



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y PLAN DE COMERCIALIZACION DE UN
PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA PROPORCIONAR A LOS
USUARIOS DE VEHICULOS DE COMBUSTIÓN INFORMACIÓN DE
SUS EMISIONES CONTAMINANTES EN FUNCIÓN DE DIVERSAS
VARIABLES, CON EL OBJETIVO DE REDUCIR SU IMPACTO**

Autor: Carlota Barrio Núñez

Director: Miguel Tejero Yagüe

Coordinador: Daniel Fernández Alonso

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título:

Diseño, fabricación y plan de comercialización de un prototipo de un sistema para proporcionar a los usuarios de vehículos de combustión información de sus emisiones contaminantes en función de diversas variables, con el objetivo de reducir su impacto

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/2025 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.: Carlota del Barrio Núñez

Fecha: 27/ 07/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Miguel Tejero Yagüe

Fecha: 27/ 07/ 2025

Miguel Tejero
* 5 de agosto



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y PLAN DE COMERCIALIZACION DE UN
PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA PROPORCIONAR A LOS
USUARIOS DE VEHICULOS DE COMBUSTIÓN INFORMACIÓN DE
SUS EMISIONES CONTAMINANTES EN FUNCIÓN DE DIVERSAS
VARIABLES, CON EL OBJETIVO DE REDUCIR SU IMPACTO**

Autor: Carlota Barrio Núñez

Director: Miguel Tejero Yagüe

Coordinador: Daniel Fernández Alonso

Madrid

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, gracias a mi tutor Miguel Tejero por su orientación, paciencia y apoyo continuo durante el desarrollo del proyecto. Su experiencia y sus comentarios han sido fundamentales para dar forma y sentido técnico a este trabajo. Sin su ayuda y entrega hacia este proyecto, nada habría sido posible.

También me gustaría agradecer a mis profesores y profesoras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) por la formación recibida a lo largo de estos años, tanto en el ámbito académico como en el humano.

Gracias a mi familia, por estar siempre a mi lado, por su confianza incondicional y por animarme incluso en los momentos más exigentes. Su apoyo ha sido, como siempre, mi mayor motor.

Por último, a mis compañeros y compañeras de carrera, por haber compartido conmigo esta etapa tan especial.

A todos, gracias.

DISEÑO, FABRICACIÓN Y PLAN DE COMERCIALIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA PARA PROPORCIONAR A LOS USUARIOS DE VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN INFORMACIÓN DE SUS EMISIONES CONTAMINANTES EN FUNCIÓN DE DIVERSAS VARIABLES, CON EL OBJETIVO DE REDUCIR SU IMPACTO

Autor: Barrio Núñez, Carlota.

Director: Tejero Yagüe, Miguel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas)

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un prototipo portátil para medir en tiempo real las emisiones contaminantes de vehículos de combustión. El prototipo integra sensores específicos, un microcontrolador Arduino y una interfaz HMI para visualizar variables y un puerto de comunicaciones o Wifi para permitir el volcado de los datos capturados, y su posterior tratamiento, por ejemplo, a un PC. Se posibilita así el uso de la inteligencia artificial para el análisis de datos y la búsqueda de patrones. Hoy en día, los sistemas sostenibles están en pleno auge, por lo que esta herramienta se posiciona como una solución accesible y directa para el ciudadano medio. El trabajo no solo aporta una propuesta técnica viable, sino que abre la puerta a una nueva forma de conducir: más informada, más consciente y alineada con los retos ambientales actuales. Para ello también se ha realizado un profundo estudio y análisis tanto social, político y económico sobre la contaminación, sus efectos y el impacto.

Palabras clave: Sostenibilidad, Arduino, prototipo, sensores, impacto, EEA (Agencia Europea de Medio Ambiente), MITECO (Informe de Evaluación de la Calidad del Aire)e

1. Introducción

La contaminación derivada del tráfico rodado representa uno de los mayores retos medioambientales de las ciudades actuales. Hoy en día, los vehículos de combustión interna suponen una fuente significativa de gases como el CO, NOx o partículas en suspensión, con efectos perjudiciales para la salud y el clima. Frente a este problema, el presente proyecto plantea: un sistema capaz de mostrar al conductor sus propias emisiones, en tiempo real, de forma clara y accesible para permitirle modificar sus hábitos de conducción, sus rutas o plantearse previamente, a partir de los datos obtenidos,

el impacto medioambiental de su desplazamiento. Es una manera de concienciar al usuario sobre su forma de conducción

El objetivo principal no es solo técnico, sino también social: proporcionar una herramienta que traduzca datos complejos en información comprensible para el usuario, facilitando así la toma de decisiones sostenibles desde la experiencia individual.

2. Definición del proyecto

El sistema propuesto consiste en un sistema portátil, que puede instalarse en vehículos de combustión para medir y registrar variables contaminantes clave. Su arquitectura se basa en:

- Sensores específicos (MQ-7, MQ-135, MH-Z19B, PMS5003, etc.)
- Microcontrolador Arduino Mega 2560
- Sistema de almacenamiento en tarjeta SD
- Interfaz gráfica mediante pantalla táctil HMI Nextion

El proyecto parte de una hipótesis clara: ofrecer al usuario información personalizada y visual sobre su nivel de emisiones puede generar una mejora en su estilo de conducción y contribuir a una movilidad más consciente.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El sistema consiste en un dispositivo que recoge información de distintos sensores conectados al dispositivo y externos, midiendo gases contaminantes (CO, CO₂, NO_x) y condiciones del entorno (temperatura, humedad, posición GPS). El microcontrolador procesa los datos en tiempo real y los muestra a través de una HMI con sinópticos que sean de fácil lectura para todos los usuarios.

También se incorpora una tarjeta microSD para registrar la evolución de los datos por trayecto, permitiendo su análisis posterior por ejemplo en un ordenador. El sistema está

diseñado para activarse únicamente cuando se detecta movimiento mediante GPS, evitando así lecturas en reposo.

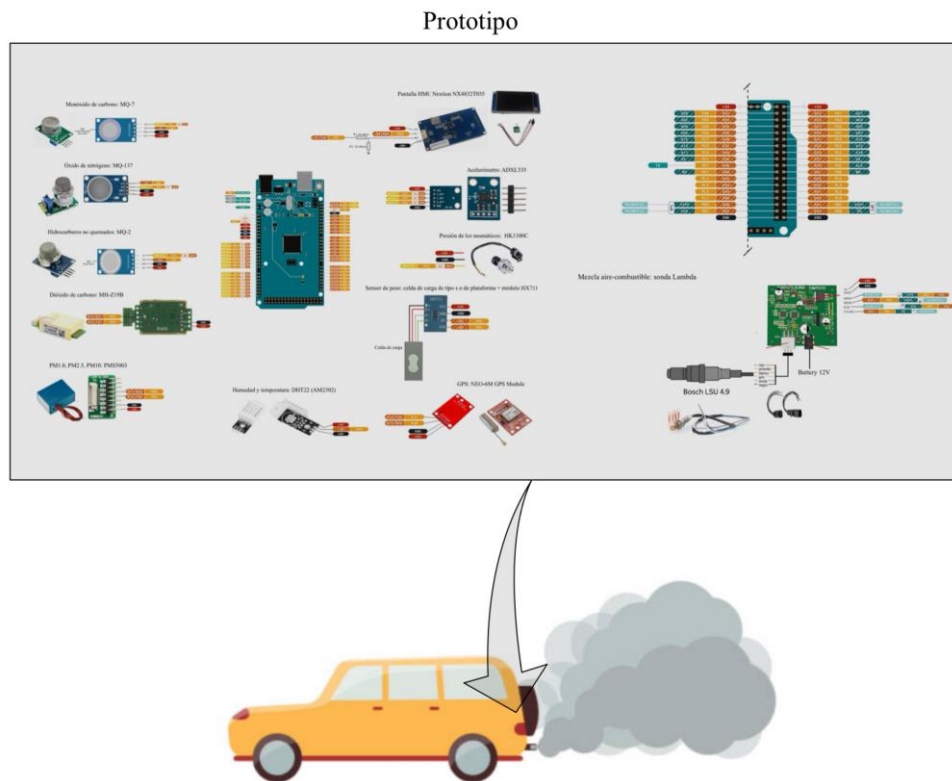


Ilustración 1: Esquema conceptual del prototipo diseñado

4. Resultados

El sistema ha sido diseñado, y su funcionamiento será comprobado en un entorno teórico. Se confirmará la adecuada comunicación entre sensores, microcontrolador y la interfaz gráfica. La estructura de datos, el flujo de información y la lógica de activación por GPS han sido planteados para a una futura implementación sobre un vehículo real, de la manera menos compleja posible. Todo ello será comprobado de manera expresamente teórica.

Se verificará que el sistema permite registrar variables relevantes, activar la visualización en condiciones simuladas y almacenar los datos para su posterior análisis. La pantalla HMI diseñada, proporcionará una experiencia para el usuario sencilla, lo que hará que sea accesible para conductores sin conocimientos técnicos.

Por otro lado, el estudio económico desarrollado evidencia que el sistema es replicable a bajo coste y muy rentable. Esto hace que sea una herramienta prometedora para flotas.

autoescuelas o campañas institucionales. Su planteamiento responde a una necesidad actual: acercar la sostenibilidad al día a día del conductor medio mediante soluciones tecnológicas accesibles.

	Año 0	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Unidades vendidas		50	750	1.000	20.000	60.000	100.000	350.000	550.000	900.000	1.000.000	2.000.000
Precio de venta unitario (euros)		450	459	468	478	487	497	507	517	527	538	549
Ingresos		22.500	344.250	468.180	9.550.872	29.225.668	49.683.636	177.370.581	284.299.703	474.522.049	537.791.656	1.097.094.978
Coste directo unitario		498	458	467	452	392	400	367	374	306	312	302
Reducción anual de costes respecto año anterior (venta al por mayor)		78	128	66	78	276	284	126	28	204	28	98
COGS- Coste directo total		(24.920)	(343.148)	(466.682)	(9.044.294)	(23.524.208)	(39.991.154)	(128.491.577)	(205.953.642)	(275.004.281)	(311.671.518)	(604.019.402)
Gross Margin		(2.420)	1.102	1.498	506.578	5.701.460	9.692.482	48.879.004	78.346.061	199.517.769	226.120.138	493.075.576
Expenses:												
Personal		(20.000)	(30.000)	(45.000)	(67.500)	(101.250)	(151.875)	(227.813)	(341.719)	(512.578)	(768.867)	(1.153.301)
General y administrativo		(4.000)	(6.000)	(9.000)	(13.500)	(20.250)	(30.375)	(45.563)	(68.344)	(102.516)	(153.773)	(230.660)
Alquiler + servicios		(5.000)	(7.500)	(11.250)	(16.875)	(25.313)	(37.969)	(56.953)	(85.430)	(128.145)	(192.217)	(288.325)
Costes de envío y logística nacional (por ud)		8,0	8,2	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9,2	8,4	8,6	8,8
Costes de envío y logística nacional total		(400,0)	(6.120,0)	(8.323,2)	(169.793,3)	(519.567,4)	(883.264,6)	(3.153.254,8)	(5.054.216,9)	(8.435.947,5)	(9.560.740,5)	(19.503.910,7)
Embalaje técnico y montaje manual (por ud)		10,0	10,2	10,4	10,6	10,8	11,0	11,3	11,5	11,7	12,0	12,2
Embalaje técnico y montaje manual total		(500,0)	(7.650,0)	(10.404,0)	(212.241,6)	(649.459,3)	(1.104.080,8)	(3.941.568,5)	(6.317.771,2)	(10.544.934,4)	(11.950.925,7)	(24.379.888,4)
Herramientas y consumibles (amortizado) (por ud)		5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,1
Herramientas y consumibles (amortizado) total		(250,0)	(3.825,0)	(5.202,0)	(106.120,8)	(324.729,6)	(552.040,4)	(1.970.784,2)	(3.158.885,6)	(5.272.467,2)	(5.975.462,8)	(12.189.944,2)
Mantenimiento/reemplazo a 1 año (por ud)		7,0	7,1	7,3	7,4	7,6	7,7	7,9	8,0	8,2	8,4	8,5
Mantenimiento/reemplazo a 1 año total		(350,0)	(5.355,0)	(7.282,8)	(148.569,1)	(454.621,5)	(772.856,6)	(2.759.097,9)	(4.422.439,8)	(7.381.454,1)	(8.365.648,0)	(17.065.921,9)
Licencias básicas software/hosting* (por ud)		2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0
Licencias básicas software/hosting* total		(125,0)	(1.912,5)	(2.601,0)	(53.060,4)	(162.364,8)	(276.020,2)	(985.392,1)	(1.579.442,8)	(2.636.233,6)	(2.987.731,4)	(6.094.972,1)
Total expenses		(30.625)	(68.363)	(99.063)	(787.660)	(2.257.555)	(3.808.481)	(13.140.426)	(21.028.248)	(35.014.275)	(39.955.366)	(80.906.923)
EBITDA		-	(33.045)	(67.261)	(97.565)	(281.082)	3.443.905	5.884.001	35.738.579	57.317.813	164.503.493	412.168.652
Amortización y depreciación			(125)	(1.875)	(2.500)	(50.000)	(150.000)	(250.000)	(875.000)	(1.375.000)	(2.250.000)	(5.000.000)
EBIT		-	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	3.293.905	5.634.001	34.863.579	55.942.813	162.253.493	407.168.652
Impuestos (25%)			-	-	-	823.476	1.408.500	8.715.895	13.985.703	40.563.373	45.916.193	101.792.163
Net Income		-	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816
Capex		(555.000)										
Free Cash Flow		(555.000)	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816

Ilustración 2: Estudio económico del proyecto de cara 10 años (elaboración propia)

Nota: Esta captura es para simplemente dejar la evidencia de que más adelante se ha realizado un estudio económico de viabilidad, no para el entendimiento de los números. Todo esto será expuesto en su respectivo capítulo.

5. Conclusiones

Este trabajo demuestra la viabilidad técnica, económica y social de un sistema portátil para la medición de emisiones en vehículos de combustión. Se logrará construir un prototipo funcional que, con bajo coste y facilidad de uso, permite visualizar en tiempo real el impacto ambiental del vehículo. Por supuesto se trata de un prototipo en fase de desarrollo, cuya idea perfecta seria que una entidad bancaria, una empresa de I+D, cualquier fundación... adaptasen y mejorasen el proyecto.

Pero, más allá de su utilidad técnica, el sistema tiene un gran potencial educativo y transformador, tanto para el usuario individual como para flotas (por ej: transporte publico), autoescuelas o ayuntamientos. Representa un paso más en el desarrollo de soluciones tecnológicas al servicio de la sostenibilidad.

6. Referencias

- [1] Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), “Air quality in Europe — 2023 report”
- [2] MITECO, “Informe de Evaluación de la Calidad del Aire en España 2022”
- [3] EsadeEcPol (2024), “Impacto económico de la contaminación en España”
- [4] WHO, “Health effects of air pollution”
- [5] Manuales técnicos MQ-7, PMS5003, Nextion, Arduino...
- [6] Energies Journal (2023), “Real-Driving Emission Measurements Using Portable Emission Measurement Systems (PEMS)”

DESIGN, DEVELOPMENT AND COMMERCIALIZATION PLAN OF A PROTOTYPE SYSTEM TO PROVIDE COMBUSTION VEHICLE USERS WITH INFORMATION ON THEIR POLLUTANT EMISSIONS BASED ON VARIOUS VARIABLES, WITH THE AIM OF REDUCING THEIR ENVIRONMENTAL IMPACT

Author: Barrio Núñez, Carlota.

Supervisor: Tejero Yagüe, Miguel.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This work presents the design, development, and implementation of a portable prototype aimed at measuring in real time the pollutant emissions of combustion engine vehicles. The device integrates sensors, an Arduino microcontroller, and a graphical HMI interface to display environmental variables. Today, sustainable systems are growing in popularity, and this tool offers an accessible and direct solution for the average citizen. The project not only provides a technically feasible proposal but also opens the door to a new way of driving: more informed, more conscious, and better aligned with current environmental challenges.

Keywords: Sustainability, Arduino, prototype, sensors, impact, EEA (European Environment Agency), MITECO (Air Quality Evaluation Report).

1. Introducción

Pollution caused by road traffic is one of the greatest environmental challenges facing today's cities. Combustion engine vehicles are a major source of harmful gases like CO, NO_x, and particulate matter, which negatively impact both human health and the climate. In response, this project proposes a concrete solution: a system capable of showing drivers their own emission levels in real time, in a clear and accessible format.

The main goal is not only technical but also social: to offer a tool that translates complex data into easy-to-understand information, helping individuals make more sustainable choices.

2. Project Definition

The proposed system is a portable device that can be installed in combustion engine vehicles to measure and record key pollutant variables. Its architecture is based on:

- Specific sensors (MQ-7, MQ-135, MH-Z19B, PMS5003, etc.)
- Arduino Mega 2560 microcontroller
- Data storage on an SD card
- Touchscreen HMI display (Nextion)

The project is built on a clear hypothesis: giving users personalized and visual feedback on their emission levels can help improve driving habits and promote more sustainable mobility.

3. System Description

The system collects data from several connected sensors, both onboard and external, measuring pollutants such as CO, CO₂, and NO_x, as well as environmental conditions

like temperature, humidity, and GPS position. The Arduino microcontroller processes this data in real time and displays it via an HMI with user-friendly visuals.

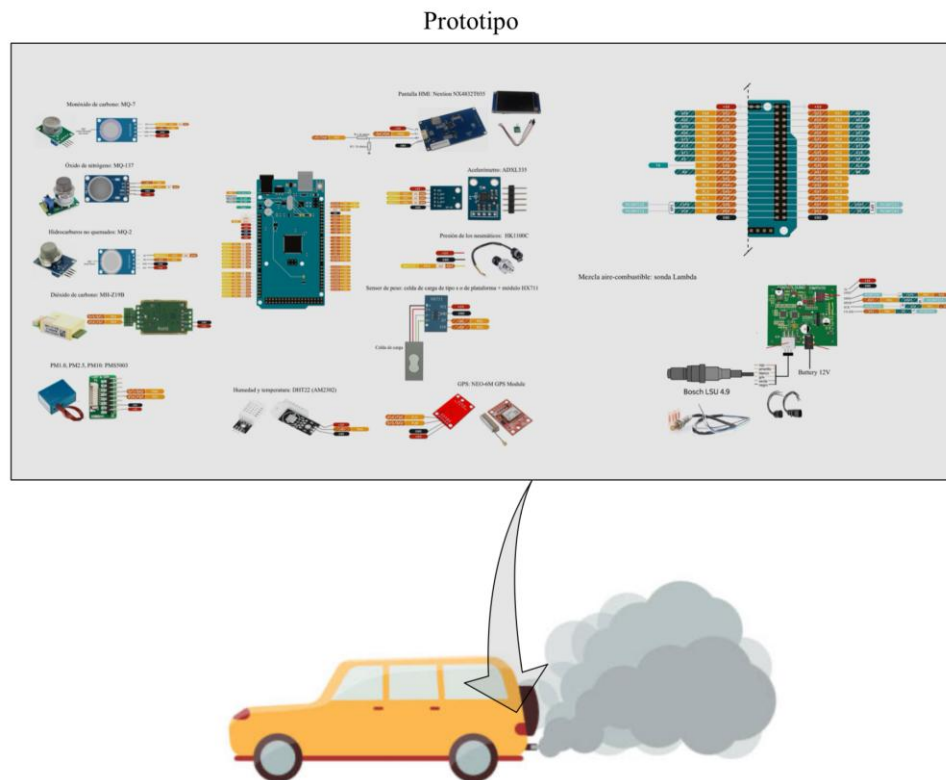


Ilustración 3: Diagram of the designed prototype

4. Results

The system has been fully designed, and its functionality will be verified in a theoretical and controlled environment. Proper communication between sensors, microcontroller, and graphical interface will be confirmed. The data structure, data flow, and GPS-based activation logic will be developed in preparation for future real-world implementation, with a focus on keeping the process simple.

It will be confirmed that the system can record relevant variables, activate display functions under simulated conditions, and store data for later analysis. The HMI interface is simple and user-friendly, making the system accessible to drivers without technical knowledge.

In addition, a basic cost analysis has shown that the system is replicable and low-cost, which positions it as a promising tool for fleets, driving schools, or public campaigns. The solution addresses a growing need: bringing sustainability closer to everyday drivers through accessible technology.

	Año 0	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Unidades vendidas		50	750	1.000	20.000	60.000	100.000	350.000	550.000	900.000	1.000.000	2.000.000
Precio de venta unitario [euros]		450	459	468	478	487	497	507	517	527	538	549
Ingresos		22.500	344.250	468.180	9.550.872	29.225.668	49.683.636	177.370.581	284.299.703	474.522.049	537.791.656	1.097.094.978
Coste directo unitario		498	458	467	452	392	400	367	374	306	312	302
Reduccion anual de costes respecto año anterior (venta al por mayor)		8%	8%	8%	18%	23%	0%	10%	0%	20%	0%	0%
COGS- Coste directo total		(24.920)	(343.148)	(466.682)	(9.044.294)	(23.524.208)	(39.991.154)	(128.491.577)	(205.953.642)	(275.004.281)	(311.671.518)	(604.019.402)
Gross Margin		(2.420)	1.102	1.498	506.578	5.701.460	9.692.482	48.879.004	78.346.061	199.517.769	226.120.138	493.075.576
Expenses:												
Personal		(20.000)	(30.000)	(45.000)	(67.500)	(101.250)	(151.875)	(227.813)	(341.719)	(512.578)	(768.867)	(1.153.301)
General y administrativo		(4.000)	(6.000)	(9.000)	(13.500)	(20.250)	(30.375)	(45.563)	(68.344)	(102.516)	(153.773)	(230.660)
Alquiler + servicios		(5.000)	(7.500)	(11.250)	(16.875)	(25.313)	(37.969)	(56.953)	(85.430)	(128.145)	(192.217)	(288.325)
Costes de envío y logística nacional (por ud)		6,9	8,2	8,3	8,6	8,7	8,8	8,9	9,3	9,4	9,6	9,8
Costes de envío y logística nacional total		(400,0)	(6.120,0)	(8.323,2)	(169.793,3)	(519.567,4)	(883.264,6)	(3.153.254,8)	(5.054.216,9)	(8.435.947,5)	(9.560.740,5)	(19.503.910,7)
Embalaje técnico y montaje manual (por ud)		10,0	10,2	10,4	10,6	10,8	11,0	11,3	11,5	11,7	12,0	12,2
Embalaje técnico y montaje manual total		(500,0)	(7.650,0)	(10.404,0)	(212.241,6)	(649.459,3)	(1.104.080,8)	(3.941.568,5)	(6.317.771,2)	(10.544.934,4)	(11.950.925,7)	(24.379.888,4)
Herramientas y consumibles (amortizado) (por ud)		5,8	5,1	5,3	5,6	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	6,0	6,1
Herramientas y consumibles (amortizado) total		(250,0)	(3.825,0)	(5.202,0)	(106.120,8)	(324.729,9)	(552.040,4)	(1.970.784,2)	(3.158.885,6)	(5.272.467,2)	(5.975.462,8)	(12.189.944,2)
Mantenimiento/reemplazo a 1 año (por ud)		7,9	7,3	7,3	7,4	7,6	7,7	7,9	8,0	8,2	8,4	8,5
Mantenimiento/reemplazo a 1 año total		(350,0)	(5.355,0)	(7.282,8)	(148.569,1)	(454.621,5)	(772.856,6)	(2.759.097,9)	(4.422.439,8)	(7.381.454,1)	(8.365.648,0)	(17.065.921,9)
Licencias básicas software/hosting* (por ud)		2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0
Licencias básicas software/hosting* total		(125,0)	(1.912,5)	(2.601,0)	(53.060,4)	(162.364,8)	(276.020,2)	(985.392,1)	(1.579.442,8)	(2.636.233,6)	(2.987.731,4)	(6.094.972,1)
Total expenses		(30.625)	(68.363)	(99.063)	(787.660)	(2.257.555)	(3.808.481)	(13.140.426)	(21.028.248)	(35.014.275)	(39.955.366)	(80.906.923)
EBITDA		-	(33.045)	(67.261)	(97.565)	(281.082)	3.443.905	5.884.001	35.738.579	57.317.813	164.503.493	412.168.652
Amortización y depreciación			(125)	(1.875)	(2.500)	(50.000)	(150.000)	(250.000)	(875.000)	(1.375.000)	(2.250.000)	(5.000.000)
EBIT		-	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	3.293.905	5.634.001	34.863.579	55.942.813	162.253.493	407.168.652
Impuestos (25%)			-	-	-	-	823.476	1.408.500	8.715.895	13.985.703	40.563.373	101.792.163
Net Income		-	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816
Capex		(555.000)										
Free Cash Flow		(555.000)	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816

Ilustración 4: Economic study of the project over 10 years (self-produced)

5. Conclusion

This work demonstrates the technical, economic, and social viability of a portable system for measuring vehicle emissions. A fully functional prototype has been created, offering real-time visualisation of a vehicle’s environmental impact at low cost and with easy use. Of course, the system remains a prototype in development, with ideal future progression involving support from a research center, public institution, bank, or innovation company.

Beyond its technical utility, the system has strong potential as an educational and transformative tool—for individuals, vehicle fleets (e.g., public transport), driving schools, or local governments. It marks a further step in the development of technological solutions that serve sustainability.

