposals are designed to fill the detected safety gaps, offering a clear path to strategically improve road safety with a high economic impact.

6. Referencias

- [1] DGT. "Estadísticas de accidentes de tráfico en España, año 2023". Dirección General de Tráfico. 2024. <https://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes.shtml>.
- [2] Kimbrough, L., Wittmann, J., Böhme, S., Nordbruch, S., Haffner, R. & Riedel, R.. "Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials". *International Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 101-115. 2020.
- [3] Abellán Perpiñán, J. M., Martínez Pérez, J. E., Méndez Martínez, I., Pinto Prades, J. L. & Sánchez Martínez, F. I.. "El valor monetario de una vida estadística en España: Estimación en el contexto de los accidentes de tráfico". *Informe financiado por la Dirección General de Tráfico*. 2021.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Introducción y antecedentes	8
1.2 Motivación Del Proyecto.....	10
1.3 Contexto actual de los ADAS	12
1.4 Objetivos	14
Capítulo 2. Estado Del Arte.....	16
2.1 Tipos De Sensores Y Actuadores	17
2.1.1 Radar	18
2.1.2 Lidar	20
2.1.3 Ultrasonidos	23
2.1.4 Cámara.....	25
2.1.5 Actuadores.....	29
2.2 Etapas Del Tratamiento De Datos	30
2.2.1 Adquisición De Datos.....	30
2.2.2 Preprocesamiento De Los Datos.....	30
2.2.3 Asociación De Los Datos	31
2.2.4 Fusión De Los Sensores	32
2.2.5 Rastreo De Objetos.....	33
2.3 Arquitectura Eléctrica Y Electrónica.....	34
2.3.1 Componentes De La Arquitectura	34
2.3.2 Tipos De Arquitecturas.....	35
2.3.3 Redes de Comunicación	37
Capítulo 3. Marco Regulatorio	41
3.1 Regulación Internacional, De La UE Y España	41
3.1.1 Regulación Internacional UNECE.....	41
3.1.2 Regulación De La Unión Europea	42
3.1.3 Regulación En España	42
3.1.4 Ejemplos De Regulación De Los ADAS.....	43
3.2 Estándares Técnicos	43
3.2.1 SAE J3016	44

3.2.2 ISO 26262.....	44
3.2.3 ISO 21448.....	45
3.2.4 UL 4600.....	46
3.3 Programas De Evaluación Del Consumidor.....	46
3.3.1 Euro NCAP.....	47
3.3.2 NHTSA.....	48
Capítulo 4. Objetivos Del Proyecto	49
4.1 Objetivos	49
4.2 Alineación Con Los ODS.....	51
Capítulo 5. Introducción ADAS En España.....	54
5.1 Penetración de ADAS en Vehículos Nuevos	54
5.2 Penetración de ADAS en el Parque Automovilístico Circulante	56
Capítulo 6. Estudio Cuantitativo.....	58
6.1 Análisis Europeo Sobre Eficacia De ADAS	58
6.1.1 Metodología.....	59
6.1.2 Resultados	61
6.1.3 Conclusiones.....	65
6.2 Estimación del Impacto de los ADAS en la Seguridad Vial en EE.UU.....	66
6.2.1 Análisis De Datos.....	69
6.2.2 Discusión.....	72
6.2.3 Implicaciones.....	74
6.3 Efecto de Los ADAS en los Usuarios Vulnerables	74
6.3.1 Introducción	75
6.3.2 Recolección De Datos	76
6.3.3 Resultados	79
6.3.4 Discusión.....	81
6.3.5 Conclusión.....	83
6.4 Conclusiones Del Análisis Cuantitativo De Los ADAS	83
Capítulo 7. Análisis De Las Bases De Datos	86
7.1 Gestión Y Preparación De Las Bases Datos.....	86
7.1.1 Limpieza Y Normalización De Los Datos.....	87
7.1.2 Preparación De Los Datos Para El Análisis.....	87

7.2	Resultados Del Análisis Y Discusión.....	88
7.2.1	<i>Análisis De La Siniestralidad De Peatones En Escenarios Críticos.....</i>	88
7.2.2	<i>Impacto Detallado por Tipo de Accidente y Sistema ADAS.....</i>	91
Capítulo 8.	<i>Análisis Económico.....</i>	99
8.1	Cálculo del Ahorro Económico Potencial Anual	100
8.2	Análisis de Sensibilidad	102
8.3	Análisis de Coste-Beneficio y Retorno de la Inversión (ROI)	104
8.4	Conclusión del Análisis Económico.....	108
Capítulo 9.	<i>Propuestas de Innovación en ADAS.....</i>	110
9.1	Análisis Cuantitativo de los Tipos de Siniestros	111
9.2	Propuestas de Sistemas ADAS de Nueva Generación	113
9.2.1	<i>Sistema de Detección de Terreno y Estabilidad Activa (SDTEA)</i>	113
9.2.2	<i>ADAS Urbano Integral (ADASI)</i>	114
9.2.3	<i>Asistente Predictivo de Conducción (APC).....</i>	114
Capítulo 10.	<i>Conclusiones.....</i>	116
Capítulo 11.	<i>Bibliografía.....</i>	118
ANEXO I	120	
ANEXO II	124	

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 – ADAS (Chery).....	6
Ilustración 2 – Ahorro económico (elaboración propia)	6
Ilustración 3 Types of ADAS (Blackboxmycar)	9
Ilustración 4 – Economics saving (elaboración propia)	9
Ilustración 5 Ejemplo de ADAS (Yamovil)	8
Ilustración 6 Primer Vehículo con ABS (El confidencial)	9
Ilustración 7 Evolución del parque en España (Motor16).....	14
Ilustración 8 Niveles SAE de automatización (Autobild)	17
Ilustración 9 Como funciona el radar (Hyperphysics)	18
Ilustración 10 Tipos de radar (Revista española de electrónica).....	19
Ilustración 11 Lidar unidireccional (ADAS and sensor technology)	21
Ilustración 12 Lidar retroreflectivos (ADAS and sensor technology).....	21
Ilustración 13 Lidar de reflexión difusa (ADAS and sensor technology).....	21
Ilustración 14 Nube de puntos (Zona Movilidad)	22
Ilustración 15 Funcionamiento de los ultrasonidos (Fundación Mapfre).....	24
Ilustración 16 Funcionamiento cámara (RACE)	26
Ilustración 17 Funcionamiento cámara infrarroja (FLIR).....	27
Ilustración 18 Tipos de actuadores (ADAS and sensor technology).....	29
Ilustración 19 Fusión de sensores (ADAS and sensor technology).....	32
Ilustración 20 Arquitectura distribuida (ADAS and sensor technology)	35
Ilustración 21 Arquitectura de dominio (ADAS and sensor technology)	36
Ilustración 22 Arquitectura de Zona (ADAS and sensor technology).....	37
Ilustración 23 Redes de comunicación (ADAS and sensor technology).....	37
Ilustración 24 SAE J3016 (Norma SAE).....	44
Ilustración 25 Niveles ASIL (ADAS and sensor technology).....	45
Ilustración 26 Logo Euro NCAP (EURONCAP)	47
Ilustración 27 Logo NHTSA (NHTSA)	48
Ilustración 28 ODS (ODS)	51

Ilustración 29 Edad Media del parque en España (ANFAC)	56
Ilustración 30 Condiciones de los accidentes (Impact analysis of ADAS regarding road safety)	61
Ilustración 31 Uso de cada ADAS segun el año (Impact analysis of ADAS regarding road safety)	62
Ilustración 32 Potencial de reducción de accidentes (Impact analysis of ADAS regarding road safety)	63
Ilustración 33 Potencial reducción de muertes (Impact analysis of ADAS regarding road safety)	64
Ilustración 34 Accidentes evitables por el AEB (Potential Reductions in Crashes)	70
Ilustración 35 Accidentes evitables por LKA (Potential Reductions in Crashes)	70
Ilustración 36 Accidentes evitables por BSW (Potential Reductions in Crashes)	71
Ilustración 37 Accidentes evitables por el resto de ADAS (Potential Reductions in Crashes)	72
Ilustración 38 Objetos que reconocen los sistemas (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)	77
Ilustración 39 Total de accidentes con usuarios vulnerables (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)	77
Ilustración 40 Clasificación según la generación del ADAS (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)	78
Ilustración 41 Situaciones de conflicto estudiadas (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)	79
Ilustración 42 Clasificación de peatones fallecidos por acción (elaboración propia)	89
Ilustración 43 Distribución de víctimas por heridos hospitalizados y acción del peatón (elaboración propia)	90
Ilustración 44 Distribución de víctimas por heridos no hospitalizados y acción del peatón (elaboración propia)	91
Ilustración 45 Accidentes totales y su potencial reducción (elaboración propia)	93
Ilustración 46 Impacto potencial en la reducción de fallecidos (elaboración propia)	95

Ilustración 47 Impacto potencial en la reducción de heridos hospitalizados (elaboración propia).....	95
Ilustración 48 Impacto potencial en la reducción de heridos no hospitalizados (elaboración propia).....	96
Ilustración 49 Potencial reducción de accidentes en España (elaboración propia)	97
Ilustración 50 Ahorro potencial por ADAS (elaboración propia)	101
Ilustración 51 Ahorro total por escenario (elaboración propia)	104
Ilustración 52 Periodo de recuperación de la inversión (elaboración propia)	106
Ilustración 53 Análisis del retorno de la inversión global (elaboración propia)	107
Ilustración 54 Número de siniestros según el tipo de accidente (elaboración propia)	111
Ilustración 55 Distribución de accidentes según el tipo de vía (elaboración propia)	112
Ilustración 56 Distribución de accidentes según la iluminación (elaboración propia).....	112

Índice de tablas

Tabla 1 Pros y contras del radar (elaboración propia).....	20
Tabla 2 Pros y contras del lidar (elaboración propia).....	23
Tabla 3 Pros y contras de los ultrasonidos (elaboración propia).....	25
Tabla 4 Pros y contras de la cámara (elaboración propia).....	28
Tabla 5 Comparativa de sensores (elaboración propia).....	28
Tabla 6 Comparativa de Buses (elaboración propia)	39
Tabla 7 Ahorro anual por ADAS (elaboración propia)	101
Tabla 8 Ahorro detallado por ADAS (elaboración propia)	102
Tabla 9 Ahorro según el escenario (elaboración propia).....	103
Tabla 10 Ahorro detallado por ADAS y escenario (elaboración propia)	104
Tabla 11 ROI por ADAS (elaboración propia)	105

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La seguridad vial supone uno de los mayores retos dentro del sector de la movilidad, y continúa siendo una de las principales prioridades tanto para las distintas administraciones públicas como para los fabricantes de automóviles. A pesar de los grandes avances que se han llevado a cabo en el sector en cuanto a infraestructuras, normativas más exigentes y campañas de concienciación, el principal causante de los accidentes de tráfico sigue siendo el error humano. En este contexto, han surgido tecnologías que buscan reducir drásticamente el número de siniestros mediante sistemas de ayuda al conductor. Es aquí donde entran en juego los ADAS (Advanced Driver Assistance Systems).

Los sistemas ADAS constituyen un conjunto de tecnologías que se encuentran integradas en un vehículo y que tienen como función aumentar la seguridad activa de estos. En concreto se encargan de proporcionar asistencia al conductor en tiempo real y en determinadas situaciones intervenir en el control del vehículo. Entre los sistemas más conocidos se encuentran el frenado automático de emergencia (AEB), el control de crucero adaptativo (ACC), el asistente de mantenimiento de carril (LKA) o la detección de ángulo muerto (BSD).



Ilustración 5 Ejemplo de ADAS (Yamovil)

El funcionamiento de los sistemas ADAS se basa en integrar sensores con sistemas electrónicos. Los sensores se encargan de captar información del medio en tiempo real para procesar lo que sucede en el entorno cercano al vehículo. La información que es recogida por los sensores es procesada en las unidades de control (ECUs) que mediante algoritmos fusionan los datos y toman decisiones en cuestión de milisegundos para informar al conductor o actuar sobre el vehículo en caso de que fuera necesario. Para lograr un sistema de comunicación eficiente los sensores se conectan a las ECUs con redes internas como el bus CAN o Ethernet, lo cual facilita la coordinación de la información.

El concepto de asistencia al conductor no es algo completamente nuevo. Desde la segunda mitad del siglo XX, los fabricantes de automóviles han ido incorporando tecnologías orientadas a mejorar la seguridad activa del vehículo. Algunos de los hitos más relevantes en esta evolución tecnológica fueron el desarrollo del sistema antibloqueo de frenos (ABS) en los años 70, este sistema fue inventado por la empresa Bosch y lo produjo en serie para Mercedes-Benz, en concreto fue el modelo clase S (W116). Otro de los hitos más importantes fue la creación del sistema de control electrónico de estabilidad (ESP) en los años 90. Estos sistemas supusieron una revolución en la seguridad activa de los automóviles, ya que cambiaron la manera en la que reaccionaban los vehículos antes situaciones de riesgo.



Ilustración 6 Primer Vehículo con ABS (El confidencial)

Con la llegada del siglo XXI, el aumento en la capacidad de cálculo de los microprocesadores, el abaratamiento de los sensores y el desarrollo de algoritmos más complejos han permitido dar un gran salto adelante en la mejora de los sistemas ADAS. Debido a estas mejoras los sistemas han evolucionado de sistemas reactivos a sistemas inteligentes y proactivos, dando lugar a sistemas que no solo alertan, sino que también pueden tomar decisiones autónomas e intervenir en caso de que exista un peligro inminente.

Uno de los primeros sistemas ADAS en expandirse de forma masiva fue el control de cruce adaptativo (ACC), que ajusta la velocidad del vehículo para mantener una distancia segura con el vehículo precedente. Posteriormente, se introdujeron otras funciones clave como el frenado autónomo de emergencia (AEB), el asistente de mantenimiento de carril (LKA), el reconocimiento de señales de tráfico o la detección de ángulo muerto. Todo ello ha sido posible gracias al avance de tecnologías como cámaras, radar, LiDAR y sistemas de comunicación interna y externa como el bus CAN o el V2X, que permiten la integración de múltiples funciones en una arquitectura electrónica compleja. Esta evolución ha dado lugar a los actuales niveles de automatización definidos por la SAE, donde la mayoría de los vehículos con ADAS se sitúan en los niveles 1 y 2, correspondientes a asistencia parcial, mientras que los niveles 3 y superiores ya implican capacidades de conducción autónoma.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Tras haber cursado el doble máster en Ingeniería Industrial y en Motorsport, Movilidad y Seguridad, he tenido la oportunidad de adquirir una formación técnica completa que abarca tanto los fundamentos de la ingeniería industrial como los desafíos más actuales relacionados con la movilidad inteligente y la seguridad en el transporte. Esta formación me ha permitido desarrollar una sensibilidad especial hacia los retos que enfrenta la sociedad en términos de sostenibilidad, eficiencia y, sobre todo, seguridad vial.

En concreto, a lo largo del máster especializado en movilidad y seguridad, he cursado asignaturas en las que se abordaban de forma directa los principales factores de riesgo en la conducción, así como las tecnologías emergentes orientadas a reducirlos. Una de las materias

que más interés despertó en mí fue la de sistemas avanzados de asistencia a la conducción (ADAS). En ella se analizaban tanto su funcionamiento técnico como su impacto en la reducción de la siniestralidad, evidenciando el papel clave que desempeñan como paso intermedio hacia la conducción autónoma. Durante el curso, aprendí que estos sistemas no solo representan una mejora en términos de comodidad o modernidad, sino que constituyen un avance real y medible en la prevención de accidentes y la protección de la vida humana.

Este proyecto de fin de máster nace, por tanto, del deseo de profundizar en un ámbito que considero fundamental para el futuro de la movilidad. La posibilidad de evaluar de forma objetiva el efecto que los ADAS están teniendo sobre la siniestralidad en España representa, desde mi punto de vista, una oportunidad para aplicar conocimientos adquiridos en el máster a un problema real y de gran trascendencia social. Más allá del interés académico, me motiva especialmente poder vincularme a un área que, sin duda, será protagonista en los próximos años dentro del sector automovilístico.

Además, creo que este es un momento clave para abordar un trabajo como este. Por un lado, la normativa europea ya obliga a que todos los vehículos nuevos vendidos a partir de 2024 incluyan ciertos sistemas ADAS, lo que está acelerando mucho su implantación. Por otro lado, cada vez vemos más pruebas piloto y desarrollos en marcha relacionados con la conducción autónoma. Estamos en una fase de transición donde conviven coches antiguos sin ayudas electrónicas con modelos muy avanzados, lo que genera muchas dudas sobre cómo va a evolucionar realmente la seguridad vial.

Por eso pienso que este proyecto me va a permitir no solo aplicar muchos de los conocimientos que he ido aprendiendo a lo largo del máster, sino también aportar mi granito de arena para mejorar la movilidad del futuro. Me parece importante analizar con datos reales si estas tecnologías están cumpliendo lo que prometen, porque al final la ingeniería tiene que estar al servicio de las personas. Entender el impacto real de los ADAS me parece una forma muy clara de conectar la parte técnica con una mejora directa para la sociedad.

1.3 CONTEXTO ACTUAL DE LOS ADAS

En los últimos años, los sistemas ADAS han pasado de ser un equipamiento opcional reservado para vehículos de alta gama, a convertirse en una tecnología cada vez más común en el parque automovilístico europeo. Este proceso de implantación de los sistemas ADAS viene impulsado tanto por la presión regulatoria como por el esfuerzo de los fabricantes de ofrecer de seguridad más avanzados a un coste bajo. En la actualidad, es muy frecuente encontrar en muchos modelos sistemas como el frenado autónomo de emergencia, el control de crucero adaptativo y la asistencia de mantenimiento del carril.

La Unión Europea ha contribuido notablemente con un avance normativo crucial: el Reglamento (UE) 2019/2144. Este reglamento, que establece la obligatoriedad de incorporar una serie de sistemas ADAS en todos los vehículos nuevos homologados a partir de julio de 2022 y en todos los vehículos nuevos vendidos desde 2024, busca reforzar significativamente la seguridad vial. Entre estos sistemas se incluyen, además de los ya mencionados, el asistente inteligente de velocidad (ISA), la detección de somnolencia y distracción del conductor y la cámara trasera o sistema de detección de marcha atrás. Complementariamente, organismos como Euro NCAP, el Programa Europeo de Evaluación de Automóviles Nuevos, una organización independiente que realiza pruebas de seguridad rigurosas, también han contribuido a acelerar la adopción de estas tecnologías al incorporarlas en sus criterios de evaluación, lo que ha incentivado a los fabricantes a mejorar su equipamiento de serie.

Los ADAS no solo están transformando la seguridad activa del vehículo, sino que además representan la base tecnológica sobre la que se construyen los distintos niveles de conducción autónoma. Según la clasificación SAE J3016, estos sistemas abarcan desde el nivel 0 (sin automatización) hasta el nivel 2 (automatización parcial), y sirven como puente hacia los niveles 3, 4 y 5, donde el vehículo asume un mayor grado de control. En este sentido, la evolución de los ADAS es inseparable del desarrollo de la conducción autónoma, y constituye una etapa crítica en ese proceso de transición.

A pesar del progreso, todavía existen barreras y desafíos importantes. Desde el punto de vista técnico, se requieren mejoras en la fusión de sensores, en la precisión de localización, y en la ciberseguridad de los sistemas embarcados. En el ámbito social, el reto está en educar al usuario. Aunque muchos conductores valoran la seguridad y comodidad que ofrecen los ADAS, persiste una cierta desconfianza o desconocimiento sobre su correcto funcionamiento. Se ha podido observar casos en los que los usuarios sobreestiman las capacidades del sistema, creyendo que están ante vehículos autónomos cuando en realidad siguen requiriendo supervisión constante, dando lugar a accidentes.

En el caso concreto de España, la llegada de estas tecnologías ha ido en aumento en los últimos años, especialmente debido al impulso normativo europeo y de campañas de concienciación impulsadas por la DGT. Sin embargo, su implantación aún presenta un ritmo desigual, ya que una gran parte del parque automovilístico español sigue siendo relativamente antiguo. La antigüedad media de los turismos en circulación supera actualmente los 13 años, lo que limita la penetración efectiva de los ADAS en el conjunto del sistema vial. Aunque los vehículos de nueva matriculación ya incluyen en su mayoría los sistemas exigidos por la normativa, el peso de los vehículos que no se encuentran regidos por estas normativas y, por lo tanto, que no tienen ayudas electrónicas sigue siendo elevado. Esto plantea un desafío relevante para lograr una reducción generalizada de la siniestralidad en el corto plazo. Aun así, se observa una tendencia creciente hacia la renovación del parque, la mejora en la educación del conductor y la recopilación de datos que permitan medir con mayor precisión el impacto real de estas tecnologías en la seguridad vial española.

Evolución de la antigüedad del parque en España

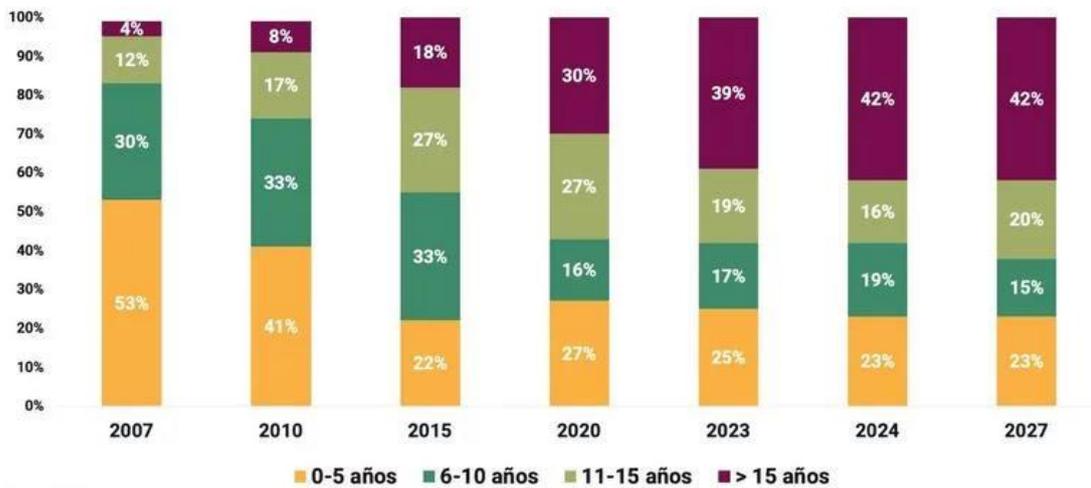


Ilustración 7 Evolución del parque en España (Motor16)

1.4 OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como propósito fundamental evaluar el impacto de los ADAS en la reducción de la siniestralidad vial en España. Este proyecto se abordará desde un enfoque técnico y analítico, utilizando datos reales y literatura científica contrastada para establecer sus conclusiones.

El estudio se centrará en varios objetivos clave. En primer lugar, se buscará comprender el funcionamiento y la base tecnológica de los ADAS, detallando los sensores, actuadores y la lógica de control. Se analizarán distintos sistemas, como el frenado autónomo de emergencia, para entender cómo contribuyen a la mitigación del error humano. Además, se analizará el marco normativo que rige su uso, revisando la legislación a nivel internacional, europeo y español para entender cómo las regulaciones impulsan su adopción.

Posteriormente, el TFM justificará la relevancia de los ADAS en la reducción de accidentes, explicando cómo estos sistemas superan las capacidades humanas en términos de reacción y atención, lo que supone una mejora sustancial en la seguridad vial. Se evaluará su grado de

implantación en el parque automovilístico español utilizando datos oficiales de la DGT, investigando su evolución y presencia actual. Para respaldar estas conclusiones, se realizará una revisión bibliográfica exhaustiva de estudios científicos e informes técnicos relevantes.

Finalmente, se realizará un análisis estadístico de la siniestralidad en España, estudiando las bases de datos públicas y apoyándose en los papers científicos para extraer conclusiones relevantes para la situación española. El trabajo culminará con un estudio del impacto económico de la incorporación de los ADAS, estimando los beneficios en términos de vidas salvadas, reducción de la gravedad de los accidentes y el consiguiente ahorro en costes sanitarios e indemnizaciones.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

Con el objetivo de comprender adecuadamente el enfoque y la relevancia de este proyecto, es necesario partir de una base sólida sobre el estado de arte de los sistemas avanzados de asistencia a la conducción. Estos sistemas constituyen un conjunto de tecnologías desarrolladas para incrementar la seguridad, el confort y la eficiencia durante la conducción. Su funcionamiento se basa en la asistencia continua al conductor en distintas situaciones que pueden suponer un riesgo en la conducción, abarcando desde prevención de colisiones hasta el mantenimiento del coche dentro del carril, pasando por la regulación automática de la velocidad o el reconocimiento de señales de tráfico.

Los ADAS funcionan procesando información de una variedad de sensores, como radares, cámaras, ultrasonidos y LiDAR, los cuales permiten al vehículo interpretar el entorno situando objetos por precisión en tiempo real.

Los sistemas ADAS constituyen un papel clave en el proceso de automatización de los vehículos. Para contextualizar el papel que juegan estos sistemas en el proceso de automatización es útil acudir a la clasificación que propone la SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción), la cual representa una organización internacional de referencia en cuanto a la estandarización técnica dentro de la industria del automóvil y la movilidad. Este organismo identifica seis niveles distintos de automatización, desde el nivel 0, el cual no tiene ningún tipo de asistencia hasta el nivel 5, el cual representa el nivel para la automatización total del vehículo. Actualmente la mayor parte del parque automovilístico se encuentra entre los niveles 1 y 2, donde el sistema puede asumir alguna función como el control de crucero adaptativo, pero el conductor continúa siendo el responsable de la conducción.

A partir del nivel 3, comienza a poder hablarse sobre la conducción autónoma. En el nivel 3 el sistema es capaz de detectar bien el entorno y de encargarse de realizar una gran parte de la conducción del vehículo, pero el conductor sigue estando encargado de supervisar que la

conducción se lleva a cabo correctamente. En cuanto al nivel 4 ya supone un alto grado de automatización. El vehículo en este caso ya es capaz de realizar todas las tareas que se requieren para la conducción en ciertas circunstancias. Estas circunstancias especiales se refieren a que solo puede operar autónomamente dentro de un área específica, definida previamente por coordenadas GPS o condiciones de entorno. El nivel 5 supone la automatización total de la conducción, por lo que ya no se necesita la interacción humana.

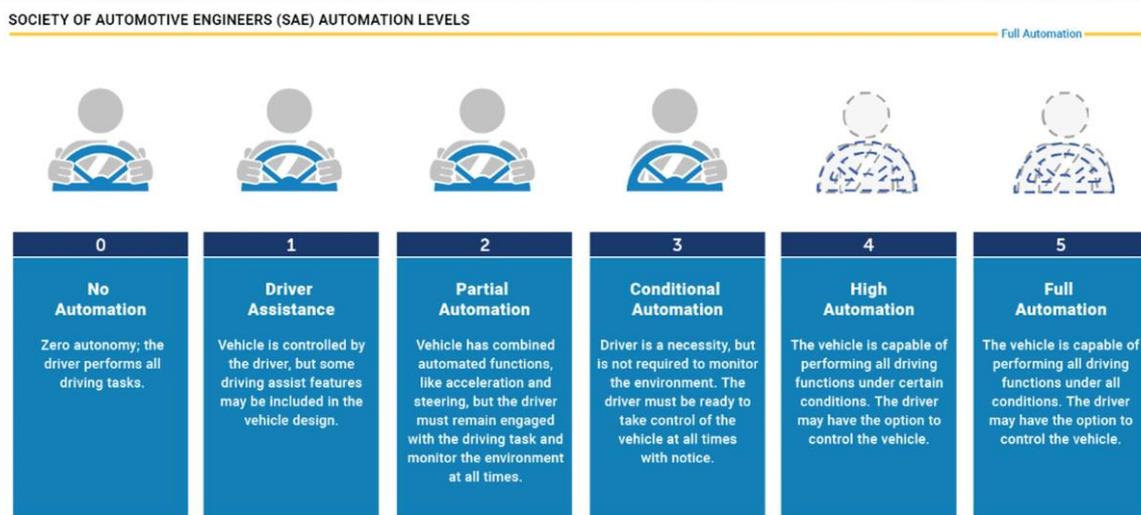


Ilustración 8 Niveles SAE de automatización (Autobild)

2.1 TIPOS DE SENSORES Y ACTUADORES

Como ya se ha comentado con anterioridad, los sensores y actuadores conforman los elementos necesarios para que el vehículo sea capaz de interpretar su entorno y reaccionar en consecuencia a ello. Los sensores se encargan de detectar información como la posición del vehículo en el carril o la presencia de un obstáculo o peatón entre muchos otros. En cambio, los actuadores realizan las acciones necesarias para impedir la colisión. A continuación, se explica el funcionamiento de varios tipos de sensores y actuadores analizando además pros y contras de cada uno.

2.1.1 RADAR

El radar (Radio Detection and Ranging) es uno de los sensores que más se utilizan en los ADAS debido a su buena capacidad de detección de objetos y a calcular su distancia, velocidad y posición relativa sin necesidad de que se den buenas condiciones meteorológicas. El funcionamiento de este sensor se basa en emitir ondas electromagnéticas de alta frecuencia que, al impactar con un objeto, rebotan y se recogen con un receptor. Dependiendo del tiempo que tarda en volver y de la frecuencia desplazada, que se conoce como efecto Doppler, el sistema consigue realizar una estimación precisa de la posición y de la velocidad relativa del objeto que ha detectado.

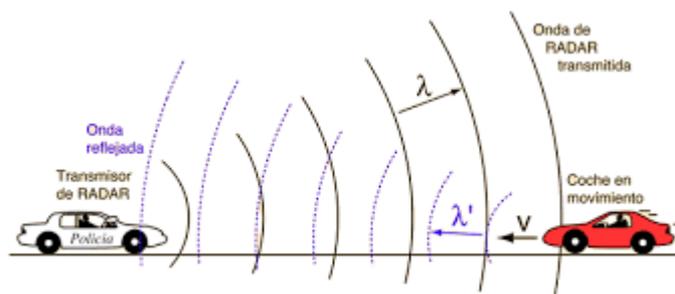


Ilustración 9 Como funciona el radar (Hyperphysics)

Existen distintos tipos de radares dependiendo de su alcance. En la industria de la automoción se usan el radar de largo alcance y el radar de corto alcance, los cuales tienen distintas utilidades.

- Radar de largo alcance (LRR): este tipo de radar se usa para sistemas como el control de crucero adaptativo, ya que es capaz de detectar múltiples objetos a larga distancia. Este también mide su ángulo y velocidad radial respecto del vehículo mediante antenas multihaz.
- Radar de corto alcance (SRR): en este caso, este sistema está basado en la tecnología de banda ultraancha, la cual permite detectar solo objetos cercanos. Este tipo de radares se usan sobre todo en sistemas de aparcamiento asistido, la detección de los ángulos muertos y previenen las colisiones laterales. Su alcance máximo llega solo a

30 metros de distancia, por lo que es necesario complementarlo con el radar de largo alcance.

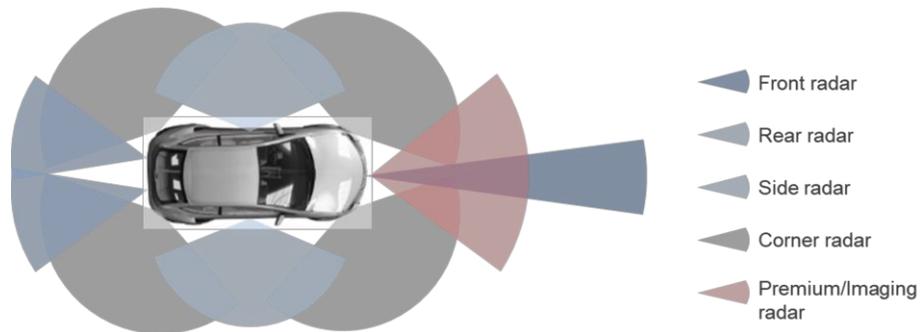


Ilustración 10 Tipos de radar (Revista española de electrónica)

Otra forma de clasificar los radares es según el tipo de onda que utiliza. Se distinguen el radar de onda continua, el cual transmite y recibe simultáneamente y el radar de pulsos, que mide el tiempo de eco entre la emisión y la recepción de la onda. Ambos sistemas pueden incorporar modulación en frecuencia o fase para mejorar la precisión en la estimación de la distancia y velocidad. Gracias a su robustez y versatilidad, el radar sigue siendo una tecnología clave en el desarrollo de la conducción automatizada.

PROS	CONTRAS	APLICACIONES
Detección de velocidad y posición precisa	El entorno es desconocido	Control Crucero Adaptativo
Buena resolución detectando objetos a larga y corta distancia	Mala detección de objetos no metálicos	Detección del ángulo muerto
Buena integración en el vehículo	No diferencia entre objetos	Asistente de cambio de carril
No se ve afectado por malas condiciones meteorológicas	Localización espacial pobre en caso de pocas antenas	Asistente de aparcamiento

Tabla 1 Pros y contras del radar (elaboración propia)

2.1.2 LIDAR

El Lidar (Light Detection and Ranging) es un sensor óptico que utiliza pulsos de luz láser para medir distancias a objetos de forma precisa. Este sensor consigue crear una representación del entorno en 3D en forma de una nube de puntos.

Dentro de los sensores lidar, en la industria se pueden distinguir varios tipos según su funcionamiento. Las tres tecnologías más usadas son las siguientes:

- Sensores unidireccionales: estos constan de un emisor y de un receptor que se encuentran colocados en lados opuestos. Cuando un objeto pasa entre el emisor y el receptor e interrumpe el haz de luz, el receptor lo detecta como una señal de conmutación.

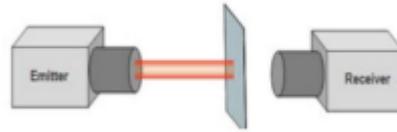


Ilustración 11 Lidar unidireccional (ADAS and sensor technology)

- Sensores retro reflectivos: tanto el emisor como el receptor se integran en una sola carcasa. La señal se refleja mediante un espejo o superficie reflectante situada frente al sensor. En este caso cualquier interrupción del haz entre el sensor y el reflector se interpreta como la presencia de un objeto.



Ilustración 12 Lidar retroreflectivos (ADAS and sensor technology)

- Sensores de reflexión difusa: este tipo de sensor es el más usado en la industria de la automoción. El mismo emisor trabaja a la vez como receptor, por lo que no requiere ningún reflector del haz de luz. El haz de luz se refleja directamente sobre el objeto que detecta, calculando su posición y distancia relativa.



Ilustración 13 Lidar de reflexión difusa (ADAS and sensor technology)

La manera en la que funciona el lidar usado en los vehículos es la siguiente, el lidar emite un pulso de luz con una marca temporal, el cual al reflejarse en el objeto vuelve al receptor con un nuevo sello temporal. Conociendo el tiempo de viaje del pulso y sabiendo cual es la orientación y la posición del sensor usando el GPS, se calculan las coordenadas del objeto

en el cual ha rebotado el haz de luz. Todos estos puntos que se localizan se agregan unos a otros para formar la nube que se ha nombrado anteriormente. Esta nube de puntos se procesa con algoritmos como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) para poder reconstruir superficies y mapas tridimensionales de lo que rodea al vehículo.

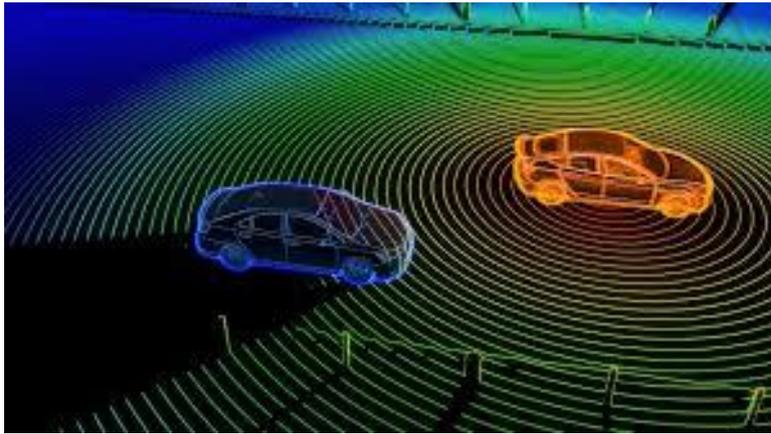


Ilustración 14 Nube de puntos (Zona Movilidad)

Aunque el lidar ha cobrado una gran importancia en el mundo del automóvil debido a su importante papel para lograr la conducción autónoma, es una tecnología que tiene múltiples funciones. Alguna de sus aplicaciones en otros sectores es por ejemplo en los teléfonos móviles como los iPhone, donde se utiliza para mejorar el enfoque de la cámara. Otro uso destacable de esta tecnología podría ser en la medición de la velocidad del viento. El lidar puede estimar la velocidad del viento a distintas alturas empleando pulsos de luz, siendo una alternativa más económica y flexible que los métodos tradicionales.

PROS	CONTRAS	APLICACIONES
Puede detectar objetos y obstáculos de poco tamaño	No lee información visual del entorno	Nivel 3 o superior
Buena resolución detectando objetos a media y corta distancia a una alta velocidad	Coste alto de producción	Ayuda para alguna función del Nv 2 para tener una mayor precisión
Capaz de ofrecer un mapeo fiable del entorno	Procesamiento de datos complejo	
Como se utiliza en Nv 3 o mayor se necesita mucha fiabilidad	No es preciso en condiciones meteorológicas malas	

Tabla 2 Pros y contras del lidar (elaboración propia)

2.1.3 ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son sensores ampliamente utilizados en los sistemas ADAS, especialmente en funciones de asistencia al aparcamiento. Su diseño permite medir distancias cortas con alta precisión. Son muy útiles para tener un control de la distancia con distintos objetos en las maniobras de marcha atrás, detectar obstáculos a corta distancia y son imprescindibles para realizar una maniobra de aparcamiento automatizada.

El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en la tecnología sonar, similar a la que utilizan los murciélagos para volar. Estos sensores emiten ondas sonoras de alta frecuencia, normalmente cercana a 40 KHz la cual es imperceptible para el oído humano.

Estas ondas se propagan a través del aire y para calcular la distancia al objeto miden el tiempo que tarda el eco en volver tras haber rebotado en el objeto. Los sensores de ultrasonidos se conforman por un transmisor, el cual se encarga de emitir la onda sonora que ha generado un cristal piezoeléctrico y un receptor que recibe el eco que ha rebotado. Para calcular la distancia simplemente se necesita la velocidad de la señal sonora y el tiempo que transcurre hasta que es captada por el receptor.

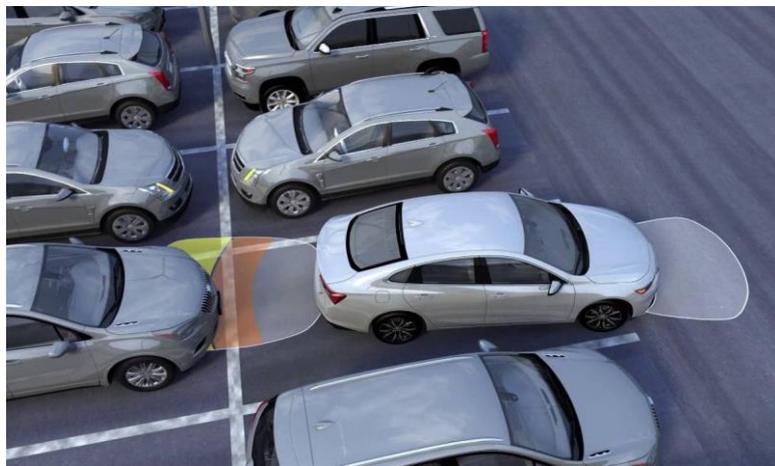


Ilustración 15 Funcionamiento de los ultrasonidos (Fundación Mapfre)

Su posición habitual en los vehículos suele ser los paragolpes. Entre sus principales ventajas se puede destacar que ofrecen una medición muy precisa y robusta sin importar las condiciones meteorológicas. Estos sensores no dependen de que haya niebla o esté oscuro, ya que no dependen de la luz para funcionar. Una de sus mayores limitaciones es la poca distancia que pueden alcanzar, su máximo alcance ronda entre los 6 y 10 metros y además son el fiable a bajas velocidades. Es por todo esto que su uso solo es en sistemas de aparcamiento, no se pueden utilizar en funciones de conducción asistida en carretera o para detección de objetos a media o larga distancia.

PROS	CONTRAS	APLICACIONES
Detección de corto alcance (<6m)	Posibles falsos positivos	Asistencia al aparcamiento
Se puede usar en sitios oscuros	Sensibilidad de precisión se ve afectada según los materiales	
Precio bajo	Afectado por el efecto Doppler (solo se usa a bajas velocidades)	

Tabla 3 Pros y contras de los ultrasonidos (elaboración propia)

2.1.4 CÁMARA

Las cámaras permiten al vehículo ver el entorno que le rodea como si fuera el ojo humano. Gracias a la alta resolución de las cámaras y a los continuos avances que se producen en visión artificial, estos sensores son capaces de detectar, reconocer y clasificar objetos como señales de tráfico. Todo esto las convierte en una herramienta clave para diversas funcionalidades de seguridad y asistencia a la conducción.

El funcionamiento de una cámara de un sistema ADAS comienza con la captura de la imagen del entorno. Posteriormente esta imagen es procesada por una unidad central (ECU), la cual mediante algoritmos de visión por ordenador y con la ayuda de la inteligencia artificial, analiza el contenido para detectar objetos relevantes en la imagen. Con este proceso se logra identificar vehículos, peatones, ciclistas, marcas viales y demás objetos. Aunque las cámaras capturan la información en 2D, con el sistema de visión estéreo (dos cámaras a la vez) y con

un análisis de perspectiva, se puede estimar la distancia y el movimiento relativo de los objetos.

Las cámaras que se usan en estos sistemas pueden ser de distinto tipo y se pueden colocar en distintas ubicaciones del vehículo. Algunos de los distintos usos que se les dan son las cámaras traseras para facilitar el aparcamiento, que suelen tener un gran ángulo de visión por lo que se conocen como ojo de pez. También se pueden encontrar en la parte frontal, normalmente ubicadas tras el parabrisas. Estas últimas son muy útiles en sistemas como el LKA o el AEB. Las cámaras frontales son además imprescindibles para el reconocimiento de señales de tráfico y el control de cruceo adaptativo. Otro tipo de cámaras usadas en los sistemas ADAS, son las cámaras laterales, que suelen ir integradas en los retrovisores, para detectar vehículos en el ángulo muerto o incluso creas una visión de 360°. Por último, existen las cámaras interiores. Las cámaras interiores sirven para detectar signos de somnolencia en el conductor o gestos de distracción.



Ilustración 16 Funcionamiento cámara (RACE)

Existe una nueva tecnología en desarrollo dentro del ámbito de los sistemas ADAS, la cual es la cámara infrarroja., con aplicaciones especialmente útiles en condiciones de baja visibilidad, como la conducción nocturna. Estas cámaras no dependen de la luz visible, sino que detectan la radiación térmica emitida por los cuerpos, lo que permite identificar personas, animales u objetos con diferente temperatura respecto al entorno. Su principal

ventaja es que pueden detectar peatones o animales en la vía mucho antes de que sean visibles por los faros del vehículo.



Ilustración 17 Funcionamiento cámara infrarroja (FLIR)

No obstante, las cámaras también presentan ciertas limitaciones que es importante tener en cuenta. Su capacidad de reconocimiento depende de los objetos que hayan sido previamente clasificados en el software, por lo que no pueden identificar elementos desconocidos o imprevistos. Además, su fiabilidad puede verse comprometida en condiciones meteorológicas adversas, como lluvia, nieve o niebla, o cuando están sucias. También son sensibles a deslumbramientos o ilusiones ópticas que pueden afectar la interpretación de las imágenes. Por este motivo, aunque son una herramienta fundamental en los sistemas ADAS, no son suficientes por sí solas y deben complementarse con otros sensores como el radar o el lidar para garantizar una percepción más precisa y segura del entorno.

PROS	CONTRAS	APLICACIONES
Puede distinguir formas, colores y detectar objetos	Sensible a la meteorología y oscuridad	Todas las funciones
Reconocimiento de información en 2D	Problemas ópticos (parpadeo, efecto mouré)	Vista de 360°
Precio bajo		

Tabla 4 Pros y contras de la cámara (elaboración propia)

A continuación, se presenta una tabla en la que se comparan los principales sensores empleados en los sistemas ADAS: ultrasonidos, cámaras, radas y lidar. En la tabla se resume sus principales características técnicas y operativas. Con esta tabla comparativa se clarifica las diferencias y similitudes que existen entre los distintos sensores.

	Ultrasonidos	Cámara	Radar	Lidar
Coste	Bajo	Bajo	Medio	Alto
Tamaño	Pequeño	Medio	Pequeño-Medio	Medio-Grande
Rapidez de detección	Baja	Baja	Alta	Media
Sensibilidad a los colores	No	Alta	No	No
Robustez frente al tiempo	Alta	Baja	Alta	Media
Robustez frente al día y la noche	Alta	Baja	Alta	Alta
Resolución	Baja	Alta	Media	Alta
Rango de alcance	Corto	Medio-Largo	Corto, Medio, Largo	Largo

Tabla 5 Comparativa de sensores (elaboración propia)

2.1.5 ACTUADORES

Los actuadores son los elementos encargados de ejecutar físicamente las acciones decididas por la unidad de control electrónico (ECU) del sistema ADAS. Una vez que los sensores han recogido información del entorno y el software ha determinado la acción más adecuada, los actuadores son los responsables de llevarla a cabo sobre los componentes mecánicos del vehículo, como el freno, el acelerador o la dirección. En los vehículos tradicionales, estos sistemas eran puramente mecánicos: el pedal del acelerador accionaba un cable que abría el carburador, el pedal del freno empujaba un pistón que activaba un circuito hidráulico, y el volante giraba directamente las ruedas mediante una conexión mecánica. Sin embargo, en los vehículos modernos equipados con ADAS, estos mecanismos han evolucionado hacia sistemas electromecánicos o electrónicos, lo que permite que el propio vehículo actúe por sí mismo ante determinadas situaciones como, por ejemplo, frenar de emergencia o mantener el carril, incluso sin intervención directa del conductor.

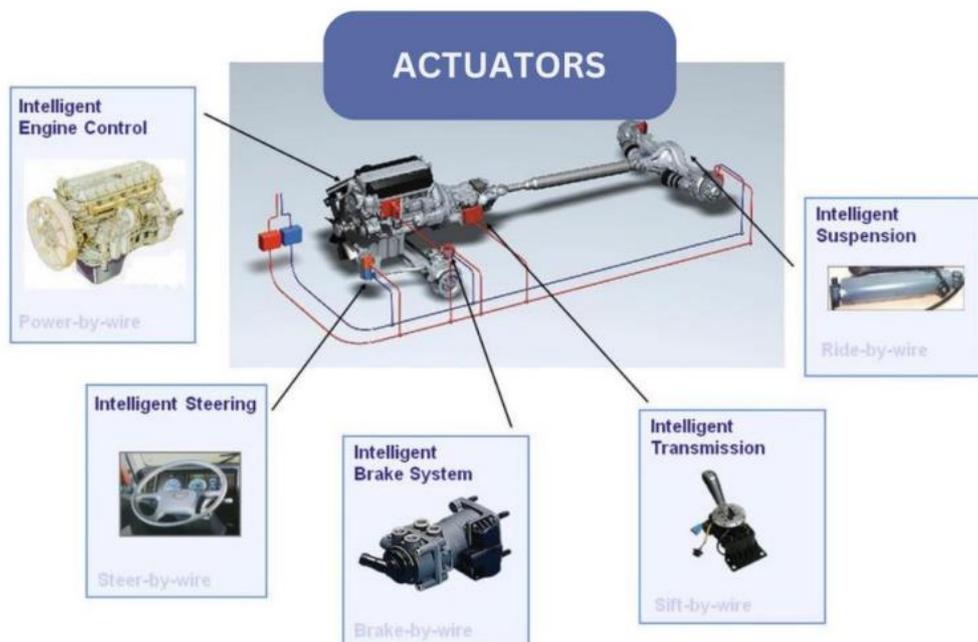


Ilustración 18 Tipos de actuadores (ADAS and sensor technology)

2.2 ETAPAS DEL TRATAMIENTO DE DATOS

En los sistemas ADAS, la toma de decisiones no depende únicamente de la captación de datos del entorno, sino también del proceso en el cual se gestionan y analizan. En este proceso se pueden distinguir varias etapas durante las cuales, los datos obtenidos se transforman en acciones precisas. Este es el verdadero valor de los sistemas ADAS ya que tiene la capacidad de partiendo de señales crudas interpreta el entorno y toman decisiones en tiempo real y de manera segura. Las principales fases son las siguientes:

2.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

El primer paso de este proceso tan complejo consiste en captar los datos del entorno, lo cual se lleva a cabo a través de una combinación de sensores que se instalan de manera estratégica a lo largo del vehículo. Los sensores se encargan de recoger la información esencial para lograr entender el contexto de conducción y detectar aquellos elementos que sean relevantes como vehículos, peatones, señales, obstáculos y condiciones meteorológicas.

El objetivo de esta etapa no reside solamente en captar datos, sino en hacerlos con la mayor precisión, frecuencia y cobertura espacial posible, para alimentar al sistema con información que sea fiable y en tiempo real. Es por esto por lo que se requiere una correcta disposición, calibración y sincronización temporal de todos los sensores para que el sistema pueda operar de forma coherente.

2.2.2 PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Una vez recogidos, los datos procedentes de los sensores deben pasar por un proceso de filtrado de ruido, que elimina las pequeñas fluctuaciones o errores generados por interferencias o condiciones externas. Esto permite obtener señales más estables y fiables para su posterior análisis.

Por otro lado, en esta etapa también se lleva a cabo la sincronización temporal. Debido a que cada sensor opera con distinta frecuencia y estos pueden registrar eventos en diferentes momentos, es necesario alinear todos los datos en el tiempo para asegurar que correspondan

al mismo instante de observación. Al mismo tiempo, se aplica interpolación para obtener una imagen completa en caso de que existan datos faltantes, lo que ayuda a mantener la continuidad en las mediciones.

Por último, en esta etapa también se calculan variables que se obtienen a partir de los datos brutos, como velocidad, aceleración, distancias relativas o ángulos. Estas variables enriquecen la información original y son clave para que el sistema pueda anticipar riesgos y tomar decisiones precisas en las siguientes fases.

2.2.3 ASOCIACIÓN DE LOS DATOS

Una vez preprocesados, los datos recogidos por distintos sensores deben ser agrupados y asociados para que el sistema pueda identificar si diferentes señales hacen referencia al mismo objeto o situación en el entorno. Este paso se necesita para evitar datos duplicados y garantizar una percepción que sea coherente. Un ejemplo en el que se puede ver claramente es cuando el radar y el lidar detectan simultáneamente el mismo objeto. Aunque los dos sensores recogen distintos tipos de datos en cuanto a distancia, velocidad o nubes de puntos, el sistema tiene que ser capaz de agrupar las detecciones que se correspondan a un solo objeto. Esta tarea se denomina asociación sensorial.

Para llevar a cabo esta función, se emplean técnicas como el clustering. El clustering es un método de machine learning no supervisado, el cual agrupa puntos de datos similares según sus características compartidas, como la posición, la forma o el movimiento. Esta técnica permite descubrir patrones, reducir ruido y simplificar los datos, lo que facilita el análisis posterior. En el caso de un sensor lidar, se agrupan los puntos detectados en diferentes regiones del espacio para identificar vehículos, peatones u otros elementos. Luego, estos grupos pueden ser fusionados con los obtenidos por otros sensores como el radar, dando lugar a una detección conjunta y más precisa del objeto.

Gracias a la asociación de datos, el sistema es capaz de crear una representación con mayor precisión sobre la cual se podrá aplicar posteriormente las siguientes etapas de proceso como el seguimiento de objetos o la predicción de trayectorias.

2.2.4 FUSIÓN DE LOS SENSORES

En los sistemas ADAS existen problemas derivados de los procesos de fabricación de los distintos sensores ya que cumplen con unas tolerancias dando lugar a ciertas incertidumbres. Estas limitaciones de los sensores generan incertidumbre en las mediciones que llevan a cabo, lo que puede dar lugar a que las detecciones sean imprecisas o incluso contradictorias. Es fundamental mitigar estas incertidumbres lo máximo posible, por lo que se utiliza la fusión de sensores para lograr una mayor precisión.

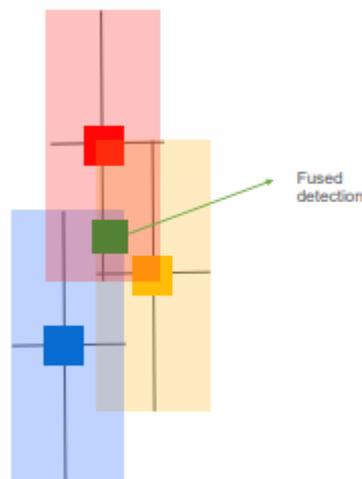


Ilustración 19 Fusión de sensores (ADAS and sensor technology)

La fusión de sensores tiene como principales objetivos los siguientes:

- Aprovechar las fortalezas propias de cada sensor.
- Compensar las incertidumbres y debilidades específicas de cada uno.
- Disponer de una única representación integrada y confiables sobre la que el sistema pueda tomar decisiones de forma segura.

Existen distintos tipos de fusión de sensores según cuando se realiza la fusión en la cadena de procesamiento:

- Fusión de los datos en bruto: los datos se combinan en su forma original sin haber sido preprocesados. Este modelo es útil en el caso de que los sensores sean

homogéneos, pero puede ser un proceso lento debido a la gran cantidad de información además de que es sensible a fallos individuales.

- Fusión de las características: en este caso cada sensor se encarga de extraer sus propias características antes de fusionarlas. Este modelo reduce la carga de información, pero requiere una buena selección de atributos y grandes conjuntos de entrenamiento para que sea capaz de reconocer patrones.
- Fusión de decisiones: cada sensor produce una hipótesis y el sistema elige la más probable mediante algoritmos. Es una opción que se comporta mejor en caso de errores, pero depende de que cada sensor esté bien calibrado y aislado en su proceso de decisión.

Además del momento de la fusión, también se distinguen tres enfoques de cooperación entre sensores:

- Fusión competitiva: varios sensores detectan el mismo objeto y se combinan sus resultados para aumentar la fiabilidad.
- Fusión complementaria: cada sensor aporta información distinta del entorno. Por ejemplo, la velocidad medida por el radar puede combinarse con el estado del vehículo para tener una visión más global.
- Fusión cooperativa: los sensores colaboran activamente para construir una representación del entorno, como ocurre con cámaras que generan una vista 3D mediante triangulación o con radares de largo alcance.

2.2.5 RASTREO DE OBJETOS

El rastreo de objetos en los ADAS consiste en vincular las detecciones de sensores con los objetos del entorno del vehículo a lo largo del tiempo. Esto permite al sistema reconocer la continuidad de un elemento, como un vehículo o un peatón, incluso cuando cambia de posición o apariencia. A cada objeto se le asigna un identificador único, lo que posibilita un seguimiento continuo en cada momento.

Al mantener este seguimiento persistente, el sistema puede extraer información dinámica. A partir del desplazamiento de cada objeto, se calculan mediciones cinemáticas. Estas incluyen la velocidad del objeto, su aceleración y su rotación. Esta capacidad es fundamental para las funciones ADAS avanzadas, ya que proporciona una comprensión en tiempo real del comportamiento de otros elementos en la carretera.

La importancia de este proceso completo en los sistemas ADAS es clave para entender cómo contribuyen a reducir los accidentes. Cada una de las fases, desde la adquisición de datos hasta el seguimiento de objetos, permite al vehículo interpretar el entorno de forma cada vez más precisa. No se trata solo de detectar obstáculos, sino de darles sentido: limpiar los datos, unirlos correctamente, combinar la información para reducir errores y seguir la evolución de lo que ocurre alrededor. Gracias a esto, el sistema puede anticiparse a situaciones de riesgo, alertar al conductor con tiempo o incluso intervenir directamente si es necesario. Esta capacidad de leer el entorno de forma global y en tiempo real marca la diferencia entre una conducción reactiva y una conducción realmente preventiva, ayudando a evitar accidentes o al menos a reducir su gravedad.

2.3 ARQUITECTURA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

El avance continuo de los sistemas ADAS en los vehículos modernos exigen una arquitectura E/E (eléctrica y electrónica) cada vez más sofisticada. Esta arquitectura está compuesta por una red de unidades de control, actuadores, sensores y módulos de comunicación que permiten el funcionamiento coordinado de las funciones de asistencia a la conducción. A medida que estas funciones se han multiplicado, la arquitectura E/E ha tenido que evolucionar para garantizar una comunicación eficiente.

2.3.1 COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA

La arquitectura eléctrica y electrónica se compone de cuatro elementos principales que trabajan conjuntamente:

- Unidades de control electrónicas (ECU): son sistemas que se dedican a controlar uno o varios subsistemas eléctricos del vehículo, desde la gestión del motor hasta el funcionamiento de las ventanillas.
- Sensores: como se ha mencionado con anterioridad, son los dispositivos encargados de recolectar la información del entorno.
- Actuadores: se encargan de ejecutar las órdenes recibidas de las ECUs.
- Redes de comunicación: son los sistemas que permiten que el resto de los componentes intercambien datos de manera eficaz.

2.3.2 TIPOS DE ARQUITECTURAS

Debido a la constante evolución de los sistemas ADAS y a su necesidad de ser más rápidos y eficientes, las arquitecturas E/E también han evolucionado de sistemas más simples a modelos mucho más complejos. A continuación, se desarrollan distintos tipos de arquitecturas.

2.3.2.1 Arquitectura Distribuida

En las arquitecturas distribuidas, las ECUs en el vehículo se encargan de gestionar cada una de ellas funciones específicas aisladas. Por ejemplo, una ECU se encargaría del frenado, mientras que otra dirigiría la dirección. Aunque las ECUs sean individuales, todas se conectan a través de una red de comunicación como CAN o LIN. Este sistema es sencillo de implementar para sistemas poco complejos, sin embargo, supone mucho cableado influyendo negativamente en el peso del vehículo.

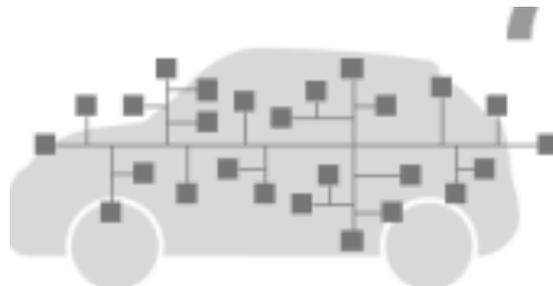


Ilustración 20 Arquitectura distribuida (ADAS and sensor technology)

2.3.2.2 Arquitectura De Dominio

Este sistema es una evolución del anterior, ya que agrupa las ECUs por distintos dominios dependiendo de las funciones que realizan. Cada dominio cuenta con un procesador que gestiona las ECUs relacionadas dentro de él. Este diseño reduce la complejidad del cableado al consolidar funciones similares y permite una comunicación más eficiente dentro de los dominios. También simplifica las actualizaciones o la escalabilidad al centrarse en áreas funcionales específicas. Sin embargo, la comunicación entre diferentes dominios puede convertirse en un cuello de botella, especialmente para sistemas sensibles al tiempo como los ADAS.