6. References

- [1] European Environment Agency (EEA), Air Quality in Europe – 2023 Report
- [2] MITECO (Spain's Ministry for Ecological Transition), Air Quality Evaluation Report – 2022
- [3] EsadeEcPol (2024), The Economic Impact of Air Pollution in Spain
- [4] World Health Organization (WHO), Health Effects of Air Pollution
- [5] Technical Manuals: MQ-7, PMS5003, Nextion, Arduino
- [6] Energies Journal (2023), “Real-Driving Emission Measurements Using Portable Emission Measurement Systems (PEMS)”

Índice de la memoria

Capítulo 1. Resumen Ejecutivo	9
Capítulo 2. Introducción	12
2.1 Contextualización del problema ambiental y tecnológico e importancia del control de emisiones en la automoción	12
2.1.1 . Impacto global del transporte en la contaminación.....	12
2.1.2 . Importancia del control de emisiones en automoción.....	13
2.1.3 . Situación en España	14
2.1.4 . Evidencia Científica y estudios recientes	15
2.1.5 . Evolución tecnológica	16
2.2 Planteamiento del proyecto	17
2.2.1 . Enfoque técnico	17
2.2.2 . Enfoque de concienciación social y medioambiental.....	18
2.2.3 . Resultados esperados	18
2.2.4 . Objetivos del proyecto.....	19
2.2.5 . Estrategia	19
2.3 Estructura del documento	19
Capítulo 3. Motivación y objetivos del proyecto	24
3.1 Problemática actual del usuario medio de automóvil.....	25
3.2 Concienciación ambiental desde el usuario individual.....	25
3.3 Enfoque técnico del proyecto	26
3.4 Enfoque personal del proyecto	26
Capítulo 4. Marco legal, social y medioambiental	28
4.1 4.1. Pacto Verde Europeo y su implicación normativa	28
4.2 Normativas europeas y españolas sobre emisiones	29
4.2.1. Normativas Europeas.....	29
4.2.2. Normativas españolas	32
4.3. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados	35
4.3.1. ODS 3. Salud y bienestar	35
4.3.2. ODS 9. Industria e innovación.....	36

4.3.3.	ODS 11. Ciudades sostenibles	36
4.3.4.	ODS 13. Acción por el clima.....	37
Capítulo 5. Panorama actual y antecedentes: salud, datos y soluciones tecnológicas..		39
5.1	Contaminación y salud pública: estudios y cifras	39
5.1.1	. Exposición urbana en España	41
5.1.2	Impacto en salud pública.....	43
5.2	Fuentes de datos (ITV, estudios, bases de datos públicas).....	47
5.2.1	Inspección Técnica de Vehículos (ITV) y datos OBD	47
5.2.2	Bases públicas e investigación del ISCIII y CNSA	47
5.2.3	Estudios académicos y observatorios económicos	48
5.3	Tecnologías actuales para la medición de emisiones	49
5.3.1	Dinamómetros y bancos de pruebas (laboratorio).....	49
5.3.2	Software de simulación.....	50
5.3.3	Sensores portátiles (PEMS) y sobre el terreno (RDE)	50
5.3.4	Otras tecnologías.....	51
5.4	Sistemas de asistencia y diagnóstico embarcados (OBD)	54
5.5	Resumen de las tecnologías.....	56
5.6	Breve benchmark de soluciones similares (productos existentes).....	57
5.6.1	Clasificación general.....	57
5.6.2	Análisis comparativo	58
5.6.3	Visualización comparativa	59
5.6.4	Conclusiones del Benchmark	60
Capítulo 6. Diseño del prototipo del sistema: variables, sensores, sistema, conexonado.		63
6.1	Elección de la placa de control: Arduino MEGA 2560.....	64
6.2	Variables a medir y su relación con las emisiones	65
6.2.1	Contaminantes gaseosos y partículas.....	65
6.2.2	Variables de comportamiento dinámico.....	66
6.2.3	Variables contextuales y ambientales.....	66
6.3	Elección de sensores y criterio de selección.....	66
6.3.1	Sensores de gases y partículas	67
6.3.2	Sensores característicos, de contexto y posición.....	68

6.3.3 Sensores embarcados del vehículo	68
6.4 Almacenamiento y tratamiento de datos	68
6.4.1 Flujo de datos	69
6.4.2 Alternativas de almacenamiento evaluadas	70
6.5 Diseño del prototipo físico	71
6.6 Esquema del prototipo físico	72
6.7 Diseño de los sinópticos del HMI	80
Capítulo 7. Programación y gestión de datos	83
7.1 Análisis e introducción al código	83
7.2 Código	86
Capítulo 8. Evaluación del impacto y utilidad del sistema	97
8.1 Potencial de concienciación y cambio de hábitos	97
8.2 Posible uso en campañas públicas o educativas	97
8.3 Posible integración en apps o plataformas	98
Capítulo 9. Estudio económico y de viabilidad.....	100
9.1 Costes estimados del sistema por unidad	101
9.2 Análisis de producción	103
9.3 Posibles clientes: conductores, ayuntamientos, autoescuelas.....	105
9.4 Propuesta básica de comercialización	106
9.4.1 Precio de venta estimado.....	106
9.4.2 Canal de distribución	107
9.4.3 Modo de instalación (kit básico, App, asesoría)	107
9.4.4 Proyección y posibles expectativas económicas	108
Capítulo 10. Limitaciones del proyecto y propuesta de mejora	118
10.1 Limitaciones técnicas actuales	118
10.2 Futuras mejoras del sistema	119
10.3 Escalado del sistema a flotas o transporte público	120
Capítulo 11. Conclusiones.....	123
11.1 Valoración global del proyecto	123
11.2 Reflexión final sobre sostenibilidad y tecnología.....	124
Capítulo 12. Bibliografía.....	125

<i>ANEXO I: Catálogo Arduino MEGA 2560.....</i>	<i>130</i>
<i>ANEXO II: Esquema y conexionado del prototipo físico</i>	<i>132</i>
<i>ANEXO III: Proveedores y compras de los distintos elementos para el montaje del prototipo</i>	<i>135</i>
<i>ANEXO IV: Datasheet y catálogos de los sensores propuestos.....</i>	<i>137</i>

Índice de figuras

Ilustración 1: Esquema conceptual del prototipo diseñado	9
Ilustración 2: Estudio económico del proyecto de cara 10 años (elaboración propia)	10
Ilustración 3: Diagram of the designed prototype	15
Ilustración 4: Economic study of the project over 10 years (self-produced).....	16
Ilustración 5: Distribución de emisiones Contaminantes del aire por sectores en España 2023. (Fuente EEA).....	13
Ilustración 6: Comparación de las emisiones estándar de NOx para las diferentes normas euro.	14
Ilustración 7: Indicadores anuales de exposición 2009-2023 y objetivo nacional de reducción. (Fuente: Informe Evaluación Calidad del Aire España 2022. Ministerio del Gobierno	15
Ilustración 8: Índice Europeo de la Calidad del Aire Fuente: EEA.....	40
Ilustración 9: Índice Mundial de la Calidad del Aire. Fuente:waqi.info	41
Ilustración 10: Índice Nacional de la Calidad del Aire. Fuente: MITECO https://ica.miteco.es/	42
Ilustración11: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (SO2). Fuente MITECO	44
Ilustración 12: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (NO2). Fuente MITECO	44
Ilustración 13: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (PM10). Fuente MITECO.....	44
Ilustración 14: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (PM2.5). Fuente MITECO.....	45
Ilustración 15: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (O3). Fuente MITECO	45

Ilustración 16: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (CO). Fuente MITECO	45
Ilustración 17: Muertes prematuras asociadas a NO ₂ , O ₃ y PM _{2.5} en España. Fuente: ESADE	46
Ilustración 18: Potencial estimado de PIB por CCAA en cada periodo de cumplirse con los límites de concentración de partículas PM _{2.5} marcadas por la OMS (2021/2027, 2014/2020, 2007/2013) . Fuente: ESADE.....	49
Ilustración 19: Puntos de medición fijos en la Comunidad de Madrid y su calidad. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.....	52
Ilustración 20: Evolución de funcionalidades OBD-II vs OBD-III. Fuente: elaboración propia.....	55
Ilustración 21: Comparativa de soluciones. (Elaboración propia).	60
Ilustración 22: Convertidor CC alimentación Arduino	73
Ilustración 23: Diseño de conexionado del prototipo físico parte delantera	73
Ilustración 24: Diseño de conexionado del prototipo físico parte trasera	74
Ilustración 25: Diseño del sinóptico de la pantalla HMI. Elaboración propia	80
Ilustración 26: Aspecto de los numero del proyecto de cara 10 años (elaboración propia)	110

Índice de tablas

Tabla 1: Limite de emisiones del Pacto Verde	30
Tabla 2: Etiquetado de la clasificación del parque móvil.....	34
Tabla 3: Comparación de las tecnologías actuales para medición de emisiones. Elaboración propia.....	51
Tabla 4: Resumen de las tecnologías existentes. ventajas vs limitaciones.....	56
Tabla 5: Benchmark de soluciones comerciales para la medición de emisiones	57
Tabla 6: Recopilación de sensores de gases y partículas.....	67
Tabla 7: Recopilación de sensores característicos, de contexto y posición.....	68
Tabla 8: Alternativas y comparativas de almacenamiento evaluadas	70
Tabla 9: Propuesta de los costes de los distintos elementos del prototipo	102
Tabla 10: Desglose de los costes técnicos directos (unitarios) del prototipo	109
Tabla 11: Desglose de los costes técnicos indirectos (unitarios) del prototipo	109

Capítulo 1. RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de fin de grado surge por la creciente necesidad de crear soluciones tecnológicas que ayuden a reducir el impacto ambiental del transporte por carretera, uno de los sectores más contaminantes a nivel global. En este trabajo se tratará sobre todo los vehículos más comunes en las carreteras: automóviles, motocicletas... El proyecto propone el diseño, implementación y validación de un sistema inteligente que permita a los usuarios de vehículos de combustión interna conocer, en tiempo real, el nivel de emisiones contaminantes que generan en función de variables que se expondrán y estudiarán a lo largo del trabajo.

Este sistema, se basa en la integración de una combinación de sensores, microcontroladores y técnicas de análisis de datos mediante inteligencia artificial, un concepto muy emergente y de actualidad. Tiene como objetivo no solo proporcionar información técnica precisa, sino también fomentar una conducción más consciente y sostenible. La propuesta se alinea con los principios de la ingeniería responsable, entendida como aquella que no solo resuelve problemas técnicos, sino que también responde a los desafíos éticos, sociales y medioambientales de nuestro tiempo.

Los resultados esperados incluyen el desarrollo de un prototipo funcional, la validación teórica del sistema en un entorno real (preferentemente una moto o coche, por su accesibilidad y facilidad de manipulación), y un análisis de viabilidad técnica y económica para su posible comercialización. Además, se contempla la creación de una interfaz básica que permita al usuario interpretar fácilmente los datos recogidos. Esto facilitará la toma de decisiones informando sobre su estilo de conducción, para reducir estas emisiones mencionadas y con ello que resulte en una conducción óptima y más sostenible.

Este trabajo representa una contribución significativa en el ámbito de la ingeniería aplicada a la sostenibilidad, al ofrecer una herramienta que combina hardware, software

y análisis de datos con un propósito claro: reducir el impacto ambiental del transporte privado sin necesidad de sustituir el vehículo, sino optimizando su uso. Como dijo Sócrates, filósofo griego: *“El secreto del cambio es enfocar toda tu energía no en luchar contra lo viejo, sino en construir lo nuevo.”* Esta idea encaja perfectamente con el enfoque de este proyecto, que no busca eliminar lo existente, sino transformarlo y mejorarlo mediante el conocimiento, la tecnología y la responsabilidad individual.

Capítulo 2. INTRODUCCIÓN

2.1 CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA AMBIENTAL Y TECNOLÓGICO E IMPORTANCIA DEL CONTROL DE EMISIONES EN LA AUTOMOCIÓN

Uno de los grandes desafíos medioambientales y sanitarios del siglo XXI es la contaminación del aire, causada por el transporte por carretera. Constituye uno de los principales retos a nivel global, que la sociedad se enfrenta en estos próximos años, en un contexto de creciente urbanización, aumento del parque automovilístico y dependencia de combustibles fósiles.

2.1.1 . IMPACTO GLOBAL DEL TRANSPORTE EN LA CONTAMINACIÓN

De acuerdo con la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), este sector es responsable de aproximadamente 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en la Unión Europea. [1] Las emisiones no solo contribuyen al cambio climático, sino que también generan contaminantes atmosféricos como: NO_x, partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Todas estas sustancias no solo degradan la calidad del aire y favorecen el cambio climático, también tienen efectos directos sobre la salud humana aumentando la incidencia de enfermedades destacando, enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas [2]

Según la OMS, en la zona de la región europea se estima que aproximadamente 569.000 muertes anuales están directamente relacionadas con la contaminación del aire, siendo el transporte una de las principales fuentes.[3] también hay que destacar otro factor que es el ruido del tráfico rodado. Este afecta a más del 50% de la población urbana, generando estrés, trastornos del sueño y enfermedades cardiovasculares.

2.1.2 . IMPORTANCIA DEL CONTROL DE EMISIONES EN AUTOMOCIÓN

Según la pincelada de datos expuesto, se puede afirmar que es de innegable importancia las emisiones que genera este sector. Se puede observar en la Ilustración 5: Distribución de emisiones Contaminantes del aire por sectores en España 2023. (Fuente EEA), de manera más visual.

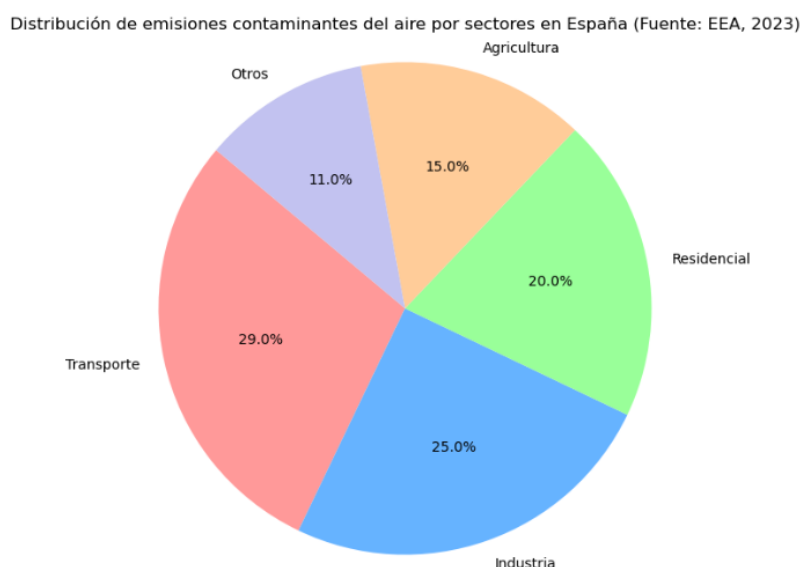


Ilustración 5: Distribución de emisiones Contaminantes del aire por sectores en España 2023. (Fuente EEA)

De hecho, la Unión europea ha implementado una serie de normativas progresivas para reducir las emisiones de los vehículos, conocidas como “normas euro”. Estas regulaciones han establecido límites cada vez más estrictos para las emisiones Nox, CO, HC y partículas, con más atención en los vehículos diésel. Sin embargo, estudios recientes muestran que, aunque los vehículos de gasolina han reducido significativamente sus emisiones reales, los diésel no han logrado los mismos avances. Esto se ve reflejado a continuación en la siguiente Ilustración 5: Distribución de emisiones Contaminantes del aire por sectores en España 2023. (Fuente EEA) según la *European Environment Agency*:

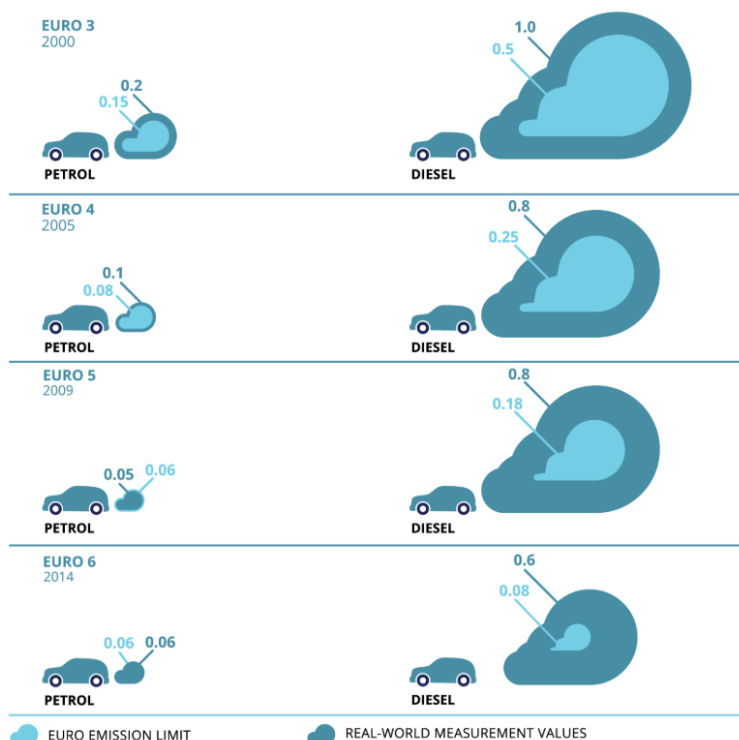


Ilustración 6: Comparación de las emisiones estándar de NOx para las diferentes normas euro.

2.1.3 . SITUACIÓN EN ESPAÑA

Según los estudios realizados, en España, el transporte supone el 29% de las emisiones totales de efecto invernadero. Es el sector más contaminante incluso por encima de la industria y la generación eléctrica. Dentro de estas emisiones el 90% son debido a el transporte por carretera, en específico de vehículos privados con motores de combustión interna. [4]

El Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) ha señalado que las ciudades españolas superan con más frecuencia los límites de calidad del aire establecidos por la Unión Europea. Se destaca en especial debido al dióxido de nitrógeno (NO₂), ya que este está estrechamente vinculado al tráfico urbano.

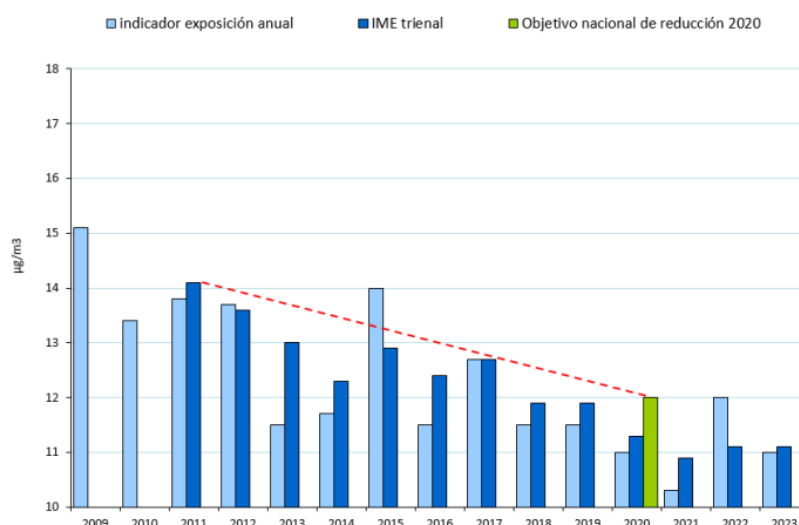


Ilustración 7: Indicadores anuales de exposición 2009-2023 y objetivo nacional de reducción. (Fuente: Informe Evaluación Calidad del Aire España 2022. Ministerio del Gobierno)

La Ilustración 7: Indicadores anuales de exposición 2009-2023 y objetivo nacional de reducción. (Fuente: Informe Evaluación Calidad del Aire España 2022. Ministerio del Gobierno) muestra una tendencia general descendente, especialmente a partir de 2011, con una reducción progresiva tanto del indicador anual como del IME. En 2020 se alcanza el objetivo nacional de reducción, representado en verde, y los valores posteriores se mantienen por debajo o cerca de ese umbral. Esta evolución sugiere una mejora en la calidad del aire, probablemente ligada a la implementación de políticas medioambientales y a la renovación del parque móvil, aunque en algunos años como 2014 y 2019 se aprecian repuntes puntuales.

2.1.4 . EVIDENCIA CIENTÍFICA Y ESTUDIOS RECIENTES

Este tema tan emergente en el siglo XXI despierta cierta inquietud en los científicos que investigan sobre ello, por lo que hay estudios y evidencias relevantes. Los epidemiólogos han demostrado que la exposición prolongada a contaminantes del tráfico aumenta el riesgo de enfermedades respiratorias cardiovasculares y neurológicas, como se ha citado previamente. A continuación, se detallarán algunos de los datos más llamativos de estos estudios:

- La exposición a PM2.5 (partícula contaminante, que contienen los gases de escape, que se verá en profundidad más adelante) aumenta un 8% el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares
- El ruido del tráfico incrementa el riesgo de cardiopatía isquémica
- Según el informe de la ONU “Perspectiva Ambiental Mundial”, la contaminación del aire se estima que cause 7 millones de muertes prematuras al año a nivel mundial.[5]

Todo esto se verá más en profundidad más adelante.

2.1.5 . EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA

En cuanto a la evolución tecnológica de las últimas décadas, es evidente que se han existido grandes avances científicos significativos en cuanto a la eficiencia de motores, sistema de postratamiento de gases y la electrificación del transporte. Estos factores podrían corresponderse a las observaciones mencionadas en la Ilustración 7: Indicadores anuales de exposición 2009-2023 y objetivo nacional de reducción. (Fuente: Informe Evaluación Calidad del Aire España 2022. Ministerio del Gobierno. En ella es evidente una tendencia en constante descenso, que una parte se podría atribuir a esta mejora de la eficiencia de motores,

En cuanto a la tecnología actual de estos sistemas, hoy en día, la mayoría de los sistemas actuales (como los sensores OBD-II) están orientados al diagnóstico mecánico y no proporcionan al usuario información clara sobre su impacto ambiental en tiempo real. Esto genera una *brecha tecnológica* entre la capacidad de medición y la concienciación del usuario. La falta de herramientas accesibles que traduzcan los datos técnicos en información comprensible limita la posibilidad de que los conductores adopten hábitos más sostenibles. Por ello es por lo que con este estudio se pretende desarrollar un prototipo eficaz que pueda contribuir a aumentar la conciencia sobre el cambio climático y que tenga cierto impacto. Pero sobre todo que sea accesible por todos tanto económicamente como a nivel de entendimiento técnico.

Aunque la transición hacia una movilidad completamente descarbonizada es el objetivo final de materia global, La mayoría de los automóviles son vehículos de combustión, especialmente en países con mayores barreras económicas o subdesarrollados, con infraestructuras que dificultan la adopción masiva de vehículos eléctricos.

La ingeniería se enfrenta a un doble desafío: por un lado, desarrollar tecnologías limpias para el futuro; por otro, optimizar el uso de los sistemas existentes para reducir su impacto ambiental. Como afirmaba el filósofo Hans Jonas en su obra *El principio de responsabilidad*, la técnica moderna debe ser guiada por una ética del futuro, que considere las consecuencias a largo plazo de nuestras acciones tecnológicas. Este proyecto entiende a la perfección esa lógica, proponiendo una solución intermedia que permita reducir las emisiones, a partir de la concienciación del usuario, sin necesidad de sustituir el vehículo.

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado plantea el diseño, desarrollo y validación de un sistema de bajo coste que permita a los usuarios de vehículos de combustión interna conocer, en tiempo real o cuando deseen, el impacto ambiental de su estilo de conducción y resto de condicionantes del vehículo. El objetivo es doble: tecnológico y social.

Nace de la necesidad urgente de abordar el impacto ambiental del transporte desde una perspectiva accesible, tecnológica y educativa. En un contexto donde las políticas públicas avanzan hacia la descarbonización, pero el ciudadano medio carece de herramientas para comprender su papel individual en la contaminación, este proyecto propone una solución concreta: un sistema que permita al conductor conocer, interpretar y reducir sus emisiones contaminantes a través de su estilo de conducción.

2.2.1 . ENFOQUE TÉCNICO

Se basa en la integración de sensores físicos (velocidad, aceleración, carga del vehículo, topografía, GPS...), microcontrolador (Arduino) y una memoria no volátil para

registrar datos en tiempo real. Posteriormente, estos datos serán analizados mediante técnicas de inteligencia artificial con el objetivo de extraer patrones de comportamiento estimar las emisiones contaminantes asociadas a cada trayecto y estilo de conducción. Este enfoque permite:

- Medir variables clave que influyen en las emisiones.
- Procesar y almacenar datos de forma eficiente.
- Traducir datos técnicos e información comprensible para el usuario.

2.2.2 . ENFOQUE DE CONCIENCIACIÓN SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL

Más allá del desarrollo técnico, el proyecto busca empoderar al usuario con información clara y personalizada sobre su impacto ambiental. La hipótesis de partida es que, al hacer visible el efecto de ciertas decisiones al volante (como aceleraciones bruscas o exceso de carga), se puede fomentar una conducción más eficiente y sostenible.

Este planteamiento se alinea con los objetivos del Pacto Verde Europeo y la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Unión Europea, que promueve la digitalización del transporte y la reducción de emisiones como pilares clave para alcanzar la neutralidad climática en 2050. También se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente los relacionados con salud, innovación, ciudades sostenibles y acción climática, que se verán más en profundidad más adelante.

2.2.3 . RESULTADOS ESPERADOS

En cuanto a los resultados esperados, se pretende expresar al máximo todo aquello que favorezca la concienciación de la contaminación del aire y su impacto.

Por otro lado, sobre los resultados más técnicos se esperan:

- Un prototipo funcional implementado en un vehículo real (motocicleta).
- Un conjunto de datos teóricos que permitan validar la hipótesis.
- Un análisis de viabilidad técnica y económica del sistema.

- Una propuesta de comercialización orientada a usuarios particulares, autoescuelas o ayuntamientos.

2.2.4 . OBJETIVOS DEL PROYECTO

- ✓ Diseñar un sistema funcional y replicable que permita medir variables relacionadas con las emisiones.
- ✓ Montar un prototipo teórico sobre un vehículo real (motocicleta) como banco de pruebas.
- ✓ Concienciar al usuario mediante visualizaciones claras y comprensibles
- ✓ Evaluar la viabilidad técnica económica y comercializar el sistema.

2.2.5 . ESTRATEGIA

Este proyecto no solo responde a una inquietud técnica, sino también a una preocupación personal por el medio ambiente y el papel que la ingeniería puede desempeñar en la transición ecológica. Todos los estudiantes de Ingeniería Industrial deberían considerar que la tecnología debe estar al servicio de la sociedad, y que la sostenibilidad no es una opción, sino una responsabilidad.

Además, el proyecto plantea una visión estratégica: si este sistema se implementara a gran escala, por ejemplo, en flotas urbanas, autoescuelas o como parte de campañas públicas, podría convertirse en una herramienta poderosa de transformación social. No se trata solo de reducir emisiones, sino de educar, empoderar y transformar hábitos.

2.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado siguiendo una lógica progresiva que permite abordar el problema planteado desde una perspectiva integral, combinando el análisis teórico con el desarrollo práctico y la reflexión crítica. La organización del documento responde a los estándares académicos propios de los estudios de Ingeniería Industrial, y busca facilitar tanto la comprensión técnica del sistema propuesto como su contextualización social y medioambiental.

En primer lugar, se introduce el contexto general del proyecto, incluyendo la motivación personal, la problemática ambiental asociada al transporte y los objetivos que se persiguen. A continuación, se presenta un marco teórico y normativo que permite situar el trabajo dentro del estado actual del conocimiento, así como justificar su relevancia técnica y social.

Posteriormente, se desarrolla el diseño conceptual y técnico del sistema, detallando las decisiones de ingeniería adoptadas, la selección de componentes, la arquitectura del prototipo y la lógica de funcionamiento. Esta parte se complementa con una fase experimental, en la que se implementa y valida el sistema en condiciones reales.

El documento también incluye un análisis de los datos obtenidos, una evaluación del impacto potencial del sistema y un estudio de viabilidad económica y comercial. Finalmente, se presentan las conclusiones, las limitaciones detectadas y las posibles líneas de mejora o ampliación futura.

La estructura se completa con una bibliografía rigurosa y una serie de anexos técnicos que recogen información complementaria relevante, como esquemas eléctricos, código fuente, fichas técnicas y resultados experimentales.

Esta organización permite no solo documentar el proceso de desarrollo del proyecto, sino también ofrecer una visión crítica y propositiva sobre el papel de la ingeniería en la transición hacia una movilidad más sostenible.

De una manera más explícita, se organiza en quince capítulos que siguen una secuencia lógica desde la contextualización del problema hasta la validación experimental y las conclusiones. A continuación, se describe brevemente el contenido de cada sección:

Capítulo 1 – Resumen ejecutivo

Presenta una visión general del proyecto, incluyendo el propósito, enfoque técnico y social, resultados esperados y la motivación personal que da origen a la propuesta.

Capítulo 2 – Introducción

Describe el contexto ambiental y tecnológico que justifica el desarrollo del sistema, la relevancia del control de emisiones en el sector del automóvil y la estructura metodológica del documento.

Capítulo 3 – Motivación y objetivos del proyecto

Aborda la problemática desde la perspectiva del usuario medio de automóvil, la necesidad de concienciación ambiental y el enfoque técnico y personal adoptado.

Capítulo 4 – Marco legal, social y medioambiental

Revisa el Pacto Verde Europeo, la normativa vigente en materia de emisiones y su relación directa con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contextualizando la relevancia institucional del proyecto.

Capítulo 5 – Panorama actual y antecedentes

Ofrece un análisis de la relación entre contaminación y salud pública, las principales fuentes de datos existentes (ITV, estudios académicos, bases abiertas) y una revisión técnica de soluciones actuales de medición de emisiones y diagnóstico embarcado.

Capítulo 6 – Diseño del prototipo del sistema

Detalla el diseño conceptual del sistema, incluyendo las variables a medir, la selección de sensores, el sistema de control (Arduino Mega 2560), el almacenamiento de datos y la estructura física del prototipo.

Capítulo 7 – Programación y gestión de datos

Describe la lógica de programación implementada, el funcionamiento del código fuente y el flujo de adquisición y tratamiento de datos por parte del sistema.

Capítulo 8 – Evaluación del impacto y utilidad del sistema

Evalúa el potencial del sistema como herramienta de concienciación ambiental y social, su aplicabilidad en campañas educativas y su posible integración en plataformas digitales o institucionales.

Capítulo 9 – Estudio económico y de viabilidad

Presenta un análisis económico del sistema, estimaciones de coste por unidad, viabilidad de producción a pequeña escala, posibles clientes y vías básicas de comercialización.

Capítulo 10 – Limitaciones del proyecto y propuesta de mejora

Identifica las principales limitaciones técnicas, plantea mejoras futuras y propone el escalado del sistema a flotas, transporte público o integraciones institucionales.

Capítulo 11 – Conclusiones

Resume los resultados alcanzados, los aprendizajes personales y técnicos y reflexiona sobre el papel de la ingeniería en la sostenibilidad y el cambio de hábitos sociales.

Capítulo 12 – Bibliografía

Recoge las fuentes científicas, normativas, académicas y técnicas consultadas a lo largo del trabajo.

Capítulo 13 – Anexos

Incluye material complementario como el conexionado del prototipo, lista de proveedores y compras realizadas, esquemas, códigos y datos adicionales.

Capítulo 3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

Como se ha expuesto previamente, este trabajo surge como respuesta a una necesidad creciente en el contexto actual de la urgencia en reducir el impacto que tiene el transporte en lo que respecta a las emisiones contaminantes generadas por vehículos de combustión. Existe una brecha significativa entre la conciencia ambiental colectiva y la percepción individual del problema. Esto quiere decir que muchos conductores desconocen cómo sus hábitos al volante influyen directamente en la calidad del aire y por tanto en la salud pública y medio ambiente.

La motivación de este proyecto se justifica por su doble enfoque: técnico y social. Se propone una solución tecnológica que pretende ser de bajo coste accesible para todos los públicos, y una solución colectiva que busca empoderar al usuario con información personalizada. Esta información permitirá una toma de decisiones libre del usuario más sostenible y responsable.

La motivación principal de este trabajo tiene como objetivo hacer visible lo invisible. Esto quiere decir que se puedan transformar datos técnicos en conocimiento útil para la sociedad. Esta visibilidad es esencial para fomentar un cambio de hábitos, ya que solo cuando se comprende el impacto real de nuestras acciones es posible modificar conductas. Además, el proyecto se alinea con tendencias actuales en movilidad sostenible, ciudades inteligentes y la creciente digitalización del transporte, lo que refuerza su posible utilidad

Presenta un reto interesante desde el punto de vista académico y profesional al integrar disciplinas como la electrónica, la programación, el análisis de datos y el diseño de producto. No solo enriquece el proceso de aprendizaje, sino que también demuestra la viabilidad de desarrollar soluciones tecnológicas con impacto social real desde un entorno universitario aplicando todo lo aprendido.

Por lo que con esto se quiere demostrar que este proyecto no solo pretende aportar una herramienta útil para los usuarios individuales. También pretende contribuir a una transformación cultural hacia una movilidad más consciente, eficiente y respetuosa con el entorno.

3.1 PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL USUARIO MEDIO DE AUTOMÓVIL

Como ya se ha introducido previamente el usuario medio de automóvil se enfrenta a una paradoja cotidiana: utiliza su vehículo como herramienta esencial de movilidad, pero desconoce en gran medida el impacto ambiental que genera su uso. Aunque es evidente que ya existe una creciente preocupación social por la contaminación del aire, esta coincidencia no siempre se traduce en acciones concretas a nivel individual. La mayoría de los conductores no disponen de información directa, específica y comprensible sobre cómo su estilo de conducción afecta a las emisiones contaminantes de su vehículo.

Ya existen diversas políticas públicas como son las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE) o el etiquetado ambiental de la DGT, pero simplemente estas no logran conectar con la experiencia diaria del conductor. Estas medidas suelen percibirse como restricciones externas más que como oportunidades de mejora personal. En este contexto, el usuario medio carece de herramientas que le permitan comprender y modificar su comportamiento de forma autónoma y basada en datos reales.

3.2 CONCIENCIACIÓN AMBIENTAL DESDE EL USUARIO INDIVIDUAL

Cualquier proceso de concienciación comienza con el acceso a la información. Sin embargo, para que ésta sea efectiva, debe de ser personalizada, contextualizada y de fácil interpretación para todo el mundo. Hoy en día, el cambio hacia una movilidad más sostenible no puede depender únicamente de normas o avances tecnológicos, sino que debe involucrar a el individuo. La toma de conciencia basada en la evidencia, puede ser el primer paso hacia una conducción más eficiente y respetuosa con el entorno. El sistema propuesto no busca

imponer cambios, sino ofrecer al usuario las herramientas necesarias para tomar decisiones informadas y responsables.

3.3 ENFOQUE TÉCNICO DEL PROYECTO

Se pretende reflejar el desafío multidisciplinar que supone combinando electrónica, programación, análisis de datos y diseño de producto. La elección de componentes como sensores, microcontroladores de tipo Arduino y memoria no volátil responde a la necesidad de crear una solución funcional, accesible y replicable. Además, las técnicas basadas en inteligencia artificial muy punteras en estos momentos para el análisis de datos añaden un valor añadido al sistema, permitiendo no solo registrar información, sino también interpretarla de forma útil y sencilla para el usuario.

3.4 ENFOQUE PERSONAL DEL PROYECTO

En el ámbito personal, este proyecto refleja cierta inquietud por contribuir a la sostenibilidad desde el ámbito de la ingeniería. No trata únicamente de desarrollar una tecnología, sino de ponerla al servicio de un cambio cultural. La motivación principal es demostrar que es posible generar impacto positivo desde soluciones simples, bien diseñadas y centradas en el usuario. En definitiva, el enfoque de este proyecto combina aptitudes técnicas con una sensibilidad social, buscando equilibrio entre innovación, utilidad y conciencia ambiental.

Capítulo 4. MARCO LEGAL, SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL

4.1 PACTO VERDE EUROPEO Y SU IMPLICACIÓN NORMATIVA

Para entender el marco legal, habrá que comenzar por comprender en que consiste el Pacto Verde (European Green Deal), tan sonado esta última década. Es una hoja de ruta estratégica cuya función es guiar al conjunto de la Unión Europea en su transición hacia una economía climática neutra, justa y sostenible. Fue presentado por la Comisión Europea en diciembre de 2019. Su principal objetivo es conseguir la neutralidad climática en 2050. Esto quiere decir que las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) sean iguales a cero. Por ello es un objetivo verdaderamente ambicioso con un plazo de aproximadamente 30 años (2019-2050).

Este pacto se trata de un marco legislativo sólido y no solo a alimentar múltiples declaraciones políticas. Afecta a múltiples sectores, incluyendo el transporte por carretera, que como ya se ha expuesto es una de las fuentes más significativas de emisiones en Europa. Uno de los pilares legislativos más relevantes en el sector del transporte es el Reglamento (UE) 2019/631, que establece límites de emisiones de CO₂ para vehículos ligeros nuevos. Este reglamento y los demás que también son relevantes de ven a continuación en profundidad.

En el ámbito jurídico, el Pacto Verde ha dado lugar a iniciativas legislativas más concretas que se agrupan en paquetes normativos como el “Fit for 55” (objetivo 55) que consiste en reducir las emisiones de efecto invernadero al menos en un 55% antes del año 2030 respecto a los niveles en 1990. Por tanto, se puede comprender que este paquete incluye revisiones de directivas y reglamentos existentes y por supuesto la introducción de nuevas medidas.

También hay que destacar sobre este pacto, que también promueve el uso de combustibles alternativos, el desarrollo de infraestructuras de recarga eléctrica y la creación de zonas de bajas emisiones.

Por lo que con todo lo expuesto, el Pacto Verde no es únicamente una estrategia política, sino una base jurídica que orienta y justifica la normativa climática de la UE. Su implementación se refleja en los reglamentos vinculantes que se exponen más adelante con mayor claridad. Estos obligan a los países miembros de la unión europea a adaptar sus marcos legales para promover una movilidad más sostenible. Esto es innegable que afecta de una manera muy directa y quizás agresiva a un conjunto de colectivos como pueden ser los fabricantes, consumidores, ciudadanos y administraciones públicas.

4.2 *NORMATIVAS EUROPEAS Y ESPAÑOLAS SOBRE EMISIONES*

La regulación de emisiones contaminantes en el transporte por carretera es uno de los pilares de la política climática de la Unión Europea. Por ello es por lo que hay una gran cantidad de normativas relacionadas con el tema medioambiental. Para ello hay que entender que es exactamente una normativa, y lo que implica, por lo que según Wikipedia: *“La normativa europea se refiere al conjunto de leyes, directivas, reglamentos y otras disposiciones legales que son promulgadas por las instituciones de la Unión Europea. Estas normas regulan una amplia gama de aspectos, desde el comercio hasta la seguridad y el medio ambiente, y tienen un alcance general y aplicable en todos los Estados miembros.”*

4.2.1. NORMATIVAS EUROPEAS

REGLAMENTO (UE) 2019/631: Normativa de emisiones para vehículos ligeros

El Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo, establece los estándares de emisiones de CO₂ para turismos y furgonetas nuevos. Este reglamento se modifica en 2023 con el objetivo de intensificar los esfuerzos hacia la neutralidad climática. A partir de 2025, los límites se endurecen significativamente mostrando el compromiso con el Pacto Verde:

Tabla 1: Limite de emisiones del Pacto Verde

	Emisiones 2020-2029 [g CO_2/km]	Emisiones 2030-2034 [g CO_2/km]
Turismos nuevos	93,6	49,5
Furgonetas nuevas	153,9	90,6

A partir del año 2035 se pretende que sean de 0 g CO_2/km . Esto implica que se prohíbe la venta de vehículos nuevos de combustión interna, con la excepción de los que sean propulsados con combustibles neutros en carbono o tecnologías avanzadas.

Los valores de emisiones presentados se calculan de acuerdo con el protocolo WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure), un estándar que ha sustituido al anterior ciclo NEDC (New European Driving Cycle) por su mayor realismo en condiciones de conducción. El WLTP permite realizar mediciones más precisas y representativas de las emisiones reales en condiciones de conducción cotidianas, y esto refuerza la fiabilidad de los datos utilizados en la regulación y en las estrategias de descarbonización del transporte.

Esta normativa presenta un marco legal clave en la transición hacia una movilidad sostenible y un paso decisivo en la reducción del impacto ambiental del sector de transporte, responsable de cerca del 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea.

Aunque este reglamento es el que más interesa en cuanto al contenido de este trabajo, se expondrán los demás, que están relacionados, para enriquecer el conocimiento sobre estos temas.

REGLAMENTO (UE) 2025/258: Nuevos estándares para vehículos pesados e impulsados por hidrógeno

Este reglamento se trata de una evolución en la política climática de la Unión Europea aplicada al transporte profesional muy emergente en estos últimos años. Establece un nuevo control de emisiones para vehículos pesados y nuevas normas técnicas de homologación. Por primera vez, estas se incorporan a vehículos propulsados por hidrógenos, híbridos y eléctricos dentro del marco regulatorio común. En marzo de 2025 comienza el proceso de certificación de conformidad, y en enero de 2026 entrará en vigor obligatoriamente para todos los vehículos nuevos de las tecnologías mencionadas.

Al ser tan novedosas estas tecnologías, se pueden destacar a continuación las más destacadas:

- El uso de nuevos métodos de simulación aerodinámica y acción en carretera, con el fin de garantizar que los datos de emisiones reflejen condiciones reales de conducción.
- Inclusión de vehículos de hidrógeno como categorías reguladas. Esto implica un gran avance en la descarbonización del transporte de mercancías y pasajeros.
- Certificación de extremos de rueda eficientes. Esta es una medida técnica para mejorar la aerodinámica de los vehículos pesados para que reduzcan su consumo energético y emisiones.

Con este reglamento se puede ver reflejado una visión más integradora, tecnológica y evolucionada de la legislación europea, adaptados a los cambios que pide la sociedad. Ya no se limita a regular emisiones directas, sino que se considera el diseño aerodinámico y la eficiencia global del vehículo.

REGLAMENTO DELEGADO (UE) 2025/1117: Seguridad y requisitos técnicos para vehículos agrícolas y forestales

Este reglamento está dirigido a estos sectores que tradicionalmente han sido a lo largo de la historia menos regulados en materia de emisiones, como puede ser la agricultura. Se introducen nuevas exigencias técnicas para la homologación de estos vehículos ya que realmente tienen también un impacto significativo en la seguridad y la sostenibilidad.

Se pueden destacar entre los requisitos acogidos por este reglamento, los siguientes puntos:

- Requisitos de seguridad activa: Consiste en sistemas de freno más precisos, mejoras en la estabilidad y control del vehículo, y tecnologías de asistencia a la conducción.
- Normas de frenado estrictas, pensadas para terrenos irregulares o en peores condiciones.
- Homologación técnica exigente: obliga a los fabricantes a incorporar tecnologías más avanzadas y someter estos vehículos a pruebas más rigurosas antes de que salgan al mercado.

Este reglamento lo que implica es una profesionalización y tecnificación de estos sectores que siempre han pasado más desapercibidos. Con ello se garantiza mayor seguridad a los operarios y la reducción del impacto ambiental. Y esta segunda razón es en la que nos queremos centrar en este trabajo.

4.2.2. NORMATIVAS ESPAÑOLAS

España cumple los compromisos de sostenibilidad y cambio climático establecidos por la unión europea a través de la legislación española. Se ha adaptado el marco jurídico para cumplir los reglamentos y directivas comunitarias. Para ello se ha promovido la clasificación ambiental del parque móvil y establecido zonas de bajas emisiones en las ciudades.

REAL DECRETO 106/2018: Adaptación a la normativa europea

Como se ha comentado previamente se tienen que transponer los objetivos del marco europeo al ordenamiento jurídico español para así poder aplicar y cumplir con lo dicho por la Unión Europea. Este Real Decreto tuvo lugar en marzo de 2018.

A continuación, se destacan las principales aportaciones:

- La gestión y tratamiento de residuos derivados de vehículos fuera de uso
- La introducción de requisitos para el etiquetado ambiental pudiendo clasificar los vehículos según su impacto ambiental, dependiendo de sus emisiones contaminantes.

Con lo que se puede concluir que este real decreto es imprescindible a nivel nacional parera controlar y reducir las emisiones del transporte. Este facilita la aplicación de políticas como la Zona de Baja Emisiones (ZBE) o los incentivos a los vehículos limpios.

ETIQUETADO AMBIENTAL DE LA DGT: Clasificación del parque móvil

Este sistema ya reconocido por la mayoría de los españoles debido a su eficaz implementación clasifica los vehículos en función de sus niveles de emisiones de dióxido de carbono y contaminantes atmosféricos. Este etiquetado es un instrumento muy útil para la gestión ambiental urbana y las políticas de movilidad sostenible.

Las categorías son las siguientes:

Tabla 2: Etiquetado de la clasificación del parque móvil

Etiqueta	Tipo de Vehículos	
Cero emisiones	Vehículos eléctricos de batería (BEV), de autonomía extendida (REEV), híbridos enchufables con autonomía ≥ 40 km, y vehículos de pila de hidrógeno.	
ECO	Híbridos no enchufables, enchufables con autonomía < 40 km, y vehículos propulsados por gas natural (GNC/GNL) o GLP.	
Etiqueta C	Turismos y furgonetas ligeras de gasolina matriculados desde enero de 2006 y diésel desde 2014.	Gasolina Euro 4 o diésel Euro 6
Etiqueta B	Turismos y furgonetas ligeras de gasolina matriculados desde el año 2000 y diésel desde 2006.	Gasolina Euro 3 o diésel Euro 4 y 5
Sin etiqueta	Vehículos más contaminantes, acceso muy restringido	

Este sistema no solo informa a los ciudadanos sobre el impacto ambiental de sus vehículos si no que condiciona el acceso a ciertas áreas urbanas y da acceso a beneficios fiscales bonificaciones de aparcamiento, peajes... y más. Sin embargo, como se ha expuesto en puntos anteriores, aunque este de una clasificación de cuanto contamina un vehículo, no conciencia lo suficiente al usuario. Se queda en una simple clasificación y no una posible reflexión sobre la mejora de los hábitos de conducción para ser más responsable libremente.

ZONA DE BAJAS EMISIONES (ZBE): Restricción a l circulación

Estas zonas de bajas emisiones se implementan obligatoriamente debido a la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (Ley 7/2021. Se implementa en todos los municipios de más de 50.000 habitantes y también en aquellos con alta contaminación o

con islas turísticas de más de 20.000 habitantes. Estas zonas pretenden reducir la exposición de la población a contaminantes atmosféricos, fomentando la movilidad sostenible.

Estas zonas se basan en el etiquetado ambiental de la DGT para limitar o restringir el acceso a los vehículos más contaminantes. Su impacto se puede considerar significativo, ya que obliga a los ciudadanos y Administraciones Públicas, a renovar el parque móvil, fomentar el transporte público y adoptar criterios ambientales en la Movilidad Urbana.

El sistema propuesto en este TFG puede integrarse como herramienta de apoyo para que los usuarios comprendan mejor su clasificación y tomen decisiones informadas sobre su movilidad.

4.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) RELACIONADOS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible se tratan de un plan global adoptado en 2015 hoy por los Estados Miembros con el propósito de acabar con la pobreza, proteger el planeta, y garantizar paz y prosperidad para todas las personas. Estos objetivos forman parte de la agenda 2030 de las Naciones Unidas. Esta agenda está compuesta por 17 objetivos y 169 metas concretas. Se abordan distintos temas sociales, económicos y medioambientales con una visión sostenible.

En este proyecto en concreto se alinea con varios de estos ODS, no solo por su carácter tecnológico e innovador, sino también por su impacto positivo en la salud pública, el medio ambiente urbano y la acción climática global. A continuación, se detallan los ODS más directamente vinculados al sistema que se pretende desarrollar.

4.3.1. ODS 3. SALUD Y BIENESTAR

El ODS 3, se centra en asegurar una vida sana y fomentar el confort de cada persona sin importar la edad.

Uno de los mayores riesgos para la salud en las ciudades es la polución atmosférica, y está muy relacionada con la circulación de vehículos. Tal como señala la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, los óxidos de nitrógeno (Nox), el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar, son contaminantes habituales de los vehículos de combustión. Estos son capaces de causar dolencias respiratorias cardiovasculares y neurológicas.

El sistema creado ofrece a los usuarios la posibilidad de saber sus niveles de emisiones reales. Esto podría impulsar unos hábitos de conducción más sostenibles o incluso el cambio de vehículo disminuyendo así la exposición global de las personas a dichos contaminantes.

4.3.2. ODS 9. INDUSTRIA E INNOVACIÓN

Esta meta impulsa una industrialización que integra a todos de forma duradera, junto con la innovación en tecnología y el desarrollo de infraestructuras sólidas.

El plan combina sensores, microcontroladores y algoritmos para manejar datos, impulsando el cambio digital en el campo de la movilidad. El control constante de los datos emitidos ayuda a generar soluciones inteligentes. Aparte, también da pie a la creación de servicios nuevos para estudiar el medioambiente como, por ejemplo: aplicaciones para móviles, plataformas de datos o hasta herramientas para municipios y empresas de envíos.

4.3.3. ODS 11. CIUDADES SOSTENIBLES

El objetivo de desarrollo sostenible número once busca transformar las ciudades en lugares inclusivos, capaces de recuperarse de las adversidades y que respeten el medio ambiente.

Dentro de esta visión el sistema creado tiene el potencial de complementar las políticas urbanas especialmente en ciudades con Zonas de Bajas Emisiones. Su aplicación permitiría a los conductores ser más conscientes del impacto de su

vehículo en un entorno urbano, generando cambios de comportamiento individual o colectivo. Además, podría utilizarse, por ejemplo, en flotas municipales, servicios de mensajería o taxis para medir el impacto ambiental de su actividad diaria, facilitando la toma de decisiones informada por parte de las administraciones.

4.3.4. ODS 13. ACCIÓN POR EL CLIMA

Como ya se ha dicho múltiples ocasiones el transporte es responsable aproximadamente de 1/4 de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, por lo que el ODS 13 insiste en adoptar medidas urgentes contra el cambio climático tanto en términos de suprimirlo como de adaptarnos.

Este proyecto contribuye directamente a este objetivo al ofrecer una herramienta para reducir las emisiones del transporte, promover la conducción más eficiente y alentar el cambio hacia vehículos menos contaminantes o modos de transportes más sostenibles. Su alineación con estrategias como el Pacto Verde Europeo y la Ley Europea del Clima, refuerza su valor como solución tecnológica al servicio de los compromisos climáticos actuales.

En definitiva, el sistema desarrollado no solo representa un avance tecnológico en el ámbito de la movilidad y el control de emisiones, sino que se establece como una herramienta con un impacto positivo directo en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible. Contribuye a la mejora de la salud pública, fomentar la innovación industrial, promover ciudades más sostenibles y reforzar la acción climática. Este proyecto se alinea con una visión integral del desarrollo que combina eficiencia técnica, compromiso medioambiental y responsabilidad social. Por lo que esta visión, refuerza el valor del sistema propuesto como una solución real y aplicable en el contexto actual de transición ecológica y digital, y evidencia su potencial para ser parte activa del cambio hacia un futuro más sostenible.

Capítulo 5. PANORAMA ACTUAL Y ANTECEDENTES:

SALUD, DATOS Y SOLUCIONES

TECNOLÓGICAS

5.1 CONTAMINACIÓN Y SALUD PÚBLICA: ESTUDIOS Y CIFRAS

La evidencia científica relaciona directamente la contaminación atmosférica con efectos adversos en la salud pública. La mala calidad del aire es uno de los principales riesgos ambientales para la salud de los ciudadanos. Por ello se presentan a continuación varias evidencias que refuerzan lo expuesto:

- En España, se estima que en 2021 más de 20.900 muertes prematuras se debieron a exposición a partículas PM_{2.5}, NO₂ y O₃. En 2019 se estimaron 38.600 muertes. [7]
- Entornos urbanos como Bilbao y Gijón superan frecuentemente los valores recomendados de PM_{2.5}, lo que según un estudio evidencia un impacto en mortalidad prematura que apunta a esta exposición continua.
- A nivel europeo, se estiman una gran cantidad de muertes prematuras debido a distintos contaminantes: 239.000 (PM_{2.5}), 70.000 (O₃) y 48.000 (NO₂). [8]

NIVEL EUROPEO

Se muestran a continuación, la calidad del aire según la European Environment Agency (EEA)

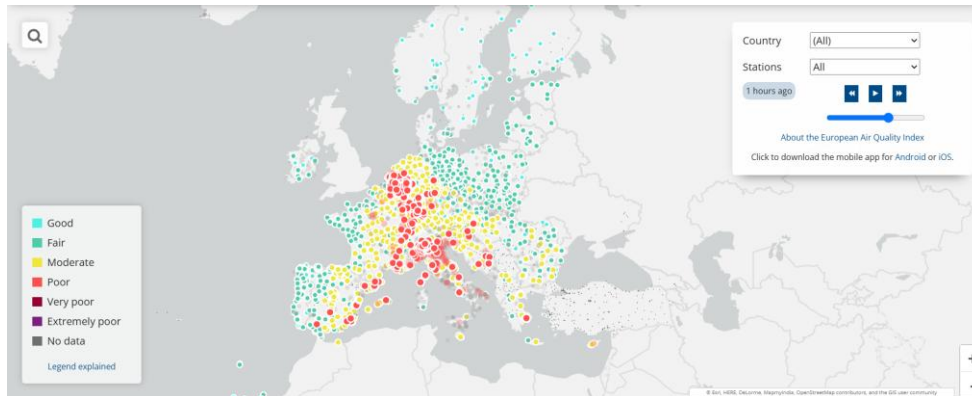


Ilustración 8: Índice Europeo de la Calidad del Aire Fuente: EEA

La Ilustración 8: Índice Europeo de la Calidad del Aire Fuente: EEA, muestra el Índice de Calidad del Aire en Europa, evidenciando una preocupante concentración de puntos rojos y amarillos en gran parte de Europa Central y del Sur, especialmente en países como Italia, Francia, Alemania y España. Estos colores indican niveles "pobres" y "moderados" de calidad del aire, respectivamente, lo que implica una exposición significativa a contaminantes como el PM2.5, NO₂ y ozono troposférico.

Esta situación refleja un problema estructural de contaminación atmosférica vinculado al tráfico, la industria y condiciones climáticas adversas, con consecuencias directas para la salud pública. La necesidad de implementar tecnologías de monitorización y políticas de reducción de emisiones es urgente para frenar estos efectos. Esta información se actualiza en tiempo real a través del European Quality index.

NIVEL MUNDIAL

A nivel global, estudios de epidemiólogos demuestran que niveles elevados de PM2.5, ozono y N02 incrementan el riesgo de asma, EPOC, infartos a largo plazo.[5]. En 2021, se atribuyeron 8,1 millones de muertes a la contaminación del aire (el 90% de ellas debido a PM2.5) [9]



Ilustración 9: Índice Mundial de la Calidad del Aire. Fuente:waqi.info

En la Ilustración 9: Índice Mundial de la Calidad del Aire. Fuente:waqi.info, se presenta en tiempo real el índice de calidad del aire mundial. Se puede ver como el más perjudicial es La República del Congo, Kinshasa, y el más favorable es Kyrgyzstan, Bishkek.

5.1.1 . EXPOSICIÓN URBANA EN ESPAÑA

Como es de esperar, se hará hincapié en España con datos y estudios del ministerio e información destacada de diferentes comunidades autónomas. El Ministerio de Transición Ecológica (MITECO) contiene un mapa interactivo con 506 estaciones que muestran gran cantidad de puntos con mucha contaminación. A continuación, se presenta a día de hoy como está la situación en España:

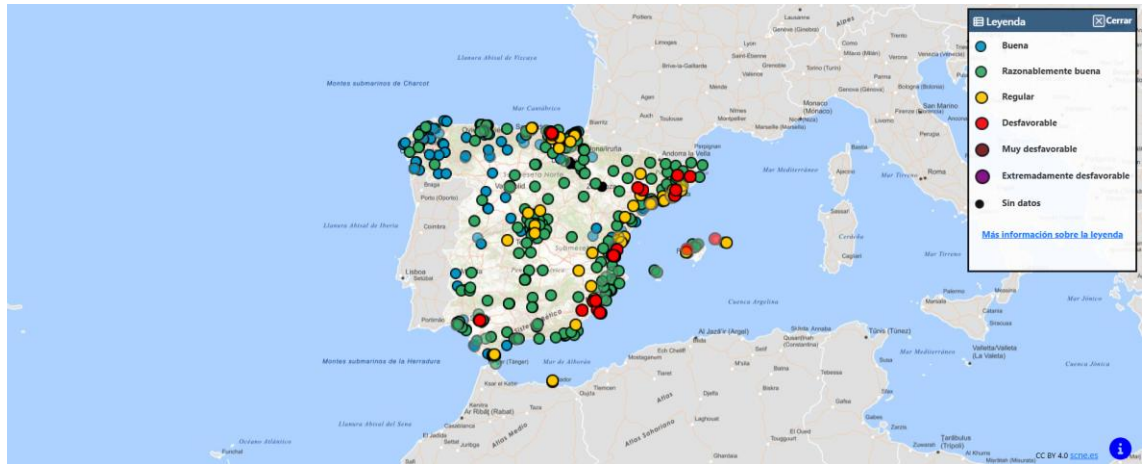


Ilustración 10: Índice Nacional de la Calidad del Aire. Fuente: MITECO <https://ica.miteco.es/>

Esta herramienta se distingue mediante un código de colores que se presenta en la leyenda del mapa en la parte superior derecha, que va desde buena, razonablemente buena, regular, desfavorable, muy desfavorable y extremadamente desfavorable. Se destacan las zonas de Madrid, Bilbao, Barcelona, Sevilla y Murcia.

Se puede observar en la Ilustración 10: Índice Nacional de la Calidad del Aire. Fuente: MITECO <https://ica.miteco.es/>, que muchas poblaciones de España superan los valores impuestos por la Unión Europea (UE) y los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Por ello, el Colegio de Comisarios de la Unión Europea denunció a España en 2021 ante el Tribunal de Justicia de la Unión Europea. Son 19 municipios los que recurrentemente sobrepasan los valores en Madrid y Barcelona. Con el objetivo de evitar la multa millonaria a España, el conjunto de las administraciones competentes ha trabajado conjuntamente para evitar esa situación. [10]

Se exponen a continuación distintos datos actualizados de interés:

- Granada registra en varios días hasta $157 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por encima del límite diario $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, en 2024. [11]

- Bilbao, Barakaldo y Erandio superan, con el doble, los 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5 establecido por la OMS, en junio de 2025. Esto saltó todas las alertas sanitarias y recomendaciones de salud pública. [12]

5.1.2 IMPACTO EN SALUD PÚBLICA

El impacto en la salud pública es evidente. Un 99% de los centros escolares en España registran niveles por encima de los límites establecidos por la OMS, esto provoca infecciones, asma y enfermedades crónicas. [13]. También se puede mencionar el ozono troposférico, especialmente en verano que agrava enfermedades respiratorias como el asma y la EPOC. Un estudio en EE. UU. Estima una reducción de un tercio de 03 a 4.000 muertes evitables.[14].

Como se ha mencionado previamente, en Bilbao motivaron las advertencias de salud pública para evitar actividad física intensa al aire libre. [15]

5.1.2.1 Tendencias y avances normativos

Todos estos estudios demuestran una evolución y tendencia a lo largo de los años a ir reduciendo el impacto que la contaminación del aire genera.

Entre 2005 y 2022 las muertes por PM2.5 en la UE disminuyeron un 45%, aunque las cifras siguen siendo altas y siguen sin cumplirse algunos de los valores establecidos por la OMS.[16]. Por lo que cumplir los nuevos estándares de la OMS se prevé que podría salvar unas 114.000 vidas más en Europa cada año. [17]

Para dejar evidencias de estas tendencias, se presenta a continuación el estudio realizado por el Ministerio de Transición Ecológica. Se muestran las sustancias más relevantes a lo largo del periodo 2002-2022. En la mayoría se demuestra una tendencia descendente general. Hay que prestar atención a la línea roja que es la que representa el tráfico.