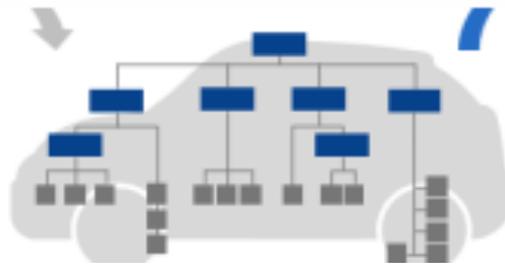


Ilustración 21 Arquitectura de dominio (ADAS and sensor technology)

2.3.2.3 Arquitectura De Zona

El enfoque más avanzado es la arquitectura zonal, que divide el vehículo en zonas físicas. Cada zona controla todas las ECUs y sensores ubicados físicamente en esa área, independientemente de su función. La comunicación entre estas zonas se produce a través de una red troncal de alta velocidad, típicamente Ethernet. Esta arquitectura reduce significativamente el cableado, lo que se traduce en un menor peso y coste. También permite el procesamiento centralizado, simplificando las actualizaciones y la gestión del software, y es altamente escalable y adaptable para futuras innovaciones como la conducción autónoma.

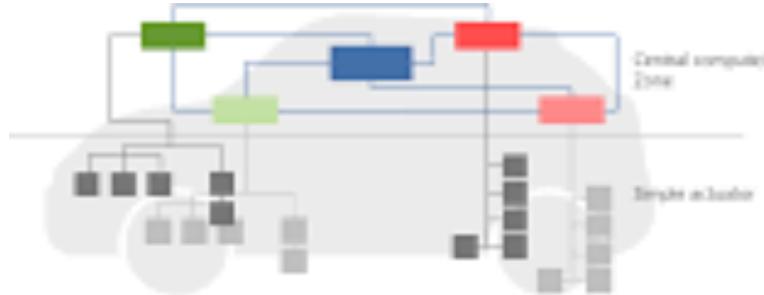


Ilustración 22 Arquitectura de Zona (ADAS and sensor technology)

2.3.3 REDES DE COMUNICACIÓN

Las redes de comunicación, a menudo denominadas buses, son las vías que permiten que los diferentes componentes electrónicos en un vehículo intercambien información. Se basan en protocolos de comunicación, que son reglas y formatos estandarizados que permiten a los dispositivos de la red interactuar e intercambiar datos de forma efectiva.

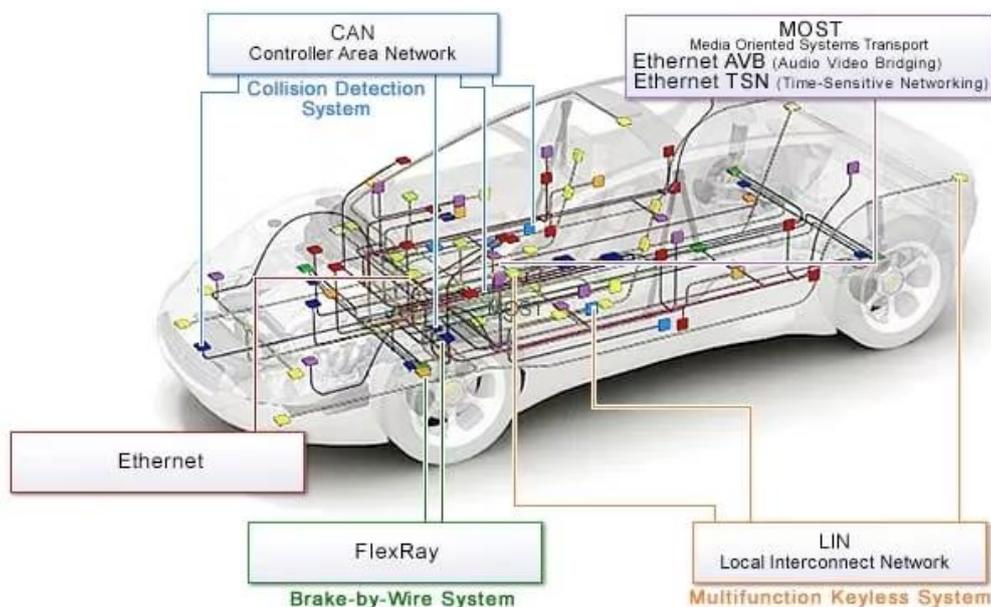


Ilustración 23 Redes de comunicación (ADAS and sensor technology)

2.3.3.1 Controller Area Network (CAN)

El bus CAN es uno de los sistemas de comunicación más extendidos en la automoción. Diseñado para reducir el cableado y mejorar la fiabilidad, permite que múltiples unidades de control compartan información sin necesidad de un nodo central. Es la mejor opción para funciones críticas, pero con baja demanda de datos, como el control del motor o la gestión de sistemas eléctricos básicos. Su gran ventaja es su robustez frente a interferencias y su sistema de priorización de mensajes, aunque no está pensado para transmitir grandes volúmenes de datos como imágenes de cámaras.

2.3.3.2 Automotive Ethernet

Esta red está diseñada para satisfacer las crecientes necesidades de ancho de banda en los vehículos modernos, especialmente con la incorporación de sistemas ADAS y funciones de conducción autónoma. Soporta velocidades desde 100 Mbps hasta 1 Gbps, lo que la convierte en la opción más adecuada para la transmisión de vídeo, datos de radar, lidar o comunicación V2X. Su baja latencia y escalabilidad permiten la implementación de funciones críticas en tiempo real. Sin embargo, su integración requiere una arquitectura más compleja y mayores costes en infraestructura, además de una configuración cuidadosa para asegurar la sincronización precisa de datos sensibles al tiempo.

2.3.3.3 Local Interconnect Network (LIN)

LIN es una red de bajo coste y baja velocidad, orientada a funciones auxiliares que no requieren tiempos de respuesta estrictos. Se basa en una arquitectura maestro-esclavo y suele utilizarse para gestionar sistemas como retrovisores, iluminación interior, elevalunas o climatización. Aunque no es apta para aplicaciones de seguridad ni para ADAS, su simplicidad y coste reducido la hacen ideal para optimizar recursos en funciones no críticas.

2.3.3.4 FlexRay

Está diseñado para sistemas de seguridad críticos que requieren sincronización precisa y alta fiabilidad, como la dirección asistida electrónica, la suspensión activa o el freno electrónico. Ofrece una velocidad de hasta 10 Mbps, con topologías flexibles y redundancia integrada,

lo que garantiza su funcionamiento incluso en caso de fallo parcial. Su capacidad para mantener la sincronización entre nodos en tiempo real lo convierte en una opción sólida para entornos exigentes, aunque con un coste más elevado que otros buses.

2.3.3.5 Media Oriented Systems Transport (MOST)

Es un bus pensado para la transmisión de datos multimedia en vehículos, especialmente útil en sistemas de entretenimiento y, en algunos casos, en ADAS que integran cámaras para funciones como el aparcamiento. Puede alcanzar velocidades de hasta 150 Mbps, utilizando topologías en anillo o estrella. Aunque es eficaz para manejar audio y vídeo, no está diseñado para funciones de seguridad que requieran baja latencia, y es menos flexible que otras soluciones como Ethernet.

Bus	Vel. máx	Aplicaciones	Complejidad	Coste
CAN	1 Mbps (CAN FD: 5-8 Mbps)	Control de carrocería, sensores básicos, diagnóstico	Media	Bajo
Ethernet	1 Gbps	Cámaras, lidar, radar, infoentretenimiento avanzado, V2X	Muy Alta	Medio/Alto
LIN	20 Kbps	Funciones periféricas (luces, espejos, A/C)	Baja	Muy Bajo
FlexRay	10 Mbps	Sistemas críticos (frenos, dirección, suspensión)	Alta	Alto
MOST	150 Mbps	Sistemas multimedia, datos de sensores de vídeo (asistencia aparcamiento)	Media	Medio

Tabla 6 Comparativa de Buses (elaboración propia)

En los vehículos modernos, la arquitectura E/E, que organiza los componentes electrónicos y el software, es de vital importancia para el despliegue y la eficacia de los sistemas ADAS,

fundamentales en la reducción del número de accidentes. Esta arquitectura ha evolucionado desde modelos distribuidos, donde ECUs individuales se comunican mediante redes como CAN o LIN, hacia diseños de dominio, que agrupan ECUs funcionalmente, y finalmente a la arquitectura zonal. Esta última, la más avanzada, divide el vehículo en zonas físicas, concentrando sensores y ECUs en cada una y comunicándose a través de una red troncal de alta velocidad como Automotive Ethernet. Esta evolución es crucial porque permite manejar el inmenso volumen de datos de sensores de ADAS con el alto ancho de banda y la baja latencia necesarios. Al asegurar que la información crítica del entorno se procese y transmita de forma rápida y fiable a través de redes robustas, la arquitectura E/E capacita a los ADAS para detectar riesgos, predecir colisiones e intervenir con precisión en tiempo real, lo que se traduce directamente en una mejora sustancial de la seguridad vial y una reducción significativa de los siniestros.

Capítulo 3. MARCO REGULATORIO

El desarrollo e implementación de los sistemas ADAS no solo depende del avance tecnológico, sino también de un marco regulatorio que garantice su seguridad, fiabilidad y correcto funcionamiento. El marco regulatorio de los sistemas ADAS está formado por una combinación de normativas internacionales, europeas y nacionales. Además, estos sistemas vienen regulados por unos estándares técnicos y programas de evaluación del consumidor, los cuales guían en el diseño e implementación de esta tecnología. Conforme los vehículos se acercan a niveles más altos de automatización, el papel que juega la regulación es más crucial para asegurar una transición segura hacia la conducción autónoma.

3.1 REGULACIÓN INTERNACIONAL, DE LA UE Y ESPAÑA

Muchas de las normativas se remontan a mediados del siglo XX, han evolucionado para incluir disposiciones específicas sobre la automatización de la conducción y el uso de ADAS. Entre los más relevantes destacan la convención de Ginebra (1949) y la convención de Viena (1968), así como los acuerdos de 1958 y 1998, que sirven de base para la aprobación técnica de vehículos y el establecimiento de reglamentos técnicos globales.

Cada uno de estos instrumentos cumple un rol específico: desde establecer normas generales de circulación vial hasta definir requisitos técnicos para homologaciones internacionales de vehículos equipados con tecnologías automatizadas. Su correcta interpretación y aplicación es clave para la implementación segura y legalmente reconocida de los vehículos con ADAS y funciones de conducción autónoma a nivel mundial.

3.1.1 REGULACIÓN INTERNACIONAL UNECE

A nivel global, la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE) desempeña un papel clave en la armonización de las normativas relacionadas con la seguridad vial y la tecnología relacionada con la conducción autónoma. A través de su foro mundial para la armonización de las regulaciones de vehículos (WP.29), este organismo

establece marcos legales que son adoptados por numerosos países, permitiendo una mayor uniformidad en el desarrollo e implementación de tecnologías como los ADAS.

Entre los avances recientes destaca la aprobación de las regulaciones relativas a los Sistemas de Asistencia al Control del Conductor (DCAS), que se corresponden con el nivel 2 de automatización según la clasificación de la SAE. Estas regulaciones, en vigor desde septiembre de 2024, establecen criterios específicos de seguridad y rendimiento. Al ser de nivel 2, subraya la responsabilidad del conductor en todo momento y exigiendo a los fabricantes que comuniquen de forma clara las limitaciones de estos sistemas.

Además, la UNECE continúa avanzando en el desarrollo normativo para niveles más elevados de automatización, a través del grupo de trabajo sobre vehículos autónomos. Este grupo aborda desafíos técnicos, legales y éticos relacionados con los ADAS, sentando las bases para una futura movilidad autónoma segura y coordinada a nivel internacional.

3.1.2 REGULACIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA

La Unión Europea ha ayudado significativamente en la implementación de normativas que obligan la inclusión de ADAS específicos. El Reglamento (UE) 2019/2144, conocido como el reglamento general de seguridad, es una pieza legislativa clave que establece una serie de sistemas ADAS cuya obligatoriedad se ha introducido de forma escalonada. Desde julio de 2022, estos sistemas son obligatorios para todos los nuevos modelos de vehículos. A partir de julio de 2024, la obligatoriedad se extiende a todas las nuevas matriculaciones de vehículos, incluyendo modelos ya existentes en producción. Esta normativa abarca una amplia gama de ADAS, desde sistemas básicos hasta otros más avanzados, con el objetivo de mejorar drásticamente la seguridad vial en toda la UE.

3.1.3 REGULACIÓN EN ESPAÑA

En España, el marco regulatorio de seguridad vehicular y ADAS se encuentra alineado directamente con las normativas de la Unión Europea. La legislación española, por tanto, se rige según los requisitos del Reglamento (UE) 2019/2144. Esto significa que los vehículos nuevos matriculados en España deben cumplir con la obligatoriedad de diversos sistemas

ADAS, los cuales contribuyen a la prevención de accidentes y a la protección de los ocupantes y otros usuarios de la vía.

3.1.4 EJEMPLOS DE REGULACIÓN DE LOS ADAS

Las regulaciones no solo imponen la presencia de ADAS, sino que también establecen criterios de rendimiento y seguridad que influyen directamente en el diseño del vehículo. A continuación, se dan algunos ejemplos de normas que influyen tanto en los ADAS como en la seguridad y ciberseguridad.

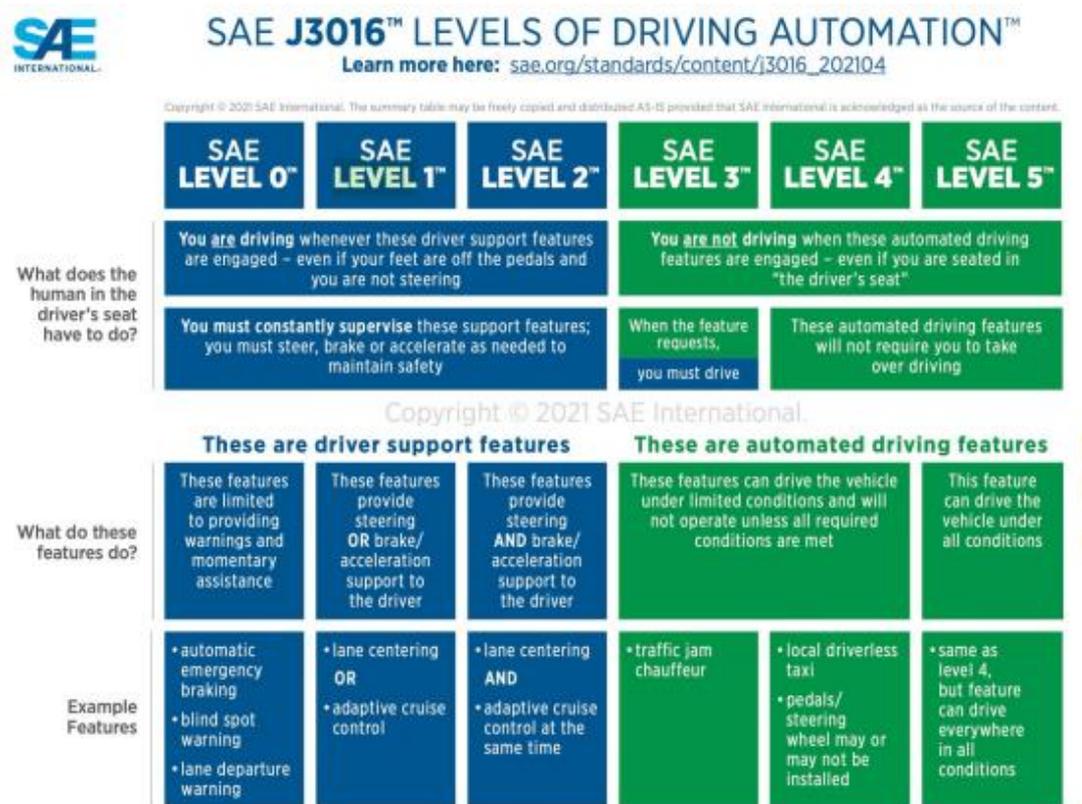
- UN R79 se refiere a funciones de dirección (ADAS): Regula sistemas de dirección, incluyendo LKAS (Lane Keeping Assist System), ELKS (Emergency Lane Keeping System) y CSF (Control Software Function). Define categorías para la función de dirección asistida automáticamente, desde advertencia de salida de carril hasta sistemas de cambio de carril, y sistemas de estacionamiento.
- UN R152 (AEBS) y UN R131 (frenado de emergencia avanzado para vehículos pesados): Estas regulaciones aseguran un frenado oportuno para mitigar colisiones con vehículos y peatones. Establecen criterios de rendimiento para rangos de detección y tiempos de reacción.
- UN R155 (Ciberseguridad): Obliga a la protección contra amenazas cibernéticas para sistemas conectados y automatizados. Requiere gestión de riesgos y actualizaciones de software seguras.

3.2 ESTÁNDARES TÉCNICOS

Los estándares técnicos son documentos elaborados por organismos de normalización que proporcionan guías detalladas, requisitos y metodologías para el diseño y validación de sistemas. En el ámbito de los ADAS, son fundamentales para garantizar la interoperabilidad y la seguridad de estas tecnologías. Actúan como un lenguaje común y un conjunto de mejores prácticas que complementan la legislación.

3.2.1 SAE J3016

El estándar SAE J3016, lo desarrolla la Sociedad de Ingenieros de Automoción, la cual es universalmente reconocida como la referencia principal para clasificar los niveles de automatización de la conducción. Su objetivo es proporcionar una taxonomía clara y una terminología estandarizada para facilitar la comunicación y la comprensión entre reguladores, ingenieros, fabricantes y el público en general. Esta clasificación es crucial para diferenciar las capacidades de los sistemas y el papel que tiene el conductor en cada etapa de la automatización.



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™
Learn more here: sae.org/standards/content/j3016_202104

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering.			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in "the driver's seat"		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	<ul style="list-style-type: none"> • automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering OR • adaptive cruise control 	<ul style="list-style-type: none"> • lane centering AND • adaptive cruise control at the same time 	<ul style="list-style-type: none"> • traffic jam chauffeur 	<ul style="list-style-type: none"> • local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed 	<ul style="list-style-type: none"> • same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Copyright © 2021 SAE International.

Ilustración 24 SAE J3016 (Norma SAE)

3.2.2 ISO 26262

La norma ISO 26262 es un estándar internacional de seguridad funcional que se aplica a los sistemas eléctricos y electrónicos relacionados con la seguridad en vehículos de carretera.

Su propósito central es reducir los riesgos de seguridad que surgen de fallos aleatorios de hardware, como un cortocircuito y fallos de software, como errores en el diseño o el proceso que son replicables. Es un pilar para asegurar que los sistemas ADAS y ADS respondan de manera segura y controlada incluso cuando ocurren fallos.

Un componente clave de la ISO 26262 es el análisis de peligros y la evaluación de riesgos (HARA). Esto permite identificar peligros, determinar su gravedad, la probabilidad de exposición y la controlabilidad por parte del conductor. A partir del HARA, se asignan los distintos niveles de integridad de seguridad automotriz (ASIL), que van desde la letra A, el nivel de riesgo más bajo y menos riguroso en los requisitos de seguridad hasta a la D, el cual es el nivel de riesgo más alto y por lo tanto tiene los requisitos más estrictos.

	ASIL-A	ASIL-B	ASIL-C	ASIL-D
SPF (Single Point fault) Metric	Not Applicable	> 90%	> 97%	> 99%
LF (Latent Fault) Metric	Not Applicable	> 60%	> 80%	> 90%
Failure rate	10^{-6} /hour	10^{-7} /hour	10^{-7} /hour	10^{-8} /hour
FIT (failure in time)	< 1,000 FIT	< 100 FIT	< 100 FIT	< 10 FIT

Ilustración 25 Niveles ASIL (ADAS and sensor technology)

3.2.3 ISO 21448

Mientras que la ISO 26262 se ocupa de la seguridad causada por fallos del sistema, la ISO 21448, aborda un desafío diferente pero igualmente crítico. Este desafío se refiere a los riesgos de seguridad que pueden surgir debido a insuficiencias funcionales o del uso indebido. Esto afecta incluso cuando el sistema está operando tal como fue diseñado y sin defectos. Es decir, un sistema puede no tener fallos de hardware o software, cumpliendo así con la norma ISO 26262, pero aun así causar un incidente debido a que su funcionalidad prevista no es suficientemente robusta para todas las situaciones del mundo real, o porque el

conductor lo utiliza de una manera no prevista por el diseño. Esto incluye, por ejemplo, escenarios donde un sensor puede no detectar un objeto debido a condiciones de iluminación extremas, o un algoritmo de percepción malinterpreta una situación de tráfico compleja.

3.2.4 UL 4600

Es un estándar que ha sido desarrollado por Underwriters Laboratories (UL). La norma UL 4600 ofrece una guía integral para la evaluación de la seguridad de productos autónomos, con una atención especial en aquellos sistemas que están diseñados para operar sin la necesidad de un operador humano, como los vehículos autónomos de nivel 4 y nivel 5. A diferencia de otras normas que pueden centrarse en componentes específicos o en la seguridad funcional debida a los fallos, UL 4600 se centra en construir un caso de seguridad para todo el sistema autónomo en su conjunto.

El estándar UL 4600 proporciona un enfoque integral para garantizar la seguridad de los sistemas autónomos. Cubre desde la fiabilidad de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, hasta la validación en escenarios reales y la ciberseguridad. Además, contempla la seguridad durante todo el ciclo de vida del producto. Se complementa con normas como ISO 26262 y ISO 21448, ofreciendo una visión más completa y práctica para certificar tecnologías autónomas.

3.3 PROGRAMAS DE EVALUACIÓN DEL CONSUMIDOR

Además de las regulaciones legales y los estrictos estándares técnicos, los programas de evaluación del consumidor desempeñan una función fundamental en el fomento de la seguridad vehicular. Su función principal es doble: por un lado, informan al público sobre el rendimiento de seguridad de los vehículos, y por otro, ejercen una presión significativa sobre los fabricantes para que superen los requisitos mínimos obligatorios, impulsando así una mejora continua en el diseño y la integración de las tecnologías ADAS.

3.3.1 EURO NCAP

Euro NCAP es una organización que se ha consolidado como un referente global en la evaluación de la seguridad de automóviles nuevos. Su metodología va más allá de las tradicionales pruebas de choque, las cuales analizan la seguridad pasiva. Esta organización ha evolucionado para incluir una evaluación exhaustiva del rendimiento de la seguridad activa y de los sistemas ADAS. Los resultados de sus pruebas se publican en forma de calificaciones de estrellas, que proporcionan una guía clara y fácilmente comprensible para los consumidores.



Ilustración 26 Logo Euro NCAP (EURONCAP)

El impacto de Euro NCAP en el desarrollo de ADAS y ADS es considerable. Sus protocolos de prueba promueven activamente la adopción de sistemas de seguridad avanzados, tales como el frenado autónomo de emergencia para vehículos, peatones y ciclistas, los sistemas de mantenimiento de carril y el control de crucero adaptativo. Al evaluar rigurosamente el rendimiento de estos sistemas, Euro NCAP no solo incentiva a los fabricantes a integrar estas tecnologías, sino también a asegurar que sus diseños sean efectivos en situaciones reales. A partir de 2020, la organización introdujo una calificación separada para la asistencia en autopista, en la cual evalúa dos dimensiones. La primera es la competencia de asistencia, que analiza el equilibrio entre la intervención del conductor y la asistencia del vehículo. La segunda es el respaldo de seguridad, que se define como la capacidad del sistema para actuar como respaldo en caso de fallo. Esto empuja a la industria a desarrollar sistemas de automatización de nivel 2 o más cada vez más sofisticados y seguros.

3.3.2 NHTSA

En Estados Unidos, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) es la agencia gubernamental encargada de garantizar la seguridad vial y reducir el número de accidentes de tráfico. Uno de sus programas más influyentes es el New Car Assessment Program (NCAP), que evalúa los vehículos en cuanto a su resistencia a los choques mediante pruebas estandarizadas, publicando valoraciones de 5 estrellas.



Ilustración 27 Logo NHTSA (NHTSA)

Más allá de la seguridad pasiva, la NHTSA también se enfoca en el equipamiento y el rendimiento de las tecnologías ADAS. A través de su NCAP, la agencia recomienda activamente tecnologías de seguridad avanzadas que han superado sus propios criterios de prueba de rendimiento. Los planes futuros de la NHTSA incluyen la expansión de sus pruebas para incorporar los sistemas de conducción automatizada de mayor nivel. Esta evolución en los protocolos de prueba y las recomendaciones busca no solo mejorar la seguridad de los vehículos vendidos en los Estados Unidos, sino también fomentar la confianza del consumidor en las tecnologías emergentes de automatización de la conducción.

Capítulo 4. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Máster tiene como propósito fundamental evaluar el impacto que los Sistemas Avanzados de Asistencia a la Conducción tienen en la reducción de la siniestralidad vial en España. Debido a que estas tecnologías se posicionan como uno de los puntos clave para mejorar la seguridad en carretera, este proyecto se va a abordar desde un enfoque tanto técnico como analítico. El proyecto se va a llevar a cabo con el apoyo de datos reales y literatura científica contrastada. Para ello, se establecen los objetivos que se desarrollan a continuación.

4.1 OBJETIVOS

- Comprender el funcionamiento de los sistemas ADAS y su base tecnológica.

En primer lugar, se explicará con detalle el funcionamiento de los ADAS, dando a conocer los diferentes sensores implicados, los actuadores y la lógica de control que permite su intervención sobre el vehículo. Se analizarán distintos tipos de sistemas como el frenado autónomo de emergencia, el asistente de mantenimiento de carril, la detección de ángulo muerto, entre otros, con el fin de entender cómo contribuyen individual y colectivamente a reducir los errores humanos al volante.

- Analizar el marco normativo que regula el uso de ADAS.

Se revisará el marco regulatorio que rige la implementación de estos sistemas, tanto a nivel internacional (UNECE y acuerdos multilaterales), como en el ámbito de la Unión Europea (Reglamento 2019/2144) y en la legislación española. Este análisis permitirá entender cómo las exigencias legales están impulsando la incorporación progresiva de estas tecnologías en los nuevos vehículos, así como los niveles mínimos de seguridad y rendimiento exigidos.

- Justificar su relevancia en la reducción de accidentes.

Una vez entendido el contexto técnico y legal, se buscará demostrar la relación directa entre la incorporación de los sistemas ADAS y la mejora de la seguridad vial. Se explicará cómo estos sistemas suponen un avance respecto a los métodos

tradicionales de prevención de accidentes, al actuar en tiempo real y ofrecer funciones que superan las capacidades humanas en cuanto a términos de atención, tiempo de reacción o visibilidad.

- *Evaluar su grado de implantación en el parque automovilístico español.*

Se investigará en qué medida los vehículos con ADAS están presentes actualmente en España. Para ello, se recopilarán datos de fuentes oficiales como la Dirección General de Tráfico, se analizará la evolución de los últimos años y se clasificará el parque por tipos de vehículos, antigüedad y nivel de automatización. Este análisis permitirá contextualizar el alcance real de estas tecnologías en el país.

- *Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva.*

Como parte del enfoque metodológico, se llevará a cabo una revisión crítica de artículos científicos, informes técnicos y estudios institucionales que aborden el impacto de los ADAS en la reducción de siniestralidad. Esta revisión permitirá contrastar hipótesis, identificar tendencias globales y validar las conclusiones obtenidas a través del análisis de datos en España.

- *Desarrollar un análisis estadístico de la siniestralidad en España.*

A partir de las bases de datos públicas sobre accidentes de tráfico proporcionadas por la DGT, se elaborará un estudio cuantitativo que evalúe la evolución de la siniestralidad en relación con el aumento progresivo de la presencia de ADAS en el parque móvil.

- *Elaborar un estudio de impacto económico asociado a la renovación del parque automovilístico.*

Finalmente, se desarrollará un análisis económico que cuantifique el impacto positivo de una hipotética renovación total del parque automovilístico español con vehículos equipados con ADAS. El estudio se centrará en estimar los beneficios en términos de vidas humanas salvadas, reducción del número y gravedad de los accidentes, y el consiguiente ahorro económico. Esto incluirá el descenso esperado en los costes sanitarios derivados de la atención a víctimas, la disminución en las indemnizaciones pagadas por las aseguradoras.

4.2 ALINEACIÓN CON LOS ODS

La movilidad del futuro no puede entenderse sin un enfoque transversal que incorpore sostenibilidad, seguridad y tecnología. En este contexto, el proyecto se alinea directamente con la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, al abordar uno de los retos más urgentes en el ámbito del transporte. Este reto se refiere a la reducción de la siniestralidad vial. A través del estudio del impacto real de los ADAS y de los vehículos autónomos en la seguridad vial en España, esta investigación contribuye de forma significativa al logro de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible.



Ilustración 28 ODS (ODS)

- ODS 3: Salud y bienestar.

Este trabajo pretende contribuir a la mejora de la seguridad vial mediante el análisis riguroso del efecto de las tecnologías de asistencia a la conducción sobre la siniestralidad. Se busca entender su impacto real en la reducción de accidentes y víctimas mortales en carretera, en línea directa con la meta 3.6: “Reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo de

aquí a 2030”. Al fomentar el uso de vehículos más seguros y tecnologías preventivas, se promueve activamente el derecho a una movilidad más saludable y segura.

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

La incorporación de sistemas ADAS y de automatización vehicular impulsa la innovación en el sector de la automoción, así como la modernización de las infraestructuras necesarias para soportar su uso masivo. El proyecto promueve un modelo de transporte más tecnológico, resiliente y sostenible, alineado con la meta 9.4, que aboga por la adopción de tecnologías limpias y ambientalmente racionales en los sectores industriales, incluida la movilidad.

- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.

a reducción de accidentes, especialmente en zonas urbanas, es clave para construir ciudades más seguras y habitables. La automatización y la asistencia avanzada a la conducción permiten no solo mejorar la seguridad, sino también ofrecer soluciones de transporte más accesibles para personas mayores o con movilidad reducida. Este trabajo apoya la meta 11.2: “Proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos”, con especial atención a los colectivos vulnerables.

- ODS 13: Acción por el clima.

Aunque el foco principal del proyecto es la seguridad vial, no se puede ignorar el impacto ambiental del parque automovilístico actual. La renovación progresiva hacia vehículos equipados con tecnologías ADAS suele coincidir con una reducción en emisiones contaminantes, debido al uso de vehículos más eficientes y optimización de trayectos gracias a sistemas inteligentes. Así, el estudio contribuye indirectamente a la meta de mitigación del cambio climático, alineándose con los principios del ODS 13 mediante una movilidad más eficiente y con menor huella de carbono.

En definitiva, este proyecto tiene como finalidad proporcionar una visión global, técnica y cuantitativa del impacto real que los sistemas ADAS y la automatización vehicular pueden tener en la seguridad vial en España. A través de un enfoque que combina análisis regulatorio, revisión científica, estudio de datos reales y evaluación económica, se busca fundamentar con rigor si estas tecnologías representan una solución efectiva, viable y

necesaria para reducir la siniestralidad y avanzar hacia una movilidad más segura, sostenible y moderna.

Capítulo 5. INTRODUCCIÓN ADAS EN ESPAÑA

Desde que la Unión Europea ha establecido que ciertos ADAS sean obligatorios en los coches nuevos a partir de julio de 2024, es natural pensar que las carreteras se están volviendo mucho más seguras de forma inmediata. Sin embargo, la realidad es un poco más compleja y se mueve a dos velocidades. Por un lado, es cierto que los vehículos que salen de fábrica hoy en día están repletos de estas innovaciones y ofrecen un nivel de seguridad activa sin precedentes. Los fabricantes están haciendo un gran esfuerzo por integrar estos sistemas, y las cifras de ventas de coches nuevos lo demuestran. Pero, por otro lado, no se debe olvidar que un coche no se compra todos los días. El parque automovilístico español es, en general, bastante antiguo, y esto crea una brecha importante entre la tecnología disponible en los modelos más recientes y la que realmente circula por las carreteras.

5.1 PENETRACIÓN DE ADAS EN VEHÍCULOS NUEVOS

La oferta de vehículos nuevos en España en 2024 es un claro reflejo de la apuesta por la seguridad y la tecnología. Los fabricantes están incorporando masivamente los ADAS, en gran parte debido a la normativa europea, especialmente el Reglamento (UE) 2019/2144, que ha establecido la obligatoriedad de ciertos sistemas para las nuevas matriculaciones a partir de julio de 2024.

Según el "Barómetro sobre Vehículo Conectado y Autónomo 2024" de ANFAC, la presencia de ADAS en los modelos nuevos es muy elevada en todos los segmentos de vehículos. A continuación, se muestra una representación de distintos tipos de vehículos y como están gestionando estas incorporaciones.

- **Turismos:**

Un 81% de los modelos de turismos que se ofrecen en España ya pueden incorporar tecnología para un nivel de autonomía SAE 2. Incluso un 18% de los modelos son capaces de integrar el nivel SAE 3, que como ya se ha explicado significa una

automatización parcial, donde el sistema puede monitorizar el entorno, pero el conductor debe estar listo para intervenir.

- Vehículos Comerciales Ligeros:

En el segmento de los vehículos comerciales ligeros, la adopción de los ADAS también es significativa. El 57% de los modelos disponibles en el mercado ya ofrecen un nivel de autonomía SAE 2. En cuanto a funcionalidades específicas, la implementación es muy alta: el frenado automático de emergencia alcanza un 98,1% de penetración, el sistema de monitorización de la presión de neumáticos un 90,7%, y la advertencia de abandono de carril un 88,9%. Si bien estas cifras son elevadas, la disponibilidad de funcionalidades en este segmento es ligeramente inferior a la observada en los turismos.

- Autobuses:

En el caso de los autobuses, la mayoría de los modelos ofertados en España se sitúan en un nivel SAE 1 (68%) o SAE 2 (39%) de autonomía. Este segmento es único al ser el único tipo de vehículo que ya ofrece el nivel SAE 4 como máximo, disponible en el 3% de sus modelos, aunque típicamente para uso comercial en entornos cerrados.

Estos datos demuestran claramente que los fabricantes están preparados tecnológicamente y están equipando los vehículos nuevos con una amplia gama de ADAS, superando en muchos casos los requisitos mínimos obligatorios. A nivel global, la penetración de sistemas como la advertencia de colisión frontal y el frenado automático de emergencia en los modelos de vehículos ha aumentado drásticamente, pasando del 12,8% y 4% respectivamente en 2015 al 94% en 2023. Esta tendencia global de rápida adopción en vehículos nuevos se refleja también en España.

5.2 PENETRACIÓN DE ADAS EN EL PARQUE AUTOMOVILÍSTICO CIRCULANTE

A pesar del excelente equipado de los vehículos nuevos, la realidad del parque automovilístico que ya circula por las carreteras españolas es muy diferente, y esto tiene un impacto directo en la velocidad a la que los beneficios de seguridad de los ADAS se extienden por todo el país.

- **Antigüedad del Parque:**

El principal obstáculo es la edad de nuestros vehículos. La edad media de los turismos en España sigue aumentando, y se situará en 14,5 años en 2025, un dato preocupante si lo comparamos con los 14,2 años de 2023. Esta cifra es superior a la media de la flota de turismos de la UE, que en 2023 era de 12,5 años, aunque España se sitúa por debajo de países como Grecia (17,5 años) o Italia (14,8 años para furgonetas).



Ilustración 29 Edad Media del parque en España (ANFAC)

El parque móvil español ha crecido de manera continua, pasando de 30,9 millones de vehículos en 2014 a 37,3 millones en 2023. Sin embargo, este crecimiento se debe a que el saldo entre las nuevas altas y las bajas o achatarramiento sigue siendo positivo, lo que indica una falta de renovación efectiva de los vehículos más antiguos. Casi un tercio de la flota

española, lo que equivale a unos 8,7 millones de vehículos, tiene más de 20 años. Este porcentaje ha crecido un 11,2% en el último año.

Los coches con menos de 5 años representan una proporción muy pequeña, apenas el 16,4% del total de la flota de turismos. En el caso de los vehículos comerciales ligeros, el peso de los vehículos de menos de 5 años también ha caído en 2 puntos porcentuales, y en el mercado de industriales, la cuota de vehículos de más de 20 años es la mayor, alcanzando el 30% del total.

En cuanto al nivel de equipamiento en la flota general, un estudio sociológico de FESVIAL publicado en 2022 nos da una idea de la penetración real de los ADAS en el conjunto del parque circulante. Los porcentajes son significativamente más bajos que en los vehículos nuevos.

El Observatorio de Conductores del RACE también corrobora esta baja penetración general de los sistemas ADAS en la flota nacional. Esta marcada diferencia entre el alto equipamiento de los vehículos recién matriculados y la baja presencia de ADAS en la flota circulante es un desafío crucial para la seguridad vial en España. Esta "seguridad a dos velocidades" implica que, a pesar de los avances tecnológicos, una parte considerable de los vehículos en circulación carece de las características de seguridad más modernas, lo que se traduce en un mayor riesgo de accidente y una mayor gravedad de las lesiones en caso de siniestro para estos vehículos más antiguos.

Esto representa un obstáculo significativo para alcanzar los ambiciosos objetivos de seguridad vial, como la visión cero de la Unión Europea, que busca eliminar las muertes en carretera para 2050. La persistencia de un parque envejecido no solo afecta la seguridad activa, sino que también puede influir en la percepción y el conocimiento de los conductores sobre los ADAS, ya que aquellos con vehículos más antiguos tienen menos exposición a estas tecnologías y, por ende, un menor conocimiento sobre su funcionamiento y limitaciones, como señalan estudios de FESVIAL y RACE.

Capítulo 6. ESTUDIO CUANTITATIVO

Una vez comprendido el funcionamiento de los sistemas ADAS y su marco regulatorio, resulta fundamental analizar con evidencia empírica su impacto real sobre la siniestralidad. Este apartado tiene como objetivo evaluar, mediante estudios científicos y datos cuantificables, en qué medida los sistemas avanzados de asistencia a la conducción contribuyen a la reducción de accidentes de tráfico.

Para ello, se utilizarán papers académicos recientes, con especial atención a análisis y estudios estadísticos que integran datos de múltiples fuentes. Esto proporcionará una visión sólida y contrastada. Este enfoque permitirá determinar no solo la efectividad individual de sistemas como el frenado automático de emergencia (AEB) o la advertencia de cambio involuntario de carril (LDW), sino también el efecto acumulado de la adopción progresiva de estas tecnologías en el parque automovilístico.

Este capítulo servirá como base analítica y cuantitativa para validar las hipótesis planteadas en los objetivos del trabajo y justificar el interés económico y social de acelerar la renovación tecnológica del parque vehicular español.

6.1 ANÁLISIS EUROPEO SOBRE EFICACIA DE ADAS

El artículo titulado "Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials", elaborado por Lena Kimbrough, Jonas Wittmann, Sebastian Böhme, Stefan Nordbruch, Robert Haffner y Ralf Riedel, examina el potencial de reducción de accidentes de distintos sistemas ADAS en términos de seguridad vial. Si bien existe una base normativa sólida como el Reglamento (UE) 2019/2144, que obliga la incorporación de varios ADAS en vehículos nuevos, todavía existen limitaciones significativas en cuanto a los estudios retrospectivos debido a la falta de datos específicos sobre siniestros que permitan comparar vehículos con y sin estos sistemas.

Por ello, los autores recopilan y analizan investigaciones previas realizadas en países como EE. UU., Alemania, Suiza y Austria que sí han estimado el impacto de estos sistemas sobre la reducción de siniestros, lesiones y muertes. Algunos hallazgos previos muestran que sistemas como el frenado automático de emergencia (AEB) y la advertencia de colisión frontal (FCW) podrían evitar hasta un 29 % de los accidentes en turismos, mientras que otros sistemas como el mantenimiento de carril (LDW/LKA) o la detección de ángulo muerto (BSW) presentan también resultados prometedores, aunque con menor impacto individual.

Dado que en Austria aún no se había realizado un estudio de este tipo, el objetivo del artículo es evaluar el impacto de seguridad de varios ADAS utilizando datos de siniestros nacionales austriacos y simulaciones para tres horizontes temporales: 2025, 2030 y 2040. Para ello, desarrollaron una herramienta específica que permite adaptar los datos de entrada y calcular los potenciales de reducción según el grado de penetración de estas tecnologías en el parque móvil.

6.1.1 METODOLOGÍA

La metodología del estudio para estimar la efectividad de los ADAS en Austria se centró en un análisis detallado de la base de datos oficial de accidentes del país. El proceso comenzó por identificar las funcionalidades de cada ADAS para determinar qué tipos de accidentes y participantes se verían afectados. Posteriormente, se aplicaron filtros a estas cifras de accidentes basándose en factores operativos como las condiciones climáticas o el tipo de vía, que influyen directamente en la eficacia de los ADAS. Además, se tuvieron en cuenta limitaciones inherentes a la efectividad de los ADAS, como su penetración en el mercado o sus capacidades técnicas de detección. Dado que estos factores evolucionan con el tiempo, se definieron tres escenarios futuros (2025, 2030 y 2040) con distintos valores para ellos.

Un aspecto crucial de la metodología fue considerar la posible influencia de cada ADAS en la gravedad de las lesiones, lo que permitió estimar el potencial de reducción tanto de accidentes como de víctimas. Todos estos cálculos se ejecutaron utilizando una herramienta de software programada específicamente para este fin, conectada a la base de datos de

accidentes, lo que ofrece la flexibilidad de ajustar los parámetros y recalcular los resultados según sea necesario en el futuro.

La base de datos de accidentes, esencial para este estudio, corresponde a las estadísticas oficiales de Austria entre 2016 y 2020, registrando accidentes con lesiones. Para cada tipo de ADAS, se identificaron las características relevantes de los accidentes, los usuarios de la vía y las personas involucradas. Es importante remarcar que, debido a que diferentes sistemas pueden incidir en tipos de accidentes o usuarios similares, los potenciales de reducción individuales no son directamente sumables.

Las restricciones de los accidentes relevantes también se basaron en las condiciones de operación de los ADAS, como características de la infraestructura (ej. obras viales que desafían la tecnología de sensores), condiciones climáticas (lluvia, nieve, niebla que impactan la funcionalidad del sensor) y el tipo de carretera o área (urbana/rural), dado que muchos ADAS están optimizados para entornos o límites de velocidad específicos. Todos estos factores se integraron con la información disponible en la base de datos de accidentes, complementada con literatura y la opinión de expertos.

Level	Excerpt of attributes (grouped)	Mandatory?
Crash	time and day	yes
	location	yes
	lighting / surface condition / glaring sunlight / artificial lighting / weather / precipitation /	yes / yes / no / no / no / no
	location characteristics: urban or rural / road type / speed limit / occurrence of road works / other tags (i.e., curve, type of crossing)	yes / yes / yes / yes / no
	animal collision	no
	crash type	yes
	assumed main crash cause	yes
Road user	road user type* / trailer included	yes / yes
	license plate number / nationality	no / no
	crash factors related to the road user: manoeuvre / traffic rule compliance / vehicle factors / others	yes / yes / no / yes
Person	involvement (driver, passenger, pedestrian)	yes
	assumed main crash causer	yes
	age / gender / nationality / severity of injury	no / no / no / yes
	holding a license for the vehicle / fitness to drive / type of impairment	yes / yes / yes
	alcohol-impairment**	yes
	seatbelt use / helmet use / airbag	yes / no / yes

Ilustración 30 Condiciones de los accidentes (Impact analysis of ADAS regarding road safety)

El estudio ajusta las cifras de accidentes al considerar cómo ciertos factores pueden limitar la efectividad de los ADAS o incluso, paradójicamente, incrementar el riesgo de accidentes. Esto incluye la cantidad de vehículos que poseen ADAS, el grado en que los conductores realmente los utilizan, las limitaciones técnicas inherentes a los propios sistemas (sensores y software), y los posibles efectos negativos derivados del uso de ADAS, como la disminución de la atención del conductor o el exceso de confianza (fenómeno conocido como homeostasis del riesgo). Se proyecta que estos efectos negativos desaparecerán para el año 2040, gracias a mejoras en la formación de los conductores y a su mayor experiencia con la tecnología. La herramienta de software empleada en la investigación permite al usuario ajustar todos estos parámetros, así como la influencia de los ADAS en la gravedad de las lesiones.

6.1.2 RESULTADOS

El estudio evaluó el potencial de reducción de accidentes de nueve sistemas ADAS: control de crucero adaptativo (ACC), iluminación adaptativa, sistema de bloqueo de arranque por

alcohol, ADAS de advertencia/frenado de obstáculos (AEB y FCW), asistente inteligente de velocidad (ISA), ABS en curva, sistemas de asistencia de mantenimiento/salida de carril (LKA/LDA), asistente de giro y ADAS de detección de somnolencia y falta de concentración. Los cálculos se basaron en datos de accidentes austriacos, grupos objetivo de accidentes definidos para cada ADAS, y parámetros específicos que influyen en su efectividad.

	Scenario	ACC	Adaptive lighting	Alcohol-Interlock system	AEB/FCW	ISA	Curve-ABS	LKA/LDA	Turning Assistant	ADAS regarding drowsiness and lack of concentration
Market penetration	2025	28%	34%	5%	57%	58%	21%	49%	45%	44%
	2030	40%	40%	10%	90%	90%	40%	90%	80%	80%
	2040	80%	60%	20%	95%	95%	60%	95%	95%	95%
Level of use	2025	50%	100%	100%	50%	97%	100%	70%	90%	97%
	2030	75%	100%	100%	75%	100%	100%	90%	95%	100%
	2040	95%	100%	100%	95%	100%	100%	95%	100%	100%
Techn. detection	2025	90%	100%	95%	55%	90%	100%	90%	90%	25%
	2030	95%	100%	95%	75%	95%	100%	95%	95%	50%
	2040	95%	100%	98%	90%	98%	100%	95%	95%	70%
Negative ADAS effects	2025	2%	2%	0%	2%	3%	3%	3%	1%	2%
	2030	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
	2040	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Ilustración 31 Uso de cada ADAS según el año (Impact analysis of ADAS regarding road safety)

Los resultados generales indican que todos los ADAS analizados contribuyen a la reducción de accidentes, incluyendo disminuciones en colisiones, fallecidos, heridos graves y leves, incluso al considerar riesgos como la distracción o la funcionalidad limitada de estos sistemas.

El mayor potencial de reducción futura se atribuye a los ADAS de advertencia/frenado de obstáculos (AEB/FCW), que podrían evitar aproximadamente 8.700 accidentes y 70 muertes en Austria para 2040. Esto representa una reducción del 24% de los accidentes en comparación con el promedio de 2016-2020. El segundo ADAS más prometedor es el Asistente Inteligente de Velocidad (ISA), capaz de lograr una reducción global del 8% de los accidentes en 2040 y del 7% en 2030, con un potencial de salvar entre 70 y 80 vidas. Destaca que AEB/FCW e ISA no solapan en los tipos de accidentes que previenen, permitiendo la combinación de sus beneficios. Si nos centramos solo en la reducción de víctimas mortales, los sistemas LKA/LDA prometen la mayor disminución, entre 90 y 100 vidas menos para 2030/2040.

Otros sistemas como el control de crucero adaptativo y la iluminación adaptativa muestran un menor potencial en la reducción de accidentes generales, aunque esta última podría evitar unas 50 muertes. El Asistente de Giro para vehículos pesados presenta la menor reducción de accidentes, 30, y fallecidos, 3, para 2040, pero su impacto es significativo en la reducción de muertes relacionadas con estos vehículos debido a la alta gravedad de sus siniestros.

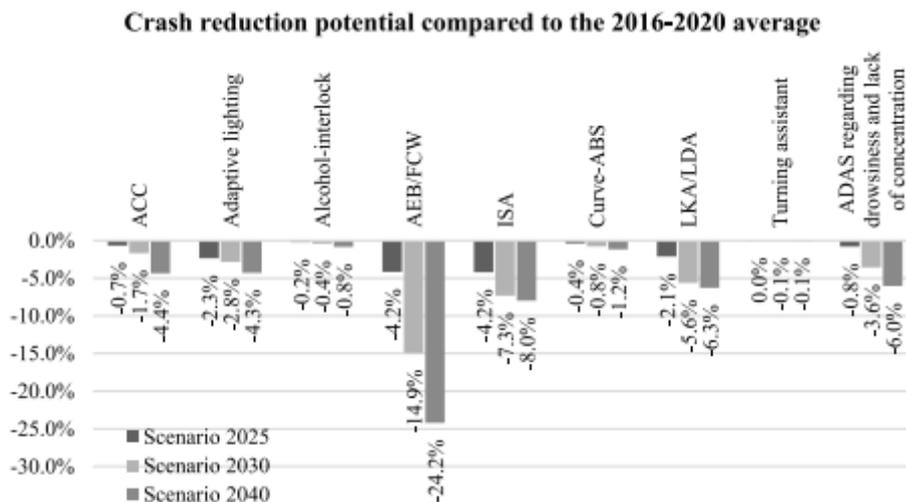


Ilustración 32 Potencial de reducción de accidentes (Impact analysis of ADAS regarding road safety)

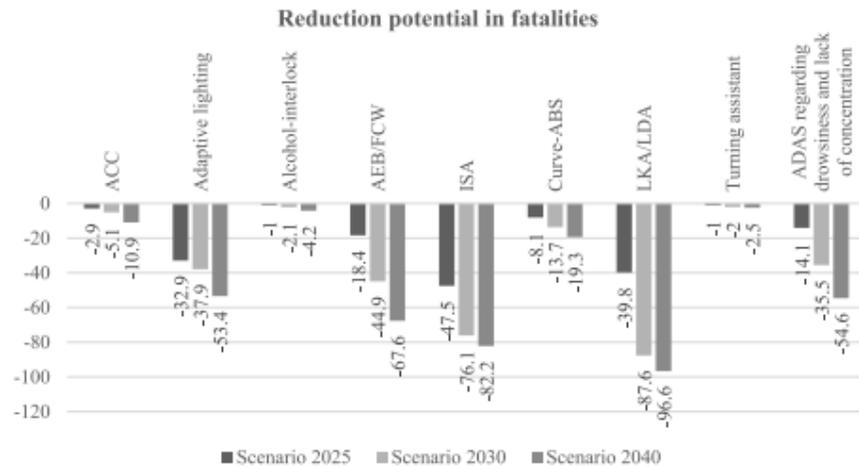


Ilustración 33 Potencial reducción de muertes (Impact analysis of ADAS regarding road safety)

El análisis también se extendió a grupos específicos de usuarios de la vía. Para los peatones, los ADAS de advertencia/frenado de obstáculos demostraron el mayor potencial, con hasta 36 muertes y más de 1.000 heridos leves evitados para 2040. La iluminación adaptativa también podría reducir 8 muertes de peatones. Para los ciclistas, el impacto es similar, y el ISA podría reducir 40 heridos leves para 2030. Los motociclistas se beneficiarían principalmente de los ADAS de advertencia/frenado de obstáculos, y el Curve-ABS específico para motos muestra un gran potencial en la reducción de fallecidos. Los sistemas LKA/LDA también podrían salvar vidas de motociclistas, y el ISA tendría un impacto considerable en la reducción de heridos graves y leves. Para otros usuarios de la vía, los sistemas LKA/LDA, ISA, iluminación adaptativa y los ADAS de detección de somnolencia muestran el mayor potencial de reducción, especialmente entre fatalidades y heridos graves.

En la discusión, se reitera que existe un claro potencial para reducir los accidentes en las carreteras austriacas mediante los ADAS. Los sistemas FCW/AEB sobresalen debido a su amplio grupo objetivo y su capacidad para prevenir colisiones frontales. Se espera que su obligatoriedad impulse mejoras continuas, aunque la detección de usuarios vulnerables como peatones, ciclistas y usuarios de micromovilidad necesita ser perfeccionada. El ISA muestra un gran potencial en la reducción de accidentes, aunque en este análisis no se estimó

una reducción de víctimas peatonales, lo que sugiere que su efecto real podría ser incluso mayor. Los sistemas LKA/LDA, aunque con un potencial de reducción de accidentes ligeramente menor que ISA, son muy efectivos en la reducción de fatalidades, lo cual se explica por su uso predominante en zonas rurales y autopistas de alta velocidad, donde ocurren accidentes más graves.

Los sistemas de iluminación adaptativa y los ADAS para la somnolencia y falta de concentración tienen un impacto notable en la reducción de fatalidades, especialmente para peatones. Se reconoce que la efectividad de la iluminación adaptativa depende de la relevancia de la iluminación en los accidentes, algo difícil de determinar con los datos disponibles. Para los sistemas de somnolencia, su potencial real se verá a medida que la tecnología madure.

Finalmente, se subraya la importancia de que los ADAS sean utilizados correctamente, comprendidos por los conductores (conociendo sus límites) y funcionen de manera impecable. Se asume un alto potencial de detección técnica para la mayoría de los ADAS, dada su madurez y la presión de la instalación obligatoria. Esto, a su vez, debería influir positivamente en el nivel de uso, apoyado por otras medidas complementarias.

6.1.3 CONCLUSIONES

El estudio concluye que los nueve sistemas ADAS analizados tienen un claro potencial para mejorar la seguridad vial en Austria. Sin embargo, para explotar completamente este potencial, es crucial que los usuarios empleen los sistemas correctamente y que se implementen medidas complementarias. Las principales áreas de acción propuestas son las siguientes.

- **Vehículos/tecnología:** Es necesario mejorar las limitaciones actuales de los ADAS, como el reconocimiento de distintos tipos de usuarios de la vía. Esto se logrará con un desarrollo tecnológico continuo y expandiendo los protocolos de prueba de los fabricantes, además de monitorear y mejorar los sistemas mediante pruebas independientes.

- **Infraestructura:** Para sistemas como el asistente inteligente de velocidad y el asistente de mantenimiento de carril, las mejoras en la infraestructura son clave. Por ejemplo, digitalizar los límites de velocidad y mejorar la detectabilidad y reflectividad de las marcas viales son esenciales para que estos ADAS funcionen a pleno rendimiento.
- **Información, concienciación y formación:** Para asegurar el uso adecuado de los ADAS, se deben intensificar las campañas de información y concienciación. Educar a la población sobre los sistemas acelerará su adopción y uso correcto, lo que se traducirá en una reducción de accidentes más rápida y efectiva. Se propone informar al momento de la compra, integrar los ADAS en la formación de conductores y crear una imagen pública positiva de estas tecnologías.

Por último, el estudio destaca la necesidad de más investigación sobre el impacto de los ADAS en la seguridad vial. Señala que la actual estadística nacional de accidentes en Austria no incluye información sobre la presencia de ADAS en los vehículos implicados, lo que limita el análisis. Sin embargo, a partir de 2023, esta información comenzará a recopilarse, lo que permitirá futuros estudios retrospectivos más precisos, idealmente en colaboración con aseguradoras y fabricantes de vehículos.

6.2 ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE LOS ADAS EN LA SEGURIDAD VIAL EN EE.UU.

El trabajo que se va a comentar se titula "Potential Reductions in Crashes, Injuries, and Deaths from Large-Scale Deployment of Advanced Driver Assistance Systems". Se trata de un informe de investigación de 2018, realizado por A.J. Benson, B.C. Tefft, A.M. Svancara y W.J. Horrey para la AAA Foundation for Traffic Safety.

En este estudio, se procede a revisar la literatura existente y a ofrecer estimaciones estadísticas actualizadas. La intención es determinar cuántos accidentes, heridos y fallecidos podrían evitarse, al menos en un escenario teórico, si la totalidad de los vehículos de pasajeros (coches, camionetas, furgonetas, etc.) estuviera equipada con determinados Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor, los ADAS. La atención se centra en

tecnologías diseñadas específicamente para prevenir o mitigar la gravedad de colisiones, o para asistir al conductor en dicha tarea. Se incluyen sistemas como la advertencia de colisión frontal (FCW), el frenado de emergencia automático (AEB), la advertencia de salida de carril (LDW), la asistencia de mantenimiento de carril (LKA) y la advertencia de punto ciego (BSW). Es relevante mencionar que no se consideran sistemas orientados principalmente a la comodidad del conductor, como el control de crucero adaptativo o la asistencia al estacionamiento. Un punto crucial es que el estudio no busca cuantificar las reducciones reales que se lograrían en situaciones cotidianas, sino establecer el máximo potencial teórico de estos sistemas bajo condiciones ideales.

- En cuanto a los sistemas de advertencia de colisión frontal (FCW) y frenado de emergencia automático (AEB), diversas investigaciones han estimado su impacto. Teóricamente, se ha sugerido que estos sistemas podrían prevenir una parte sustancial de los choques por alcance; por ejemplo, se estimó un potencial de prevención del 69-81% de estos incidentes entre 2002-2006. Al considerar las limitaciones, otra estimación apuntó a abordar teóricamente el 70% de los choques por alcance y el 18% de los choques de un solo vehículo. Además, los sistemas con detección de peatones se consideraron relevantes para el 52% de todos los choques con peatones reportados por la policía y el 90% de los choques fatales entre vehículos y peatones.

En la práctica, estudios basados en datos de policía y de seguros han demostrado reducciones tangibles. Por ejemplo, el sistema FCW de Honda Accord redujo las reclamaciones de responsabilidad por lesiones corporales en un 24%, mientras que el sistema EyeSight de Subaru, que incluye FCW y AEB, disminuyó estas reclamaciones en un 35%. También se observó que el FCW solo, el AEB a baja velocidad solo, o ambos combinados, redujeron la incidencia de choques por alcance entre un 27% y un 50%. Estas cifras respaldan el beneficio significativo de los FCW y AEB en la seguridad vial.

- Los sistemas de advertencia de salida de carril (LDW) y asistencia de mantenimiento de carril (LKA) han sido objeto de análisis para estimar su capacidad en la prevención

de accidentes. Se ha determinado que estos sistemas tienen relevancia en choques donde un vehículo se desvía involuntariamente de su carril, incluyendo colisiones de un solo vehículo por salida de la vía, choques laterales y frontales. Estimaciones teóricas sugieren un impacto considerable: por ejemplo, Farmer (2008) indicó que los LDW podrían ser pertinentes en el 13-16% de los choques de un solo vehículo y en un alto porcentaje de choques frontales y laterales, sumando cientos de miles de accidentes y miles de fatalidades anualmente. Jermakian (2011) refinó estas proyecciones, sugiriendo que una adopción universal de la tecnología LDW podría abordar teóricamente el 6% de los choques de un solo vehículo y proporciones significativas de choques frontales y laterales, representando en conjunto un 3% de todos los choques de vehículos de pasajeros y un 24% de los choques fatales.

En cuanto al impacto real, diversas investigaciones han evaluado la eficacia de LDW y LKA. Aunque algunos estudios, como los del Highway Loss Data Institute (HLDI), tuvieron dificultades para aislar el efecto específico de estos sistemas de otras tecnologías ADAS, Cicchino sí observó beneficios concretos. Sus estimaciones indican que los sistemas LDW redujeron la implicación de vehículos equipados en todos los choques en un 11% y en los choques con lesiones en un 21%. De manera similar, un estudio europeo sobre los sistemas LDW y LKA de Volvo reportó una reducción del 53% en los choques de su grupo objetivo, lo que se tradujo en un 30% de disminución en todos los choques de un solo vehículo y frontales que resultaron en lesiones.

- Los sistemas de advertencia de punto ciego (BSW) han sido evaluados por su potencial para prevenir accidentes. Los choques en los que estos sistemas buscan intervenir se componen de colisiones laterales entre vehículos que circulan en la misma dirección en carriles contiguos, cuando un vehículo cambia de carril estando ligeramente por delante de otro en su punto ciego, así como choques por alcance resultantes de un cambio de carril. Es crucial destacar que estos sistemas abordan cambios de carril intencionados donde el conductor no percibe la presencia de otro vehículo, diferenciándose así de otros ADAS. Las estimaciones sobre el potencial de prevención indican que los BSW podrían evitar entre el 24% y el 26% de los choques

por cambio de carril, lo que en ciertos periodos representaría cientos de miles de choques y varios cientos de choques fatales anualmente.

Para cuantificar los efectos reales de los BSW en la seguridad, se han llevado a cabo estudios que examinan el rendimiento de estos sistemas. Por ejemplo, se ha observado que el sistema BSW de Mazda redujo las reclamaciones por colisión en un 3%, las de daños a la propiedad en un 11% y las de responsabilidad por lesiones corporales en un 18%. Además, análisis han indicado que estos sistemas pueden disminuir los choques por cambio de carril en los vehículos equipados en un 14%, con sugerencias de una reducción aproximada del 23% en los choques con lesiones, aunque este último dato no fue estadísticamente significativo. Estos hallazgos sugieren un beneficio tangible de los sistemas BSW en la mejora de la seguridad vial.

6.2.1 ANÁLISIS DE DATOS

El análisis de datos de este estudio se propuso cuantificar el número de choques, lesiones y muertes ocurridos en Estados Unidos en 2016 que teóricamente podrían haberse evitado o mitigado si los vehículos involucrados hubieran estado equipados con las tecnologías ADAS pertinentes. Para ello, se utilizaron datos de choques reportados por la policía y lesiones del Sistema de Muestreo de Informes de Choques (CRSS) de la NHTSA, y datos de muertes del Sistema de Informes de Análisis de Fatalidades (FARS) de la NHTSA, excluyendo duplicidades. La metodología general consistió en un proceso de dos pasos: primero, identificar los tipos de choques que cada tecnología está diseñada para abordar y, segundo, restar aquellos choques que la tecnología probablemente no habría prevenido debido a limitaciones conocidas, por ejemplo, condiciones ambientales adversas o conductores incapacitados. En 2016, se estimaron 6,950,000 choques de interés que involucraron vehículos de pasajeros, resultando en 3,034,000 lesiones y 32,702 muertes.

Para los sistemas de advertencia de colisión frontal y frenado de emergencia automático (FCW/AEB), inicialmente se identificaron 2,484,000 choques en 2016 que involucraban colisiones por alcance o atropellos a peatones/ciclistas, con 1,111,000 lesiones y 6,933 muertes. Tras descontar los escenarios donde la funcionalidad del sistema se vería

comprometida (ej., mal tiempo, pérdida de tracción o conductor bajo influencia), se estimó un potencial de prevención o mitigación de 1,994,000 choques, 884,000 lesiones y 4,738 muertes. Si bien la mayoría de los choques evitables por FCW/AEB son por alcance (85%), la mayor parte de las fatalidades prevenibles (74%) corresponden a peatones y ciclistas.

	Crashes	Injuries	Deaths
Total Rear-End and Pedestrian/Cyclist Crashes	2,484,000	1,111,000	6,933
Unlikely Preventable by FCW / AEB			
Inclement Weather	243,000	98,000	523
Adverse Surface Conditions	129,000	48,000	296
Occurred off Road	2,000	1,000	112
Loss of Control	50,000	33,000	373
Driver Asleep/III/Impaired	66,000	47,000	891
Total Unlikely Preventable by FCW / AEB	490,000	227,000	2,195
Potentially Preventable by FCW / AEB	1,994,000	884,000	4,738

Ilustración 34 Accidentes evitables por el AEB (Potential Reductions in Crashes)

En el caso de los sistemas de advertencia de salida de carril y asistencia de mantenimiento de carril (LDW/LKA), se identificaron 1,395,000 choques en 2016 donde un vehículo de pasajeros se salió involuntariamente de su carril, con 589,000 lesiones y 15,445 muertes. Considerando las limitaciones tecnológicas como la visibilidad de marcas de carril, el clima o el conductor impedido, se estimó que 519,000 choques, 187,000 lesiones y 4,654 muertes podrían haberse evitado o mitigado. La mayor proporción de estos choques y lesiones son por salida de la vía, aunque una parte considerable de las fatalidades ocurre en choques frontales.

	Crashes	Injuries	Deaths
Total Unintentional Lane Departure Crashes	1,395,000	589,000	15,445
Unlikely Preventable by LDW /LKA			
Inclement Weather	295,000	108,000	1,717
Adverse Surface Conditions	135,000	51,000	1,096
Loss of Traction/Control	242,000	129,000	4,215
Driver Asleep/III/Impaired	203,000	114,000	3,763
Total Unlikely Preventable by LDW / LKA	876,000	402,000	10,791
Potentially Preventable by LDW / LKA	519,000	187,000	4,654

Ilustración 35 Accidentes evitables por LKA (Potential Reductions in Crashes)

Finalmente, para los sistemas de advertencia de punto ciego (BSW), se identificaron 349,000 choques en 2016 relacionados con cambios de carril o fusiones donde un vehículo estaba en el punto ciego, resultando en 100,000 lesiones y 348 muertes. Después de aplicar los filtros por limitaciones conocidas, se estimó que 318,000 choques, 89,000 lesiones y 274 muertes podrían haberse prevenido. La mayoría de estos fueron choques laterales, con una minoría significativa de choques por alcance y choques al girar a través de un carril.

	Crashes	Injuries	Deaths
Total Same-Direction Lane-Change Crashes	349,000	100,000	348
Unlikely Preventable by BSW			
Incliment Weather	25,000	8,000	17
Loss of Traction/Control	3,000	2,000	22
Driver Asleep/II/Impaired	3,000	1,000	35
Total Unlikely Preventable by BSW	31,000	10,000	74
Potentially Preventable by BSW	318,000	89,000	274

Ilustración 36 Accidentes evitables por BSW (Potential Reductions in Crashes)

En conjunto, se estima que la implementación de todas estas tecnologías ADAS tiene el potencial de prevenir aproximadamente el 40% de todos los choques de vehículos de pasajeros, el 37% de las lesiones y el 29% de todas las muertes en choques en Estados Unidos. Aunque los sistemas FCW/AEB y LDW/LKA se estiman con un potencial similar en la prevención de fatalidades, alrededor del 14% cada uno, los FCW/AEB son relevantes para un número de choques y lesiones cuatro veces mayor. Esto se debe a que los choques que abordan los sistemas LDW/LKA, como las salidas de carril, tienden a ser más graves. Si bien los FCW/AEB pueden prevenir un número considerable de fatalidades, especialmente entre peatones y ciclistas, la mayoría de los choques a los que son relevantes son por alcance, que rara vez son fatales. La contribución general de los sistemas BSW a la reducción de choques fue la menor, pero aún se estima que podrían prevenir hasta 318,000 choques anualmente.

	Crashes	Injuries	Deaths
Total Passenger-Vehicle Crashes	6,950,000	3,034,000	32,702
Potentially Preventable by FCW/AEB	1,994,000 (29%)	884,000 (29%)	4,738 (14%)
Potentially Preventable by LDW/LKA	519,000 (7%)	187,000 (6%)	4,654 (14%)
Potentially Preventable by BSW	318,000 (5%)	89,000 (3%)	274 (1%)
Total Potentially Preventable by All Systems Above	2,748,000 (40%)	1,128,000 (37%)	9,496 (29%)

Ilustración 37 Accidentes evitables por el resto de ADAS (Potential Reductions in Crashes)

6.2.2 DISCUSIÓN

Las tecnologías ADAS examinadas, incluyendo sistemas de advertencia de colisión frontal, frenado de emergencia automático, advertencia de salida de carril, asistencia de mantenimiento de carril y advertencia de punto ciego, tienen el potencial de prevenir o mitigar aproximadamente el 40% de todos los choques de vehículos de pasajeros. Esto podría traducirse en una reducción del 37% de las lesiones y del 29% de las fatalidades ocurridas en esos choques. La mayoría de los choques prevenibles son por alcance, que podrían ser abordados por los sistemas FCW y AEB. Sin embargo, las mayores proporciones de fatalidades que estas tecnologías podrían evitar corresponden a peatones y ciclistas, víctimas de choques potencialmente prevenibles por FCW y AEB, así como a ocupantes de vehículos en choques por salida de carril, donde los sistemas LDW y LKA tendrían un papel crucial. Es fundamental aclarar que este estudio no busca cuantificar la eficacia real de las tecnologías, sino estimar el número de choques que podrían teóricamente prevenirse si estuvieran instaladas en todos los vehículos de pasajeros y funcionaran a la perfección, capturando capacidades y limitaciones típicas.

Al considerar los hallazgos anteriores, se observa variación en las estimaciones. Por ejemplo, estudios previos excluyeron choques donde la velocidad excesiva era un factor conocido, algo que el presente estudio no hizo. Aunque los sistemas LDW y LKA no funcionan a baja velocidad o en curvas pronunciadas, la exclusión de choques en vías de baja velocidad tendría un impacto mínimo en los resultados, pues pocos choques o fatalidades clasificadas como prevenibles por estas tecnologías ocurrieron en tales condiciones. Sin embargo, la información sobre velocidad real o radio de curvatura no estaba disponible, lo que podría implicar que los LDW y LKA no prevengan todos los choques clasificados como

potencialmente evitables. De forma similar, los sistemas BSW no evitarían choques si un vehículo adyacente se desplaza a una velocidad mucho mayor, o si dos vehículos intentan ocupar el mismo espacio simultáneamente. La información disponible no permitía identificar fiablemente estos escenarios. Otra diferencia clave radica en la exclusión de choques donde el conductor estaba enfermo, dormido o bajo los efectos de alcohol o drogas, asumiendo que las tecnologías, especialmente las de advertencia, no habrían prevenido estos incidentes, lo que busca una estimación más conservadora. También se reconoce que las advertencias no siempre resultan en la prevención del choque, dado que factores como la distracción del conductor afectan el tiempo de reacción. Sistemas activos como AEB y LKA podrían ser más efectivos que los de solo advertencia, como sugieren estudios que muestran que el FCW solo redujo los choques por alcance en un 27%, mientras que en conjunto con AEB la reducción fue del 50%. La presentación de estimaciones conjuntas para FCW/AEB y LDW/LKA no implica que ambos prevengan el mismo número de choques, sino que la población de choques teóricamente relevantes es la misma.

Este estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse. Los resultados obtenidos representan un límite superior teórico de los beneficios potenciales de seguridad de estos sistemas, no sus beneficios reales esperados. Estos resultados asumen un escenario ideal donde todos los vehículos están equipados, los sistemas funcionan perfectamente el 100% del tiempo, los conductores actúan de forma correcta y oportuna ante las advertencias el 100% del tiempo, y todos los choques considerados "probablemente prevenibles" ocurren bajo condiciones óptimas para la intervención del sistema. Los beneficios de seguridad en el mundo real probablemente no serían tan elevados. No obstante, el estudio ofrece una valiosa perspectiva sobre la cantidad y los tipos de choques que podrían o no ser plausiblemente prevenidos o mitigados por los tipos de tecnologías ADAS disponibles actualmente. La ausencia de información sobre la cronología precisa de los eventos en el choque impidió determinar si un sistema habría tenido tiempo suficiente para intervenir. Además, no fue posible evaluar cómo las reacciones del conductor a las alertas o intervenciones podrían modificar el resultado de una colisión, ya sea evitándola por completo, reduciendo significativamente su gravedad, o incluso causando un choque diferente debido a una

respuesta incorrecta. El análisis tampoco pudo tener en cuenta posibles consecuencias no intencionadas de los sistemas. Por ejemplo, una excesiva dependencia de los conductores a los sistemas podría llevar a choques al confiar en ellos fuera de su dominio operativo o al conducir un vehículo no equipado. Un estudio previo encontró que una minoría significativa de los primeros usuarios de sistemas de asistencia de marcha atrás informaron haber tenido un choque o un incidente cercano al conducir un vehículo diferente sin la tecnología, debido a que esperaban incorrectamente que el vehículo no equipado proporcionara advertencias.

6.2.3 IMPLICACIONES

Las implicaciones de este estudio sugieren que las tecnologías ADAS ofrecen una gran promesa para reducir choques, lesiones y muertes en las carreteras, pero también exponen sus limitaciones. Si estos sistemas se implementaran universalmente y funcionaran a la perfección, podrían haber prevenido poco menos de un tercio de las fatalidades. Sin embargo, una cantidad similar de muertes se produce en choques que no pueden prevenirse debido a condiciones ambientales adversas o a la incapacidad del conductor, lo que resalta la necesidad de mejoras en sensores, mayor adopción de tecnologías existentes como el control electrónico de estabilidad y medidas contra la conducción bajo influencia.

Además, los resultados identifican categorías de choques no bien abordadas por los sistemas actuales, como los choques angulares, sugiriendo que las mejoras futuras en algoritmos y la comunicación vehículo a vehículo podrían ser soluciones más efectivas. Finalmente, el estudio advierte sobre el riesgo de que los conductores confíen excesivamente en estas tecnologías, lo que podría contrarrestar sus beneficios. Es crucial que los conductores mantengan la vigilancia y sean conscientes de las capacidades y limitaciones de los sistemas, a pesar del inmenso potencial de las tecnologías ADAS para mejorar drásticamente la seguridad vial.

6.3 EFECTO DE LOS ADAS EN LOS USUARIOS VULNERABLES

Este estudio, titulado "Estimación del efecto de los sistemas avanzados de asistencia al conductor ADAS para usuarios vulnerables de la carretera", buscó estimar el impacto de los

sistemas ADAS en la reducción de accidentes entre vehículos y usuarios vulnerables de la carretera, peatones y ciclistas. Utilizando datos reales de reclamaciones de seguros de automóviles Volvo en Suecia entre 2015 y 2020, la investigación encontró que la segunda generación de VRU ADAS se asoció con una reducción del 12% en la tasa de accidentes generales de coche a peatón y bicicleta en ciertas situaciones. Específicamente, hubo un 23% menos de accidentes de coche a peatón y un 6% menos de accidentes de coche a bicicleta en esas circunstancias. Sin embargo, es importante destacar que ninguno de estos resultados fue estadísticamente significativo, principalmente debido a la limitada cantidad de accidentes en los datos analizados.

A pesar de esta limitación, el estudio subraya la vital importancia de reducir los accidentes que involucran a usuarios vulnerables. Los autores esperan que las futuras generaciones de sistemas ADAS aumenten los beneficios de seguridad para peatones y ciclistas, y enfatizan la necesidad de continuar midiendo los efectos de los ADAS en condiciones de tráfico reales para asegurar una mejora continua en la seguridad vial de todos los usuarios.

6.3.1 INTRODUCCIÓN

La introducción del estudio destaca la importancia de las tecnologías de asistencia al conductor, ADAS, para prevenir o mitigar colisiones con usuarios vulnerables de la carretera, VRU. Señala la necesidad fundamental de realizar evaluaciones de estas contramedidas basadas en datos de tráfico reales. Investigaciones previas han empleado una variedad de métodos y fuentes de datos para estimar los efectos de los VRU ADAS, presentando resultados para situaciones específicas como trayectorias de cruce rectas y movimientos longitudinales. La eficacia de los sistemas se estima generalmente comparando las tasas de accidentes entre vehículos equipados y no equipados.

En la revisión de estudios que utilizan datos históricos reales, se observa que la mayoría se centran en colisiones de coche a peatón, aunque también se analizan algunas de coche a bicicleta. Estos estudios se basan en datos de accidentes policiales o de reclamaciones de seguros y utilizan metodologías como el análisis de regresión, análisis de supervivencia o métodos de exposición casi inducida. Los resultados varían: los estudios con informes

policiales sugieren una reducción de accidentes peatonales entre el 13% y el 27%, mientras que los basados en reclamaciones de seguros reportan reducciones entre el 18% y el 57%, dependiendo del modelo de coche. También se encontró una reducción de casi un tercio en las tasas de accidentes longitudinales de coche a bicicleta en un estudio específico en Estados Unidos.

Por otro lado, las evaluaciones que emplean simulaciones se apoyan en entornos virtuales, a veces complementados con pruebas en pista. Estos estudios construyen modelos de situaciones de tráfico con parámetros de entrada de datos del mundo real, incluyendo el entorno y las condiciones ambientales. A menudo utilizan versiones de ADAS descritas como conceptuales o generales, no idénticas a las tecnologías disponibles en vehículos reales. La diversidad de enfoques de línea de base, datos de entrada y herramientas de simulación en estas evaluaciones dificulta una comparación directa de los resultados y la identificación de tendencias claras en los beneficios estimados.

6.3.2 RECOLECCIÓN DE DATOS

El estudio evaluó los sistemas avanzados de asistencia al conductor para usuarios vulnerables, VRU ADAS, utilizando datos de reclamaciones de seguros de If P&C en Suecia, comparando las tasas de accidentes de vehículos Volvo entre 2015 y 2020. Se analizaron los efectos en colisiones con ciclistas y peatones, tanto de forma conjunta como individual.

La descripción del sistema detalla la disponibilidad de VRU ADAS con detección de peatones en modelos Volvo desde 2010 y la adición de detección de ciclistas a partir de 2012. Desde 2015, el sistema, que utiliza un radar de largo alcance y una cámara frontal de gran angular, se incluyó de serie. La primera generación de ADAS tenía limitaciones de detección en la oscuridad, mientras que la segunda generación, introducida en 2015, mejoró la detección de peatones en la oscuridad y la capacidad de reconocer ciclistas desde una vista lateral.

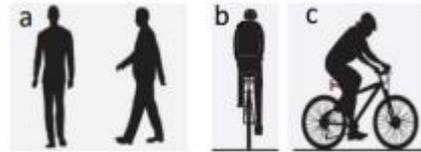


Figure 1 Examples of the contours that the system recognizes: (a) pedestrians; (b) and (c) body and bicycle outlines (adapted from Volvo (2016a,b))

Ilustración 38 Objetos que reconocen los sistemas (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)

Para la recolección de datos, se emplearon registros de accidentes y exposición de coches con seguro de responsabilidad civil de If P&C, incluyendo colisiones de baja y alta gravedad, codificadas en bases de datos específicas. La exposición se calculó en años de vehículo asegurados. El estudio también comparó estos datos de seguros con los datos oficiales de accidentes reportados por la policía en Suecia, como los de la base de datos STRADA. Se destacó que los accidentes de coche a VRU, especialmente con ciclistas, suelen estar subrepresentados en las estadísticas oficiales, y que, aunque las distintas bases de datos no son directamente comparables, ofrecen conocimiento complementario. Las proporciones de situaciones de conflicto, como trayectorias de cruce rectas y longitudinales, en los datos del seguro de este estudio eran consistentes con las estimaciones nacionales y europeas.

Table 1 Number of car-to-VRU crashes in STRADA, If_VRUP and If_VRUC

	STRADA		If_VRUP/C	If_VRUP/C*
	All makes and models, MY ≥ 2015	All Volvo Car models, MY ≥ 2015	Selected Volvo Car models, MY ≥ 2015	Selected Volvo Car models, MY ≥ 2015
Car-to-pedestrian crashes, 2015–2020	860	141	79	84.6
Car-to-bicycle crashes, 2015–2020	1 420	202	160	121.2

*Expected cases—the number of crashes from If P&C insurance claims, given the share of third-party liability policies on the Swedish market and the number of crashes in STRADA

Ilustración 39 Total de accidentes con usuarios vulnerables (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)

Table 2 Exposure and number of crashes selected for study for 1st and 2nd Gen, and 2nd Gen (numbers in parentheses show the numbers of crashes from the original data)

	Pedestrian		Cyclist	
	VRU ADAS	No VRU ADAS	VRU ADAS	No VRU ADAS
<i>Exposure (IVY, Insured Vehicle Years)</i>				
1 st and 2 nd Gen	567 006	681 112	552 188	581 560
2 nd Gen	402 770	190 178	402 770	190 178
<i>Number of crashes</i>				
1 st and 2 nd Gen	43 (54)	49 (61)	96 (102)	89 (107)
2 nd Gen	28	11	66	27

Ilustración 40 Clasificación según la generación del ADAS (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)

La selección de datos incluyó modelos Volvo específicos y años de modelo, abarcando tanto la primera como la segunda generación de VRU ADAS entre 2015 y 2020. Se creó un subconjunto de datos, el de segunda generación, para el análisis de los años 2018-2020. Se excluyeron del análisis los accidentes en los que el vehículo se movía hacia atrás, estaba parado, o los que implicaban derrapes o pérdida de control. Las colisiones seleccionadas se categorizaron en cuatro grupos de situaciones de conflicto. Se observó que las colisiones de coche a bicicleta son aproximadamente el doble de frecuentes que las de coche a peatón, y que la gravedad de las lesiones difiere entre ambos tipos de usuarios. El estudio proporcionó el número de casos con y sin ADAS para las colisiones de peatones y ciclistas, tanto para el conjunto de la primera y segunda generación como para el subconjunto de segunda generación, desglosados por situación de conflicto.

Table 3 Conflict situation groups used in the analysis

Conflict situation group	Description	Example
SCP (Straight Crossing Path)	all situations where pedestrian/bicycle crosses the path of a car moving straight	Figure 2a
Car turning	pedestrian/bicycle is crosses the path of a turning car	Figure 2b
Longitudinal	pedestrian/cyclist and car moves in parallel pedestrian/bicycle moving in the same or opposite direction	Figure 2c
Other	collisions in parking lots, etc.	—

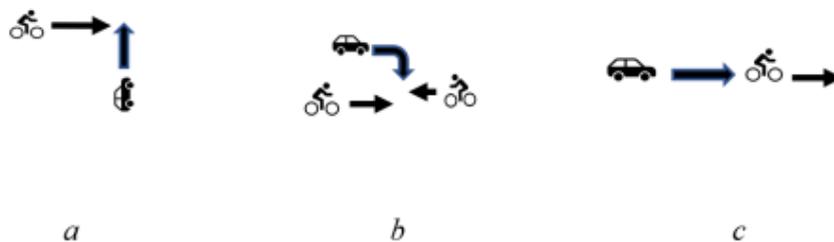


Ilustración 41 Situaciones de conflicto estudiadas (Efectos de los ADAS en los usuarios vulnerables)

En cuanto a los métodos estadísticos, se comparó la tasa de colisiones de coche a VRU por cada 10.000 vehículos asegurados para coches con y sin el sistema VRU ADAS. Se utilizó la distribución de Poisson y la regresión de Poisson para calcular las tasas y los cocientes de tasas, los cuales se emplearon para determinar la efectividad del sistema como un porcentaje de reducción de accidentes. Aunque no se controlaron los factores de confusión, los datos se estratificaron en varios subconjuntos para análisis separados, incluyendo análisis combinados y separados para peatones y ciclistas, y para distintas generaciones de ADAS. Se realizaron análisis específicos para situaciones de trayectorias de cruce rectas y longitudinales, dada su relevancia en los protocolos de prueba de EuroNCAP.

6.3.3 RESULTADOS

Se analizaron un total de 92 accidentes de coche a peatón y 185 de coche a bicicleta entre 2015 y 2020, que involucraron a los vehículos seleccionados, con y sin sistemas ADAS para usuarios vulnerables. Un subconjunto de 39 accidentes de coche a peatón y 93 de coche a bicicleta correspondió al periodo 2018-2020, con modelos de vehículos posteriores a 2015.

Los resultados generales mostraron, para todos los accidentes con el coche en movimiento hacia adelante, que los sistemas ADAS para usuarios vulnerables no tuvieron efecto o incluso se asociaron con tasas de accidente ligeramente más altas. Por ejemplo, la tasa combinada de accidentes de coche a peatón y bicicleta aumentó alrededor de un 16% para los coches con el sistema. En las situaciones de trayectoria de cruce recta, la tasa de accidentes combinada fue similar entre los vehículos con y sin el sistema. Sin embargo, al considerar las situaciones de trayectoria de cruce recta más longitudinales combinadas, se observó una disminución del 12% en la tasa de accidentes combinados para los coches con el sistema. Es crucial señalar que ninguna de estas diferencias fue estadísticamente significativa.

En el caso específico de las colisiones de coche a peatón, el análisis de los datos de la primera y segunda generación de ADAS mostró una tasa de accidentes ligeramente superior para los vehículos equipados con el sistema. No obstante, en las situaciones de trayectoria de cruce recta, se estimó una reducción del 16%, y en las situaciones de trayectoria de cruce recta más longitudinales, una reducción del 11%. Al examinar solo los datos de la segunda generación de ADAS para accidentes de coche a peatón, la tasa de accidentes general aumentó un 20%. Sin embargo, en situaciones de trayectoria de cruce recta aisladas, se estimó una reducción del 17%, y al combinar las situaciones de trayectoria de cruce recta más longitudinales, la reducción fue del 23%. Todas estas reducciones y aumentos carecieron de significancia estadística.

Para las colisiones de coche a ciclista, los datos de la primera y segunda generación de ADAS mostraron una tasa de accidentes superior para los vehículos con el sistema, tanto en la evaluación general como en las situaciones de trayectoria de cruce recta y las situaciones de trayectoria de cruce recta más longitudinales combinadas. Al analizar solo los datos de la segunda generación de ADAS, la tasa de accidentes general fue un 15% más alta para los coches con el sistema. Las situaciones de trayectoria de cruce recta mostraron tasas similares entre ambos grupos de vehículos. Solo en las situaciones de trayectoria de cruce recta más longitudinales combinadas se observó una reducción del 6% para los coches con el sistema. Al igual que en los demás análisis, ninguna de estas diferencias para los accidentes de

ciclistas alcanzó la significancia estadística. El estudio incluyó un total de 94 coches con VRU ADAS y 38 sin el sistema en la categoría de segunda generación de datos combinados, con exposiciones detalladas en años de vehículo asegurados.

6.3.4 DISCUSIÓN

La discusión aborda la relevancia global de las lesiones y muertes de usuarios vulnerables de la carretera y la necesidad de medidas efectivas. El estudio encontró una tendencia no significativa de reducción del 12% en accidentes de coche a peatón y ciclista en situaciones específicas con la segunda generación de ADAS. Si esta estimación se aplicara a los accidentes reportados oficialmente en Suecia, podría prevenirse un número considerable de ellos anualmente. Se menciona un estudio retrospectivo previo con resultados similares para la primera generación de ADAS. A pesar de haber incorporado más datos y la segunda generación del sistema, el estudio actual no encontró resultados estadísticamente significativos. Esto se atribuye a la baja frecuencia de accidentes de coche a VRU y al pequeño tamaño de la población de vehículos en Suecia, lo que hace que la recopilación de datos para conclusiones estadísticas sea un proceso prolongado. Los datos de seguros son un complemento valioso a los datos oficiales, aunque su mayor parte corresponde a accidentes menores.

Se observó una tendencia más clara de reducción de accidentes de coche a peatón, especialmente con la segunda generación de ADAS, que mejoró la detección en la oscuridad. Estas situaciones, como las de trayectoria de cruce recta y longitudinales, son prioritarias en el desarrollo de ADAS y se evalúan en protocolos de prueba como EuroNCAP. La falta de un efecto significativo en todas las situaciones de accidente podría deberse a la gran variedad de velocidades y patrones de movimiento de peatones y vehículos en contextos como los estacionamientos, que plantean desafíos complejos para el sistema.

En el caso de los accidentes de coche a bicicleta, el sistema VRU ADAS con detección de ciclistas se introdujo en 2013 y la segunda generación cubrió situaciones de trayectoria de cruce recta, que son las más comunes. Aunque se encontró una ligera tendencia a la baja en las tasas de accidentes, esta no fue tan pronunciada como en el caso de los peatones. Esto

podría deberse a la mayor variedad de perfiles de velocidad y movimiento de los ciclistas, lo que reduce el tiempo de detección para el ADAS y puede llevar a situaciones donde el ciclista colisiona con el coche, o la vista del sistema se ve obstruida.

Una limitación importante del estudio fue el bajo número de accidentes analizados para la segunda generación del sistema, lo que resultó en una baja potencia estadística y solo permitió obtener indicaciones de los beneficios del sistema. Se sugiere que futuras investigaciones mejoren las métricas de exposición, como los kilómetros recorridos por el vehículo. También se discute cómo la evolución de ADAS de característica opcional a estándar podría influir en su efectividad, ya que el sistema llegaría a una población de conductores más diversa. Se reitera que los sistemas ADAS son solo de apoyo y los conductores deben mantener siempre el control, advirtiendo sobre las altas expectativas que podrían tener repercusiones negativas.

Comparando con investigaciones previas, los resultados generales de este estudio son razonablemente consistentes. Un estudio en EE. UU. reportó una reducción no significativa del 4% en accidentes con no-motoristas, lo cual está en línea con los hallazgos actuales. Sin embargo, a diferencia de otros estudios retrospectivos en EE. UU. que reportan reducciones significativas del 14% al 27% en accidentes de peatones, este estudio en Suecia no encontró tales resultados, posiblemente debido a diferencias en los criterios de muestreo de los datos policiales o en las condiciones de conducción y cultura entre países. Estudios retrospectivos de fabricantes específicos en EE. UU. han demostrado una mejora en el rendimiento del ADAS de primera a segunda generación, lo cual es coherente con las indicaciones de mayor eficacia de la segunda generación en este estudio. Aunque algunas evaluaciones de simulación sugieren reducciones de accidentes mucho mayores, sus suposiciones requieren validación mediante estudios retrospectivos. La combinación de datos de tráfico reales y simulaciones se considera prometedora para evaluaciones oportunas, siempre que se mejore la transparencia y la generalidad de los resultados de simulación. Un desafío común para todas las evaluaciones es la falta de datos de accidentes precisos y representativos. Se concluye que los ADAS por sí solos no resolverán completamente el problema de los accidentes de coche a VRU a corto plazo, sugiriendo estrategias complementarias como la

separación de tráfico, la mejora de la detectabilidad de los VRU y la reducción de la velocidad. Se espera que las futuras tecnologías de detección avancen en la reducción de estos accidentes.