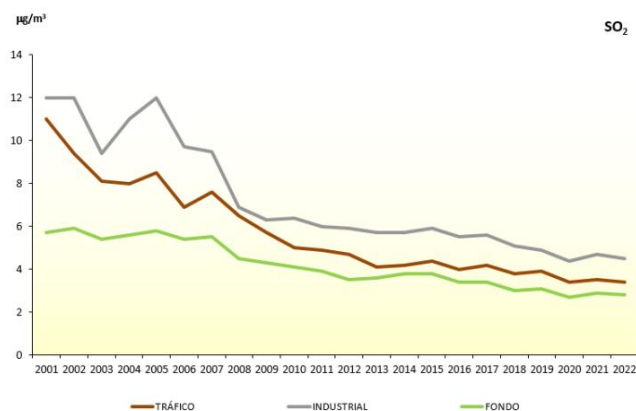


Ilustración 11: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (SO₂). Fuente MITECO

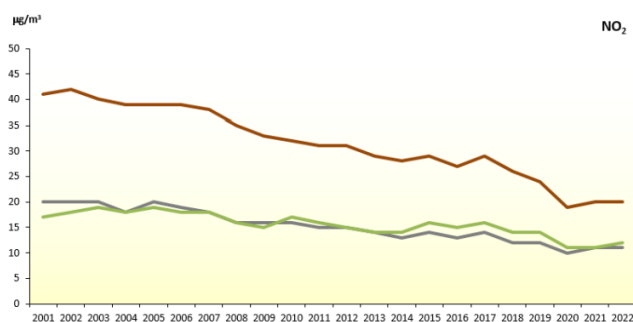


Ilustración 12: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (NO₂). Fuente MITECO

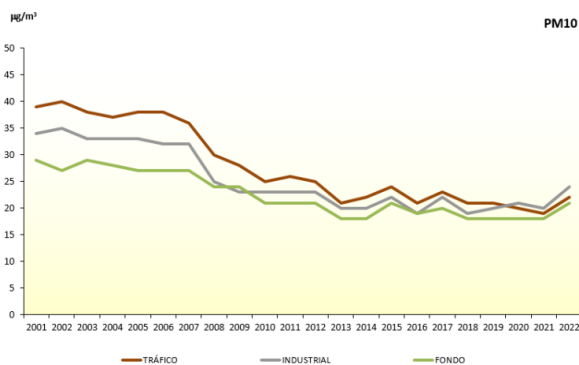


Ilustración 13: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (PM₁₀). Fuente MITECO

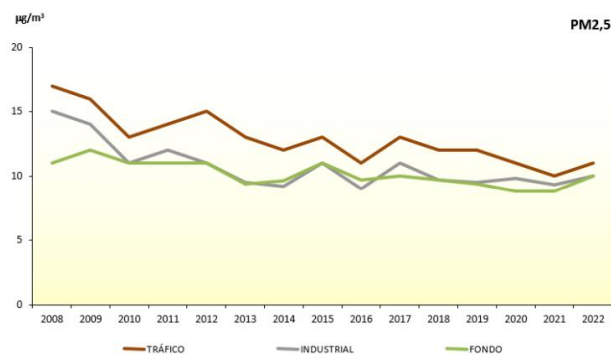


Ilustración 14: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (PM2.5). Fuente MITECO

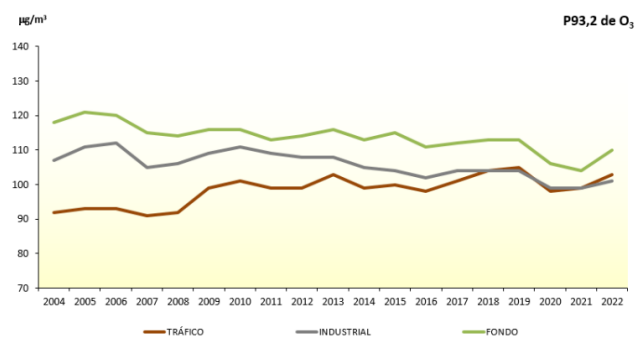


Ilustración 15: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (O3). Fuente MITECO

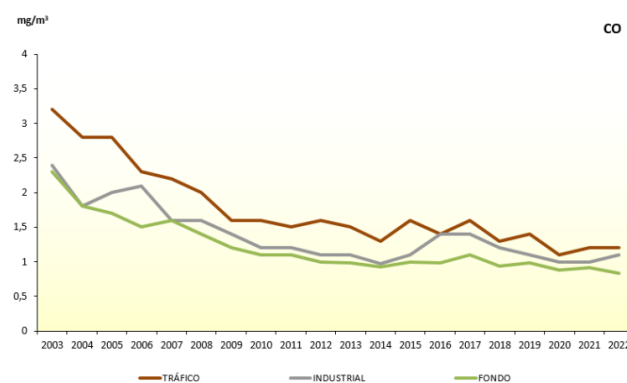


Ilustración 16: Evolución del Índice de calidad del aire en España por tipo de estación (CO). Fuente MITECO

Y a continuación, se puede observar la evolución en los últimos veinte años del impacto que tiene sobre la salud pública. Esta grafica demuestra que la tendencia también es decreciente. Se ve claramente que el objetivo de la Unión Europea podría ser alcanzado en el año 2027 según la tendencia

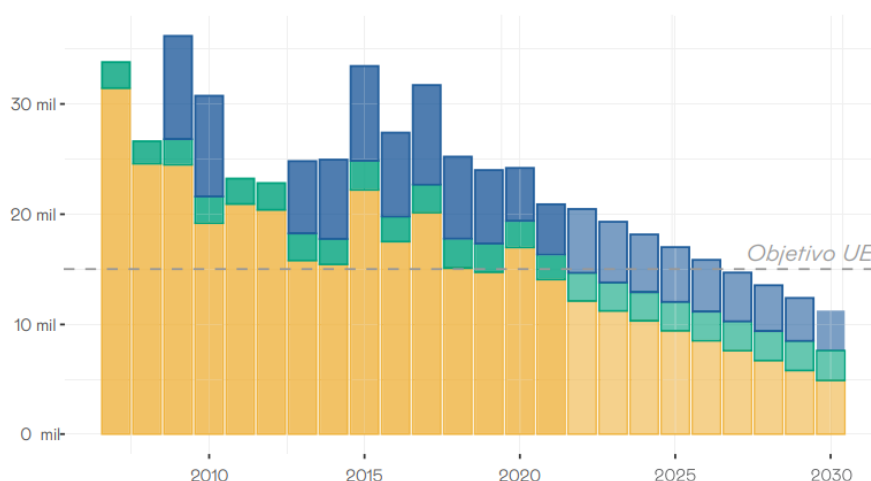


Ilustración 17: Muertes prematuras asociadas a NO2, O3 y PM2.5 en España. Fuente: ESADE

Los datos expuestos confirman que la contaminación del aire representa uno de los principales desafíos de salud pública tanto en España como a nivel mundial. Las cifras de muertes prematuras asociadas a partículas en suspensión, dióxido de nitrógeno u ozono revelan un impacto directo y cuantificable. Este contexto justifica la urgencia de desarrollar soluciones tecnológicas que permitan identificar, reducir y mitigar estas emisiones, especialmente en entornos urbanos, donde la densidad de población multiplica los riesgos sanitarios. El sistema propuesto en este proyecto se enmarca en esa necesidad creciente de actuar frente a un problema tan actual y relevante.

5.2 FUENTES DE DATOS (ITV, ESTUDIOS, BASES DE DATOS PÚBLICAS)

Para realizar el estudio de emisiones contaminantes, es muy importante apoyarse en datos fiables y variados. Para esta recopilación de información sobre las emisiones de un vehículo se detallan las más relevantes:

5.2.1 INSPECCIÓN TÉCNICA DE VEHÍCULOS (ITV) Y DATOS OBD

Entendiendo la función de la ITV en España, se podrá analizar el contenido. Según Wikipedia: *“tipo de mantenimiento legal preventivo en que un vehículo es inspeccionado periódicamente por un ente certificador, el cual verifica el cumplimiento de las normas de seguridad y emisiones contaminantes que le sean aplicables.”*. Para que un vehículo pase la ITV, se realizan una serie de pruebas que certifican su aprobación para circular de forma segura.

Desde febrero de 2018, las estaciones de ITV en España han incorporado lectura de diagnóstico a bordo (OBD) para medir en tiempo real parámetros del motor relacionados con las emisiones. Además, también realizan pruebas de opacidad en diésel o CO₂ en gasolina. En mayo de 2023 se intensificó la recogida de datos de consumo y emisiones a través de OBD, como parte del Reglamento 2021/392, con el fin de reducir las emisiones.

Actualmente, un 20% de los vehículos que se someten a la prueba de la ITV, fallan por emisiones. Esta cifra crece en los últimos años, siendo una de las causas principales de rechazo en la prueba de la ITV.

5.2.2 BASES PÚBLICAS E INVESTIGACIÓN DEL ISCIII Y CNSA

El CNSA del ISCIII es el Centro Nacional de Sanidad Ambiental, es un organismo especializado dentro del Instituto de Salud Carlos III (ISCIII), que depende del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España. Este centro es encargado de:

- Evaluar riesgos para la salud procedentes de la exposición a contaminantes ambientales (aire, agua, suelo).
- Realizar estudios e informes sobre calidad del aire y exposición humana a contaminantes.
- Apoyo en toma de decisiones públicas relacionadas con el medio ambiente.
- Monitorización de la calidad del aire.
- Coordinación de estudios con hospitales, universidades y centros de investigación.

El CNS-ISCIH trabaja con redes de vigilancia de calidad del aire y combina métodos epidemiológicos y toxicológicos para evaluar riesgos sanitarios derivados de estos contaminantes atmosféricos. En su Plan Nacional de Aire (2017-2019), se analizaron los efectos de PM10, PM2.5, NO2 y O3, relacionando esto con los estudios previamente presentados respecto a la mortalidad prematura y hospitalizaciones.

5.2.3 ESTUDIOS ACADÉMICOS Y OBSERVATORIOS ECONÓMICOS

Diversas entidades, universidades o instituciones privadas se dedican también a estudiar la procedencia y los efectos de la contaminación del aire y las emisiones. Pero en este caso en un interés más bien económico y de análisis de tendencias del mercado.

Un informe de ESADE de 2024 estima que la contaminación ha contribuido a restar un 5% del PIB español desde el 2007. Su mayor impacto viene dado en Asturias, Cataluña y Andalucía. También se recalca en el informe la comparación con otros países: *“Esto es ligeramente inferior al impacto medio estimado en la UE (6%), donde sobresalen Italia (9%) y Europa del Este (10%).”*

Este potencial estimado de PIB adicional por CCAA en cada periodo de cumplirse con los límites de concentración de partículas PM2.5 marcados por la OMS, vienen representadas a continuación.

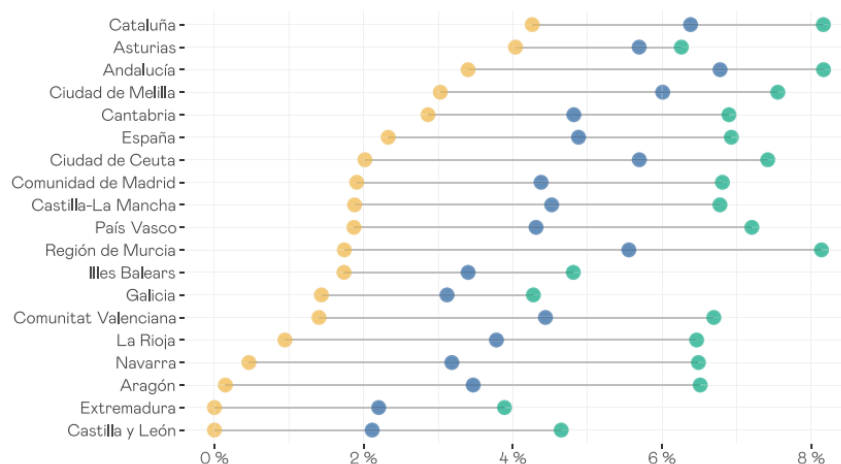


Ilustración 18: Potencial estimado de PIB por CCAA en cada periodo de cumplirse con los límites de concentración de partículas PM2.5 marcadas por la OMS (2021/2027, 2014/2020, 2007/2013). Fuente: ESADE

Otros estudios académicos destacables son proyectos como APHEIS (ISCIII-SciELO), que desarrollaron guías para medir impacto del PM2.5. Combinan impacto económico con epidemiológico de la contaminación.

5.3 TECNOLOGÍAS ACTUALES PARA LA MEDICIÓN DE EMISIONES

Es fundamental una identificación exacta y confiable de las emisiones de los vehículos para valorar su efecto en el medio ambiente y la salud pública. Hay tres tecnologías fundamentales, todas con usos diferentes pero complementarios:

5.3.1 DINAMÓMETROS Y BANCOS DE PRUEBAS (LABORATORIO)

Se emplean dinamómetros en el suelo o en unas plataformas de rodillos dónde el vehículo sigue ciclos estandarizados como el WLTC o NEDC, evaluando las emisiones bajo condiciones reguladas. Sin embargo, estos datos difieren sustancialmente de los obtenidos en carretera, esto ha sido comprobado por varios estudios. En el Joint Research Centre (JRC, UE) se han analizado las divergencias en datos de Nox entre el entorno en un laboratorio y las pruebas reales en carretera.

5.3.2 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Un software de simulación es una herramienta verdaderamente útil y alcanzable sin un elevado coste en el laboratorio. Se utilizan programas para simular las emisiones entre los que se puede destacar MOVESTAR (basado en el modelo EPA MOVES, por la Universidad de Cornell). Este se apoya en datos como velocidad y aceleración para calcular el consumo y las emisiones.

También hay instrumentos como MaLTESE, que combinan métodos de simulación y aprendizaje automático para crear modelos realistas que disminuyen la necesidad de exámenes físicos.

5.3.3 SENSORES PORTÁTILES (PEMS) Y SOBRE EL TERRENO (RDE)

Los sistemas PEMS (Sistemas de Medición de Emisiones Portátiles) representan la tecnología líder para la medición de emisiones reales en movimiento, documentando información de CO₂, CO, NO_x, partículas y más. Una investigación del JRC contrastó las emisiones de vehículos pesados medidas con PEMS frente al laboratorio, descubriendo que las condiciones reales tienen un impacto considerable en los números.

En 2023, la revista Energies publicó un estudio de herramientas PEMS y su comparativa con dispositivos de laboratorio, resaltando una desviación inferior al 15% para HC/CO/NO_x y menor a 10–15 g/km para CO₂. Otros estudios realizados en áreas urbanas en Polonia evidenciaron que modelos de simulación como VERSIT+ disminuyen las emisiones en comparación con datos reales de PEMS.

También existen sistemas más pequeños, como mini-PEMS o AirCom, todavía en desarrollo, que posibilitan mediciones en conjunto en tiempo real, beneficioso para el control ciudadano o la identificación de "software tramposo" como en el caso de Dieselgate.

Este desarrollo ofrece una visión completa de las tecnologías de medición actuales y su relevancia para el análisis de emisiones en condiciones reales y de laboratorio. Estas son las principales tecnologías, pero hay más que son menos relevantes que ese plantea a continuación. Pero antes se incluye una tabla que recopila la información expuesta sobre los tres tipos más destacados, separando en dos categorías a los PEMS y mini-PEMS, debido a que tienen algún matiz diferente:

Tabla 3: Comparación de las tecnologías actuales para medición de emisiones. Elaboración propia

Tecnología	Precisión	Aplicación más habitual	Ventajas principales
Dinámetros (lab)	Alta	Homologación y desarrollo	Medición controlada, repetible
Simulación software	Media	Estudios de impacto y modelado	Rápida, económica, permite escenarios múltiples
PEMS (móvil)	Alta	Evaluación real, RDE, vigilancia	Captura emisiones reales en condiciones reales
Mini-PEMS / AirCom	Media	Pruebas ciudadanas, control visual	Distribuable, bajo coste, ideal para el escalado de participación masiva

5.3.4 OTRAS TECNOLOGÍAS

Además de las tecnologías previamente mencionadas, existen otras tecnologías actuales y emergentes que también se utilizan o investigan para la medición de emisiones. Se exponen a continuación las más relevantes.

5.3.4.1 Sensores fijos urbanos o de infraestructura

Consiste, como dice el propio nombre, en estaciones de medición fijas colocadas en puntos clave de ciudades para monitorizar contaminantes como NO₂, CO, O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}.

Estos sistemas los utilizan las redes oficiales, como ESPAIRA en España o el European Air Quality Index. En Madrid y Barcelona existen mapas detallados basados en sensores distribuidos por zonas escolares, avenidas o túneles. A continuación, se muestran en la Comunidad de Madrid los distintos puntos de medición y su calidad:

En tiempo real

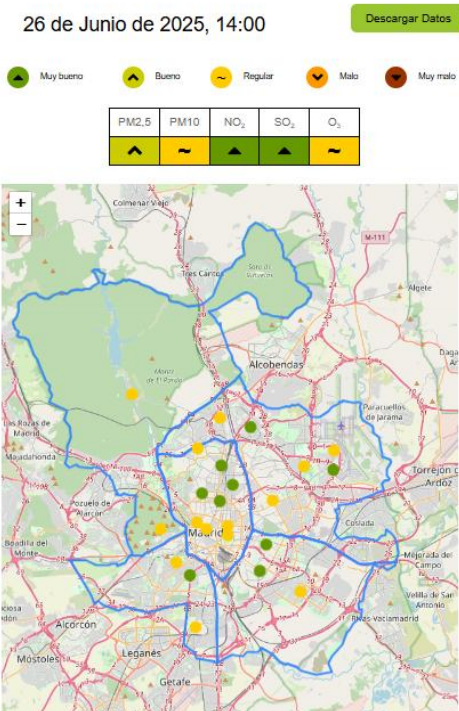


Ilustración 19: Puntos de medición fijos en la Comunidad de Madrid y su calidad. Fuente: Ayuntamiento de Madrid

Aunque estos sistemas no son en específico para vehículos en concreto, permiten estimar emisiones por tipo de tráfico o calle. Por lo que es un sistema comúnmente utilizado y muy útil. Puede detectar anomalías en zonas que de repente cambian sus índices de contaminación frecuentemente, así pudiendo atacar el problema desde la raíz.

5.3.4.2 LIDAR y cámaras de detección remota (Remote Sensing Devices RSD)

Esta tecnología es más puntera. Pues consiste en la medición de las emisiones de cada vehículo mediante láseres o infrarrojo. Se miden de cada vehículo individualmente cuando pasan por un punto fijo en concreto.

Estos sistemas se han utilizado en ciudades como Londres, Denver o Berlín. También en estudios en Cataluña y Reino Unido. Detectan gases como HC, CO, CO₂, NO_x y partículas ultrafinas.

5.3.4.3 Sistemas embarcados avanzados (Tecnología OBD-III en pruebas)

Los sistemas OBD-II actuales permiten monitorizar emisiones en tiempo real, pero su precisión es limitada y no mide las emisiones en gr/km. Por ello se está trabajando en una futura generación más avanzada OBD-III, capaces de transmitir datos en tiempo real por conexión inalámbrica a autoridades.

Actualmente, han sido implementados en países como China o Corea del Sur, en vehículos industriales.

5.3.4.4 Drones equipados con sensores

Consiste, como dice el propio nombre, en drones con sensores ópticos o químicos para medir concentraciones de contaminantes en zonas de difícil acceso, por ejemplo: túneles o zonas industriales. Son de gran ayuda para detectar “zonas calientes” de contaminación o verificar emisiones de flotas.

5.3.4.5 Sistemas de medición por satélite

Hay satélites como Sentinel-5P (ESA) o TROPOMI, que miden la concentración de contaminantes atmosféricos a gran escala. Estos son muy útiles ya que permiten relacionar datos regionales de emisiones con patrones de tráfico y meteorología.

5.4 SISTEMAS DE ASISTENCIA Y DIAGNÓSTICO EMBARCADOS (OBD)

Este sistema merece ser tratado con mayor profundidad, pues es verdaderamente actual y muy recurrente. Los sistemas de diagnóstico a bordo son conocidos como OBD (On-Boarding Diagnostics).

Consisten en herramientas electrónicas incorporadas en los vehículos que permiten monitorizar el estado de los distintos sistemas del vehículo. Especialmente todos aquellos parámetros relacionados con las emisiones contaminantes y la eficiencia del motor.

El sistema estándar es el OBD-II, y es obligatorio en la Unión europea desde 2001 para vehículos de gasolina, y desde 2004 para vehículos de diésel. Estos sistemas proporcionan acceso a datos clave como: la relación aire-combustible, temperatura del refrigerante, estado del sistema encendido, eficiencia del catalizador, y presencia de errores mediante códigos DTC (Diagnostic Trouble Codes). Estos códigos se leen con herramientas que permiten detectar fallos y realizar un mantenimiento predictivo de posibles errores de cara al futuro.

También hay que mencionar que está en marcha una nueva generación de esta tecnología conocida como OBD-III. Sin embargo, están en proceso de implementación todavía en EE. UU y UE desde el 2025. Es una tecnología todavía en desarrollo y que introduce unas mejoras claves. Tiene una transmisión automática de datos a autoridades y fabricantes via 5G y 6G, un diagnóstico predictivo con IA para por ejemplo detectar fallos antes de que ocurran. También constan de una ciberseguridad avanzada y una integración V2X, que permite la comunicación con semáforos, estaciones de carga y otros vehículos.

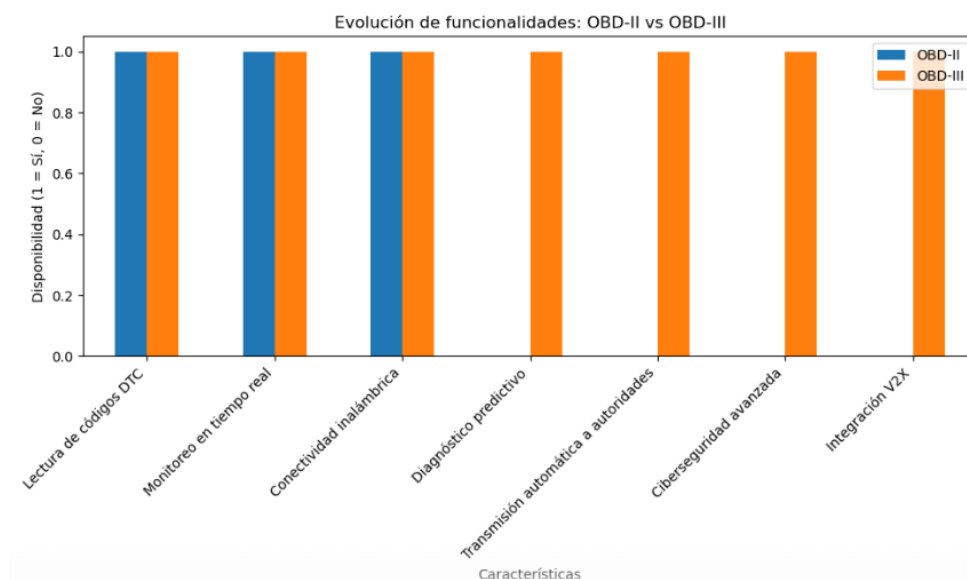


Ilustración 20: Evolución de funcionalidades OBD-II vs OBD-III. Fuente: elaboración propia

Desde un punto de vista de este proyecto, los sistemas OBD representan una fuente fundamental de datos ya disponibles en muchos vehículos, lo que abre las puertas integraciones con dispositivos externos que no requieren una modificación compleja del vehículo. Su uso podría complementar o incluso facilitar la adquisición de datos sobre el comportamiento del motor y, por tanto, sobre las emisiones reales en tiempo real, sin necesidad de instrumentación adicional en algunos casos. Por lo que, la existencia de estos sistemas OBD es de gran ayuda para la implementación del nuevo sistema planteado.

También, existen dispositivos comerciales tipo “dongle” que se conectan al puerto OBD-II y transmiten datos mediante Bluetooth o WiFi, lo cual sería una opción viable para proyectos de bajo coste o prototipos enfocados a usuarios individuales. En el contexto de este trabajo, el OBD puede actuar como fuente de validación o como referencia comparativa frente a las mediciones realizadas por los sensores externos que se analizaran en este proyecto.

5.5 RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS

Por lo que para mejor entendimiento visual se realiza una tabla en la que se pueden ver las distintas tecnologías, y las analogías entre ellas y sus limitaciones.

Tabla 4: Resumen de las tecnologías existentes. ventajas vs limitaciones

<i>Tecnología</i>	<i>Aplicación principal</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Limitaciones</i>
Dinamómetros (laboratorio)	Homologación, control oficial	Alta precisión y estandarización	No refleja conducción real
PEMS	Evaluación en condiciones reales (RDE)	Datos reales de NOx, CO ₂ , etc.	Coste y complejidad técnica
Simulación (MOVES, MaLTESE)	Estudios, modelado, políticas públicas	Económica y flexible	Necesita calibración con datos reales
Sensores urbanos fijos	Vigilancia ambiental	Datos continuos, comparables	No identifica vehículo individual
LIDAR / Detección remota (RSD)	Evaluación de flotas y tráfico real	Sin contacto, no invasivo	Precisión variable
Drones	Inspección puntual o áreas inaccesibles	Flexible, útil en emergencias	Corta autonomía
Satélites	Análisis global o regional	Cobertura masiva, útil para políticas	Baja resolución local
OBD-II / III embarcado	Monitorización continua en el vehículo	Información en tiempo real	Limitado por fabricante (OBD-II)

5.6 BREVE BENCHMARK DE SOLUCIONES SIMILARES (PRODUCTOS EXISTENTES)

Para realizar el prototipo de este proyecto, primero hay que investigar y analizar las soluciones ya disponibles en el mercado y que puedan servir de referencia técnica, estratégica o económica. Por lo que a continuación se expone un breve benchmark que incluye productos comerciales, proyectos académicos y dispositivos accesibles enfocado tanto para usuarios individuales como flotas. El objetivo de ello es identificar ventajas, limitaciones y nichos que aún no hayan sido cubiertos, pudiendo ser una buena oportunidad.

5.6.1 CLASIFICACIÓN GENERAL

Por lo que se exponen a continuación las posibles soluciones comerciales para la medición de emisiones. Se analizarán más en profundidad las más destacadas.

Tabla 5: Benchmark de soluciones comerciales para la medición de emisiones

Tipo de solución	Ejemplos comerciales	Público objetivo	Nivel de precisión	Precio estim.	Aplicaciones	Diagnóstico predictivo
Dispositivo OBD tipo dongle	ELM327, FIXD, Carly, GOFAR	Usuario individual	5	Bajo	Lectura de códigos OBD, diagnóstico básico	Medio
Sensor portátil avanzado (mini-PEMS)	AirCom, SensorBox, Senseair K33	Startups / I+D	9	Medio	Medición real de emisiones, investigación	Alto
Plataforma integrada para flotas	Geotab, AVL M.O.V.E, Continental eHorizon	Empresas / Administraciones	9	Alto	Gestión de flotas, análisis de emisiones, mantenimiento predictivo	Alto

Dispositivo OBDLink MX+	OBDLink MX+	Usuario individual	5	Medio	Diagnóstico OBD, monitoreo en tiempo real	Medio
Dispositivo ELM327	ELM327	Usuario individual	3	Bajo	Lectura básica de códigos OBD	Nulo
App móvil Torque	Torque App	Usuario individual	4	Bajo	Visualización de datos OBD	Bajo
App móvil FIXD	FIXD	Usuario individual	5	Medio	Diagnóstico de fallos, mantenimiento	Medio
App móvil Automatic Pro	Automatic Pro	Usuario individual	5	Medio	Seguimiento de viajes, diagnóstico	Medio
App móvil Fuelio / Drivvo	Fuelio / Drivvo	Usuario individual	3	Bajo	Registro de consumo y mantenimiento	Nulo

5.6.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

Tras ver de una manera resumida las más destacadas soluciones tecnológicas, se enterará a tratar más en profundidad las más destacadas. Se realizará una comparativa entre tres soluciones de referencia, seleccionadas por su relevancia y datos disponibles:

GOFAR (Australia)

Se trata de un dispositivo que se conecta al puerto OBD-II y recopila datos en tiempo real de conducción y consumo. Integra una app móvil con alertas y puntuaciones de eficiencia.

Cuenta con la ventaja de que es muy accesible, tiene buen diseño y es útil para la concienciación individual. Sin embargo, no mide emisiones directamente, solo las estima con algoritmos. Su precio estimado ronda los 89 euros.

AirCom (Polonia)

Se trata de un dispositivo que consiste en un Mini PEMS de bajo coste y desarrollado para proyectos ciudadanos de medición distribuida. Mide partículas de NOx, CO, y otros contaminantes desde el tubo de escape mediante sensores de bajo coste ya calibrados.

Cuenta con la ventaja de que tiene un tamaño reducido, adaptable y muy compatible con las distintas plataformas. Sin embargo, tiene una precisión limitada comparada con los PEMS estándar, y que requiere un mantenimiento recurrente. El precio estimado puede oscilar entre 600 y 1200 euros. Por ello es por lo que principalmente se utilizan para investigación, no todos pueden acceder a ello.

AVL M.O.V.E (Australia)

Se trata de un dispositivo PEMS profesional, homologado para ensayos. Se emplea en validación de emisiones por fabricantes y organismos.

Cuenta con la ventaja de que son de alta precisión, datos homologados y tienen integración total. Sin embargo, presentan un elevado coste y gran complejidad técnica. El precio estimado está por encima de los 30.000 euros. Se utilizan en industrias y laboratorios certificados.