6.3.5 CONCLUSIÓN

Los datos de reclamaciones de seguros de Suecia revelan que los automóviles con la segunda generación de sistemas avanzados de asistencia al conductor para usuarios vulnerables, VRU ADAS, tienen un 12% menos de accidentes de coche a peatón y ciclista en situaciones de trayectoria de cruce recta más longitudinales, un resultado no significativo, en comparación con los coches sin el sistema. Para los accidentes de coche a peatón, se estimó que la tasa de accidentes se redujo en un 23%, mientras que los accidentes de coche a bicicleta se redujeron en un 6% para la segunda generación de VRU ADAS en las mismas situaciones. Para mitigar el problema de los accidentes de coche a VRU en un futuro cercano, antes de que los ADAS efectivos y la automatización segura de vehículos estén plenamente implementados, se necesitan otros esfuerzos complementarios. Investigaciones previas han empleado diversos métodos y herramientas para estimar el efecto de reducción de accidentes o lesiones de varios sistemas ADAS para VRU en el tráfico real. Sin embargo, pocos resultados se han presentado a partir de estudios que controlen factores que puedan afectar los resultados, como marcas y modelos, áreas geográficas y culturas, situaciones de conflicto para las que los sistemas fueron diseñados, tipos de VRU y estilos de conducción.

6.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ADAS

La revisión de tres estudios científicos clave, incluyendo uno europeo de Austria, uno estadounidense de la AAA Foundation y un estudio sueco centrado en usuarios vulnerables, permite extraer conclusiones sólidas acerca del gran potencial de los sistemas avanzados de asistencia al conductor, ADAS, para mejorar la seguridad vial.

Se observa que el estudio europeo de Austria sugiere que los sistemas de frenado automático de emergencia, AEB, y la advertencia de colisión frontal, FCW, podrían reducir hasta el 24% de los accidentes totales y salvar unas 70 vidas anuales para 2040. Los asistentes inteligentes

de velocidad, ISA, se asocian con reducciones del 8%, y los sistemas de mantenimiento de carril, LKA o LDA, podrían disminuir significativamente la mortalidad, hasta 100 vidas menos en 2030 o 2040. Otros ADAS, como el control de cruce adaptativo, la iluminación adaptativa y la detección de somnolencia, ofrecerían reducciones adicionales más modestas, del 2% al 5%.

El estudio estadounidense de la AAA Foundation indica que una implementación universal de ADAS en vehículos de pasajeros podría prevenir aproximadamente el 40% de los accidentes, el 37% de las lesiones y el 29% de las muertes. Aquí, los sistemas FCW y AEB tendrían el mayor impacto, previniendo alrededor del 14% de las fatalidades, mientras que los sistemas de advertencia y mantenimiento de carril, LDW y LKA, podrían evitar otro 14% de muertes. Los sistemas de punto ciego, BSW, contribuirían con reducciones menores, en torno al 4% del total de siniestros.

En cuanto a los usuarios vulnerables, el estudio sueco revela que los sistemas ADAS de segunda generación para detección de peatones y ciclistas lograron una reducción estimada del 12% en accidentes combinados, con mejoras más notables para peatones, un 23%, que para ciclistas, un 6%. Aunque estos resultados no alcanzaron significancia estadística, la tendencia observada sugiere que la evolución tecnológica y una mayor penetración de estas soluciones podrían incrementar sustancialmente sus beneficios en la seguridad.

Considerando estos hallazgos, una estimación para España, que toma en cuenta la estructura del parque automovilístico y la tipología de accidentes, proyecta un potencial significativo de reducción de siniestros. En un escenario teórico con el 100% de penetración de ADAS, la reducción total de accidentes podría oscilar entre un 35% y un 40%, con disminuciones del 30% al 35% en lesiones y del 25% al 30% en muertes. Los sistemas FCW y AEB serían responsables de aproximadamente la mitad de esa reducción, entre un 15% y un 20% de los siniestros evitados. Los sistemas LDW y LKA aportarían un 10% a un 12% adicional, especialmente en accidentes mortales por salidas de carril, mientras que BSW y otros sistemas menores contribuirían con un 3% a un 5%. Para peatones y ciclistas, la reducción podría alcanzar entre un 15% y un 20%, similar a los resultados suecos. En un escenario

intermedio, con una penetración del 50% para el año 2035, la reducción estimada se situaría entre un 18% y un 20% en siniestros, con una disminución proporcional en muertes y lesiones graves.

Finalmente, la evidencia científica demuestra un impacto sustancial de los ADAS en la mejora de la seguridad vial, particularmente en la prevención de colisiones frontales, salidas de carril y accidentes con usuarios vulnerables. La aplicación plena de estas tecnologías en España podría evitar hasta 4 de cada 10 accidentes, salvando miles de vidas y reduciendo significativamente los costes sanitarios y de seguros. Para lograr estos beneficios, será indispensable una renovación acelerada del parque automovilístico, combinada con mejoras en la infraestructura y una formación adecuada de los conductores para el uso correcto de los sistemas.

Capítulo 7. ANÁLISIS DE LAS BASES DE DATOS

Tras la exhaustiva revisión de la literatura científica, que ha demostrado la efectividad teórica de los sistemas ADAS en la reducción de la siniestralidad, este apartado se centra en trasladar dicha evidencia a la realidad de España. El propósito es cuantificar el impacto potencial de estas tecnologías en nuestro país, utilizando datos oficiales y fiables que sirvan como base empírica para las conclusiones de este TFM.

Para llevar a cabo este análisis, se han seleccionado y extraído dos bases de datos clave de la Dirección General de Tráfico (DGT), ambas correspondientes al año 2023. La elección de estas fuentes no es aleatoria, sino que se ha realizado para que se ajusten con precisión a los escenarios de riesgo identificados en los estudios internacionales. Por un lado, la base de datos de accidentes de tráfico de peatones nos permite estudiar en detalle las acciones de los usuarios vulnerables, información esencial para evaluar el potencial de sistemas como la Detección de Peatones. Por otro lado, la base de datos general de accidentes clasifica los siniestros por tipo de colisión (frontal, por alcance, salida de vía, etc.), lo que nos permite analizar de forma directa el ámbito de actuación de ADAS como el Frenado Autónomo de Emergencia (AEB) o la Asistencia de Mantenimiento de Carril (LKA).

El objetivo principal de este análisis es, por tanto, doble: primero, cuantificar el problema de la siniestralidad en los escenarios relevantes para ADAS en España y, segundo, aplicar los porcentajes de reducción de víctimas y accidentes obtenidos de la literatura científica a estos datos reales. Los resultados de este ejercicio permitirán estimar con exactitud el número de vidas y heridos que podrían haberse salvado en 2023, proporcionando una sólida evidencia de cómo la tecnología ADAS puede contribuir a mejorar la seguridad vial en nuestro país.

7.1 GESTIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS BASES DE DATOS

El primer paso metodológico consistió en la carga de las bases de datos de la Dirección General de Tráfico (DGT) en un entorno de análisis de datos, para lo cual se utilizó la librería

pandas en el lenguaje de programación Python. Se importaron dos archivos principales en formato Excel: la tabla que contiene la información de los accidentes con víctimas clasificados por tipo de siniestro y otra tabla específica para los accidentes de peatones. Esta fase inicial permitió una primera exploración de los datos, confirmando que cada base contenía un número representativo de registros del año 2023, así como la estructura y el tipo de variables disponibles. El código empleado para la carga de los datos se encuentra detallado en el Anexo.

7.1.1 LIMPIEZA Y NORMALIZACIÓN DE LOS DATOS

Una vez cargados, los datos fueron sometidos a un proceso de limpieza y normalización para asegurar su consistencia y fiabilidad antes del análisis. La calidad de las bases de datos proporcionadas por la DGT era notable, con una cantidad mínima de valores faltantes o atípicos que pudieran comprometer la integridad del estudio. El principal paso de normalización se centró en la estandarización de los nombres de las columnas en ambas tablas, eliminando los espacios en blanco y convirtiéndolos a mayúsculas. Esta acción, aunque sencilla, fue crucial para evitar errores de referencia y facilitar la manipulación de los datos en las fases posteriores. Finalmente, se procedió a un filtrado inicial de los datos para aislar los registros que eran relevantes para los escenarios de actuación de los sistemas ADAS, como los tipos de colisión específicos o las acciones de peatones más peligrosas, sentando así las bases para un análisis dirigido. El código que describe estos procesos de limpieza y filtrado se incluye en el Anexo.

7.1.2 PREPARACIÓN DE LOS DATOS PARA EL ANÁLISIS

Con los datos ya limpios y normalizados, el siguiente paso fue prepararlos para los cálculos y visualizaciones que se presentaron en el apartado anterior. Esta fase se centró en la transformación de los datos para que fuesen más descriptivos y analizables. Un paso fundamental fue la creación de un diccionario de mapeo, que permitió traducir los códigos numéricos de los tipos de accidente (por ejemplo, el código 1 para "Frontal") a descripciones de texto claras y comprensibles. Esta traducción se aplicó para generar una nueva columna descriptiva en el DataFrame, lo cual resultó esencial para la legibilidad de los gráficos. A

continuación, se procedió a la agregación de los datos: se agruparon los registros por tipo de accidente y se calcularon sumas totales de víctimas (fallecidos, heridos hospitalizados y no hospitalizados) o el número total de accidentes por categoría. Estas operaciones de agregación generaron las tablas de resumen que se usaron para alimentar directamente los gráficos y los resultados numéricos del análisis final, completando así la preparación necesaria para la fase de interpretación de los datos.

7.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Este apartado presenta y discute los resultados clave obtenidos del análisis de las bases de datos de la DGT para 2023. El objetivo es proporcionar una evidencia cuantitativa del impacto potencial de los sistemas ADAS en España, conectando las cifras con las conclusiones teóricas extraídas de la literatura científica. Los hallazgos se organizan en función de las visualizaciones generadas para ofrecer una interpretación clara de los datos.

7.2.1 ANÁLISIS DE LA SINIESTRALIDAD DE PEATONES EN ESCENARIOS CRÍTICOS

Como primera fase del análisis de resultados, este apartado se centra en la siniestralidad de los peatones, uno de los colectivos más vulnerables de la vía. Utilizando la base de datos de la DGT, el objetivo es identificar y cuantificar las acciones de los peatones que presentan el mayor riesgo, sirviendo de base para evaluar la necesidad de la tecnología ADAS de detección de peatones. A través del análisis de las víctimas por su nivel de gravedad, se busca determinar no solo la frecuencia de estos incidentes, sino también su letalidad. Esta información es crucial para establecer las prioridades de desarrollo y la calibración de los sistemas de asistencia a la conducción en los escenarios donde su impacto potencial en la reducción de víctimas es más significativo.

- El primer gráfico que se presenta, titulado "Fallecidos por Acción del Peatón en Escenarios Relevantes para ADAS", se basa en la columna TOTAL_MU24H del diccionario de datos de la DGT, que registra el número de víctimas mortales en las

24 horas siguientes al accidente. Esta visualización es la más crítica para el análisis, ya que identifica los escenarios más letales para los peatones y, por lo tanto, las prioridades para el desarrollo de los sistemas ADAS.

De un total de 468 fallecidos en estas situaciones, el gráfico ilustra de manera contundente cómo la mortalidad se concentra en tres acciones principales:

- Cruzando calzada fuera intersección: Con 144 fallecidos, esta acción se posiciona como el escenario más peligroso. La barra de color rojo más oscuro destaca su impacto mortal, lo que subraya la necesidad de una detección efectiva en situaciones de cruce inesperado.
- Atravesando en intersección: A pesar de ser la causa de un gran volumen de accidentes en general, es la segunda acción con mayor número de víctimas mortales, con 124 fallecidos.
- Caminando por la calzada o arcén: Esta acción representa un riesgo extremo, ya que, con 122 fallecidos, se sitúa al mismo nivel de mortalidad que los accidentes en intersección, evidenciando el peligro de los peatones que circulan por zonas sin protección.

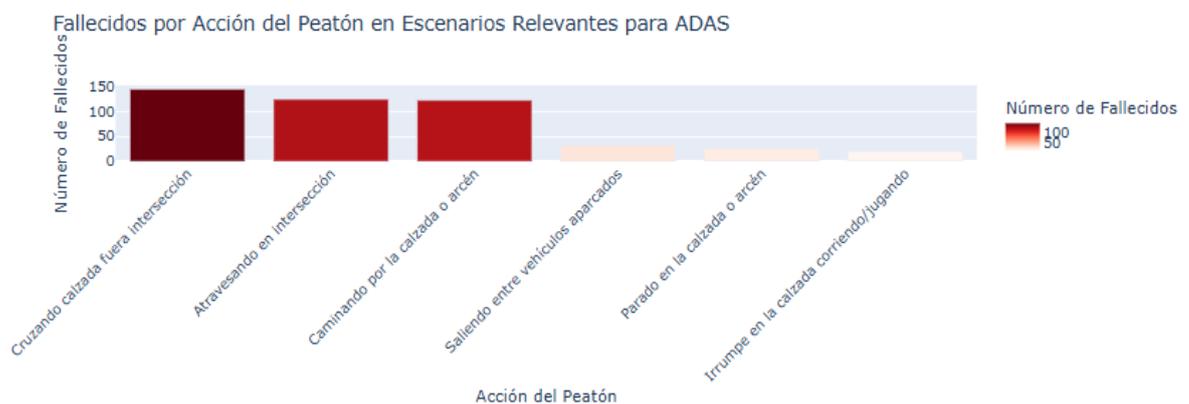


Ilustración 42 Clasificación de peatones fallecidos por acción (elaboración propia)

El análisis de esta gráfica demuestra que las tecnologías de detección de peatones deben ser especialmente eficaces en entornos fuera de las intersecciones y en las calzadas, ya que es donde se concentra la mayor parte de la mortalidad de este colectivo. Estos hallazgos

establecen una base sólida para la evaluación detallada de la eficacia de los sistemas ADAS en los apartados siguientes.

- **Heridos Hospitalizados:** La siguiente gráfica ofrece una perspectiva sobre los incidentes de mayor gravedad no mortal. En ella se puede observar cómo Atravesando en intersección y Cruzando calzada fuera intersección son las acciones que provocan el mayor número de heridos que requieren hospitalización, superando los 800 y 700 casos respectivamente. Esto demuestra que estos escenarios no solo son letales, sino que también son la principal causa de lesiones graves que requieren atención médica intensiva, lo que subraya la necesidad de sistemas ADAS con capacidad para mitigar impactos severos.



Ilustración 43 Distribución de víctimas por heridos hospitalizados y acción del peatón (elaboración propia)

- **Heridos No Hospitalizados:** Por su parte, la gráfica ilustra la frecuencia y el volumen de los incidentes que, si bien no resultan en lesiones de extrema gravedad, son los más comunes. En ella se observa claramente que Atravesando en intersección y Cruzando calzada fuera intersección son los escenarios más frecuentes, con un número de víctimas que superan las 4.500 y 4.000 respectivamente. Este hallazgo destaca la importancia de los ADAS para reducir el volumen general de accidentes y lesiones en la vía pública, incluso si estas no son de extrema gravedad.



Ilustración 44 Distribución de víctimas por heridos no hospitalizados y acción del peatón (elaboración propia)

En conclusión, el análisis detallado de las víctimas de peatones en 2023 ha revelado que el riesgo no se distribuye de manera uniforme. Los datos demuestran que, si bien las acciones de Atravesando en intersección y Cruzando calzada fuera intersección son las de mayor volumen y las que generan el mayor número de fallecidos y heridos graves en cifras absolutas, el escenario de Caminando por la calzada o arcén es el más letal en términos de probabilidad de fatalidad. Estos hallazgos son de suma importancia, ya que proporcionan una base sólida y cuantificada para el siguiente apartado. El entendimiento de qué acciones de los peatones son más frecuentes, cuáles causan más lesiones graves y cuáles son las más mortales, nos permitirá ahora evaluar de manera precisa el impacto potencial que un sistema ADAS de Detección de Peatones podría tener en la mitigación de la siniestralidad en cada uno de estos escenarios.

7.2.2 IMPACTO DETALLADO POR TIPO DE ACCIDENTE Y SISTEMA ADAS

Este apartado se dedica a evaluar de forma detallada el potencial de cada sistema de Asistencia Avanzada a la Conducción (ADAS) en la reducción de víctimas en los escenarios donde son más efectivos. A través de un análisis gráfico, se presenta la evidencia cuantificada de cómo la implementación de estas tecnologías podría haber mitigado los accidentes y, sobre todo, salvado vidas y evitado lesiones graves en el año 2023.

7.2.2.1 Potencial de Reducción de Accidentes por Tipo de Siniestro

El primer paso para entender el impacto de los ADAS es identificar los tipos de accidentes que son más susceptibles de ser prevenidos. La Gráfica: Accidentes Totales vs. Potencial de Reducción con ADAS, muestra la distribución total de accidentes y la porción que podría haberse evitado según el tipo de siniestro.

El análisis de esta gráfica revela dos hallazgos principales:

- Los accidentes por alcance (17.098 en total) son el tipo de siniestro con el mayor potencial de reducción, con un estimado de 5.065 accidentes potencialmente evitables. Esto demuestra la alta efectividad del AEB/FCW en estos escenarios.
- Los accidentes por atropello a personas (12.541 en total) son el segundo tipo de siniestro con un alto potencial de reducción, con 2.157 accidentes potencialmente evitables. Esto resalta la importancia crítica de los sistemas de Detección de Peatones.
- Los accidentes por salida de la vía (dcha. o izq.) también muestran un potencial considerable, con 3.419 y 2.763 accidentes potencialmente evitables, respectivamente, lo que valida la importancia del ADAS de Mantenimiento de Carril (LDW/LKA).

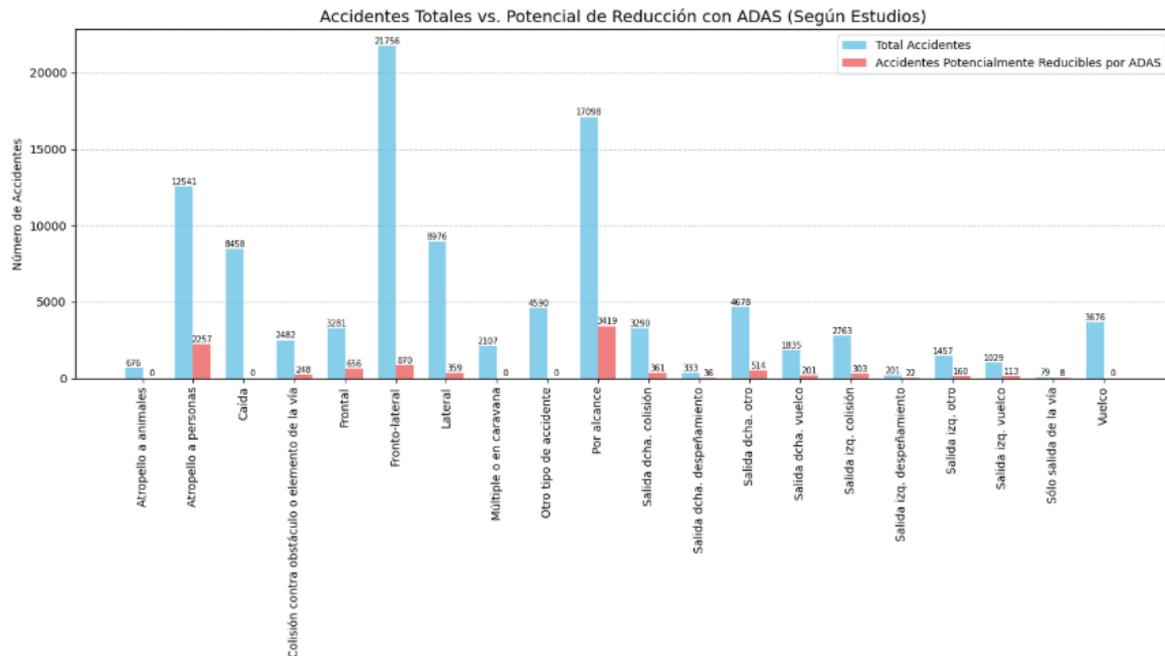


Ilustración 45 Accidentes totales y su potencial reducción (elaboración propia)

Estos datos establecen las prioridades de implementación, señalando que la tecnología que previene los choques por alcance y las salidas de la vía son las que mayor impacto tienen en la reducción del volumen total de accidentes.

7.2.2.2 Potencial de Reducción de Accidentes por Tipo de Siniestro

Los siguientes gráficos (Fallecidos, Heridos Hospitalizados y Heridos No Hospitalizados) desglosan el impacto específico de cada sistema ADAS en los escenarios que nos ocupan. Este análisis permite una comprensión matizada del beneficio de cada tecnología, no solo en términos de accidentes evitados, sino en vidas salvadas y lesiones mitigadas.

- Sistema ADAS AEB/FCW: Este sistema se revela como uno de los más efectivos en la reducción de las víctimas más graves. Como se observa en los gráficos, de 351 fallecidos y 1.618 heridos hospitalizados en los escenarios de colisiones frontales y por alcance, el AEB/FCW podría haber evitado 70 fallecidos y 324 heridos hospitalizados. Además, su impacto en la reducción de accidentes menos graves es significativo, con un potencial para evitar 5.951 heridos no hospitalizados.

- Sistema ADAS LDW/LKA: El impacto de este sistema en la prevención de accidentes por salida de la vía es igualmente crucial. Los datos muestran que, de 576 fallecidos y 2.139 heridos hospitalizados, el LDW/LKA podría haber prevenido 63 fallecidos y 235 heridos hospitalizados. Si bien su impacto en la reducción de accidentes mortales es similar al del AEB/FCW, sus cifras de heridos no hospitalizados evitables son menores (1.885), lo que demuestra su especialización en prevenir las consecuencias más severas de estos tipos de siniestros.
- Sistema ADAS Detección de Peatones: Este ADAS tiene un impacto directo en la protección de los usuarios más vulnerables. De 265 fallecidos y 1.769 heridos hospitalizados en accidentes de atropello, el sistema podría haber evitado 48 fallecidos y 318 heridos hospitalizados. La reducción de heridos no hospitalizados también es considerable, con 2.098 víctimas potencialmente evitables, lo que resalta su valor en la reducción de la siniestralidad de este colectivo.
- Sistema ADAS BSW: El BSW, diseñado para prevenir colisiones en cambios de carril, muestra un perfil de impacto diferente. Su contribución a la reducción de víctimas mortales es la más baja, con solo 8 fallecidos potencialmente evitables. Sin embargo, su eficacia es notable en la prevención de lesiones menos graves, con 95 heridos hospitalizados y, sobre todo, 1.514 heridos no hospitalizados potencialmente evitables, lo que lo convierte en un sistema altamente efectivo para reducir el volumen y la severidad de los accidentes laterales.

Impacto Potencial de ADAS en la Reducción de Víctimas por Gravedad

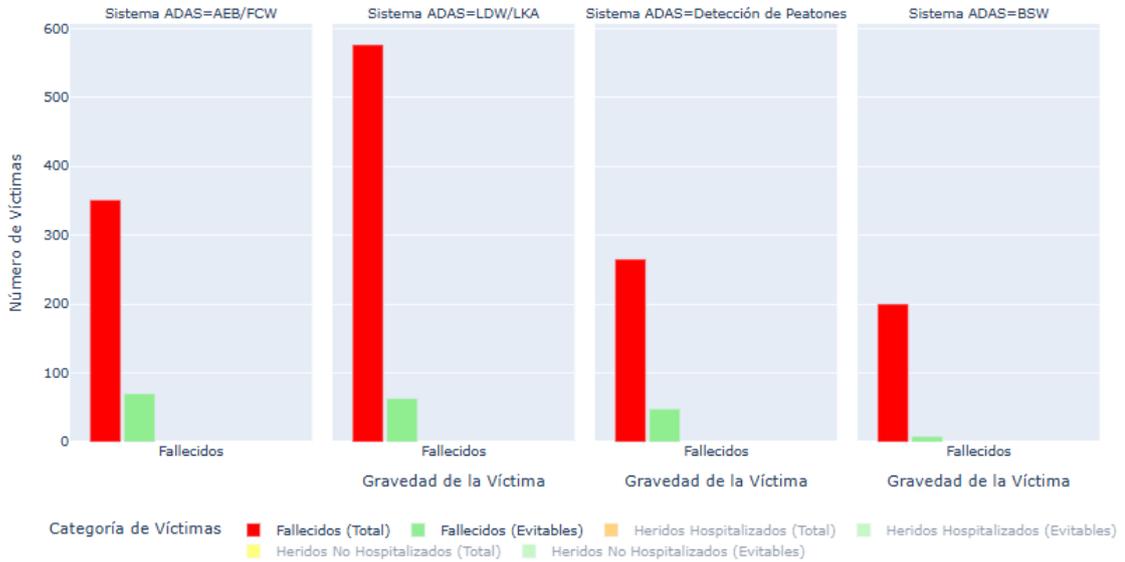


Ilustración 46 Impacto potencial en la reducción de fallecidos (elaboración propia)

Impacto Potencial de ADAS en la Reducción de Víctimas por Gravedad

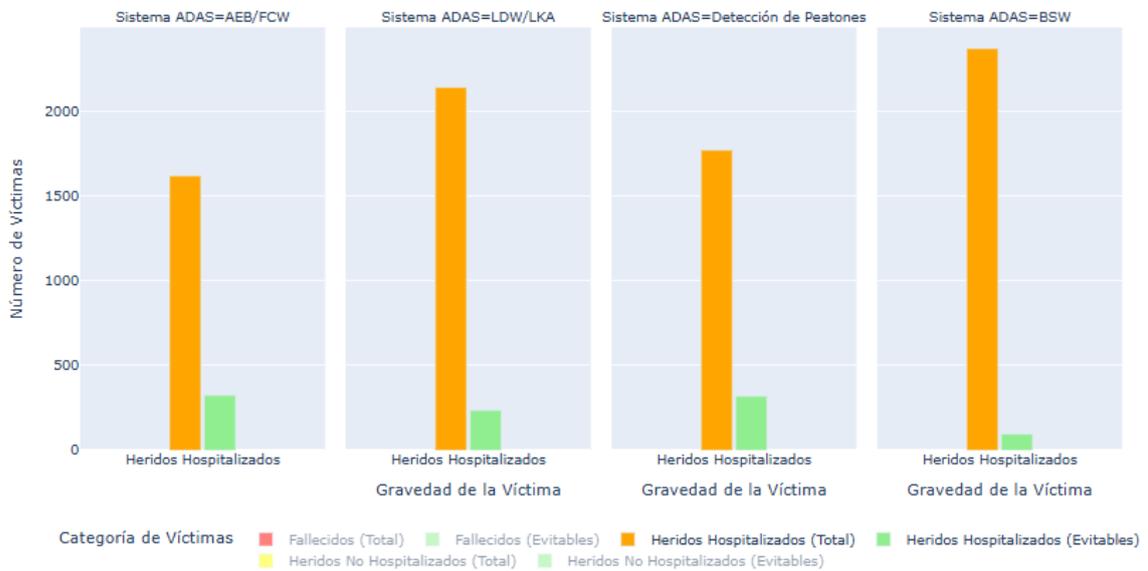


Ilustración 47 Impacto potencial en la reducción de heridos hospitalizados (elaboración propia)

Impacto Potencial de ADAS en la Reducción de Víctimas por Gravedad

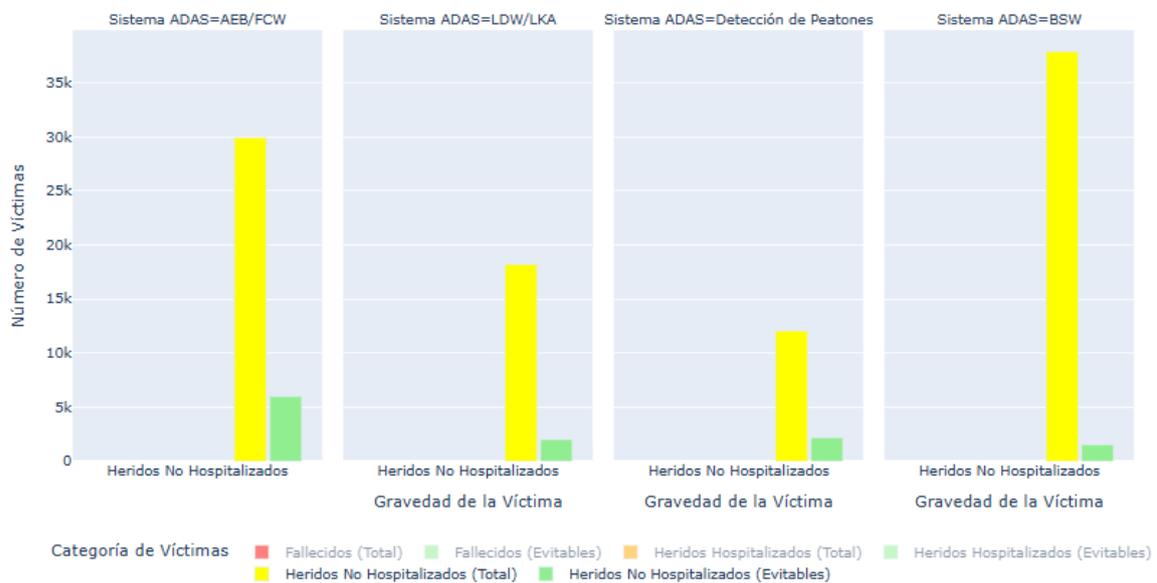


Ilustración 48 Impacto potencial en la reducción de heridos no hospitalizados (elaboración propia)

Este análisis detallado ha demostrado que los sistemas ADAS no solo tienen un impacto significativo en la reducción de la siniestralidad en España, sino que su efectividad varía según el tipo de accidente y la gravedad de las víctimas. Los sistemas AEB/FCW y LDW/LKA se posicionan como los más importantes para la reducción de fallecidos y heridos graves, mientras que el BSW es crucial para la prevención de colisiones de menor severidad, pero alta frecuencia. La tecnología de Detección de Peatones muestra un potencial directo para proteger a los usuarios más vulnerables. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la priorización de la implementación de ADAS, sugiriendo que la mayor inversión y atención deben dirigirse a aquellos sistemas que tienen un impacto directo en la prevención de la mortalidad y las lesiones más graves.