5.6.3 VISUALIZACIÓN COMPARATIVA

A modo resumen de estas tres soluciones destacadas, se incluye un gráfico que muestra la valoración de los criterios comentados: precisión, coste, facilidad de uso, capacidad de integración y escalabilidad, por relaboración propia. Donde el coste más alto se representa en 0 y el más bajo en 10.

Se resumen los siguientes conceptos:

- GOFAR bajo coste y facilidad de uso, pero baja precisión.
- AirCom es equilibrado, con buena escalabilidad y compatibilidad, coste medio-alto, precisión limitada, adaptable.
- AVL M.O.V.E sobresale en precisión e integración, pero es costoso y complejo de usar.

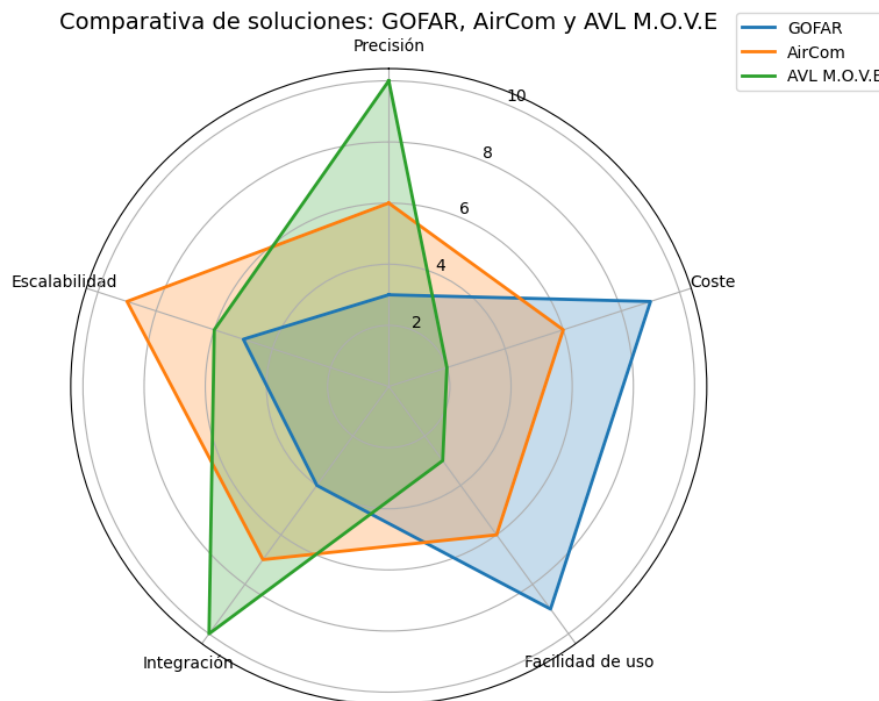


Ilustración 21: Comparativa de soluciones. (Elaboración propia).

5.6.4 CONCLUSIONES DEL BENCHMARK

Este análisis permite identificar varias oportunidades estratégicas. Existe un hueco claro entre la precisión y el coste. Los dispositivos muy precisos como AVL están fuera del alcance del usuario medio, mientras que los productos más baratos no miden emisiones reales. Un sistema portátil, de coste medio y con datos fiables cubriría ese vacío.

También se observa el potencial de integrar sensores con sistemas ya existentes. GOFAR demuestra que los usuarios están dispuestos a usar apps móviles y dongles OBD. Combinar sensores externos con datos del vehículo puede mejorar los resultados sin aumentar demasiado el coste

Por último, hay un interés social creciente por el control individual de emisiones. Soluciones como AirCom y proyectos de ciencia ciudadana muestran una tendencia clara hacia la democratización del control ambiental.

Estas ideas refuerzan el enfoque del prototipo propuesto: un sistema portátil, de bajo o medio coste, compatible con OBD y orientado a la concienciación individual en entornos urbanos.

Capítulo 6. DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA:

VARIABLES, SENSORES, SISTEMA,

CONEXIONADO.

El desarrollo de un prototipo funcional para la medición y evaluación de emisiones contaminantes en vehículos de combustión interna requiere conocimientos de ingeniería electrónica, análisis ambiental, diseño de sistemas embebidos, diseños de sistemas electrónicos y criterios de accesibilidad tanto económica como tecnológica. Por lo que, para ello, este apartado consiste en presentar el diseño detallado del prototipo propuesto. Para ello se requiere principalmente un estudio de las variables que pueden tener relevancia en este estudio, para su posterior selección de sensores asociados a ellas. Todo ello debe ser compatible con la plataforma de control que se seleccione para que permita el correcto conexionado físico y por supuesto el almacenamiento de datos y posterior tratamiento mediante inteligencia artificial.

Este sistema busca principalmente ser una alternativa viable, versátil y económica para soluciones comerciales complejas o inaccesibles. Como ya se ha planteado previamente, el objetivo es medir, registrar y visualizar de forma comprensible las emisiones de contaminantes clave, como: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos no quemados, dióxido de carbono y partículas en suspensión. Y combinando estos datos con variables como: velocidad, aceleración, temperatura o localización GPS permitirán una lectura más fiel del comportamiento real del vehículo.

Pero también además de cuantificar emisiones se pretende empoderar al usuario final con información entendible y en tiempo real sobre su impacto ambiental en la conducción. Por

ello es por lo que se plantea una interfaz a través de una pantalla HMI y un almacenamiento de datos para un análisis posterior para sacar mayor beneficio a los datos obtenidos. Y todo esto se implementará sobre una arquitectura modular y abierta basada en Arduino Mega 2560 que facilite su replicación, mejora o adaptación a otros contextos futuros.

6.1 ELECCIÓN DE LA PLACA DE CONTROL: ARDUINO MEGA 2560

El primer paso para comenzar a plantear el prototipo es seleccionar la placa de control que se ajuste a las necesidades de este proyecto. Para ello se ha seleccionado la placa Arduino Mega 2560. Es una de las más robustas, versátiles y extendidas del ecosistema Arduino. Se ha seleccionado porque responde a los criterios técnicos fundamentales que hacen que sea adecuada para el prototipo planteado. Como ya se sabe, debe de gestionar múltiples sensores, protocolos de comunicación y operaciones en tiempo real. Las características que incluye su ficha técnica se encuentran en el ANEXO I: Catálogo Arduino MEGA 2560

Sin embargo, destacaremos algunas de sus características

Incluye suficientes pines analógicos y digitales para llevar a cabo el prototipo, una resolución adecuada, una memoria flash, SRAM y EEPROM suficiente, y buenas interfaces entre ellas: SPI (necesario para la conexión de la sonda lambda) y UART (necesario para varios de los sensores).

Estas especificaciones permiten integrar sensores analógicos como digitales sin riesgo a agotar los recursos del microcontrolador, algo que si pudiese suceder con placas más limitadas como el Arduino Uno. No es la placa más compacta, pero tiene un tamaño adecuado para su futura integración en vehículos de combustión o para servir de base a la realización de un PCB específico para esta aplicación.

6.2 VARIABLES A MEDIR Y SU RELACIÓN CON LAS EMISIONES

La selección de variables es un aspecto crítico en el diseño del sistema, ya que determina tanto la utilidad de los datos recogidos como la complejidad del hardware y software necesario para su adquisición y tratamiento. Por lo que en este prototipo se ha apostado por dos tipos de variables. En primer lugar, las variables contaminantes directas (gases y partículas emitidas), y en segundo lugar, variables de contexto características (estado del motor, condiciones ambientales, comportamiento dinámico del vehículo, características técnicas). La combinación de ambas permite interpretar adecuadamente las emisiones registradas.

6.2.1 CONTAMINANTES GASEOSOS Y PARTÍCULAS

- Monóxido de carbono (CO): Gas altamente tóxico producto de la combustión incompleta del combustible. En condiciones de mezcla rica (exceso de gasolina), las emisiones de CO se disparan, por lo que es un buen indicador de un motor mal ajustado o en mal estado.
- Óxidos de Nitrógeno (NOx): Incluyen principalmente NO y NO₂, y son generados a temperaturas altas en la cámara de combustión. Su emisión está directamente relacionada con la temperatura de combustión, carga del motor y presencia de catalizador. Provocan elevados valores de ozono altamente perjudiciales.
- Hidrocarburos no quemados (HC): Se originan por una combustión incompleta o pérdidas durante la inyección de combustible. Son compuestos orgánicos volátiles y muchos de ellos tienen efectos cancerígenos
- Dióxido de carbono (CO₂): Su emisión está relacionada directamente con la cantidad de combustible quemado, por lo que sirve de indicador de eficiencia energética.
- Partículas (PM₁₀, PM_{2.5}): Las partículas finas provienen de la combustión diésel, el desgaste de frenos y neumáticos, y otros procesos. Las PM_{2.5} son altamente peligrosas como ya se comentó al inicio del trabajo.

6.2.2 VARIABLES DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO

- Aceleración y frenado: Gracias a un acelerómetro se puede medir la agresividad de la conducción, uno de los factores más determinantes en la variabilidad de las emisiones reales frente a las homologadas en las pruebas de los vehículos.
- Peso del vehículo: Un mayor peso, como es de esperar, implica una mayor demanda energética para mantener la velocidad. Esto se traduce en un aumento proporcional a las emisiones. La carga del vehículo es especialmente relevante en zonas urbanas.
- Presión de neumáticos: Aunque es una variable indirecta, afecta a la eficiencia de la rodadura. Los neumáticos desinflados aumentan el consumo y con tanto las emisiones.

6.2.3 VARIABLES CONTEXTUALES Y AMBIENTALES

- Temperatura y humedad ambiental: Estas variables influyen en la densidad del aire, la mezcla de aire-combustible y la eficiencia del catalizador. Además, afectan a la dispersión de los contaminantes una vez emitidos.
- Ubicación geográfica (GPS): Permite contextualizar los datos en el espacio, trazando rutas, detectando zonas más contaminantes o asociando emisiones con entornos urbanos específicos. También, sirve de ayuda para detectar movimiento del vehículo y que pueda iniciar el registro de datos del prototipo una vez arrancado el vehículo.
- Relación aire-combustible (medida con la sonda lambda): Esta es clave para determinar la eficiencia y limpieza de la combustión. Si se conoce el valor lambda en tiempo real, se puede saber si el motor trabaja en modos: estequiométrico, rico o pobre.

6.3 ELECCIÓN DE SENSORES Y CRITERIO DE SELECCIÓN

Una vez estudiadas las variables que están involucradas en este prototipo, se hace una búsqueda y análisis de distintos sensores que se ajusten al prototipo. El criterio seguido es principalmente viabilidad económica, compatibilidad electrónica, precisión aceptable para

un prototipo y facilidad de integración y compatibilidad con Arduino. Aunque algunos de los sensores empleados no alcanzan la precisión de un laboratorio, ofrecen resultados suficientemente representativos para el uso en un prototipo.

6.3.1 SENSORES DE GASES Y PARTÍCULAS

Tabla 6: Recopilación de sensores de gases y partículas

Contaminante	Sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Limitaciones
CO	MQ-7	Semiconductor SnO ₂	Bajo coste, fácil integración	Sensible a temperatura, requiere precalentamiento y calibración
NO_x	MQ-137	Semiconductor	Detecta amoníaco y óxidos nitrogenados	Sensible a otros compuestos, no distingue entre NO y NO ₂
HC	MQ-2	Semiconductor	Detecta gases inflamables como metano, propano, butano	No distingue entre hidrocarburos específicos, sensible a temperatura
CO₂	MH-Z19B	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)	Alta precisión, salida digital UART, bajo consumo	Coste medio-alto, algo lento en respuesta
PM2.5 / PM10	PMS5003	Dispersión láser	Alta sensibilidad para partículas finas, salidas digitales y analógicas	Requiere buena ventilación y protección frente a humedad

6.3.2 SENSORES CARACTERÍSTICOS, DE CONTEXTO Y POSICIÓN

Tabla 7: Recopilación de sensores característicos, de contexto y posición

Variable	Sensor	Características	Justificación
GPS	NEO-6M	Precisión métrica, salida serial NMEA	Geolocalización precisa, ampliamente documentado
Temperatura y humedad	DHT22	Precisión $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2\%$ RH, digital	Fácil de integrar, suficiente para calibraciones ambientales
Aceleración	ADXL335	Salidas analógicas en X, Y, Z	Permite detectar aceleraciones bruscas y hábitos de conducción
Peso	Celda de carga + HX711	Alta sensibilidad, salida digital amplificada	Permite estimar carga del vehículo, integración sencilla
Presión en los neumáticos	HK1100C	Alta precisión y respuesta rápida (≤ 2 ms)	Señal analógica compatible con Arduino

6.3.3 SENSORES EMBARCADOS DEL VEHÍCULO

Sonda Lambda Bosch LSU 4.9:

Sensor de banda ancha utilizado en automoción profesional. Se conecta a través de un cableado específico para regular el voltaje, controlar el calentador interno y enviar los datos al Arduino por protocolo SPI. Permite conocer la proporción real aire-combustible, lo cual es esencial para determinar si la combustión está siendo eficiente o contaminante.

Módulo OBD-II:

Se conecta al puerto estándar del vehículo mediante UART y permite obtener parámetros en tiempo real como régimen del motor (RPM), temperatura del refrigerante, carga del motor o consumo instantáneo. Estos datos complementan los sensores externos y permiten detectar errores del sistema a través de códigos DTC.

6.4 ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO DE DATOS

Como ya se ha mencionado previamente, el sistema desarrollado se basa en la placa arduino mega 2560. Es una plataforma robusta y versátil que permite gestionar múltiples sensores

simultáneamente gracias a sus 54 pines digitales (14 PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertos UART y una memoria flash de 256 KB, SRAM de 8 KB y EEPROM de 4 KB.

La capacidad que tiene de procesamiento, la convierte en una opción ideal para este proyecto dónde se necesita la lectura y almacenamiento de datos de diversas fuentes.

6.4.1 FLUJO DE DATOS

Para entender cómo funciona el flujo de datos, a continuación, veremos cómo el tratamiento de datos se realiza mediante las siguientes fases.

- Captura embarcada: Los sensores conectados al Arduino MEGA (GPS, acelerómetro, sensor de carga, etc), envían datos en tiempo real. El microcontrolador los procesa filtra y los almacena temporalmente.
- Almacenamiento persistente: Para conservar los datos incluso tras apagados o reinicios del prototipo, se utiliza una memoria no volátil. La opción elegida ha sido una tarjeta microSD conectada mediante un módulo lector SPI, que permite guardar los datos en formato CSV. Este formato es ampliamente compatible con herramientas de análisis como Excel Python o Matlab. Esto permite concienciar a todo tipo de conductores, ya que los datos tienen que ser de fácil interpretación y manipulación, para lograr que alcance el máximo número de personas.
- Análisis externo: Los datos se extraen del sistema y se analizan en un PC mediante scripts (por ejemplo, en Python) que permiten visualizar patrones de conducción, estimar emisiones y generar informes comprensibles para el usuario. Puede usarse a posteriori, la inteligencia artificial para buscar patrones de contaminación en función de las distintas variables que intervienen en el proceso.

6.4.2 ALTERNATIVAS DE ALMACENAMIENTO EVALUADAS

Para ello, se estudian las distintas alternativas disponibles con sus ventajas y desventajas y se optara por la que más se ajuste a los criterios demandados por este prototipo:

Tabla 8: Alternativas y comparativas de almacenamiento evaluadas

Opción	Tipo	Capacidad	Ventajas principales	Desventajas principales
Tarjeta microSD	No volátil	Hasta 32GB	Gran capacidad, formato estándar, fácil acceso	Requiere módulo lector externo
EEPROM interna	No volátil	4 KB	Integrada en la placa, no requiere hardware	Muy limitada en capacidad
Memoria Flash externa	No volátil	Variable	Alta velocidad, buena durabilidad	Requiere programación más compleja
Comunicación serial a PC	Volátil	Depende del PC	No requiere almacenamiento físico en el sistema	Depende de conexión constante, no autónomo

Con esto, la elección finalmente es la Tarjeta microSD por las siguientes razones. Tiene alta capacidad, su capacidad de integración no es compleja, la compatibilidad con Arduino es alta y el análisis es sencillo. Además, tiene bajo coste y una autonomía del sistema alta. Por lo que se puede afirmar que es la opción más equilibrada y sobre todo cumple con los requisitos del prototipo y que sea accesible para todos.

6.5 DISEÑO DEL PROTOTIPO FÍSICO

Cuanto en cuanto al diseño del prototipo físico este se ha diseñado con criterios de simplicidad, utilidad y accesibilidad teniendo en cuenta su instalación en un vehículo de combustión, preferentemente una motocicleta o vehículo. La elección de este tipo de vehículo responde a su facilidad de manipulación, menor espacio requerido y simplicidad mecánica.

- El montaje se ha estructurado en 4 bloques principales:
 - **Bloque de sensores:** Incluye todos los sensores mencionados en el punto anterior que responden a variables necesarias para el funcionamiento de nuestro prototipo. Estos sensores se distribuyen estratégicamente para minimizar interferencias y maximizar la precisión de las mediciones.
 - **Bloque de control:** Consiste en la placa Arduino MEGA 2560. Esta centraliza la lectura de sensores, almacena los datos y gestiona la lógica del funcionamiento. Se ha optado por esta placa debido a las razones expuestas en el apartado anterior.
 - **Bloque de visualización de datos:** Se trata de la pantalla conectada al bloque Arduino, para que el usuario pueda ver en tiempo real en el vehículo, las variables medidas.
 - **Bloque de alimentación y almacenamiento:** Usa la batería de 12V del vehículo donde se monta el prototipo junto con regulador de voltaje y un módulo lector de tarjetas SD. Todo el sistema está protegido en una carcasa impresa en 3D, diseñada para resistir vibraciones y condiciones ambientales moderadas.

Por supuesto, el diseño contempla también la posibilidad de un desmontaje rápido para facilitar la extracción de la tarjeta de memoria. Además, se tendrá en cuenta un espacio para futuras ampliaciones.

6.6 ESQUEMA DEL PROTOTIPO FÍSICO

Tras el estudio exhaustivo de todas las variables y sus respectivos sensores a utilizar en el microprocesador Arduino mega 2560, se ha planteado cómo sería el conexionado del prototipo físico. Este conexionado es el adecuado, para que se puedan leer y almacenar todas las variables captadas por los sensores. Para ello se han utilizado correctamente los pines del microcontrolador. Se adjunta a continuación, una muestra de lo que es el plano unifilar del conexionado, que se incluye en detalle en el ANEXO II: Esquema y conexionado del prototipo físico al final del documento. También se especifica en el ANEXO IV: Datasheet y catálogos de los sensores propuestos, una tabla que recoge todos los catálogos de ellos elementos empleado. Todos estos sensores seleccionados están ya preparados con el módulo Arduino para poder conectarlo directamente a Arduino.

En cuanto a la alimentación del micro, se ha tenido que barajar la idea de introducir un convertidor CC-CC. Y finalmente, es necesario porque la tensión máxima que admite el Arduino es 12 V y la batería del vehículo tendrá una tensión que variará entre 14,5 Vdc y 10 Vdc. Según la característica de la tarjeta utilizada, tiene de máxima 12Vdc, por lo que se asegura el sistema para que con un convertidor continua-continua, no se dañe el micro y se aseguren 12Vdc a la salida.

A la vista de la información relativa a intensidades, la máxima intensidad que puede demandar el Arduino es de 750 mA a 12 Vdc. Para que no sea este el factor limitante, se elegirá un convertidor Continua/ continua de salida 12 Vdc/1 A, cuya finalidad principal es proporcionar una tensión de salida para alimentar al Arduino limitada y estabilizada a 12 Voltios, a pesar de que la tensión de la batería fluctúe entre 10 Vdc y 14.5 VDC. Por lo que se propone el siguiente:

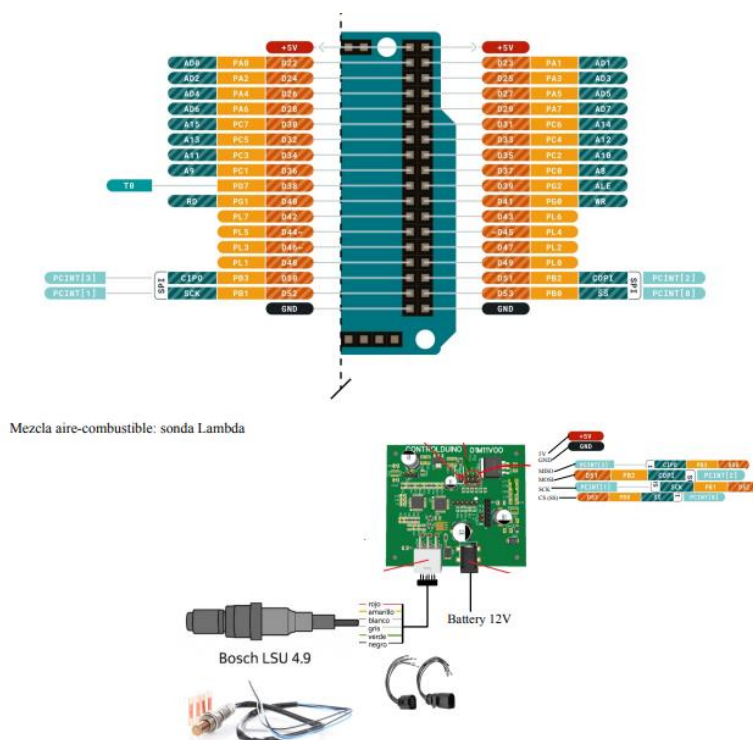
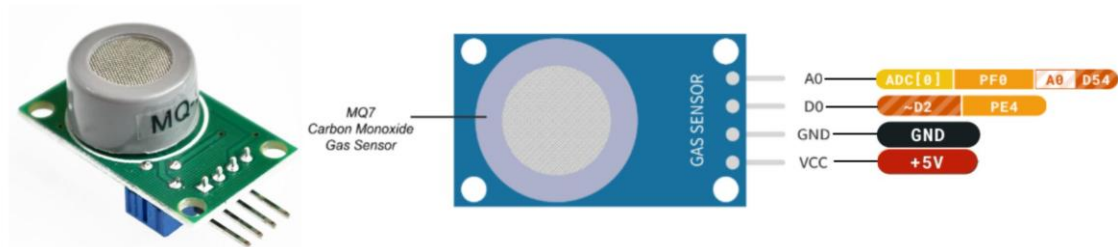


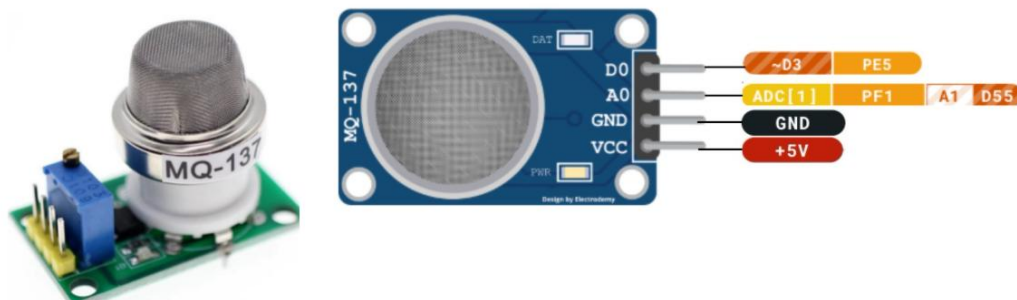
Ilustración 24: Diseño de conexionado del prototipo físico parte trasera

Como ya se ha mencionado previamente, estos sensores ya vienen preparados con el módulo Arduino, ya que estos sensores ya acondicionados para Arduino facilitan la fiabilidad y claridad del conexionado. A continuación, se detalla uno a uno los sensores utilizados y su conexionado con Arduino MEGA 2560. Por lo general, los sensores tienen una conexión analógica y digital a la placa y la conexión a la alimentación 5V y a GND. Y también alguno de ellos necesitan estar conectados a los pines Rx Y Tx. Tx (transmit), desde el Arduino y Rx (Receive) es el pin que recibe datos hacia el Arduino. Estos permiten que el Arduino se comunique con otros dispositivos, y son clave para cargar programas y enviar/recibir datos.

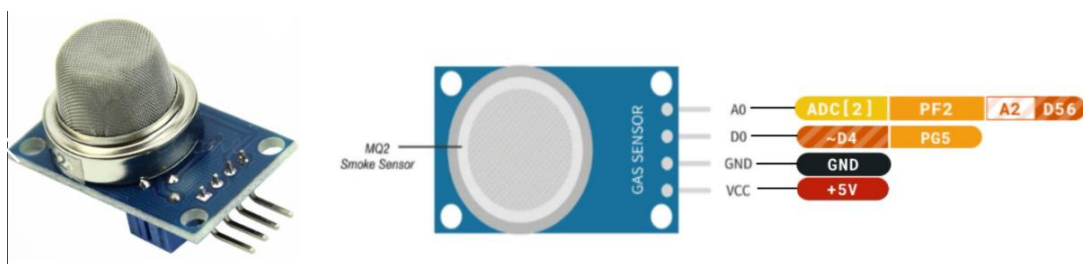
Monóxido de carbono: MQ-7



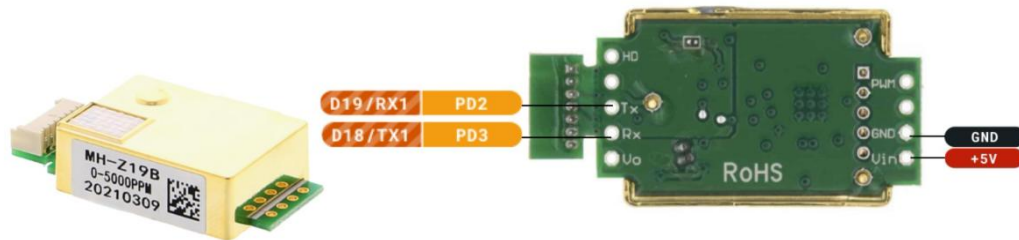
Óxido de nitrógeno: MQ-137



Hidrocarburos no quemados: MQ-2



Dióxido de carbono: MH-Z19B



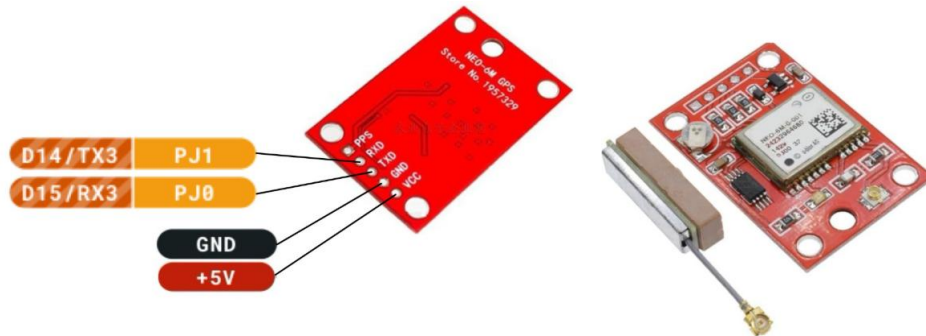
Partículas PM2.5, PM10: PMS5003



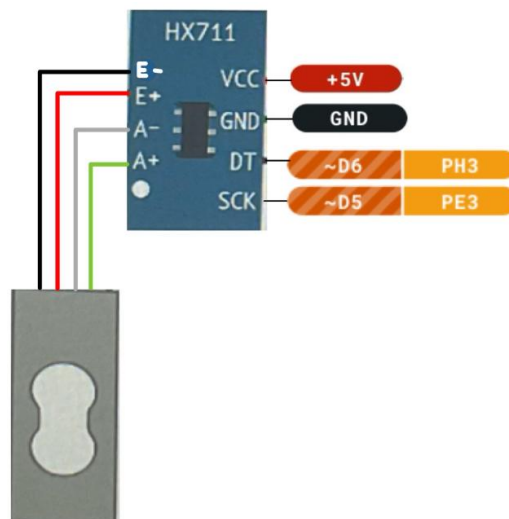
Humedad y temperatura: DHT22



GPS: NEO-6M GPS Module



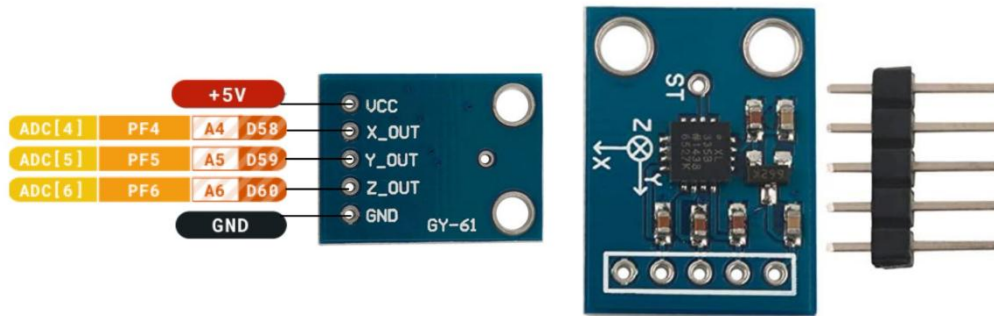
Sensor de peso: celda de carga de tipo S + módulo HX711



Presión de los neumáticos: HK11100C



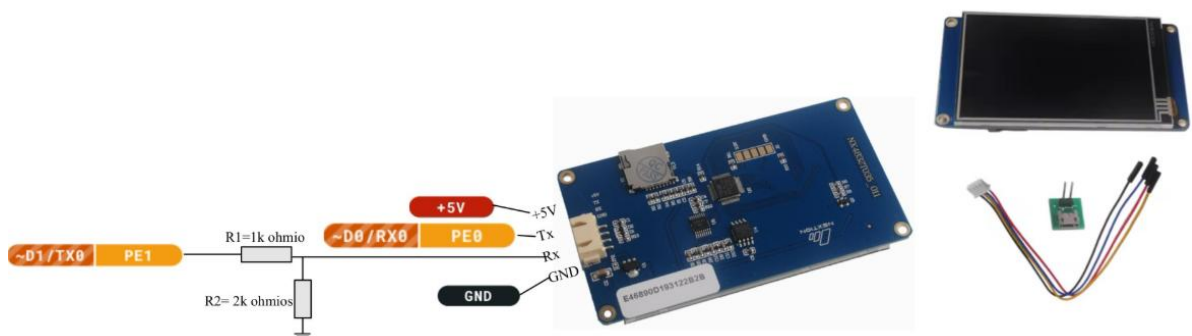
Acelerómetro: ADXL335



Pantalla HMI: Nexion NX4832T035

La conexión de la pantalla Nexion tiene una particularidad, es que el pin Rx de la pantalla soporta 3.3V, por lo que, para bajarlo, se ponen dos resistencias en paralelo de modo que desde GND de Arduino a la Rx Nexion caigan 3.3V.

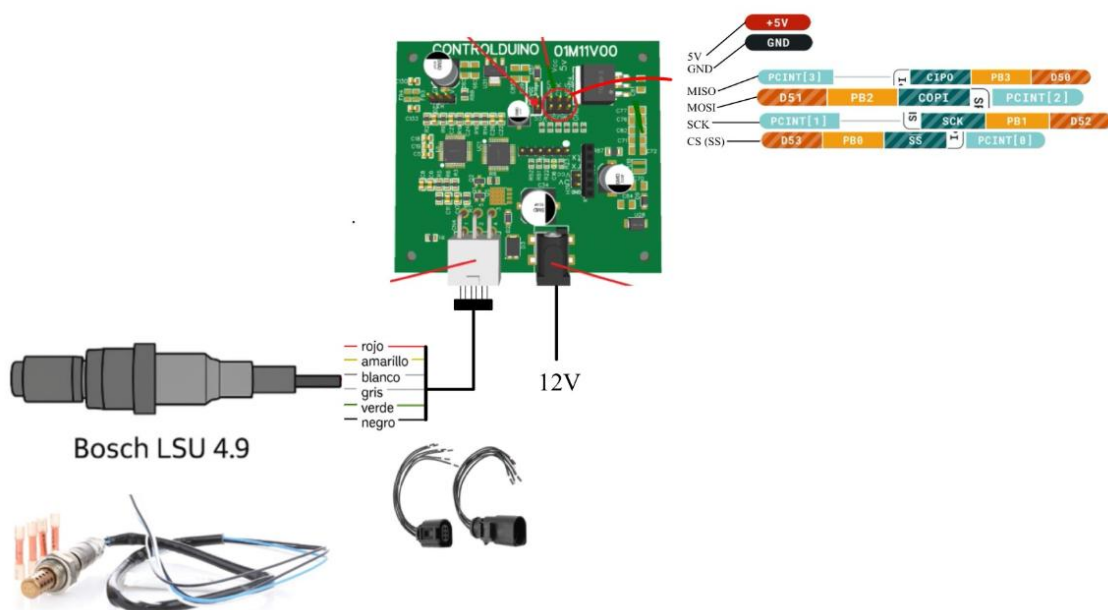
$$V2 \text{ (caída de tensión en Rx de la Nexion)} = \frac{2k}{2k + 1k} = 3.3V$$



Mezcla aire-combustible: Sonda lambda

La sonda Lambda, necesita alimentación de 12 V y un módulo controlador que interprete sus señales. Este módulo se comunica con el Arduino mediante SPI para enviar los datos de la mezcla aire-combustible.

No es necesario introducir un convertidor continua-continua. Las baterías de los vehículos oscilan en los 12V, por lo que se debe comprobar si el límite mínimo y máximo que suele tener la batería perjudicaría a el sistema. En ese caso, se introduciría un convertidor para establecer que, a la salida, siempre será 12V la señal. Sin embargo, no es necesario, se alimenta del módulo 01M11V00. Éste permite su alimentación con la batería de la moto o coche. Esta especificación viene dada en el datasheet sobre la conexión de la sonda lambda, y este datasheet/catálogo se encuentra en el ANEXO III: Proveedores y compras de los distintos elementos para el montaje del prototipo



6.7 DISEÑO DE LOS SINÓPTICOS DEL HMI

Para completar el diseño del prototipo, se ha realizado también el diseño de los sinópticos de la pantalla HMI, por la que el usuario visualizará las distintas variables. Como se ha mencionado previamente, estos sinópticos deben de ser claros, no muy recargados y sencillos de visualizar y analizar. Por lo que para el diseño del sinóptico nos basaremos en la premisa de sencillez. No se harán distintas pestañas, simplemente una única pantalla que sea visible y se situara en la parte delantera del vehículo o motocicleta.



Ilustración 25: Diseño del sinóptico de la pantalla HMI. Elaboración propia

Como se puede ver en la Ilustración 25: Diseño del sinóptico de la pantalla HMI. Elaboración propia; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, aparecen en la pantalla todas las variables medidas con un esquema bastante simple y dinámico. No causa fatiga a la vista por lo que se ha seleccionado el fondo de color negro. En el lado izquierdo se encuentran los valores de contaminación captados, y en el lado derecho las variables medidas. Un matiz respecto a la presión de los neumáticos habrá dos lecturas diferentes de los neumáticos delanteros y de los traseros.

Capítulo 7. PROGRAMACIÓN Y GESTIÓN DE DATOS

Este programa se ha diseñado para ofrecer una monitorización en tiempo real de los parámetros ambientales mencionados y de distintas variables del vehículo ya estudiadas. El sistema se inicia, al detectar el arranque y el movimiento del vehículo mediante el GPS, por lo que en ese momento se activa automáticamente la captura de datos de todos los sensores. Sin embargo, antes de comenzar realiza una calibración para asegurar lecturas estables.

Los valores medidos se muestran de forma continua en la pantalla HMI que estará al alcance del usuario para que pueda interpretar y visualizar en tiempo real los datos. Simultáneamente se almacenan en formato CSV en una tarjeta microSD para su análisis posterior. El sistema se pone en marcha solo cuando realmente es necesario. Tiene la ventaja de que pueda recuperarse automáticamente de posibles fallos reiniciándose.

Por lo que este código proporciona el proceso completo: comenzando con la inicialización de los periféricos y el calentamiento de los sensores, su posterior adquisición periódica y filtrado de datos. También la representación interactiva en la pantalla HMI y el registro fiable de toda la información en la tarjeta microSD para su posterior análisis.

7.1 ANÁLISIS E INTRODUCCIÓN AL CÓDIGO

El código se ha dividido en distintas partes para que el desglose de estas partes permita comprender cual es la función de cada una de ellas. Se trata de un código muy claro, simple, fiable y muy completo.

Parte 1: Preparación de recursos y pines

- Se cargan las librerías necesarias para manejar cada sensor y módulo. Estas librerías son necesarias para la correcta depuración del código.
- Se definen todos los pines de Arduino que conectan con cada dispositivo. Los pines analógicos son para: MQ, acelerómetro y presión. Y los pines digitales son para: SPI

(sonda Lambda), tarjeta microSD, además de los físicos que son los restantes sensores.

Parte 2: Rutinas de utilidad

- Se configura lo necesario para el envío de información al HMI. Hay una función que envía el texto a la pantalla Nexion y que añade los bytes finales que exige el protocolo.
- Se filtran las señales analógicas. Esto es necesario para reducir el ruido que dan los sensores. Por ello es por lo que se toman varias muestras y se hace el promedio.
- Se calibran los sensores MQ. Estos sensores necesitan un calentamiento inicial por lo que, tras él, se toman las medidas de resistencias de referencia de aire limpio de cada sensor MQ.
- Se realiza una comunicación SPI con la sonda lambda.

Parte 3: Arranque y puesta a punto

- Se inicia el monitor serie y cada canal de comunicación (todos los sensores).
- Se activa el Watchdog, que garantiza que, si en algún momento el programa se bloquea o queda colgado, la placa se reinicie automáticamente tras 8 segundos.
- Se espera un breve tiempo para que los sensores MQ alcancen su temperatura de trabajo (warm-up)
- Se lleva a cabo la calibración de los sensores MQ del aire limpio, guardando internamente los valores de R0 (Valores de referencia de aire limpio, necesario para poder interpretar correctamente las lecturas del sensor ya que este no da ppm directamente, sino una resistencia interna variable llamada Rs)
- Finalmente se informa a la pantalla Nexion con el mensaje “Sistema Listo”

Parte 4: Bucle principal de control

- Se lee continuamente el GPS.

- Una vez que el GPS detecta que el vehículo se mueve superando 1 km/h, se considera que hay movimiento y se activa la toma de datos (se cambia a “sistema ACTIVADO”)
- Una vez activo el sistema, cada dos segundos (sin bloquear con retardos largos), se lanza la rutina de medición y registro.

Parte 5: Lectura real, visualización y almacenamiento

- Se realiza la medición de los contaminantes
 - MQ-7 (CO), MQ-137 (NOx) y MQ-2 (HC): Se hacen lecturas promediadas para obtener valores estables
 - MH-Z19B (CO2): A través de la UART se leen y se almacenan los ppm correctos.
 - PMS5003 (PM2.5/PM10): Se extraen los datos del sensor de partículas.
- Se realiza la medición de las variables físicas
 - DHT22: Humedad (%) y temperatura (°C)
 - ADXL335: Acelerómetro, donde se calcula la magnitud total del vector aceleración, convertido a “g”.
 - Presión de los neumáticos: Lectura analógica convertida a voltios.
 - Célula de carga: Peso en Kg promediando varias lecturas
 - GPS: Se forma un texto con la latitud y longitud con 6 decimales.
 - Sonda lambda: Se obtiene un voltaje de la mezcla aire combustible.
- Dan lugar las salidas en pantalla HMI: Cada valor se envía a un campo de texto específico en la Nexion, junto con las unidades, para que se puedan ver en tiempo real.
- Registro en la tarjeta microSD: Se abre (o crea) un archivo CSV, se escribe una línea con la marca de tiempo millis() y todos los valores medidos en orden, y se cierra el archivo para asegurar la integridad.

7.2 *CÓDIGO*

```
// SISTEMA DE MEDICIÓN - ARDUINO MEGA 2560

// Incluye calentamiento MQ, filtrado y watchdog

// PARTE 1: LIBRERÍAS Y DEFINICIONES DE PINES

#include <DHT.h>                // Incluye librería para sensor DHT22 de humedad y
                                temperatura

#include <SoftwareSerial.h>      // Permite crear puerto serie por software para la
                                HMI Nextion

#include <HX711.h>               // Librería para módulo HX711 y célula de carga

#include <SPI.h>                 // Librería para comunicación SPI (utilizada por la
                                sonda Lambda)

#include <SD.h>                  // Librería para manejar tarjeta SD

#include <TinyGPS++.h>           // Librería para GPS NEO-6M

#include <PMS.h>                 // Librería para sensor PMS5003 (PM2.5/PM10)

#include <avr/wdt.h>             // Librería para usar Watchdog Timer en AVR

SoftwareSerial hmi(10, 11);      // Crea objeto 'hmi' en pins 10=RX, 11=TX para
                                Nextion

#define DHTPIN 2                // Define pin 2 como entrada para el DHT22

DHT dht(DHTPIN, DHT22);         // Crea objeto 'dht' con pin 2 y tipo DHT22

#define HX711_DT 3              // Pin DT (data) para HX711

#define HX711_SCK 4             // Pin SCK (clock) para HX711
```

```
HX711 scale; // Crea objeto 'scale' para la célula de carga

#define ACC_X A3 // A3 sensor acelerómetro X

#define ACC_Y A4 // A4 sensor acelerómetro Y

#define ACC_Z A5 // A5 sensor acelerómetro Z (ADXL335)

#define MQ7_PIN A0 // Pin analógico A0 para sensor MQ-7 (CO)

#define MQ137_PIN A1 // Pin A1 para sensor MQ-137 (NOx)

#define MQ2_PIN A2 // Pin A2 para sensor MQ-2 (HC)

float mq7_R0, mq137_R0, mq2_R0; // Variables para almacenar R0 de cada MQ tras
calibrado

HardwareSerial &co2Ser = Serial1; // Usa puerto Serial1 para MH-Z19B CO2 (RX1=19,
TX1=18)

HardwareSerial &pmsSer = Serial2; // Usa Serial2 para PMS5003 (RX2=17, TX2=16)

PMS pms(pmsSer); // Crea objeto 'pms' para leer datos PM

PMS::DATA pmsData; // Estructura para almacenar datos de PM

HardwareSerial &gpsSer = Serial3; // Usa Serial3 para GPS NEO-6M (RX3=15, TX3=14)

TinyGPSPlus gps; // Crea objeto 'gps' para procesar datos NMEA

#define PRESSURE_PIN A6 // Pin A6 para sensor de presión de neumáticos

#define LAMBDA_CS 53 // Pin digital 53 como chip select de SPI para
Lambda
```

```
#define SD_CS 8 // Pin digital 8 como chip select de la SD

bool systemActive = false; // Controla si el sistema está midiendo o no

unsigned long lastTime = 0; // Almacena tiempo de última lectura (millis)

// PARTE 2: FUNCIONES AUXILIARES

// Envía un comando de texto a la HMI Nextion y añade los bytes finales 0xFF

void sendToHMI(const String &cmd) {

    hmi.print(cmd); // Envía la cadena de texto

    hmi.write(0xFF); // Byte final exigido por Nextion

    hmi.write(0xFF); // Repetición

    hmi.write(0xFF); // Repetición

}

// Promedia 'samples' lecturas de un pin analógico para reducir variaciones

float analogAverage(uint8_t pin, uint8_t samples = 10) {

    long sum = 0; // Acumula muestras

    for (uint8_t i = 0; i < samples; ++i) {

        sum += analogRead(pin); // Lee valor analógico y suma

        delay(5); // Pequeña pausa para estabilidad

    }

    return sum / float(samples); // Devuelve media
```

```
}

// Calibra sensor MQ calculando valor R0 en aire limpio

float calibrateMQ(uint8_t pin) {

    return analogAverage(pin, 50); // Promedia 50 lecturas

}

// Lee valor bruto de sonda Lambda vía SPI y lo convierte a voltios

float readLambda() {

    digitalWrite(LAMBDA_CS, LOW);           // Selecciona dispositivo SPI

    byte hi = SPI.transfer(0x00);           // Lectura byte alto

    byte lo = SPI.transfer(0x00);           // Lectura byte bajo

    digitalWrite(LAMBDA_CS, HIGH);          // Deselecciona dispositivo

    int raw = (hi << 8) | lo;               // Combina bytes

    return raw * (5.0 / 1023.0);            // Convierte a voltios

}

// PARTE 3: SETUP - configuración inicial del sistema

void setup() {

    Serial.begin(115200);                   // Abre monitor serie a 115200 baudios

    hmi.begin(9600);                        // Inicializa HMI Nextion a 9600 baudios

    gpsSer.begin(9600);                    // Inicializa GPS
```

```
co2Ser.begin(9600);          // Inicializa MH-Z19B

pmsSer.begin(9600);          // Inicializa PMS5003

dht.begin();                 // Inicializa DHT22

scale.begin(HX711_DT, HX711_SCK); // Inicializa HX711

pinMode(LAMBDA_CS, OUTPUT);   // Configura pin CS de Lambda como salida

SPI.begin();                 // Arranca bus SPI

if (!SD.begin(SD_CS))        // Intenta iniciar SD

    Serial.println("Error inicializando SD");

wdt_enable(WDTO_8S);          // Activa watchdog con reinicio en 8 s

Serial.println("Calentando sensores MQ...");

delay(300000);                // Espera 5 min para calentamiento MQ

mq7_R0    = calibrateMQ(MQ7_PIN);    // Calibra MQ-7

mq137_R0  = calibrateMQ(MQ137_PIN);   // Calibra MQ-137

mq2_R0    = calibrateMQ(MQ2_PIN);     // Calibra MQ-2

Serial.println("Calibración MQ completa");

sendToHMI("t0.txt=\"Sistema listo\""); // Muestra mensaje inicial

}

// PARTE 4: LOOP - ciclo principal de ejecución
```

```
void loop() {

    wdt_reset();                // Resetea watchdog para evitar reinicio

    // Procesa datos entrantes del GPS

    while (gpsSer.available()) {

        gps.encode(gpsSer.read());    // Codifica cada byte recibido

    }

    // Activa sistema si velocidad > 1 km/h

    if (!systemActive && gps.speed.kmph() > 1.0) {

        systemActive = true;        // Cambia estado

        sendToHMI("t0.txt=\"Sistema ACTIVADO\"");

    }

    // Si está activo y han pasado >2 s, mide y actualiza

    if (systemActive && millis() - lastTime > 2000) {

        lastTime = millis();        // Guarda tiempo actual

        measureAndDisplay();        // Llama a función principal

    }

}

// PARTE 5: measureAndDisplay - lee sensores, envía a HMI y guarda en SD
```

```
void measureAndDisplay() {

    // 5.1 Mediciones de sensores MQ con promedio

    float coRaw  = analogAverage(MQ7_PIN);

    float noxRaw = analogAverage(MQ137_PIN);

    float hcRaw  = analogAverage(MQ2_PIN);


    // 5.2 Lectura de CO2 MH-Z19B via trama UART

    int co2ppm = 0;

    if (co2Ser.available() >= 9) {

        byte buf[9]; co2Ser.readBytes(buf, 9);           // Captura trama completa

        if (buf[0]==0xFF && buf[1]==0x86)                // Verifica encabezado

            co2ppm = buf[2]*256 + buf[3];                // Calcula ppm

    }


    // 5.3 Lectura de PM2.5 y PM10

    int pm25=0, pm10=0;

    if (pms.read(pmsData)) {                            // Si hay dato válido

        pm25 = pmsData.PM_AE_UG_2_5;                   // Extrae PM2.5

        pm10 = pmsData.PM_AE_UG_10_0;                  // Extrae PM10

    }


    // 5.4 DHT22: humedad y temperatura
```

```
float hum = dht.readHumidity();

float tmp = dht.readTemperature();


// 5.5 Acelerómetro: calcula magnitud en "g"

float ax=analogRead(ACC_X), ay=analogRead(ACC_Y), az=analogRead(ACC_Z);

float accel = sqrt(ax*ax + ay*ay + az*az) * (5.0/1023.0);


// 5.6 Presión neumáticos: lectura analógica convertida a V

float presV = analogRead(PRESSURE_PIN) * (5.0/1023.0);


// 5.7 Peso: lectura en kilogramos

float wt = scale.get_units(5);


// 5.8 GPS: construye string "lat,lon"

String gpsStr = String(gps.location.lat(), 6) + "," + String(gps.location.lng(),
6);


// 5.9 Sonda Lambda: lectura en voltios

float lam = readLambda();


// Envío de cada medida a la HMI (campos tCO, tNOx, etc.)

sendToHMI("tCO.txt=\\"" + String(coRaw, 0) + " u\\");

sendToHMI("tNOx.txt=\\"" + String(noxRaw, 0) + " u\\");
```

```
sendToHMI("tHC.txt=\"\" + String(hcRaw, 0) + " u\"");

sendToHMI("tCO2.txt=\"\" + String(co2ppm) + " ppm\"");

sendToHMI("tPM25.txt=\"\"+ String(pm25) + " ug/m3\"");

sendToHMI("tPM10.txt=\"\"+ String(pm10) + " ug/m3\"");

sendToHMI("tGPS.txt=\"\"+ gpsStr + "\"");

sendToHMI("tPeso.txt=\"\"+ String(wt, 2) + " kg\"");

sendToHMI("tHum.txt=\"\" + String(hum, 1) + " %\"");

sendToHMI("tTemp.txt=\"\"+ String(tmp, 1) + " C\"");

sendToHMI("tAccel.txt=\"\"+ String(accel, 2) + " g\"");

sendToHMI("tPres.txt=\"\" + String(presV, 2) + " V\"");

sendToHMI("tLambda.txt=\"\"+ String(lam, 2) + " V\"");


// Guardado en SD en formato CSV: timestamp + todas las medidas

File f = SD.open("log.csv", FILE_WRITE);

if (f) {

    f.print(millis()); f.print(',');

    f.print(coRaw, 0);      f.print(',');

    f.print(noxRaw, 0);    f.print(',');

    f.print(hcRaw, 0);     f.print(',');

    f.print(co2ppm);       f.print(',');

    f.print(pm25);         f.print(',');

    f.print(pm10);         f.print(',');

    f.print(hum, 1);       f.print(',');
```

```
f.print(tmp, 1);      f.print(',');  
  
f.print(accel, 2);    f.print(',');  
  
f.print(presV, 2);    f.print(',');  
  
f.print(wt, 2);       f.print(',');  
  
f.println(lam, 2);  
  
f.close();  
  
}  
  
}
```


Capítulo 8. EVALUACIÓN DEL IMPACTO Y UTILIDAD DEL SISTEMA

8.1 POTENCIAL DE CONCIENCIACIÓN Y CAMBIO DE HÁBITOS

El prototipo de este sistema puede tener un gran impacto si se utiliza debidamente por los usuarios. Cuando el conductor aprecia en tiempo real como cambian los valores de contaminantes justo al pisar a fondo o al levantar el pie, experimenta cierta conexión directa entre su forma de conducir y la calidad del aire.

Este feedback instantáneo funciona como concienciación para los usuarios. Si al acelerar bruscamente alguno de los indicadores se dispara, el usuario puede reflexionar y moderar la manera de arrancar y acelerar. Sería posible incluso colocar una alarma acústica para avisar cuando se superan ciertos umbrales de contaminación. Con el paso de las semanas, se podrían llegar a instaurar hábitos más suaves, ritmo de revoluciones más bajo, frenadas progresivas, mantenimiento preventivo del motor... Todos estos hábitos prolongan la vida del vehículo y reducen el consumo de combustible y las emisiones nocivas. Además, al comparar trayectos similares (ciudad, autovía, carretera secundaria), el propio usuario puede llegar a analizarlos y buscar la ruta menos contaminante de tal modo que optimizaría el estilo de conducción.

8.2 POSIBLE USO EN CAMPAÑAS PÚBLICAS O EDUCATIVAS

Llevar este prototipo a aulas de colegios e institutos, fundaciones o campañas públicas, podría ser muy útil. Los estudiantes y participantes de estas campañas, aparte de absorber teoría, se les podría dar la oportunidad de manipular el sistema, diseñar pequeños experimentos, proponer mejoras a través de competiciones... Por ejemplo, en una feria de medio ambiente, se podría poner un stand equipado con el dispositivo y que las personas

pudiesen verlo e interesarse por él, se podrían hacer campañas de retos colectivos y visualizar gráficas comparativas en pantalla gigante. Todo este tipo de actividades lo que pueden es generar motivación colectiva y un aprendizaje activo que va mucho más allá de un folleto informativo qué, en el mayor de los casos, no atrae a la sociedad.

8.3 POSIBLE INTEGRACIÓN EN APPS O PLATAFORMAS

Gracias a su diseño modular, añadir un módulo Bluetooth o wifi de cara al futuro convierte este prototipo en un sistema muy competitivo. Se puede plantear una app móvil donde tras cada viaje el conductor recibe el informe detallado con gráficos de emisiones por tramos, alertas si supera un umbral de dióxido de carbono, recomendaciones personalizadas (hoy, por ejemplo: reduce un 10% tu consumo bajando marchas)

En un nivel municipal, un servidor central podría recoger datos anónimos de cientos de usuarios para mapear zonas de alta contaminación, diseñar políticas de tráfico y planificar con antelación restricciones temporales o carriles preferentes. Por supuesto, también podrían utilizar estos datos para futuras previsiones. En el transporte público, la plataforma podría ofrecer indicadores de eficiencia por vehículo y conductor, fomentando incentivos económicos o formaciones específicas para quienes muestren peores registros de emisiones. De este modo, el sistema pasa de ser una herramienta experimental, a un componente clave en la gestión análisis, y la mejora continua de la movilidad sostenible.

Capítulo 9. ESTUDIO ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD

Aunque se trate de un proyecto técnico, cualquier desarrollo que aspire a convertirse en un producto real debe ir acompañado de un estudio económico que permita valorar si su fabricación, distribución y mantenimiento tienen sentido desde el punto de vista práctico. En otras palabras, no basta con que el sistema funcione: también debe ser asumible económicamente, tanto para quien lo produce como para quien lo utiliza.

Este apartado tiene como objetivo principal analizar los costes aproximados que implicaría fabricar este sistema en pequeñas cantidades y explorar cómo podría ponerse en el mercado de forma sencilla. Dado que se trata de un prototipo, y que su finalidad es sobre todo informativa y social; es decir, concienciar a los conductores sobre sus emisiones contaminantes, no se ha planteado un margen de beneficio alto. Al contrario, la idea es que sea un sistema accesible, que pueda llegar al mayor número posible de personas, especialmente a quienes conducen vehículos antiguos o sin acceso a tecnologías de control ambiental.

Por tanto, más que un plan de negocio detallado, este apartado recoge una estimación realista de los costes, una propuesta básica de comercialización y una reflexión sobre su posible viabilidad económica en un escenario de producción reducida.

9.1 COSTES ESTIMADOS DEL SISTEMA POR UNIDAD

Para poder valorar si el sistema diseñado es viable económicamente, lo primero es conocer cuánto costaría fabricar una unidad completa. En este apartado se ha hecho una estimación de los principales componentes que conforman el dispositivo: desde el microcontrolador (en este caso, un Arduino Mega 2560), hasta los sensores, los elementos de alimentación, la carcasa, cables y conectores, así como los posibles costes de montaje, empaquetado y puesta a punto. Por lo que con esto se obtiene lo que se entiende como coste unitario por unidad de producción.

No se han incluido, por ahora, costes de desarrollo de software, ya que esta parte ha sido asumida dentro del propio proyecto. Tampoco se contempla aún una estructura de márgenes o beneficios, ya que el objetivo principal es la divulgación y el acceso, no la rentabilidad económica. El resultado es una aproximación del coste base por unidad, que servirá como referencia para plantear posibles precios de venta o valorar su uso en campañas piloto.

A continuación, se ha hecho un estudio de los distintos sensores seleccionados en distintas páginas web, proveedores, tiendas online, físicas... Y se ha realizado una propuesta basada en la relación equilibrada del bajo coste y la buena calidad del sensor. Se parte de la base de que se buscaran proveedores de todo tipo, no hace falta que sean únicamente al por mayor por el reducido volumen de prototipos a realizar. También tener en cuenta que venden en España y que los gastos de envío no sean muy elevados. Para ello, la información de la tabla que viene a continuación se ha obtenido de distintos proveedores, cuyo link está especificado según elemento empleado en el ANEXO III: Proveedores y compras de los distintos elementos para el montaje del prototipo

Se muestran a continuación una muestra o primera propuesta para el coste del prototipo:

Tabla 9: Propuesta de los costes de los distintos elementos del prototipo

Sensores	Nombre del Sensor	PVP [euros]
Monóxido de Carbono (CO)	MQ-7	2,95
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	MQ-137	41
Hidrocarburos no quemados (HC)	MQ-2	3,95
Dióxido de Carbono (CO ₂)	MH-Z19B	14,99
Partículas PM2.5 y PM10	PMS5003	22,99
GPS	NEO-6M GPS Module	15
Peso	celda de carga tipo S, módulo HX711	1,75
Humedad y Temperatura	DHT22 (AM2302)	3,95
Acelerómetro	ADXL335	9,99
Sonda Lambda	Bosch LSU 4.9	93,98
Presión de Neumáticos	HK1100C	10,5
Pantalla HMI	Nextion NX4832T035	43,89
Otros elementos	Tipo/Característica	PVP [euros]
Arduino	MEGA 2560	49,65
Resistencias 1kohmio +2kohmio (2 en serie)	1kohmio [1,25 20uds]	0,1875
Hembra 6 pines	Hembra 6 pines (para sonda lambda)	0,72
Convertor CC-CC	CC10-1212SR-E TDK	25,02
Control Arduino para sonda	01M11V00	98,8
Cable Jack	Conector DC Hembra 5.5 X 2.1 Mm	1,45
Cables pequeños (120 uds)	Jumper	6,99
Caja Spelsberg	TK PC 1813-6F-M 12741501	50,69
Total		498,4475

Por lo que una vez seleccionados todos los elementos que intervienen en el prototipo, se hace una suma y se obtienen 498,45 euros. Se puede ver como el sistema es caro de naturaleza, por lo que como se ha mencionado previamente no se puede exigir más en cuanto a precisión, para que haya un equilibrio entre calidad-precio y sea accesible. Aun así, es de esperar, que cuantas más unidades se produzcan más barato sale el coste unitario. Pero se partirá de una base de la composición de un único prototipo para el laboratorio. Se adjuntan en el anexo II los enlaces de compra y los proveedores de estos elementos.