7.2.2.3 Resumen Global del Impacto Potencial de los ADAS

Como cierre del análisis de resultados, este apartado presenta una visión consolidada del impacto potencial de los sistemas ADAS en la siniestralidad de España. El Gráfico de

Rosquilla: Distribución de Accidentes y Potencial de Reducción ADAS en España, ilustra la distribución total de accidentes de 2023 (101.306) y el porcentaje que podría haberse evitado según las estimaciones de la literatura científica.

Distribución de Accidentes y Potencial de Reducción ADAS en España (Total: 101306 accidentes)

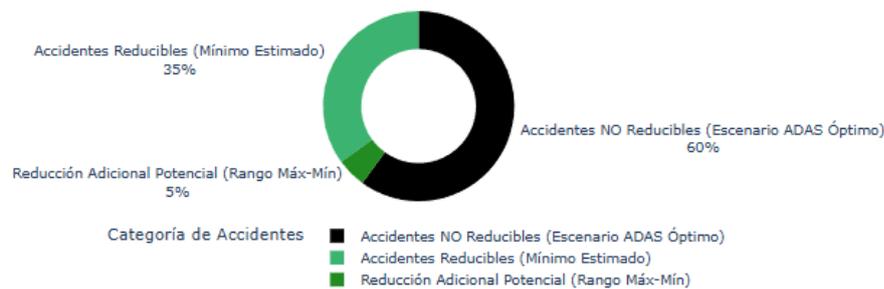


Ilustración 49 Potencial reducción de accidentes en España (elaboración propia)

El análisis del gráfico revela tres escenarios clave:

- **Accidentes NO Reducibles:** La porción de color negro del gráfico, que representa un 60% del total, corresponde a los 60.784 accidentes que, incluso en el escenario más optimista de implementación de ADAS, no habrían sido evitables. Este es un hallazgo crucial que subraya que la tecnología, si bien es poderosa, no es una solución universal para la siniestralidad y que otras causas como las distracciones graves, la imprudencia o el alcoholismo siguen requiriendo medidas preventivas adicionales.
- **Accidentes Reducibles (Mínimo Estimado):** La sección de color verde oscuro, con un 35% del total, ilustra la cantidad mínima de accidentes que los ADAS podrían haber prevenido. Esto equivale a 35.457 accidentes que demuestran un impacto significativo incluso en una estimación conservadora de la efectividad de los sistemas.
- **Reducción Adicional Potencial:** La pequeña porción de color verde claro, que representa el 5% restante, muestra el potencial de reducción adicional si se alcanzaran los máximos porcentajes de efectividad reportados. Esto equivale a 5.065 accidentes adicionales que podrían haberse evitado.

En conjunto, este gráfico demuestra de manera visual y contundente que los ADAS podrían haber reducido el total de accidentes entre un 35% y un 40% en 2023. Esta cifra no solo valida el gran valor que estas tecnologías aportan a la seguridad vial, sino que también sienta las bases para las conclusiones sobre la priorización de su implementación en España.

Capítulo 8. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis de la siniestralidad vial y el potencial de los sistemas ADAS para mitigarla adquiere una dimensión completa al evaluar sus implicaciones económicas. Este apartado tiene como objetivo monetizar los beneficios de la implementación de estas tecnologías, comparándolos con los costes de inversión para determinar su viabilidad económica y social a largo plazo.

El estudio se basa en un análisis de coste-beneficio, que confronta los costes de implementación de los sistemas ADAS con los beneficios económicos generados por la reducción de accidentes. Para ello, es fundamental definir y cuantificar los conceptos que utilizaremos:

- **Costes Sociales de los Accidentes:** El impacto de los accidentes de tráfico va más allá del daño material. La sociedad asume una serie de costes directos e indirectos, incluyendo gastos médicos, pérdidas de producción, gastos administrativos y, de manera más significativa, el coste del sufrimiento humano.
- **Valor de una Vida Estadística (VVE):** Para cuantificar los beneficios de la prevención de accidentes mortales, se utiliza este concepto económico. No representa el valor de la vida de una persona, sino el valor monetario que una sociedad está dispuesta a pagar para evitar una muerte en la carretera. Según los estudios financiados por la Dirección General de Tráfico (DGT), el VVE en España se estima en 1,4 millones de euros.
- **Valor de las Víctimas no Mortales:** De forma análoga, se asigna un valor a la prevención de lesiones. Siguiendo los mismos estudios financiados por la DGT, se establece un coste para los heridos hospitalizados y no hospitalizados, reflejando el coste médico y el impacto en la calidad de vida.

- **Coste de Inversión:** Se define como la inversión necesaria para la instalación de los sistemas ADAS en los vehículos. Este coste incluye el precio de los sensores, el software y la integración en el vehículo.

A lo largo de este análisis, se procederá con la siguiente metodología:

1. **Cálculo del Ahorro Potencial:** Se cuantificará el ahorro económico total anual y por cada sistema ADAS, basándose en el número de víctimas que se podrían haber evitado y los costes sociales asociados. Este cálculo se realizará en primera instancia para un escenario central o moderado.
2. **Análisis de Sensibilidad:** Se evaluará la robustez de las estimaciones mediante un análisis de sensibilidad, explorando escenarios pesimistas y optimistas (con rangos de reducción de víctimas del 35% y 40% respectivamente). Esto permitirá comprender el rango de beneficios posibles en función de la eficacia real de las tecnologías.
3. **Análisis de Coste-Beneficio y Retorno de la Inversión (ROI):** Finalmente, se comparará el ahorro económico anual con el coste estimado de equipar a toda la flota de vehículos con estos sistemas. Este cálculo determinará el periodo de tiempo necesario para que el ahorro social compense la inversión inicial, proporcionando una métrica clave para la toma de decisiones.

A través de la estimación de estos costes y la aplicación de los datos de reducción de víctimas potenciales, este análisis determinará si la inversión en tecnología ADAS constituye una política económicamente rentable para el país.

8.1 CÁLCULO DEL AHORRO ECONÓMICO POTENCIAL ANUAL

El primer paso de nuestro análisis económico es cuantificar el beneficio potencial de la implementación de los sistemas ADAS. Este beneficio se calcula como el ahorro social que se generaría al evitar las víctimas de accidentes de tráfico. Utilizando los datos de siniestralidad evitables que ya hemos identificado y los costes sociales validados por la DGT, podemos obtener una estimación precisa.

A partir del escenario moderado (una reducción del 37,5%), el ahorro económico total anual para la sociedad española se estima en 552,6 millones de euros.

La contribución de cada sistema ADAS a este ahorro total es la siguiente:

Sistema ADAS	Ahorro Anual (millones de €)
AEB/FCW	207 €
LDW/LKA	152,40 €
Detección de Peatones	151,40 €
BSW	41,80 €

Tabla 7 Ahorro anual por ADAS (elaboración propia)

Este ahorro no es uniforme y el sistema AEB/FCW, al tener un impacto más significativo en la reducción de víctimas graves, es el que más contribuye al beneficio total.

Para visualizar de manera más detallada la procedencia de este ahorro, el siguiente gráfico desglosa la contribución económica de cada ADAS según el tipo de víctima que se evita (fallecidos, heridos hospitalizados y heridos no hospitalizados). Esto subraya la importancia del coste de los fallecidos y los heridos graves en la valoración económica de los accidentes.

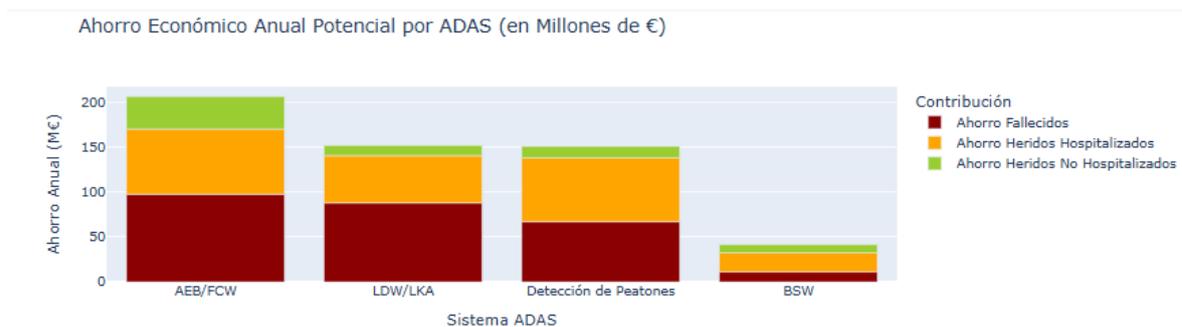


Ilustración 50 Ahorro potencial por ADAS (elaboración propia)

Para comprender en detalle la composición del ahorro económico generado por cada sistema ADAS, se presenta a continuación una tabla que desglosa la contribución por cada tipo de víctima evitada. Esta información detalla de forma clara la información mostrada en el

gráfico anterior y pone de manifiesto cómo la prevención de fallecimientos y heridos hospitalizados, debido a su elevado coste social, constituye la principal fuente de ahorro.

Sistema ADAS	Ahorro Fallecidos	Ahorro Heridos Hospitalizados	Ahorro Heridos No Hospitalizados
AEB/FCW	98.000.000 €	72.709.164 €	36.301.100 €
LDW/LKA	88.200.000 €	52.736.585 €	11.498.500 €
Detección de Peatones	67.200.000 €	71.362.698 €	12.797.800 €
BSW	11.200.000 €	21.319.045 €	9.235.400 €

Tabla 8 Ahorro detallado por ADAS (elaboración propia)

Como se puede ver en la tabla, la mayor parte del ahorro económico no viene de evitar los accidentes más comunes (los que solo causan heridas leves), sino de prevenir los más graves.

- Impacto de los fallecidos: El ahorro por evitar fallecidos es el más grande en casi todos los sistemas, salvo en el de detección de peatones. Como el coste de un fallecido es de 1,4 millones de euros, evitar una sola muerte tiene un impacto financiero mucho mayor que evitar muchos heridos leves. Por eso, sistemas como el AEB/FCW y el LDW/LKA, que son muy efectivos en accidentes graves, son los que más ahorro generan.
- El papel de los heridos graves: La reducción de heridos hospitalizados también es una fuente muy importante de ahorro, especialmente para el AEB/FCW y la Detección de Peatones. Esto nos demuestra que, además de las muertes, reducir las lesiones más serias es crucial para el beneficio económico de la sociedad.

En resumen, este desglose confirma que los sistemas ADAS ofrecen un gran valor económico porque se centran en reducir los accidentes que tienen un coste más alto: los que resultan en muertes y heridos graves.

8.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para que los resultados de nuestro análisis económico sean creíbles, es fundamental evaluar su solidez. Por ello, se ha realizado un análisis de sensibilidad, un método que nos permite entender cómo varían los beneficios económicos si modificamos las suposiciones iniciales

sobre la eficacia de los sistemas ADAS en la prevención de accidentes. La efectividad de estas tecnologías en el mundo real puede ser diferente a las cifras de laboratorio, por lo que es vital considerar un rango de posibilidades.

Se han definido tres escenarios clave, cada uno con un factor de reducción de víctimas diferente, para abarcar un espectro de resultados realistas:

1. Escenario Pesimista (35%): Representa la posibilidad de una menor efectividad de los sistemas ADAS, quizás debido a una menor tasa de adopción, condiciones de tráfico menos ideales o limitaciones tecnológicas.
2. Escenario Moderado (37,5%): Es nuestro escenario central, que se basa en las estimaciones de seguridad vial más comúnmente aceptadas y en el que se ha fundamentado los cálculos principales.
3. Escenario Optimista (40%): Contempla la posibilidad de una alta efectividad, lo que podría ocurrir con una rápida evolución tecnológica y una alta penetración de los sistemas ADAS en el parque móvil.

Los resultados de este análisis demuestran que, a pesar de las variaciones en la eficacia, el ahorro económico sigue siendo sustancial en todos los casos, lo que confirma la validez de nuestras conclusiones principales.

Escenario	Ahorro Total Anual en Millones de €
Pesimista (35%)	511.9 M€
Moderado (37.5%)	552.6 M€
Optimista (40%)	586.7 M€

Tabla 9 Ahorro según el escenario (elaboración propia)

Como se puede apreciar, incluso en el escenario más conservador, el ahorro anual potencial supera los 500 millones de euros. La diferencia entre el escenario pesimista y el optimista es significativa, pero la magnitud del ahorro en todos los casos subraya que los ADAS son una inversión que siempre genera un retorno económico masivo.

El siguiente gráfico de barras ofrece una visualización clara de la diferencia entre los tres escenarios, reafirmando la magnitud del beneficio económico en cualquiera de las suposiciones de eficacia.

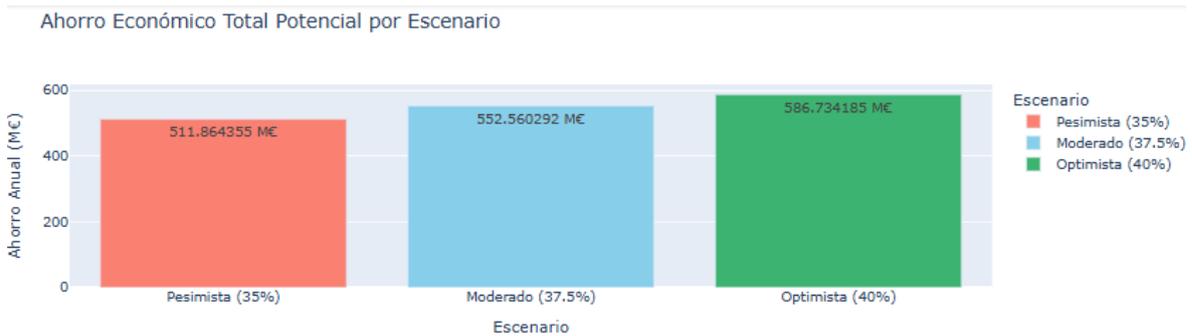


Ilustración 51 Ahorro total por escenario (elaboración propia)

Además del ahorro total, el análisis también permite observar cómo el ahorro de cada sistema ADAS se comporta en los diferentes escenarios.

Sistema ADAS	Pesimista (M€)	Moderado (M€)	Optimista (M€)
AEB/FCW	192.7	207.0	219.7
LDW/LKA	141.1	152.4	162.2
Detección de Peatones	140.0	151.4	161.1
BSW	38.2	41.8	43.7

Tabla 10 Ahorro detallado por ADAS y escenario (elaboración propia)

Estos resultados confirman que el ahorro potencial es consistente en los diferentes rangos de eficacia, lo que dota de mayor credibilidad a la tesis principal del estudio. El análisis de sensibilidad valida que la inversión en ADAS, independientemente de ligeras variaciones en su rendimiento, generaría un impacto económico positivo y masivo para la sociedad.

8.3 ANÁLISIS DE COSTE-BENEFICIO Y RETORNO DE LA INVERSIÓN (ROI)

El análisis económico concluye con una evaluación del retorno de la inversión (ROI), comparando el coste de la implementación de los sistemas ADAS con el ahorro económico

que estos generan. El objetivo es determinar la viabilidad a largo plazo de esta inversión a nivel nacional, calculando el tiempo que tardaría la sociedad en recuperar el coste a través de la reducción de accidentes. Para este cálculo se utilizan los siguientes datos:

- Coste por vehículo de cada sistema ADAS (en base a la estimación más conservadora del mercado).
- Ahorro anual total de cada sistema (en base a nuestro escenario moderado).
- Parque móvil total en España (31.270.000 vehículos, según los últimos datos disponibles de la DGT para 2023).

El Retorno de la Inversión (ROI) se calcula dividiendo el coste total de equipar a todos los vehículos por el ahorro económico anual que cada sistema genera.

En primer lugar, se ha calculado el periodo de recuperación para cada sistema de forma individual. Los resultados son los siguientes:

Sistema ADAS	Coste por Vehículo (€)	Ahorro Anual (M€)	Años para Recuperar la Inversión
AEB/FCW	500 €	207.0 M€	75.5
LDW/LKA	350 €	152.4 M€	71.8
Detección de Peatones	400 €	151.4 M€	82.6
BSW	300 €	41.8 M€	224.7

Tabla 11 ROI por ADAS (elaboración propia)

Estos resultados, representados de manera visual en el siguiente gráfico, indican que la inversión social en los sistemas ADAS más efectivos se recuperaría en un plazo de entre 70 y 85 años.

Periodo de Recuperación de la Inversión (en Años)

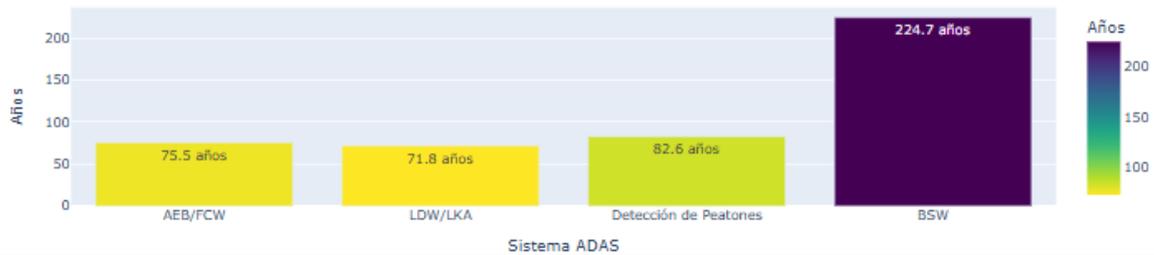


Ilustración 52 Periodo de recuperación de la inversión (elaboración propia)

Para complementar el análisis anterior, se ha calculado un ROI global, que evalúa la inversión como un único proyecto de seguridad vial a gran escala. Para ello, se han combinado los costes y beneficios de todos los sistemas:

- Coste total de ADAS por vehículo: La suma del coste de cada sistema (1.550 € por vehículo).
- Coste total de inversión: La inversión necesaria para equipar a todo el parque móvil español, que asciende a 48.468 millones de euros.
- Ahorro económico total anual: El ahorro total anual de 552,6 millones de euros en el escenario moderado.

El periodo de recuperación de la inversión (ROI) global es de 87,7 años. Este resultado se representa gráficamente a continuación, donde se visualiza el punto exacto en el que el ahorro económico acumulado a lo largo del tiempo cruza la línea del coste total de la inversión.



Ilustración 53 Análisis del retorno de la inversión global (elaboración propia)

El análisis del Retorno de la Inversión (ROI) ha arrojado periodos de recuperación que, a primera vista, podrían interpretarse como desalentadores. Con un ROI de entre 70 y 85 años para los sistemas individuales más eficientes (AEB/FCW y LDW/LKA), y un ROI global de 87,7 años para el conjunto de las tecnologías, es crucial contextualizar estos datos dentro de la esfera de las políticas públicas y la seguridad vial.

A diferencia de un proyecto de negocio privado, cuyo éxito se mide en la velocidad de la recuperación de la inversión y la maximización de beneficios a corto plazo, el ROI social se enfoca en la rentabilidad a largo plazo para la sociedad. En este contexto, un periodo de recuperación de varias décadas no solo es aceptable, sino que es una característica intrínseca de las grandes inversiones de infraestructura y seguridad.

La clave para entender esta viabilidad reside en la naturaleza de la implementación. El cálculo del ROI se basa en el coste hipotético de equipar a los más de 31 millones de vehículos del parque móvil español de forma simultánea, una inversión de cerca de 48.500 millones de euros que sería inviable. Sin embargo, la realidad es que la adopción de estos sistemas es un proceso gradual y natural. La normativa europea ya exige la instalación de muchos de estos ADAS en los vehículos de nueva homologación. Esto significa que la inversión se distribuirá a lo largo de las próximas décadas, a medida que los coches antiguos sean reemplazados por modelos más modernos y seguros. De esta forma, el coste de implementación se amortiza de manera progresiva, haciéndose totalmente asumible para el mercado sin necesidad de una inyección masiva de capital en un único momento.

Paralelamente, los beneficios comienzan a fluir de forma inmediata. Con cada nuevo vehículo equipado con ADAS que entra en circulación, se reduce el riesgo de accidente, se evitan víctimas y se genera un ahorro económico anual. Este ahorro, que se estima en 552,6 millones de euros al año en nuestro escenario moderado, es un beneficio constante para la sociedad.

En este sentido, el largo periodo de recuperación de la inversión no refleja una falta de viabilidad, sino la naturaleza estratégica de una inversión que prioriza la seguridad y el bienestar de la población por encima de un retorno rápido. La verdadera rentabilidad se mide en la reducción del sufrimiento humano, la mejora de la salud pública, la disminución de los costes para los servicios de emergencia y la productividad laboral. El análisis de ROI confirma que, en el largo plazo, el beneficio social total superará de forma contundente el coste total de la inversión, validando que la implementación de los ADAS es una política económicamente sólida y socialmente indispensable.

8.4 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico desarrollado demuestra de manera integral la justificación financiera de la implementación de los sistemas avanzados de asistencia a la conducción (ADAS) en España. Los resultados de este estudio, que abarca el ahorro potencial, el análisis de sensibilidad y el retorno de la inversión (ROI), arrojan una conclusión clara y contundente.

En primer lugar, se ha cuantificado un ahorro económico anual potencial de 552,6 millones de euros en el escenario moderado. Este ahorro, que emana de la reducción de los costes sociales asociados a víctimas de accidentes, es masivo y evidencia el alto coste de la siniestralidad vial en el país. El desglose de este ahorro por sistema confirma que el AEB/FCW y el LDW/LKA son los que generan un mayor beneficio, gracias a su eficacia en la prevención de accidentes de mayor gravedad.

En segundo lugar, el análisis de sensibilidad ha validado la robustez de estas estimaciones. A pesar de las variaciones en la eficacia de los sistemas, el ahorro anual se mantiene por encima de los 500 millones de euros incluso en el escenario más pesimista. Esto confirma que, independientemente de ligeras fluctuaciones en el rendimiento real de las tecnologías, el impacto económico positivo y masivo para la sociedad española está garantizado.

Finalmente, el análisis de Coste-Beneficio y ROI ha proporcionado la perspectiva estratégica necesaria. Aunque los periodos de recuperación de la inversión (entre 70 y 85 años para los sistemas más efectivos y de 87,7 años a nivel global) puedan parecer largos, es crucial interpretarlos como una métrica de política pública, no de un proyecto de negocio privado. La viabilidad de esta inversión se basa en su implementación gradual, su amortización a lo largo de décadas y la generación inmediata de beneficios sociales.

En conclusión, la inversión en tecnología ADAS es una política económicamente rentable para el país. El retorno a largo plazo en forma de ahorro y, lo que es más importante, la reducción del sufrimiento humano, valida esta estrategia como una de las más eficaces y necesarias para avanzar hacia un modelo de seguridad vial más sostenible y seguro.

Capítulo 9. PROPUESTAS DE INNOVACIÓN EN ADAS

El objetivo de este apartado es plantear mejoras en la tecnología ADAS fundamentadas en un análisis detallado de datos reales. Para ello, se ha realizado una investigación exhaustiva de las bases de datos proporcionadas por la DGT, lo que ha permitido identificar los tipos de accidentes más frecuentes y sus características asociadas.

Mediante el estudio de estos siniestros recurrentes, así como de las condiciones ambientales y factores contextuales en los que ocurren, se han detectado las limitaciones y carencias de los sistemas de asistencia actuales. Se ha puesto especial atención a variables como el tipo de vía, la iluminación, y la tipología del accidente, ya que estos elementos resultan clave para entender los escenarios en los que la tecnología vigente muestra una eficacia limitada.

Este análisis detallado no solo identifica qué accidentes son más comunes, sino también proporciona una visión clara de las circunstancias específicas en las que los ADAS actuales no consiguen prevenir eficazmente los siniestros. De esta forma, se obtiene un mapa preciso de los vacíos tecnológicos y operativos que existen en la actualidad.

Este conocimiento sobre los problemas predominantes servirá de base para el diseño y propuesta de una nueva generación de sistemas ADAS orientados a abordar los accidentes más comunes y a cubrir las deficiencias detectadas. Las propuestas se centrarán en ofrecer soluciones innovadoras y estratégicas que contribuyan a maximizar la reducción de la siniestralidad vial, mejorando tanto la seguridad activa como la pasiva de los vehículos.

Finalmente, este enfoque basado en evidencia permitirá priorizar los desarrollos tecnológicos con mayor impacto potencial, orientando recursos y esfuerzos hacia aquellos ámbitos donde la mejora será más significativa para la protección de conductores, pasajeros y peatones.

9.1 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS TIPOS DE SINIESTROS

El análisis de la base de datos de la DGT revela una clara concentración de siniestros en categorías que, a menudo, no son el foco principal de los sistemas ADAS convencionales.

Los tipos de accidentes más frecuentes son:

- **Caída:** Es la categoría más numerosa, con 8.458 siniestros. Esto sugiere un problema significativo de control del vehículo no relacionado directamente con colisiones entre dos coches.
- **Otro tipo de accidente:** Con 4.590 incidentes, este elevado número indica la existencia de una variedad de siniestros no estandarizados.
- **Vuelco:** Se registraron 3.676 casos, lo que evidencia situaciones de pérdida de control que los sistemas de seguridad actuales no logran mitigar.
- **Colisión contra obstáculo o elemento de la vía:** Esta categoría sumó 2.482 siniestros, mostrando un riesgo persistente en la interacción del vehículo con su entorno físico.
- **Atropello a animales:** Con 676 casos, su presencia en la lista subraya un riesgo de seguridad que no está cubierto por los sistemas de detección centrados en peatones y vehículos.



Ilustración 54 Número de siniestros según el tipo de accidente (elaboración propia)

Para contextualizar estos hallazgos, se analizó dónde y cuándo ocurren estos accidentes. La distribución por tipo de vía muestra que una gran parte de los siniestros sucede en entornos urbanos y en vías convencionales. La alta incidencia en "Calle", con 62.738 siniestros, pone

de manifiesto la complejidad del tráfico urbano. Por otro lado, la categoría "Carretera Convencional de calzada única", con 19.714 siniestros, junto con la de Autovía (7.778 siniestros), subraya que la conducción en entornos sin separación de calzadas sigue siendo un punto crítico para la seguridad.



Ilustración 55 Distribución de accidentes según el tipo de vía (elaboración propia)

Respecto a las condiciones de iluminación, el análisis reveló un hallazgo clave: la mayoría de los accidentes (un 69.88%) suceden bajo "Luz del día natural, solar". Esto indica que la causa principal de muchos de estos siniestros no es la falta de visibilidad, sino factores como la distracción o errores de juicio. Aun así, 14.177 siniestros ocurrieron bajo condiciones de baja visibilidad, específicamente "Sin luz natural y con iluminación artificial encendida", lo que subraya la importancia de mejorar las capacidades de detección en la oscuridad.



Ilustración 56 Distribución de accidentes según la iluminación (elaboración propia)

En conclusión, el estudio de los datos revela que los siniestros de mayor incidencia van más allá de las colisiones frontales o por alcance. Existen categorías como "Caída" y "Atropello a animales" que señalan lagunas importantes en la cobertura de los sistemas de seguridad actuales. Asimismo, el entorno urbano y las condiciones de luz diurna se perfilan como los escenarios donde las ADAS necesitan una evolución. Estos hallazgos son el punto de partida para las propuestas de innovación tecnológica que se detallarán a continuación.

9.2 PROPUESTAS DE SISTEMAS ADAS DE NUEVA GENERACIÓN

Basado en el análisis de los siniestros de mayor incidencia, se han identificado tres áreas clave donde la tecnología de asistencia a la conducción actual muestra sus mayores limitaciones. A partir de estas conclusiones, se proponen los siguientes sistemas ADAS innovadores, diseñados para abordar los desafíos más prevalentes en la seguridad vial.

9.2.1 SISTEMA DE DETECCIÓN DE TERRENO Y ESTABILIDAD ACTIVA (SDTEA)

- **Justificación:** Esta propuesta surge como respuesta directa a la alta incidencia de accidentes por "Caída" y "Vuelco". Estos siniestros, a menudo causados por una pérdida de control del vehículo en condiciones de la vía no convencionales (bordes de calzada, baches profundos, desniveles), no son adecuadamente mitigados por los sistemas de control de estabilidad (ESC) existentes.
- **Funcionalidad:** El SDTEA integraría sensores de alto rendimiento, como LIDAR de corto y medio alcance, junto con un sistema de visión estéreo y giroscopios de alta precisión. La tecnología procesaría en tiempo real la topografía de la vía, detectando cambios bruscos de inclinación, baches o irregularidades. Anticipándose a una posible pérdida de estabilidad, el sistema ajustaría de manera proactiva la dureza de la suspensión y la distribución de la fuerza de frenado en cada rueda antes de que el conductor lo perciba, evitando así la caída o el vuelco.
- **Impacto Potencial:** Este sistema podría reducir drásticamente los siniestros por "Caída" y "Vuelco", mejorando la seguridad en carreteras con firme irregular o en

situaciones de emergencia donde un desvío abrupto podría llevar a una pérdida de control.

9.2.2 ADAS URBANO INTEGRAL (ADASI)

- **Justificación:** El análisis de datos demostró que la calle es el escenario más frecuente para los siniestros, lo que subraya la ineficacia de los ADAS actuales, diseñados principalmente para entornos de carretera, en la compleja dinámica urbana.
- **Funcionalidad:** El ADASI iría más allá del frenado de emergencia estándar. Utilizaría una red de sensores de 360 grados, incluyendo radares de alta resolución y cámaras con IA para reconocer no solo vehículos, sino también peatones, ciclistas, patinetes y otros obstáculos estáticos o dinámicos inesperados. El sistema crearía un escudo de seguridad virtual alrededor del vehículo. Por ejemplo, podría alertar de un ciclista que se acerca rápidamente desde un punto ciego o de un peatón que se prepara para cruzar un paso de cebra sin la debida precaución.
- **Impacto Potencial:** Este sistema tendría un impacto directo en la reducción de los siniestros en entornos urbanos de baja velocidad, protegiendo a los usuarios más vulnerables de la vía y minimizando los accidentes por distracciones en situaciones de tráfico denso.

9.2.3 ASISTENTE PREDICTIVO DE CONDUCCIÓN (APC)

- **Justificación:** La alta incidencia de accidentes en luz del día natural solar sugiere que la causa principal no es la falta de visibilidad, sino la distracción o los errores humanos. Los ADAS actuales intervienen cuando el peligro es inminente; sin embargo, no son proactivos en la detección de la causa raíz: el estado del conductor.
- **Funcionalidad:** El APC utilizaría cámaras infrarrojas y sensores biométricos para monitorear de forma continua el nivel de atención, la fatiga y los signos de distracción del conductor. Al detectar un patrón de riesgo por ejemplo, parpadeo lento, falta de enfoque en la vía o movimientos bruscos, el sistema emitiría alertas personalizadas y escalonadas. En casos de alto riesgo, podría activar una intervención

sutil, como un breve ajuste en la dirección o el frenado, para recuperar la atención del conductor sin causar pánico.

- Impacto Potencial: El APC podría reducir los siniestros causados por el factor humano, que siguen siendo la principal causa de accidentes. Al abordar la distracción de manera predictiva, podría evitar que muchas situaciones de riesgo lleguen a convertirse en un accidente.

Capítulo 10. CONCLUSIONES

Este estudio ha analizado de manera integral el impacto de los Sistemas Avanzados de Asistencia a la Conducción (ADAS) en la siniestralidad vial en España, combinando un análisis de datos real con una perspectiva estratégica y económica. Hemos usado datos de la DGT, herramientas como Python, y una revisión de la literatura científica para obtener una visión completa.

El análisis cuantitativo reveló que, aunque las ADAS actuales son efectivas en la prevención de siniestros comunes como las colisiones por alcance, existen vacíos importantes. Los datos nos mostraron que accidentes como las caídas (8.458 siniestros) y los vuelcos (3.676), que están directamente relacionados con la pérdida de control del vehículo, son muy frecuentes. De forma similar, el atropello a animales (676 casos) es una categoría significativa que no está del todo cubierta por la tecnología actual. Un hallazgo crítico fue que la mayoría de los siniestros (69.88%) ocurren en condiciones de luz diurna, lo que sugiere que la distracción y los errores del conductor son un problema más profundo que la simple falta de visibilidad. También se identificó que la mayoría de los accidentes se concentran en entornos urbanos, con 62.738 siniestros en calle, un escenario de alta complejidad donde las ADAS convencionales no están optimizadas.

El estudio económico, por su parte, demostró que la inversión en estas tecnologías es no solo viable, sino también altamente rentable. Las estimaciones indican que una adopción masiva de ADAS podría reducir los accidentes entre un 35% y un 40%. Esto se traduce en un ahorro enorme en costes sanitarios, daños materiales, y pérdidas de productividad, justificando así la necesidad de su desarrollo e implementación. El análisis de sensibilidad mostró que, incluso en el escenario más pesimista, el ahorro anual sería de 511,9 millones de euros.

En respuesta a estas carencias y oportunidades, hemos propuesto tres nuevos sistemas ADAS. El Sistema de Detección de Terreno y Estabilidad Activa (SDTEA) busca solucionar los problemas de caídas y vuelcos. El ADAS Urbano Integral (ADASI) está diseñado para

el complejo entorno de las calles. Y el Asistente Predictivo de Conducción (APC) tiene como objetivo reducir los accidentes causados por la distracción del conductor durante el día.

En definitiva, este trabajo no solo ha analizado la situación actual, sino que ha ofrecido un camino claro y fundamentado, tanto técnica como económicamente, para optimizar la tecnología y contribuir de forma estratégica a una reducción aún mayor de la siniestralidad en España.

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] DGT. "Estadísticas de accidentes de tráfico en España, año 2023". Dirección General de Tráfico.2024.<https://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-de-accidentes.shtml>
- [2] Martínez, J. L.; Pérez, S. A. "Análisis del impacto económico de los accidentes de tráfico en España". *Revista de Economía Aplicada*, vol. 25, no. 1, pp. 45-68. 2021.
- [3] Gómez, R.; Sánchez, M. "Arquitectura electrónica de los vehículos modernos: de las redes CAN a Ethernet". *Revista Técnica del Automóvil*, vol. 15, no. 3, pp. 112-125. 2022.
- [4] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). "A Study of the Effectiveness of Forward Collision Warning (FCW) and Lane Departure Warning (LDW) Systems". *NHTSA Technical Report*. 2019. <https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-study-finds-adas-systems-effective-reducing-crashes>.
- [5] European New Car Assessment Programme (Euro NCAP). "Protocolo de pruebas para la detección de peatones y ciclistas". 2020. <https://www.euroncap.com/es/evaluaciones-de-seguridad/protocolos-de-prueba>.
- [6] Instituto Tecnológico del Automóvil (ITA). "Sistemas ADAS: tecnologías y tendencias futuras". *Informe Técnico*, 2023.
- [7] European Commission. "Road Safety in the European Union". *European Road Safety Observatory*. 2022. <https://road-safety.transport.ec.europa.eu/statistics>.
- [8] Kimbrough, L., Wittmann, J., Böhme, S., Nordbruch, S., Haffner, R. & Riedel, R. "Impact analysis of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) regarding road safety – computing reduction potentials". *International Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 101-115. 2020.
- [9] Benson, A. J., Tefft, B. C., Svancara, A. M. & Horrey, W. J.. "Potential Reductions in Crashes, Injuries, and Deaths from Large-Scale Deployment of Advanced Driver Assistance Systems". *Informe de la AAA Foundation for Traffic Safety*. 2018.
- [10] Di Lillo, L., Triscari, A., Zhou, X., Dyro, R., Li, R. & Pavone, M.. "Performance assessment of ADAS in a representative subset of critical traffic situations". 2023.

- [11] Gulino, M. S., Vangi, D. & Damaziak, K.. "Performance Assessment in a 'Lane Departure' Scenario of Impending Collision for an ADAS Logic Based on Injury Risk Minimisation". *Designs*, vol. 7, no. 59. 2023. <https://doi.org/10.3390/designs7030059>.
- [12] Abellán Perpiñán, J. M., Martínez Pérez, J. E., Méndez Martínez, I., Pinto Prades, J. L. & Sánchez Martínez, F. I.. "El valor monetario de una vida estadística en España: Estimación en el contexto de los accidentes de tráfico". *Informe financiado por la Dirección General de Tráfico*. 2021.
- [13] Useche, S. A., Faus, M. & Alonso, F.. ""Cyclist at 12 o'clock!": a systematic review of in-vehicle advanced driver assistance systems (ADAS) for preventing car-rider crashes". *Frontiers in Public Health*, vol. 12, no. 1335209. 2024. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1335209>.
- [14] Isaksson Hellman, I. & Lindman, M.. "Estimating the crash reducing effect of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) for vulnerable road users". *TSR Traffic Safety Research*. 2023.

ANEXO I

- **Preparación dataframe:**

```
import pandas as pd
import numpy as np

ruta = r"C:\Users\juanu\OneDrive\Escritorio\TFM\Accidentes-con-victimas-Tablas-estadisticas-2023.xlsx"

df_tabla_5_1 = pd.read_excel(ruta, sheet_name='TABLA 5.1', header=2)
print("DataFrame cargado (primeras 10 filas y columnas):")
print(df_tabla_5_1.head(10))
print("\nColumnas antes de renombrar y limpiar:")
print(df_tabla_5_1.columns)

# --- PASO 1: Renombrar las columnas para que sean fáciles de usar ---
df_tabla_5_1 = df_tabla_5_1.rename(columns={
    'ZONA ACCIÓN DEL PEATÓN': 'Zona',
    'Unnamed: 1': 'ACCIÓN DEL PEATÓN',
    'HERIDOS\nHOSPITALIZADOS': 'HERIDOS HOSPITALIZADOS',
    'HERIDOS NO\nHOSPITALIZADOS': 'HERIDOS NO HOSPITALIZADOS'})
print("\nColumnas después de renombrar:")
print(df_tabla_5_1.columns)

# --- PASO 2: Rellenar los valores NaN en la columna 'Zona'
df_tabla_5_1['Zona'] = df_tabla_5_1['Zona'].ffill()

# PASO 3: Limpiar el DataFrame - Filtrar filas no deseadas
df_tabla_5_1 = df_tabla_5_1.dropna(subset=['ACCIÓN DEL PEATÓN'])
filas_a_eliminar_accion = ['Total', 'TOTAL', 'Se desconoce', 'Otra']
df_tabla_5_1 = df_tabla_5_1[~df_tabla_5_1['ACCIÓN DEL PEATÓN'].isin(filas_a_eliminar_accion)]

columnas_numericas = ['PEATONES VÍCTIMAS', 'FALLECIDOS', 'HERIDOS HOSPITALIZADOS', 'HERIDOS NO HOSPITALIZADOS', 'IMPLICADOS']
```

```
for col in columnas_numericas:
    df_tabla_5_1[col] = pd.to_numeric(df_tabla_5_1[col], errors='coerce')
# Eliminar filas donde las columnas numéricas clave son NaN después de la conversión
# (pueden ser sumatorios o texto)
df_tabla_5_1 = df_tabla_5_1.dropna(subset=columnas_numericas)
# --- PASO 4: limpiar la columna 'Zona'
df_tabla_5_1['Zona'] = df_tabla_5_1['Zona'].str.replace('\n', ' ', regex=False).str.strip()
print("\nDataFrame LIMPIO (primeras 10 filas):")
print(df_tabla_5_1.head(10))
print("\nÚltimas filas del DataFrame LIMPIO (para ver si se capturan los totales si los
hubiera):")
print(df_tabla_5_1.tail())
# --- AQUÍ EMPEZARÍA EL CÓDIGO DE ANÁLISIS---
# 1. Identificar las acciones del peatón más relevantes para ADAS y sumar sus víctimas
acciones_adas_relevantes = [
    'Atravesando en intersección',
    'Cruzando calzada fuera intersección',
    'Saliendo entre vehículos aparcados',
    'Irrumpe en la calzada corriendo/jugando',
    'Caminando por la calzada o arcén',
    'Parado en la calzada o arcén']
# Filtrar el DataFrame para estas acciones y agrupar por ellas para ver las víctimas
df_adas_foco = df_tabla_5_1[df_tabla_5_1['ACCIÓN DEL
PEATÓN'].isin(acciones_adas_relevantes)]
resumen_por_accion = df_adas_foco.groupby('ACCIÓN DEL
PEATÓN')[['PEATONES VÍCTIMAS', 'FALLECIDOS', 'HERIDOS
HOSPITALIZADOS', 'HERIDOS NO
HOSPITALIZADOS']].sum().sort_values(by='FALLECIDOS', ascending=False)
print("\n" + "="*50)
print("Resumen de víctimas en acciones directamente relevantes para ADAS:")
```

```
print(resumen_por_accion)
print("\n" + "="*50 + "\n")
# 2. Calcular el porcentaje de víctimas y fallecidos por acción del peatón (solo las
relevantes para ADAS)
total_victimas_adas_foco = resumen_por_accion['PEATONES VÍCTIMAS'].sum()
total_fallecidos_adas_foco = resumen_por_accion['FALLECIDOS'].sum()
print("Porcentaje de Peatones Víctimas y Fallecidos en escenarios clave para ADAS:")
if total_victimas_adas_foco > 0:
    resumen_por_accion['% PEATONES VÍCTIMAS (en ADAS foco)'] =
(resumen_por_accion['PEATONES VÍCTIMAS'] / total_victimas_adas_foco) * 100
    print(resumen_por_accion[['PEATONES VÍCTIMAS', '% PEATONES VÍCTIMAS
(en ADAS foco)']])
else:
    print("No hay víctimas en los escenarios de ADAS foco para calcular porcentajes de
víctimas.")
if total_fallecidos_adas_foco > 0:
    resumen_por_accion['% FALLECIDOS (en ADAS foco)'] =
(resumen_por_accion['FALLECIDOS'] / total_fallecidos_adas_foco) * 100
    print("\n")
    print(resumen_por_accion[['FALLECIDOS', '% FALLECIDOS (en ADAS foco)']])
else:
    print("No hay fallecidos en los escenarios de ADAS foco para calcular porcentajes
de fallecidos.")

print("\n" + "="*50 + "\n")
# 3. Análisis de víctimas por Zona y su impacto en escenarios ADAS
resumen_por_zona_accion = df_adas_foco.groupby(['Zona', 'ACCIÓN DEL
PEATÓN'])[['PEATONES VÍCTIMAS',
'FALLECIDOS']].sum().sort_values(by='FALLECIDOS', ascending=False)
print("Víctimas y Fallecidos en escenarios ADAS por Zona y Acción del Peatón:")
```

```
print(resumen_por_zona_accion)
print("\n" + "="*50 + "\n")
# 4. Identificar acciones más allá del foco principal de ADAS (posibles desafíos o
escenarios no cubiertos)
acciones_otras = [
    'Trabajar en la calzada',
    'Reparando vehículo',
    'Servicio de auxilio en carretera',
    'Caminando o parado en la acera o refugio',
    'Auxiliando accidente anterior',
    'Otra',
    'Se desconoce']
df_otras_acciones = df_tabla_5_1[df_tabla_5_1['ACCIÓN DEL
PEATÓN'].isin(acciones_otras)]
resumen_otras_acciones = df_otras_acciones.groupby('ACCIÓN DEL
PEATÓN')[['PEATONES VÍCTIMAS',
'FALLECIDOS']].sum().sort_values(by='FALLECIDOS', ascending=False)
print("Resumen de víctimas en otras acciones del peatón (posibles desafíos o
escenarios no directamente cubiertos por ADAS principales):")
print(resumen_otras_acciones)
```

ANEXO II

- **Análisis de las bases de datos**

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
# Mapeo de tipos de accidentes
tipo_accidente_mapping = {
    1: "Frontal",
    2: "Fronto-lateral",
    3: "Lateral",
    4: "Por alcance",
    5: "Múltiple o en caravana",
    6: "Colisión contra obstáculo o elemento de la vía",
    7: "Atropello a personas",
    8: "Atropello a animales",
    9: "Vuelco",
    10: "Caída",
    11: "Sólo salida de la vía",
    12: "Salida izq. colisión",
    13: "Salida izq. despeñamiento",
    14: "Salida izq. vuelco",
    15: "Salida izq. otro",
```

```
16: "Salida dcha. colisión",
17: "Salida dcha. despeñamiento",
18: "Salida dcha. vuelco",
19: "Salida dcha. otro",
20: "Otro tipo de accidente"
}

# Mapear nombres de accidente

df_accidentes["TIPO_ACCIDENTE_DESC"] =
df_accidentes["TIPO_ACCIDENTE"].map(tipo_accidente_mapping)

# Definir los porcentajes de reducción de accidentes según los estudios

adas_reduction_percentages_map = {

    "Frontal": 0.20, # FCW/AEB (20% es una estimación conservadora basada en los
estudios)

    "Por alcance": 0.20, # AEB también muy relevante aquí

    "Atropello a personas": 0.18, # Detección de peatones y ciclistas

    "Lateral": 0.04, # BSW (Blind Spot Warning)

    "Fronto-lateral": 0.04, # También relacionado con cambios de carril/intersecciones, BSW
y generales

    "Sólo salida de la vía": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida izq. colisión": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida izq. despeñamiento": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida izq. vuelco": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida izq. otro": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida dcha. colisión": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida dcha. despeñamiento": 0.11, # LDW/LKA

    "Salida dcha. vuelco": 0.11, # LDW/LKA
```

"Salida dcha. otro": 0.11, # LDW/LKA

"Colisión contra obstáculo o elemento de la vía": 0.10, # Potencialmente impactado por AEB/FCW/LKA

}

Calcular totales de accidentes

```
accidentes_totales =  
df_accidentes.groupby("TIPO_ACCIDENTE_DESC").size().rename("Total Accidentes")
```

Crear un DataFrame para los datos del gráfico

```
df_plot = pd.DataFrame(accidentes_totales)
```

Calcular los "Accidentes Reducibles ADAS" aplicando los porcentajes

```
df_plot["Accidentes Reducibles ADAS"] = 0.0 # Inicializar a 0
```

```
for tipo_accidente, total_count in accidentes_totales.items():
```

```
    if tipo_accidente in adas_reduction_percentages_map:
```

```
        reduction_percentage = adas_reduction_percentages_map[tipo_accidente]
```

```
        df_plot.loc[tipo_accidente, "Accidentes Reducibles ADAS"] = total_count *  
reduction_percentage
```

```
    # Si el tipo de accidente no está en el mapa, su reducción se mantiene en 0.0
```

Asegurarse de que los valores sean enteros para la visualización

```
df_plot["Accidentes Reducibles ADAS"] = df_plot["Accidentes Reducibles  
ADAS"].astype(int)
```

--- Crear gráfico de barras agrupadas ---

```
x = np.arange(len(df_plot))
```

```
width = 0.35
```

```
fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 8)) # Aumentar el tamaño para mejor lectura
```

```
bars1 = ax.bar(x - width/2, df_plot["Total Accidentes"], width, color='skyblue', label='Total
Accidentes')

bars2 = ax.bar(x + width/2, df_plot["Accidentes Reducibles ADAS"], width,
color='lightcoral', label='Accidentes Potencialmente Reducibles por ADAS')

ax.set_ylabel('Número de Accidentes')

ax.set_title('Accidentes Totales vs. Potencial de Reducción con ADAS (Según Estudios)',
fontsize=14)

ax.set_xticks(x)

ax.set_xticklabels(df_plot.index, rotation=90, fontsize=10) # Rotar y ajustar tamaño de
etiquetas

ax.legend(fontsize=10)

# Etiquetas en las barras
for bar in bars1:
    yval = bar.get_height()
    ax.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2, yval + 5, int(yval),
            ha='center', va='bottom', fontsize=7) # Ajusta el +5 para separar la etiqueta
for bar in bars2:
    yval = bar.get_height()
    ax.text(bar.get_x() + bar.get_width()/2, yval + 5, int(yval),
            ha='center', va='bottom', fontsize=7)

ax.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7) # Añadir una cuadrícula para mejor lectura

plt.tight_layout()
```

```
plt.show()

import pandas as pd

import plotly.express as px

# --- 1. Agrupar las víctimas por TIPO_ACCIDENTE_DESC ---

df_victimas_por_tipo = df_accidentes.groupby('TIPO_ACCIDENTE_DESC').agg(

    Fallecidos_Total=('TOTAL_MU24H', 'sum'),

    Heridos_Hospitalizados_Total=('TOTAL_HG24H', 'sum'),

    Heridos_No_Hospitalizados_Total=('TOTAL_HL24H', 'sum')

).reset_index()

# --- 2. Definir los 4 ADAS, sus tipos de accidente relevantes y porcentajes de reducción de VÍCTIMAS ---

adas_info = {

    'AEB/FCW': {

        'accident_types': ['Frontal', 'Por alcance'],

        'reduction_percentage': 0.20

    },

    'LDW/LKA': {

        'accident_types': [

            'Sólo salida de la vía', 'Salida izq. colisión', 'Salida izq. despeñamiento',

            'Salida izq. vuelco', 'Salida izq. otro', 'Salida dcha. colisión',

            'Salida dcha. despeñamiento', 'Salida dcha. vuelco', 'Salida dcha. otro'

        ],

        'reduction_percentage': 0.11

    },

    'Detección de Peatones': {
```

```
'accident_types': ['Atropello a personas'],
'reduction_percentage': 0.18
},
'BSW': {
    'accident_types': ['Lateral', 'Fronto-lateral'],
    'reduction_percentage': 0.04
}
}
# --- 3. Calcular Víctimas Totales y Evitadas por cada ADAS ---
adas_data = []

for adas_name, info in adas_info.items():
    relevant_types = info['accident_types']
    reduction_pct = info['reduction_percentage']

    df_adas_relevant_victims = df_victimas_por_tipo[
        df_victimas_por_tipo['TIPO_ACCIDENTE_DESC'].isin(relevant_types)
    ]

    total_fallecidos = df_adas_relevant_victims['Fallecidos_Total'].sum()

    total_heridos_hospitalizados =
df_adas_relevant_victims['Heridos_Hospitalizados_Total'].sum()

    total_heridos_no_hospitalizados =
df_adas_relevant_victims['Heridos_No_Hospitalizados_Total'].sum()
```

$evitados_fallecidos = total_fallecidos * reduction_pct$

$evitados_heridos_hospitalizados = total_heridos_hospitalizados * reduction_pct$

$evitados_heridos_no_hospitalizados = total_heridos_no_hospitalizados * reduction_pct$

Añadimos los datos para 'Total'

```
adas_data.append({
```

```
    'ADAS': adas_name,
```

```
    'Gravedad': 'Fallecidos',
```

```
    'Valor': total_fallecidos,
```

```
    'Tipo_de_Dato': 'Total'
```

```
})
```

```
adas_data.append({
```

```
    'ADAS': adas_name,
```

```
    'Gravedad': 'Heridos Hospitalizados',
```

```
    'Valor': total_heridos_hospitalizados,
```

```
    'Tipo_de_Dato': 'Total'
```

```
})
```

```
adas_data.append({
```

```
    'ADAS': adas_name,
```

```
    'Gravedad': 'Heridos No Hospitalizados',
```

```
    'Valor': total_heridos_no_hospitalizados,
```

```
    'Tipo_de_Dato': 'Total'
```

```
})
```

```
# Añadimos los datos para 'Evitables'

adas_data.append({

    'ADAS': adas_name,

    'Gravedad': 'Fallecidos',

    'Valor': evitados_fallecidos,

    'Tipo_de_Dato': 'Evitables'

})

adas_data.append({

    'ADAS': adas_name,

    'Gravedad': 'Heridos Hospitalizados',

    'Valor': evitados_heridos_hospitalizados,

    'Tipo_de_Dato': 'Evitables'

})

adas_data.append({

    'ADAS': adas_name,

    'Gravedad': 'Heridos No Hospitalizados',

    'Valor': evitados_heridos_no_hospitalizados,

    'Tipo_de_Dato': 'Evitables'

})

df_adas_victimas = pd.DataFrame(adas_data)

# Redondear los valores de 'Valor' a enteros para mejor visualización

df_adas_victimas['Valor'] = df_adas_victimas['Valor'].round().astype(int)

# --- 4. Crear el Gráfico Interactivo con Plotly Express ---
```

Definir el mapa de colores customizado para cada categoría

```
custom_color_map = {  
    'Fallecidos (Total)': 'red',  
    'Heridos Hospitalizados (Total)': 'orange',  
    'Heridos No Hospitalizados (Total)': 'yellow',  
    'Fallecidos (Evitables)': 'lightgreen', # Verde claro para todos los evitables  
    'Heridos Hospitalizados (Evitables)': 'lightgreen',  
    'Heridos No Hospitalizados (Evitables)': 'lightgreen'  
}
```

Crear una nueva columna para el color que combine Gravedad y Tipo de Dato

```
df_adas_victimas['Gravedad_y_Tipo'] = df_adas_victimas['Gravedad'] + ' (' +  
df_adas_victimas['Tipo_de_Dato'] + ')'
```

Definir el orden de las categorías para la leyenda

```
category_orders = {  
    'Gravedad_y_Tipo': [  
        'Fallecidos (Total)', 'Fallecidos (Evitables)',  
        'Heridos Hospitalizados (Total)', 'Heridos Hospitalizados (Evitables)',  
        'Heridos No Hospitalizados (Total)', 'Heridos No Hospitalizados (Evitables)'  
    ]  
}
```

```
fig = px.bar(  
    df_adas_victimas,  
    x='Gravedad', # Eje X por tipo de gravedad  
    y='Valor',  
    color='Gravedad_y_Tipo', # Usamos la nueva columna combinada para el color  
    facet_col='ADAS', # Una columna para cada ADAS  
    barmode='group', # Agrupamos las barras  
    color_discrete_map=custom_color_map,  
    category_orders=category_orders, # Aplicar el orden en la leyenda  
    title='Impacto Potencial de ADAS en la Reducción de Víctimas por Gravedad',  
    labels={  
        'Valor': 'Número de Víctimas',  
        'ADAS': 'Sistema ADAS',  
        'Gravedad': 'Gravedad de la Víctima',  
        'Gravedad_y_Tipo': 'Categoría' # Título de la leyenda  
    },  
    hover_data={  
        'Valor': True,  
        'Gravedad': True,  
        'Tipo_de_Dato': True,  
        'Gravedad_y_Tipo': False # No mostrar esta columna combinada en el tooltip  
    },  
    height=600 # Ajustar altura del gráfico
```

```
)  
  
# Ajustes de layout  
fig.update_layout(  
    xaxis_title=None, # Eliminar el título del eje x repetitivo en los subplots  
    legend_title_text='Categoría de Víctimas', # Título de la leyenda  
    legend=dict(  
        orientation="h", # Leyenda horizontal  
        yanchor="bottom", # Anclada en la parte inferior  
        y=-0.3, # Posición vertical (ajusta si es necesario para que no se solape)  
        xanchor="center", # Anclada en el centro horizontal  
        x=0.5 # Posición horizontal  
    ),  
    bargap=0.15, # Espacio entre grupos de barras  
    bargroupgap=0.1 # Espacio entre barras dentro de un grupo  
)  
  
# Ajustes específicos para los ejes x de cada subplot para evitar etiquetas superpuestas  
fig.for_each_xaxis(lambda axis: axis.update(showticklabels=True, tickangle=0))  
fig.show()  
  
import pandas as pd  
import plotly.express as px  
  
# 1. Calcular el total de accidentes en España  
total_accidentes_espana = len(df_accidentes) # Cuenta el número de filas en tu DataFrame  
de accidentes  
  
# 2. Definir los porcentajes de reducción de los papers  
# Rango de reducción total de accidentes: 35% a 40%
```

```
porcentaje_min_reduccion = 0.35
```

```
porcentaje_max_reduccion = 0.40
```

```
# 3. Calcular las porciones para el gráfico de rosquilla
```

```
accidentes_reducibles_min = total_accidentes_espana * porcentaje_min_reduccion
```

```
accidentes_reducibles_adicional = total_accidentes_espana * (porcentaje_max_reduccion -  
porcentaje_min_reduccion)
```

```
accidentes_no_reducibles_max_escenario = total_accidentes_espana * (1 -  
porcentaje_max_reduccion)
```

```
# 4. Preparar los datos para Plotly
```

```
data = {
```

```
    'Categoría': [
```

```
        'Accidentes NO Reducibles (Escenario ADAS Óptimo)',
```

```
        'Accidentes Reducibles (Mínimo Estimado)',
```

```
        'Reducción Adicional Potencial (Rango Máx-Mín)'
```

```
    ],
```

```
    'Número de Accidentes': [
```

```
        accidentes_no_reducibles_max_escenario,
```

```
        accidentes_reducibles_min,
```

```
        accidentes_reducibles_adicional
```

```
    ]
```

```
}
```

```
df_donut = pd.DataFrame(data)
```

```
# Redondear los valores para que sean enteros
```

```
df_donut['Número de Accidentes'] = df_donut['Número de Accidentes'].round().astype(int)
```

```
# 5. Crear el gráfico de rosquilla interactivo
```

```
fig = px.pie(
    df_donut,
    values='Número de Accidentes',
    names='Categoría',
    title=f'Distribución de Accidentes y Potencial de Reducción ADAS en España (Total:
    {total_accidentes_espana} accidentes)',
    hole=0.6, # Hace que sea un gráfico de rosquilla (donut)
    color='Categoría', # Colorear las porciones por categoría
    color_discrete_map={
        'Accidentes NO Reducibles (Escenario ADAS Óptimo)': 'black', # <--- CAMBIO
        AQUÍ: Ahora es negro
        'Accidentes Reducibles (Mínimo Estimado)': 'mediumseagreen',
        'Reducción Adicional Potencial (Rango Máx-Mín)': 'forestgreen'
    }
)

# Ajustar el texto que aparece en el centro o en las porciones
fig.update_traces(
    textinfo='percent+label', # Mostrar porcentaje y etiqueta
    insidetextorientation='radial', # Orientación del texto dentro de las porciones
)

# Ajustes de layout para la leyenda
fig.update_layout(
    legend_title_text='Categoría de Accidentes',
    legend=dict(
```

```
orientation="h",    # Leyenda horizontal
yanchor="bottom",  # Anclada en la parte inferior
y=-0.5,           # Aumenta el valor negativo para bajarla más
xanchor="center",  # Anclada en el centro horizontal
x=0.5             # Posición horizontal
)
)
fig.show()
```