Para valorar la viabilidad del sistema desde el punto de vista económico, se ha realizado una estimación detallada del coste por unidad, incluyendo tanto los sensores como el resto de los componentes necesarios para el funcionamiento del prototipo. El objetivo no es obtener un precio de venta cerrado, sino entender si el sistema, tal y como se ha concebido, es razonablemente asequible y escalable en el futuro.

Los sensores representan el grueso del presupuesto, especialmente aquellos más específicos como la sonda lambda Bosch LSU 4.9 o el sensor de partículas PMS5003. También destacan la pantalla HMI Nextion y el módulo de control Control Aduino 01M11V00, necesarios para el procesamiento y visualización de los datos.

El precio total estimado por unidad es de 498,45 euros, un coste elevado para un sistema comercial, pero asumible dentro del contexto de un prototipo funcional completo, capaz de recopilar, tratar y mostrar múltiples variables ambientales en tiempo real. En caso de escalar la producción, muchos de estos precios podrían reducirse significativamente mediante compras al por mayor, rediseño del hardware o integración de sensores múltiples en un mismo módulo.

Cabe destacar que en esta fase no se ha considerado el margen comercial ni los costes indirectos (desarrollo, soporte, marketing, etc.), ya que el enfoque está en validar el concepto técnico y funcional, no en rentabilizarlo económicamente desde el inicio.

9.2 ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN

Una vez estimado el coste del sistema por unidad en fase de prototipo, resulta relevante analizar su viabilidad en un escenario de producción, comenzando por la fabricación de entre 50 y 200 unidades, hasta miles, para como se ha mencionado previamente, pruebas en colegios, ferias, flotas, laboratorios... Este tipo de análisis permite identificar qué elementos del sistema podrían optimizarse o rediseñarse para reducir el coste sin comprometer la funcionalidad del producto.

En primer lugar, es importante señalar que muchos de los componentes utilizados en el prototipo han sido adquiridos individualmente a través de distribuidores minoristas, lo que implica precios significativamente más altos que los que podrían obtenerse mediante compras al por mayor o acuerdos con fabricantes. En un escenario de producción en lotes pequeños, podrían aplicarse descuentos de entre un 10 % y un 30 % en la mayoría de los sensores y módulos electrónicos, especialmente los genéricos como el MQ-7, DHT22, MQ-2, ADXL335 o los cables jumper.

Además, algunos elementos podrían integrarse o sustituirse para abaratar costes. Por ejemplo:

- La electrónica del sistema podría rediseñarse mediante una placa base personalizada que integre el microcontrolador, la circuitería de alimentación, y algunas de las funciones que actualmente están separadas en varios módulos.
- La caja estanca seleccionada, aunque muy adecuada para pruebas reales en entorno hostil, podría sustituirse por una versión más económica o fabricarse a medida mediante impresión 3D en plásticos técnicos resistentes a temperatura (como PETG o ASA) en fases intermedias de desarrollo.

También podrían estudiarse estrategias de fabricación por fases. Por ejemplo, adquirir los sensores críticos (PMS5003, MH-Z19B, LSU 4.9) directamente del fabricante o mediante distribuidores técnicos en Asia con certificación CE, lo que abarataría costes de forma considerable. Para los sensores más económicos, se podría establecer un stock base o kits ensamblables internamente.

En términos logísticos, una producción de 50 a 100 unidades podría gestionarse desde un pequeño taller o laboratorio, con montaje manual, pruebas de calidad básicas (verificación de comunicación de sensores, calibración inicial) y empaquetado sencillo. Este enfoque no requiere una gran inversión en maquinaria, aunque sí implicaría una mayor dedicación en términos de tiempo y personal.

Finalmente, es importante destacar que en una primera fase de escalado, el margen de beneficio no debería ser prioritario, ya que el objetivo principal sería validar el interés del mercado y refinar el diseño del producto. La producción a pequeña escala permitiría también obtener feedback real de usuarios (conductores, autoescuelas, talleres o ayuntamientos) que podría ser clave para mejorar la siguiente versión del sistema.

9.3 POSIBLES CLIENTES: CONDUCTORES, AYUNTAMIENTOS, AUTOESCUELAS.

El sistema desarrollado tiene un claro enfoque de concienciación medioambiental y monitorización de emisiones contaminantes en vehículos de combustión. Por tanto, sus posibles clientes, como ya se han mencionado, abarcan tantos usuarios individuales, como entidades públicas o privadas con interés en la reducción de emisiones, la educación vial y la sostenibilidad urbana. Sin embargo, al ser un prototipo, los principales clientes deberían de ser laboratorios de desarrollo, fábricas de I+D, departamentos de mejora de vehículos que tengan mayores presupuestos para terminar de ajustar el prototipo.

Sin embargo, en líneas generales, los clientes del prototipo en un futuro se pretenden que sean:

- Conductores particulares constituyen un grupo objetivo evidente, preocupados por el impacto medioambiental de su coche o con intención de alargar su vida útil sin incumplir normativas. El sistema permitiría hacer un seguimiento de sus emisiones reales y adaptar su estilo de conducción para reducirlas.
- Ayuntamientos y administraciones locales podrían estar interesados en integrar el sistema en campañas de sensibilización ambiental, planes de movilidad sostenible o como herramienta educativa en proyectos escolares y municipales. También sería útil en programas de control de emisiones en flotas de servicios urbanos (taxis, limpieza, mantenimiento, etc.), donde la reducción de contaminantes es un objetivo medible.

- Autoescuelas y centros de formación vial también son un perfil con gran potencial. Estos centros podrían utilizar el sistema como complemento pedagógico en clases de conducción eficiente o sensibilización ambiental, permitiendo al alumnado visualizar en tiempo real cómo afecta su forma de conducir al nivel de emisiones.
- Otros posibles perfiles incluyen empresas de transporte, talleres mecánicos que ofrezcan servicios de diagnóstico ecológica, o incluso ONGs medioambientales que quieran desarrollar campañas de concienciación basadas en datos reales de emisiones.

9.4 PROPUESTA BÁSICA DE COMERCIALIZACIÓN

Dado que se trata de un producto aún en fase de desarrollo, la propuesta de comercialización planteada es básica y flexible, orientada a un mercado inicial de adopción temprana. Se busca llegar a usuarios comprometidos con la sostenibilidad, instituciones interesadas en la educación ambiental, y perfiles técnicos capaces de instalar y utilizar el sistema sin soporte complejo. Por supuesto, como ya se ha mencionado, lo que sería el perfecto principal promotor, serían laboratorios de I+D, talleres de coches, usuarios capaces de seguir desarrollando el prototipo, universidades con departamentos de investigación, entidades o fundaciones con gran capacidad de inversión en este sistema.

9.4.1 PRECIO DE VENTA ESTIMADO

A partir del estudio económico realizado, el coste de fabricación por unidad en fase de prototipo es de aproximadamente 498,45 ~~489~~ €. Sin embargo, en una fase inicial de producción a pequeña escala (50–100 unidades), aplicando reducciones por compras al por mayor, uso de placas Arduino compatibles, simplificación del diseño físico y optimización del montaje, se estima que el coste podría reducirse a unos 300–350 € por unidad.

Teniendo en cuenta un margen comercial razonable del 25–30 %, el precio de venta estimado podría situarse entre 390 y 450 €, con variaciones según si se incluye solo el kit o también servicios de instalación, asesoría o software personalizado. Pero

como se ha mencionado en varias ocasiones, como el objetivo es que alcance el mayor número de personas, se pondrá un precio inicial inferior al coste, y a medida que vayan pasando los años el producto acabará siendo más barato debido al aprovisionamiento al por mayor. Con los años, se irá recuperando la inversión.

Este precio lo posicionaría como un producto intermedio entre una solución educativa y un dispositivo técnico para diagnosis ambiental, asequible para instituciones o usuarios comprometidos con la sostenibilidad.

9.4.2 CANAL DE DISTRIBUCIÓN

En una primera fase, el producto se podría comercializar a través de:

- Venta directa online, mediante página web propia o plataformas tipo Tindie, Etsy o Amazon para dispositivos electrónicos.
- Distribuidores educativos o técnicos, como tiendas de electrónica o empresas de equipamiento didáctico (por ejemplo, AZDelivery, BricoGeek, DFRobot...).
- Contactos directos con instituciones (ayuntamientos, centros de FP, autoescuelas, empresas de desarrollo) para ofrecerles una demo o proyecto piloto.

En una segunda fase, si el producto demuestra su utilidad, se podría escalar hacia acuerdos con fabricantes de componentes, talleres o incluso flotas profesionales.

9.4.3 MODO DE INSTALACIÓN (KIT BÁSICO, APP, ASESORÍA)

La instalación se plantea con distintos niveles de acompañamiento, adaptados al perfil del cliente:

- Kit básico de autoensamblaje: incluye todos los componentes físicos y una guía paso a paso para su instalación y puesta en marcha. Pensado para usuarios avanzados o centros educativos.
- Versión con aplicación móvil/web (no desarrollada en este trabajo): se desarrollaría una app básica para visualizar en tiempo real los datos medidos, mediante Bluetooth o WiFi. Esta opción podría incluir una pequeña suscripción si se ofrecen funciones avanzadas como registro histórico, análisis de trayectos o sugerencias de conducción eficiente.
- Asesoría técnica o servicio de instalación: en colaboración con talleres o técnicos locales, especialmente útil para flotas o ayuntamientos que quieran aplicar el sistema en varios vehículos sin asumir la parte técnica directamente.

Este enfoque escalonado permite adaptar la solución al nivel de conocimientos y necesidades del cliente, facilitando así su adopción y ampliando su potencial de mercado.

9.4.4 PROYECCIÓN Y POSIBLES EXPECTATIVAS ECONÓMICAS

Una vez estimado el coste técnico por unidad del prototipo en ~~489,41€~~, se ha llevado a cabo un análisis económico más completo, incluyendo gastos indirectos, logísticos y de implantación, así como una valoración de su viabilidad a pequeña escala en caso de plantearse su uso real o su comercialización básica. Para ello se han estimado todos los gastos excluyendo el coste unitario ya calculado. Y por tanto se realiza primero un desglose de cada uno de ellos.

COSTE TECNICO DIRECTO (UNITARIO)

Tabla 10: Desglose de los costes técnicos directos (unitarios) del prototipo

Concepto	Coste estimado [euros]
Sensores (gases, partículas, GPS...)	225,00
Elementos electrónicos y control	163,00
Caja, batería, conectores, extras	101,41
Total coste directo	498,45

COSTE TECNICO INDIRECTO (UNITARIO)

Tabla 11: Desglose de los costes técnicos indirectos (unitarios) del prototipo

Concepto	Estimación [euros]
Costes de envío y logística nacional	8,00
Embalaje técnico y montaje manual	10,00
Herramientas y consumibles (amortizado)	5,00
<i>Mantenimiento/reemplazo a 1 año</i>	7,00
<i>Licencias básicas software/hosting</i>	2,50
Total coste indirecto	32,5

Por lo que el coste total estimado por unidad incluyendo lo que se entiende por costes directos e indirectos es aproximadamente de: 530,95 euros/unidad. Pero este precio

como ya se ha dicho es en una fase inicial de desarrollo y prototipo, por lo que a mayor cantidad producida estos costes irían disminuyendo.

Con este precio fijado, se realiza una proyección de lo que sería el proyecto si en un futuro llega tras desarrollarse a comercializarse al por mayor en grandes cantidades. Incluso podría llegar a estar en todos los vehículos nuevos producidos a partir de un año en concreto. Y por supuesto se vuelve a recalcar que se trata de una posible estimación. Una idea del crecimiento en los siguientes diez años es la siguiente.

Este es el aspecto de lo que sería el proyecto, en la siguiente página esta desarrollado, explicado, y especificadas las suposiciones realizadas.

Año 0	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Unidades vendidas	50	750	1.000	20.000	60.000	100.000	350.000	550.000	900.000	1.000.000	2.000.000
Precio de venta unitario (euros)	420	459	468	478	487	497	507	517	527	538	549
Ingresos	21.000	344.250	468.000	9.560.000	29.220.000	49.683.000	177.375.000	284.299.500	474.522.000	537.791.656	1.097.094.978
Coste directo unitario	498	458	467	452	392	400	367	374	306	312	302
Reducción anual de costes respecto año anterior (venta al por mayor)	0%	30%	0%	3%	25%	0%	30%	0%	20%	0%	3%
COGS: Coste directo total	(24.920)	(343.148)	(466.682)	(9.044.294)	(23.524.208)	(39.991.154)	(128.491.577)	(205.953.642)	(275.004.281)	(311.671.518)	(604.019.402)
Gross Margin	(2.420)	1.102	1.498	506.578	5.701.460	9.692.482	48.879.004	78.346.061	199.517.769	226.120.138	493.075.576
Expenses:											
Personal	(20.000)	(30.000)	(45.000)	(67.500)	(101.250)	(151.875)	(227.813)	(341.719)	(512.578)	(708.867)	(1.153.301)
General y administrativo	(4.000)	(6.000)	(9.000)	(13.500)	(20.250)	(30.375)	(45.563)	(68.344)	(102.516)	(153.773)	(230.660)
Alquiler + servicios	(5.000)	(7.500)	(11.250)	(16.875)	(25.313)	(37.969)	(56.953)	(85.430)	(128.145)	(192.217)	(288.325)
Costes de envío y logística nacional (por u/s)	0,0	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Costes de envío y logística nacional total	(400,0)	(6.120,0)	(8.323,2)	(66.937,5)	(519.567,4)	(883.264,6)	(3.153.254,8)	(5.054.216,9)	(8.435.947,5)	(9.560.740,5)	(19.503.910,7)
Embalaje técnico y montaje manual (por u/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Embalaje técnico y montaje manual total	(500,0)	(7.650,0)	(10.404,0)	(212.241,6)	(649.459,3)	(1.104.080,8)	(3.941.568,3)	(6.317.771,2)	(10.544.934,4)	(11.950.925,7)	(24.379.888,4)
Herramientas y consumibles (amortizado) (por u/s)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Herramientas y consumibles (amortizado) total	(250,0)	(3.825,0)	(5.202,0)	(106.120,8)	(324.729,6)	(552.040,4)	(1.970.784,2)	(3.158.885,6)	(5.272.467,2)	(5.975.452,8)	(12.189.942,1)
Mantenimiento/reemplazo a 1 año (por u/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mantenimiento/reemplazo a 1 año total	(350,0)	(5.355,0)	(7.282,8)	(148.569,1)	(454.621,5)	(772.856,6)	(2.759.097,9)	(4.422.439,8)	(7.381.454,1)	(8.365.648,0)	(17.065.921,9)
Licencias básicas software/hosting (por u/s)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Licencias básicas software/hosting total	(125,0)	(1.812,5)	(2.601,0)	(53.060,4)	(162.364,8)	(276.020,2)	(885.392,1)	(1.579.442,8)	(2.636.233,6)	(2.987.731,4)	(6.094.972,1)
Total expenses	(30.625)	(68.363)	(99.063)	(787.660)	(2.257.555)	(3.808.481)	(13.140.426)	(21.628.248)	(35.014.275)	(39.955.366)	(80.906.923)
EBITDA	(31.045)	(67.261)	(97.565)	(281.082)	3.443.905	5.884.001	35.738.579	57.317.813	164.503.493	186.164.772	412.168.652
Amortización y depreciación	(125)	(1.875)	(2.500)	(50.000)	(150.000)	(250.000)	(875.000)	(1.375.000)	(2.250.000)	(2.500.000)	(5.000.000)
EBIT	(31.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	3.293.905	5.634.001	34.863.579	55.942.813	162.253.493	183.664.772	407.168.652
Impuestos (25%)	-	-	-	-	823.476	1.408.500	8.715.895	13.985.703	40.563.373	45.916.193	101.792.163
Net Income	-	(31.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816
Capex	(555.000)										
Free Cash Flow	(555.000)	(31.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816

Ilustración 26: Aspecto de los numero del proyecto de cara 10 años (elaboración propia)

Nota: Esto es simplemente para mostrar cómo queda un análisis de viabilidad, está explicado e introducido con mayor tamaño más adelante.

Hay que recalcar que este análisis se realiza de la manera más simplificada posible y clara para el entendimiento del máximo número de personas posibles. Pues la finalidad no es un análisis económico exacto, sino más bien que se entienda que los primeros años suponen pérdidas. Esto es debido al principal objetivo ya mencionado: que sea accesible para el máximo número de personas.

Además, se realiza este análisis de viabilidad, partiendo de la base de que está orientado a que una entidad financiera, una fundación, un grupo grande de empresas automovilística, un departamento de I+D... se quedasen con la idea y la desarrollasen más en profundidad, una vez alcanzado ese objetivo. Se plantea este análisis para recalcar desde una visión optimista el brusco crecimiento del sistema ya desarrollado y lo beneficioso que podría llegar a ser. Por ello, se insiste en que es una estimación.

	Año 0	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Unidades vendidas		50	750	1.000	20.000	60.000	100.000	350.000	550.000	900.000	1.000.000	2.000.000
Precio de venta unitario [euros]		450	459	468	478	487	497	507	517	527	538	549
Ingresos		22.500	344.250	468.180	9.550.872	29.225.668	49.683.636	177.370.581	284.299.703	474.522.049	537.791.656	1.097.094.978
Coste directo unitario		498	458	467	452	392	400	367	374	306	312	302
<i>Reducción anual de costes respecto año anterior (venta al por mayor)</i>		<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>0%</i>	<i>5%</i>	<i>15%</i>	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>0%</i>	<i>20%</i>	<i>0%</i>	<i>5%</i>
COGS- Coste directo total		(24.920)	(343.148)	(466.682)	(9.044.294)	(23.524.208)	(39.991.154)	(128.491.577)	(205.953.642)	(275.004.281)	(311.671.518)	(604.019.402)
Gross Margin		(2.420)	1.102	1.498	506.578	5.701.460	9.692.482	48.879.004	78.346.061	199.517.769	226.120.138	493.075.576
Expenses:												
Personal		(20.000)	(30.000)	(45.000)	(67.500)	(101.250)	(151.875)	(227.813)	(341.719)	(512.578)	(768.867)	(1.153.301)
General y administrativo		(4.000)	(6.000)	(9.000)	(13.500)	(20.250)	(30.375)	(45.563)	(68.344)	(102.516)	(153.773)	(230.660)
Alquiler + servicios		(5.000)	(7.500)	(11.250)	(16.875)	(25.313)	(37.969)	(56.953)	(85.430)	(128.145)	(192.217)	(288.325)
Costes de envío y logística nacional (por ud)		8,0	8,2	8,3	8,5	8,7	8,8	9,0	9,2	9,4	9,6	9,8
Costes de envío y logística nacional total		(400,0)	(6.120,0)	(8.323,2)	(169.793,3)	(519.567,4)	(883.264,6)	(3.153.254,8)	(5.054.216,9)	(8.435.947,5)	(9.560.740,5)	(19.503.910,7)
Embalaje técnico y montaje manual (por ud)		10,0	10,2	10,4	10,6	10,8	11,0	11,3	11,5	11,7	12,0	12,2
Embalaje técnico y montaje manual total		(500,0)	(7.650,0)	(10.404,0)	(212.241,6)	(649.459,3)	(1.104.080,8)	(3.941.568,5)	(6.317.771,2)	(10.544.934,4)	(11.950.925,7)	(24.379.888,4)
Herramientas y consumibles (amortizado) (por ud)		5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,9	6,0	6,1
Herramientas y consumibles (amortizado) total		(250,0)	(3.825,0)	(5.202,0)	(106.120,8)	(324.729,6)	(552.040,4)	(1.970.784,2)	(3.158.885,6)	(5.272.467,2)	(5.975.462,8)	(12.189.944,2)
Mantenimiento/reemplazo a 1 año (por ud)		7,0	7,1	7,3	7,4	7,6	7,7	7,9	8,0	8,2	8,4	8,5
Mantenimiento/reemplazo a 1 año total		(350,0)	(5.355,0)	(7.282,8)	(148.569,1)	(454.621,5)	(772.856,6)	(2.759.097,9)	(4.422.439,8)	(7.381.454,1)	(8.365.648,0)	(17.065.921,9)
Licencias básicas software/hosting*(por ud)		2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	3,0	3,0
Licencias básicas software/hosting* total		(125,0)	(1.912,5)	(2.601,0)	(53.060,4)	(162.364,8)	(276.020,2)	(985.392,1)	(1.579.442,8)	(2.636.233,6)	(2.987.731,4)	(6.094.972,1)

Total expenses	(30.625)	(68.363)	(99.063)	(787.660)	(2.257.555)	(3.808.481)	(13.140.426)	(21.028.248)	(35.014.275)	(39.955.366)	(80.906.923)
EBITDA	- (33.045)	(67.261)	(97.565)	(281.082)	3.443.905	5.884.001	35.738.579	57.317.813	164.503.493	186.164.772	412.168.652
Amortización y depreciación	(125)	(1.875)	(2.500)	(50.000)	(150.000)	(250.000)	(875.000)	(1.375.000)	(2.250.000)	(2.500.000)	(5.000.000)
EBIT	- (33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	3.293.905	5.634.001	34.863.579	55.942.813	162.253.493	183.664.772	407.168.652
Impuestos (25%)	-	-	-	-	823.476	1.408.500	8.715.895	13.985.703	40.563.373	45.916.193	101.792.163
Net Income	- (33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	229.580.965	508.960.816
Capex	(555.000)										
Free Cash Flow	(555.000)	(33.170)	(69.136)	(100.065)	(331.082)	4.117.381	7.042.501	43.579.473	69.928.516	202.816.867	508.960.816

Para realizar estas proyecciones, al ser un posible supuesto, se han partido de la base de varias suposiciones e hipótesis:

1. Se ha estimado el crecimiento de unidades de los sistemas fabricados de manera creciente hasta 2030. Para realizar este crecimiento, al ser tan optimista, se estiman que para 2030 de todos los coches fabricados (100 millones según un estudio), el 2% lleven este sistema, y son aproximadamente 2 millones.
2. Se considera una inflación anual del 2%, por lo que las ventas y los costes directos dependen directamente de la inflación, debido a ello se ve cómo va aumentando el precio de venta.
3. Sin embargo, en los costes, además de ir aumentando anualmente con la inflación, también el coste se ha ido reduciendo según las unidades producidas debido a la venta al por mayor. Cuantas más unidades se compran, más barato es, por ello se han supuesto en años aleatorios una reducción respecto al año anterior de lo que serían los costes por unidad. Por lo que en este caso es una combinación de ambos.
4. Para la amortización, dado que vendes hardware, el coste de producción de cada unidad se contabiliza como un gasto directo (COGS). Eso no se amortiza porque desaparece de tu inventario y se transforma en ingreso. Sin embargo, sí se amortizan otros costes que ha asumido la empresa para poder producir esas unidades. En lugar de amortizar un bloque fijo al año, calculamos una cuota de amortización por unidad producida. A cada año se le ha asignado una nueva inversión amortizable, proporcional al volumen de producción, y esa inversión se amortiza a lo largo de 10 años. Por lo que para hacerlo sencillo y razonable se ha estimado que el primer año es 2,5 euros amortizables por unidad. El alquiler no se amortiza.
5. En cuanto a los impuestos, se hará de la manera más sencilla, sin compensación. Pues los años en los que el EBIT es negativo, los impuestos

serán cero. Y simplemente se pagarán impuestos los años en los que hay un EBIT positivo. Se descartará la idea de hacerlo acumulando para el año siguiente por simplicidad de cálculo.

6. Se han estimado unos gastos de personal, general y administrativo, y alquiler y servicios para que sea más realista el análisis. Estos expenses son estimados en torno a valores razonables y que van creciendo a medida que aumenta el volumen de producción.
7. Se ha estimado una inversión inicial en el año cero de la suma de los flujos de caja negativos, para que haya suficiente free cash Flow para afrontar los años en los que son negativos. Todo esto para simplificar los datos lo máximo posible.
8. Se calcula el VAN con una tasa del 30% debido a que es un prototipo sin desarrollar, y se obtiene que VAN positivo. El proyecto es altamente rentable desde un punto de vista financiero ya que ambos: TIR y VAN son valores altos y elevados. Un VAN positivo tan alto implica que, incluso descontando al 30% anual, el proyecto sigue generando miles de millones de valor.

Nota: Se vuelve a destacar que, aunque parezca que los primeros años el coste de producirlo es inferior al de venta es expresamente con un fin. Se pretende que sea lo más accesible posible para todos los usuarios, por lo que, al ser altamente rentable con una margen vista de 10 años, simplemente habrán perdidas los primeros años hasta recuperar la inversión. El fin el proyecto no es únicamente lo económico, simplemente un equilibrio entre lo social y económico.

Y en cuanto a las conclusiones obtenidas:

1. Fase inicial (2025–2028): pérdidas esperadas

Durante los primeros años, el proyecto arrastra pérdidas operativas y contables, como es habitual en fases de inversión intensiva. El EBIT y el Net Income son negativos debido a:

- Bajos volúmenes de venta

- Elevado coste unitario de producción
- Inversiones relevantes en amortización y desarrollo de estructura productiva

Esto es habitual en cualquier empresa emergente o modelo de escalado tecnológico: el sistema aún no ha alcanzado masa crítica. Además, como se ha ido mencionando a lo largo del trabajo, el objetivo inicial no es facturar, sino que sea accesible para todos, por lo que estar en fase de pérdidas no supone un problema.

2. Punto de inflexión: 2029

A partir de 2029 se alcanza un EBIT positivo de más de 3,29 millones de euros y un Net Income de 4,11 millones, lo que marca el comienzo de la rentabilidad real del proyecto. Este es el año en que se recupera toda la inversión acumulada de los años anteriores, ya que las pérdidas acumuladas (2025 y 2028) son ampliamente compensadas.

3. Fase de crecimiento exponencial: 2030–2035

Desde 2030 en adelante:

- El beneficio neto se multiplica año tras año, alcanzando más de 508 millones de euros en 2035.
- El EBITDA, indicador clave de rentabilidad operativa, supera los 57 millones en 2032 y los 186 millones en 2034.
- La estructura de costes se estabiliza: aunque los gastos crecen, el margen bruto lo hace mucho más rápido gracias al volumen y la reducción del coste directo unitario.

Capítulo 10. LIMITACIONES DEL PROYECTO Y PROPUESTA DE MEJORA

Como todos los proyectos en la vida real, este en concreto, también ha supuesto un reto, debido a varias limitaciones. Normalmente estas limitaciones suelen estar determinadas por el factor económico y tecnológico.

10.1 LIMITACIONES TÉCNICAS ACTUALES

Se ha realizado un esfuerzo para diseñar un sistema que sea funcional y sencillo, y por supuesto accesible para todos los usuarios, que permita medir y visualizar emisiones contaminantes de vehículos de combustión. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones técnicas que conviene reconocer. Aunque partiendo de la base de que es un prototipo, esta verdaderamente completa su funcionalidad, estructura, y cumple con los requisitos necesarios para entenderlo como un prototipo.

En primer lugar, el uso de la placa Arduino MEGA 2560, si bien ha resultado adecuado para el desarrollo y testeo del prototipo, pero como ya me hemos mencionado presenta ciertas restricciones en términos de capacidad del procesamiento y almacenamiento, lo que limita la posibilidad de integrar sensores más complejos o realizar cálculos más elaborados en tiempo real. Pero para este principal uso es perfectamente adecuado, pues cumple el resto de los requisitos ya estudiados a lo largo del trabajo.

Además, algunos sensores utilizados como el de óxido de carbono o dióxido de nitrógeno tienen un margen de error no despreciable cuando se emplean fuera de entornos controlados, lo que puede afectar a la precisión de los datos obtenidos en situaciones reales. Por ello, la calibración constante de estos sensores es fundamental, pero el sistema portátil de bajo coste

como este no siempre puede garantizar esa estabilidad a largo plazo. Pero como ya se ha mencionado, para un prototipo que se prueba en un laboratorio, es suficiente preciso.

Finalmente, la conexión Bluetooth, aunque funcional para el prototipo podría no ser la más fiable para contextos con interferencias o necesidades de transmisión continua y robusta de datos. Es simplemente útil para datos menos complejos y una relación sencilla entre el usuario y el prototipo.

Por último, otra limitación que hay que mencionar es tamaño del sistema y su incorporación ciertos vehículos. Pues este prototipo está pensado para introducirse dentro de una caja que no dañe la electrónica del sistema, y situado en un lugar con suficiente espacio. Pues en coches, camiones o furgonetas es más sencillos porque son más grandes, en motocicletas si supone un reto ya que no debería de estar visible por razones estéticas. Aunque para lo que supone un prototipo de pruebas en el laboratorio, la eficiencia del espacio ocupado sería un reto de cara al futuro ya que el tema del espacio acaba siendo una limitación económica tecnológica, cuanto menos espacio más caro, y como se ha recalcado, se quiere que el sistema sea accesible para la mayor cantidad de personas posibles.

10.2 FUTURAS MEJORAS DEL SISTEMA

Con todo lo expuesto en el punto anterior, se plantean ciertas alternativas para superar las limitaciones anteriores, a corto y medio plazo. Una de las más relevantes sería la migración a una plataforma de hardware más potente, como una Raspberry Pi o una placa ESP32, que permitirá integrar funcionalidades sin comprometer el rendimiento.

En cuanto a los sensores, sería deseable incorporar sensores de calidad profesional, con una mayor relación señal/ruido. Esta mejora permitiría obtener lecturas más precisas incluso en condiciones ambientales variables. Esto está enfocado a ser más medio plazo debido a qué es prioridad el factor económico con el fin de que llega el máximo número de personas posible.

Otra posible mejora sería la implementación de una interfaz más completa en la aplicación móvil, dónde el usuario no solo pudiera ver los datos en tiempo real, si no también consultar gráficas históricas, recibir alertas personalizadas o comparar su comportamiento con otros usuarios. Esto aumentaría el valor añadido del sistema y su capacidad de concienciación ambiental.

Por último, desde el punto de vista estructural se podría diseñar una carcasa modular e impermeable para proteger el prototipo en condiciones reales de uso tanto en ciudad como en carretera, especialmente pensado en su integración posterior en vehículos reales de todos los tamaños. Esta mejora también le compete al medio plazo puesto que reducir el tamaño del sistema aumenta los costes, y hay que encontrar el punto más óptimo entre tecnología y coste.

10.3 ESCALADO DEL SISTEMA A FLOTAS O TRANSPORTE PÚBLICO

Una de las líneas más interesantes para el futuro de este prototipo, sería la aplicación del sistema a flotas de vehículos o incluso al transporte público, especialmente en entornos urbanos donde la contaminación atmosférica es un problema prioritario y cada vez más resonante. Para que este escalado sea viable, sería necesario adaptar el diseño del sistema para hacerlo más robusto, estandarizado y fácil de instalar.

En el caso del transporte público, además del valor medioambiental, un sistema como este, permitiría a las administraciones realizar un seguimiento continuo de las emisiones reales, identificar puntos críticos y diseñar políticas más ajustadas a la realidad. Incluso podría emplearse en programas piloto con bonificaciones para los conductores o empresas que reduzcan sus emisiones de forma efectiva. La relevancia de la red de transporte público en los países es indiscutible. Pues en el futuro podría adaptarse este sistema a otros medios de transporte, como trenes o aviones.

Para ello, se requerirá también un sistema centralizado de recogida y análisis de datos, capaz de consolidar la información recogida por cada unidad y generar informes útiles para los

gestores de flotas o las autoridades ambientales. La tecnología necesaria ya existe y el prototipo desarrollado en este proyecto puede considerarse un primer paso en esa dirección.

Capítulo 11. CONCLUSIONES

11.1 VALORACIÓN GLOBAL DEL PROYECTO

El desarrollo de este trabajo de fin de grado ha sido una experiencia muy enriquecedora desde el punto de vista tanto técnico como personal. A lo largo del proyecto se han podido aplicar varios conocimientos adquiridos de asignaturas muy diversas cursadas durante la carrera. Entre ellas, sistemas electrónicos, automatización industrial, finanzas y contabilidad, ingeniería medioambiental o ética.

El sistema diseñado, aunque con sus limitaciones, cumple con el objetivo principal planteado: proporcionar a usuarios de vehículos de combustión información básica sobre sus emisiones contaminantes de forma comprensible y accesible. De manera que este permanente contacto lleve al usuario a una concienciación sobre su estilo de conducción y las emisiones generadas. El enfoque elegido, basado en la sencillez, bajo coste y facilidad de uso, es especialmente interesante para campañas de concienciación ciudadana o educativas, y puede tener una gran proyección si se mejora técnicamente y se acompaña de una buena estrategia de implementación.

Además, hoy se ha podido explorar áreas que no forman parte del núcleo habitual de la Ingeniería Industrial, como el diseño orientado al usuario, el benchmarking de mercado y la comercialización del producto, lo que ha permitido desarrollar un perfil más transversal y cercano a la realidad de la industria actual.

Por lo que con esto se puede decir que el prototipo diseñado es un claro ejemplo de ingeniería aplicada a la vida real. Engloba muchas áreas de la ingeniería, y se requiere cierto ingenio y determinación para proponer un prototipo tan ambicioso y novedoso, y por supuesto tan útil para la sociedad. Además de completamente adecuado y adaptado a los temas tan actuales que mas ruido hacen hoy en día.

11.2 REFLEXIÓN FINAL SOBRE SOSTENIBILIDAD Y TECNOLOGÍA

Este proyecto me ha permitido reflexionar con más profundidad sobre el papel que juega la ingeniería en los retos ambientales actuales. Aunque a menudo se asocia la tecnología con el aumento del consumo y la contaminación. Sin embargo, creo que bien enfocada, la innovación tecnológica puede ser una aliada clave para avanzar hacia una sociedad más sostenible.

En este caso concreto no se trata solo de medir emisiones, sino de hacerlas visibles al ciudadano medio, que muchas veces desconoce el impacto real de su comportamiento. Al facilitar esa información se abre una puerta a un cambio de hábitos que puede ser más efectivo que muchas campañas institucionales abstractas.

La sostenibilidad no depende solo de grandes infraestructuras o políticas globales, sino también de herramientas pequeñas como la diseñada, que permite acercar la información al usuario y empoderarle para tomar decisiones más responsables. Como futura ingeniera industrial, este proyecto me ha confirmado que el diseño hay soluciones útiles viables y pensadas para el impacto real es un camino que quiero seguir explorando.

Capítulo 12. BIBLIOGRAFÍA

Capítulo 2:

- [1] [Agencia Europea de Medio Ambiente – Emisiones del transporte](#)
- [2] [Comisión Europea – Informe sobre reducción de emisiones 2024](#)
- [3] [OMS – Transporte, salud y medio ambiente \(2023\)](#)
- [4] [SciELO – Contaminación ambiental y salud pública \(2024\)](#)
- [5] [Unión de Científicos Comprometidos – Vehículos y contaminación](#)

Capítulo 4:

[Reglamento \(UE\) 2019/631](#)

[Reglamento \(UE\) 2019/631 sobre emisiones de CO₂](#)

[Respuesta parlamentaria sobre objetivos de emisiones 2025](#)

[Reglamento Delegado \(UE\) 2025/1117 – BOE](#)

[Artículo científico: Calidad del aire y control de emisiones – RAC](#)

[Artículo: Caracterización tecnológica de sistemas de emisiones](#)

Reglamento (UE) 2019/631 (Oficial): Disponible en EUR-Lex → “Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo”

Pacto Verde Europeo (European Green Deal): Sitio oficial de la Comisión Europea, sección sobre el “European Green Deal”

Real Decreto 106/2018 (España): Boletín Oficial del Estado (BOE), Real Decreto 9/3/2018

Etiqueta ambiental DGT: Página de la Dirección General de Tráfico, sección “Distintivos ambientales”

Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética (España): Boletín Oficial del Estado (BOE), Ley 07/2021

ODS: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Capítulo 5:

Punto 5.1:

- [6] [cadenaser.com](https://www.cadenaser.com).
- [7] [eea.europa.eu+12abc.es+12diariosigloxxi.com+12](https://www.eea.europa.eu+12abc.es+12diariosigloxxi.com+12).
- [8] [eea.europa.eu+3lavanguardia.com+3agenciasinc.es+3](https://www.eea.europa.eu+3lavanguardia.com+3agenciasinc.es+3).
- [9] <https://airindex.eea.europa.eu/AQI/index.html>
- [10] [fundaciondelcorazon.com+15rtve.es+15smartcity.es+15](https://www.fundaciondelcorazon.com+15rtve.es+15smartcity.es+15).
- [11] https://www.autopista.es/planeta2030/presentan-web-medir-calidad-aire-en-tiempo-real_208165_102.html?utm_source=chatgpt.com
- [12] [los40.com+4elindependientedegranada.es+4cadenaser.com+4](https://www.los40.com+4elindependientedegranada.es+4cadenaser.com+4).
- [13] [rtve.es+15cadenaser.com+15cadenaser.com+15](https://www.rtve.es+15cadenaser.com+15cadenaser.com+15).
- [14] [los40.com+1energias-renovables.com+1](https://www.los40.com+1energias-renovables.com+1).
- [15] [cadenaser.com+8es.wikipedia.org+8cadenaser.com+8](https://www.cadenaser.com+8es.wikipedia.org+8cadenaser.com+8).
- [16] [cadenaser.com+2cadenaser.com+2cadenaser.com+2](https://www.cadenaser.com+2cadenaser.com+2cadenaser.com+2).
- [17] [rtve.es+6eea.europa.eu+6eleconomista.es+6](https://www.rtve.es+6eea.europa.eu+6eleconomista.es+6).
- [18] [agenciasinc.es+1eea.europa.eu+1](https://www.agenciasinc.es+1eea.europa.eu+1).

Punto 5.2:

ITV:

[itvcitaprevia.es+9itv.com.es+9itvcitaprevia.es+9](https://www.itvcitaprevia.es+9itv.com.es+9itvcitaprevia.es+9).

[motorpasion.com+2itvcitaprevia.es+2xataka.com+2.](#)

[posventa.com+1as.com+1.](#)

CNS-ISCIH

[sanidad.gob.es.](#)

[posventa.com+15isciii.es+15cnsa.isciii.es+15.](#)

Estudios académicos y económicos

[huffingtonpost.es+2esade.edu+2espanatimes.com+2.](#)

Punto 5.3

dinamómetro

[fh-joanneum.atmdpi.com.](#)

[mdpi.com](#)

software

[arxiv.org.](#)

[arxiv.org+2arxiv.org+2arxiv.org+2.](#)

PEMS

[amt.copernicus.org+15en.wikipedia.org+15mdpi.com+15.](#)

[mdpi.com+1mdpi.com+1.](#)

[en.wikipedia.org+7mdpi.com+7link.springer.com+7.](#)

[archivesoftransport.com+1amt.copernicus.org+1.](#)

[amt.copernicus.org+3time.com+3time.com+3.](#)

Comparativa chasis vs PEMS en vehículos pesados (*AMT, 2021*)

[amt.copernicus.org+1en.wikipedia.org+1sae.org+2op.europa.eu+2en.wikipedia.org+2amt.copernicus.org](#)

Evaluación de PEMS frente a instrumentos de laboratorio (*Energies, 2023*)

Uso de PEMS en polígonos y rondpoints (*Archives of Transport, *European study*)

[archivesoftransport.com](#)

Estudio meta de emisiones reales de vehículos diésel Euro 6 (*Atm Environ*)
link.springer.com+7researchgate.net+7sae.org+7

Proyecto MOVESTAR (simulación de emisiones con EPA MOVES) arxiv.org

MaLTESE (machine learning para emisiones) arxiv.org

Volkswagen, PEMS y Dieselgate
op.europa.eu+13time.com+13en.wikipedia.org+13

OTRAS TECNOLOGÍAS

Calidad del aire en comunidad de Madrid y puntos de medición fijos:
<https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Bases-de-datos-y-publicaciones/Bases-de-datos-de-calidad-del-aire/En-tiempo-real/?vgnextfmt=default&vgnextchannel=650a89e859517710VgnVCM1000001d4a900aRCRD>

Laser: Fuente: ICCT Remote Sensing Overview:
<https://theicct.org/publication/remote-sensing-of-motor-vehicle-exhaust-emissions/>

Drones: Estudio: “Air quality monitoring using UAVs: a review” (Science of the Total Environment, 2022).

Punto 5.4. OBD

programacalac.com+2es.wikipedia.org+2mecanicaenaccion.com+2.

gadsoftware.com+3gob.mx+3libreriaobd2.com+3libreriaobd2.comwiseguyreports.com.

Punto 5.6

<https://www.autoblog.com/maintenance/best-obd2-scanners>

https://www.researchgate.net/publication/364975657_Compact_Non-Dispersive_Infrared_Multi-Gas_Sensing_Platform_for_Large_Scale_Deployment_with_Sub-ppm_Resolution

<https://www.continental.com/en/press/press-releases/20231017-ehorizon-for-dynamic-road-events/>

<https://www.obdlink.com/products/obdlink-mxp/>

<https://play.google.com/store/apps/details?id=org.prowl.torque&hl=en-US>

Otras fuentes empleadas para la investigación:

Wikipedia de Google

Inteligencia artificial: Open IA

Inteligencia artificial: Copilot M365

ESADE policy brief contaminación

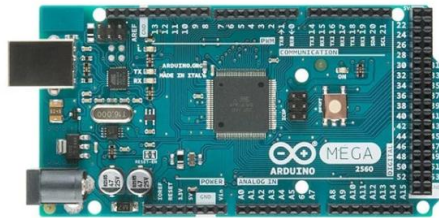
Movestar Cornell Software simulation

ANEXO I: CATÁLOGO ARDUINO MEGA 2560

Nota: Se adjuntan simplemente partes del catálogo que se consideran más relevantes para no sobrecargar los anexos.

Arduino MEGA 2560

oscar.gonzalez



Arduino MEGA 2560

El **Arduino Mega 2560** es una placa controladora basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene un total de 54 pines digitales para entradas y salidas (15 de las cuales pueden generar pulsos PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertos UART por hardware, un conector USB para programación y alimentación, una entrada de Jack para alimentación externa, pines ICSP y un botón de Reset.

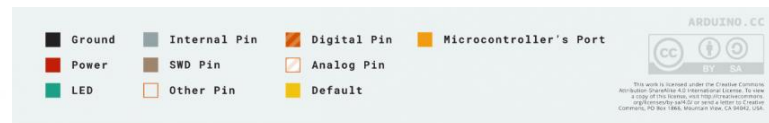
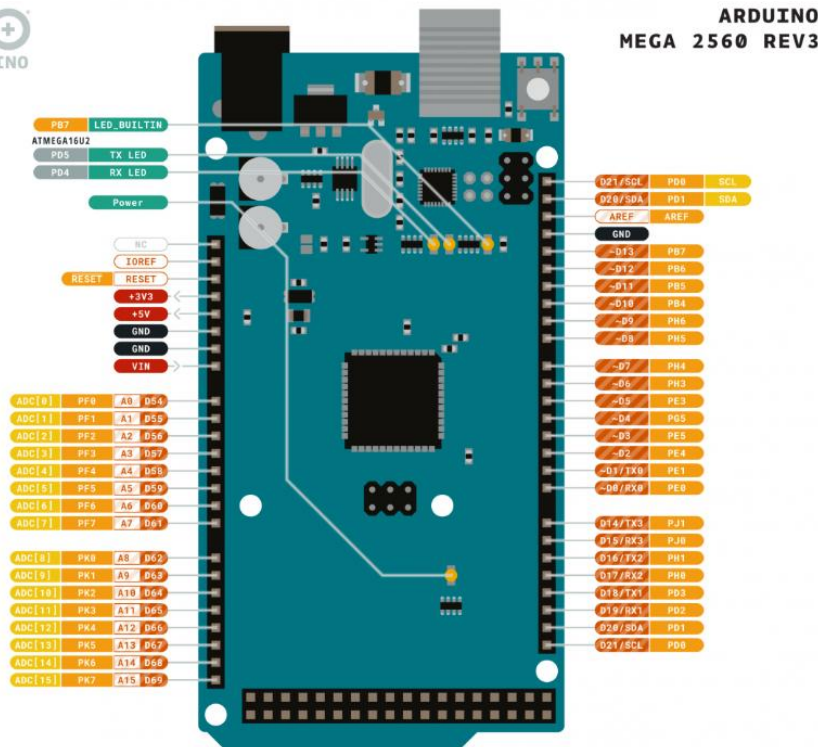
El Arduino Mega 2560 dispone de todo lo necesario para hacerla funcionar. Se conecta como los otros modelos de Arduino al puerto USB y es soportada de forma nativa por el Arduino IDE.

Es compatible con casi la mayoría de placas de expansión (shields) diseñadas para el Arduino UNO.

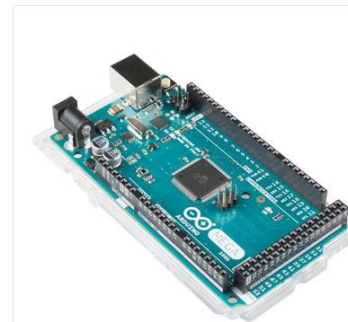
Características de Arduino MEGA 2560

- **Microcontrolador:** ATmega2560
- **Tensión de alimentación:** 5V
- **Tensión de entrada recomendada:** 7-12V
- **Límite de entrada:** 6-20V
- **Pines digitales:** 54 (14 con PWM)
- **Entradas analógicas:** 16
- **Corriente máxima por pin:** 40 mA
- **Corriente máxima para el pin 3.3V:** 50 mA
- **Memoria flash:** 256 KB
- **SRAM:** 8 KB
- **EEPROM:** 4 KB
- **Velocidad de reloj:** 16 MHz
- **Dimensiones:** 101.52 mm x 53.3 mm
- **Peso:** 37 gramos

la poder imprimirlo.



Pinout del Arduino MEGA 2560



Imágenes detalladas de Arduino MEGA 2560

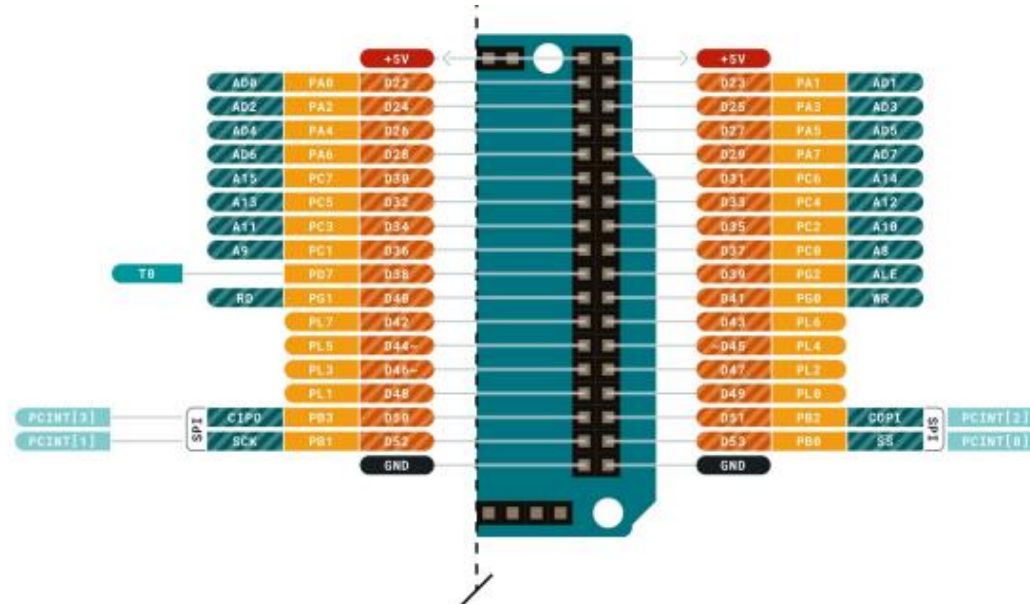
Aquí puedes ver algunas imágenes detalladas de la placa Arduino MEGA 2560 original. Hay varias formas de saber si la placa Arduino UNO que tienes es original o es un clon.

Cómo reconocer una placa Arduino Original:

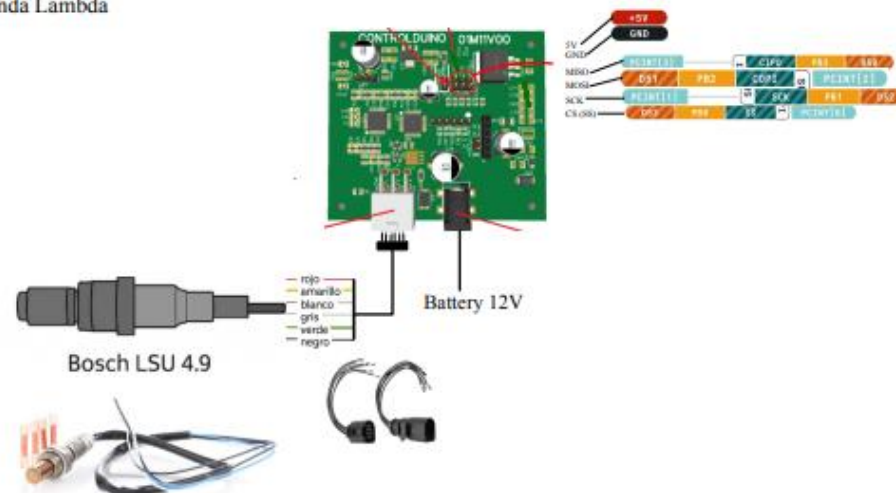
La serigrafía es una capa de tinta que contiene logotipos, símbolos y texto que se utiliza para identificar componentes. También proporciona a la placa un color de fondo. Muchas de las placas más populares, particularmente la Arduino Uno Rev3 (que tiene la mayoría de las falsificaciones) se producen hoy con el nuevo color verde azulado. Prácticamente todas las falsificaciones todavía usan el color azul, y esta puede ser una forma sencilla de identificar una falsificación.

ANEXO II: ESQUEMA Y CONEXIONADO DEL PROTOTIPO FÍSICO

Nota: No caben ambos a la vez, se adjuntan en las dos siguientes páginas.



Mezcla aire-combustible: sonda Lambda



ANEXO III: PROVEEDORES Y COMPRAS DE LOS DISTINTOS ELEMENTOS PARA EL MONTAJE DEL PROTOTIPO

Sensores	Nombre del Sensor	link del proveedor
Monóxido de Carbono (CO)	MQ-7	Tiendatec: https://www.tiendatec.es/maker-zone/modulos/1565-sensor-mq-9-detector-gas-monoxido-carbono-8472496020886.html?utm_source=
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	MQ-137	Amazon: https://www.amazon.es/HUABAN-MQ-137-Sensor-detecci%C3%B3n-de-amoniaco/dp/B089SQ3498?utm_source=chatgpt.com&th=1
Hidrocarburos no quemados (HC)	MQ-2	SF Electronica: https://sfelectronica.es/products/modulo-sensor-deteccion-gas-mq-2-humo-compatible?utm_source=
Dióxido de Carbono (CO ₂)	MH-Z19B	ElectronPerdido: https://electronperdido.com/shop/sensores/calidad-aire/mh-z19-sensor-co2-ndir-5000ppm/
Partículas PM2.5 y PM10	PMS5003	Amazon: https://www.amazon.es/iHaospace-PMS5003-Digital-Particle-Detection/dp/B071J5LL8V?utm_source=
GPS	NEO-6M GPS Module	Conectrol: https://conectrol.com/producto/modulo-gps-neo-6m-para-arduino/
Peso	celda de carga tipo S o de plataforma junto con el módulo HX711	ElectroHobby: https://www.electrohobby.es/peso/422-hx711-amplificador-celda.html?srsId=AfmBOoo0F1RjzAqndDjplHg0wi3SAAnopthDxMLFNra8ggGLrMMO2uJT&utm_source=
Humedad y Temperatura	DHT22 (AM2302)	BricoGreek: https://tienda.bricogreek.com/sensores-temperatura/1839-modulo-sensor-temperatura-y-humedad-dht22-am2302.html?srsId=AfmBOooqhjdUY9zRikpKY7JvgtnlnYHmJQVJBHngVsqgW5etdRgri&utm_source=
Acelerómetro	ADXL335	ElectroYa: https://www.electroya.com/producto/sensor-acelerometro-gy-61-adxl335/?utm_source=
Sonda Lambda	Bosch LSU 4.9	Fmic.eu: https://fmic.eu/47390-bosch-wideband-oxygen-sensor-lsu-4-9-sen-lsu4-9.html.html?srsId=AfmBOooXbZnJtZHNWJ7EcEdC3aoCXp-WwOvidzYJU89GVMqtNkmDldvw&utm_source=
Presión de Neumáticos	HK1100C	tinytronics: https://www.tinytronics.nl/en/sensors/liquid/hk1100c-water-pressure-sensor-0-12bar-g1-4?utm_source=
Pantalla HMI	Nextion NX4832T035	RobotShop: https://eu.robotshop.com/es/products/modulo-de-pantalla-tactil-hmi-tft-lcd-de-35-pulg-nx4832t035-nextion?utm_source=
Otros elementos	Nombre del Sensor	link del proveedor
Arduino	MEGA 2560	Amazon: https://www.amazon.com/-/es/Arduino-Mega-2560-REV3-A000067/dp/B0046AMGW0?utm_source=
Resistencias 1kohmio +2kohmio (2 en serie)	1kohmio[1,25 20uds]	Sparkfun: https://www.sparkfun.com/resistor-1k-ohm-1-4-watt-pt-20-pack-thick-leads.html?utm_source=
Hembra 6 pines	Hembra 6 pines (para sonda lambda)	turibot: https://www.turibot.es/conector-hembra-para-arduino-de-6-pines-4uds?srsId=AfmBOoqgU_xjcod2zX8eED8xhV08IYrCTNLTRgA-hVhIZjb9L_8BfUq&utm_source=
Convertidor CC-CC	CC10-1212SR-E TDK	https://www.mouser.es/ProductDetail/TDK-Lambda/CC10-1212SR-E?qs=sGAEpiMZZMv0DJfhVcWk3sf5TpLEu2EgE0Eh1w7HBko7h1oMuDfg%3D%3D https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/power/switching-power/dc-dc-converter/catalog/cc-e_e.pdf
Control arduino para sonda	01M11V00	Ebay: https://www.ebay.com/itm/255177970888?utm_source=
Cable Jack	Conector DC Hembra 5.5 X 2.1 Mm Negro	CablePelado.es: https://www.cablepelado.es/conector-dc-hembra-5-5-x-2-1-mm-negro?srsId=AfmBOOpC1yJG8zPqnTatI4x6-ySLRIsSGO3PJLJPJgFhIC6e-MJZZFM5&utm_source=
Cables pequeños (120 uds)	Jumper	Amazon: https://www.amazon.es/dp/B074P726ZR?th=1
Caja Spelsberg	TK PC 1813-6F-M 12741501	Amazon: https://www.amazon.es/instalaci%C3%B3n-Spelsberg-13701601-Poliestireno-Policarbonato/dp/B0176IWSR6?utm_source=

ANEXO IV: DATASHEET Y CATÁLOGOS DE LOS SENSORES PROPUESTOS

Contaminante	Enlace Datasheet/Catálogo
Monóxido de Carbono (CO)	https://www.turibot.es/downloads/MQ-7-datasheet.pdf
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	https://grupoelectrostore.com/shop/sensores/gas/modulo-sensor-de-amoniaco-mq-137/
Hidrocarburos no quemados (HC)	https://www.hwlibre.com/guia-completa-sobre-el-sensor-mq-2-para-arduino-funcionamiento-y-aplicaciones/
Dióxido de Carbono (CO ₂)	https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19B.pdf
Partículas PM2.5 y PM10	https://how2electronics.com/interfacing-pms5003-air-quality-sensor-arduino/
Sensores	Enlace Datasheet/Catálogo
GPS	https://tienda.bricogeek.com/12-modulos-gps
Peso	https://www.electan.com/sensores-c-140.html
Humedad y Temperatura	https://blog.turibot.es/index.php/2020/02/17/dht11-y-dht22-sensores-de-temperatura-y-humedad/
Acelerómetro	https://blog.bricogeek.com/noticias/tutoriales/tutorial-arduino-acelerometro-3-ejes-adxl335-3g/
Sonda Lambda	https://www.electan.com/bosch-lsu-4-9
Presión de Neumáticos	https://www.tecneu.com/blogs/tutoriales-de-electronica/monitoreando-la-presion-guia-paso-a-paso-para-utilizar-un-sensor-de-presion-con-arduino
Pantalla HMI	https://nextion.tech/datasheets/nx3224f024/
Otros catálogos	https://www.luisllamas.es/localizacion-gps-con-arduino-y-los-modulos-gps-neo-6/

Carlota del Barrio Núñez

Miguel Tejero Yagüe

1MII E

Universidad Pontificia Comillas

27/07/2025