



# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## DESARROLLO DE UNA SMART CITY EN PONTEVEDRA: GESTIÓN DEL TRÁFICO Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE ESTRUCTURA V2G

Autor: Pablo García López-Arias

Director: Pablo Magliarella

Madrid

Agosto de 2025



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Desarrollo de una Smart City en Pontevedra: gestión del tráfico y optimización energética  
mediante estructura V2G

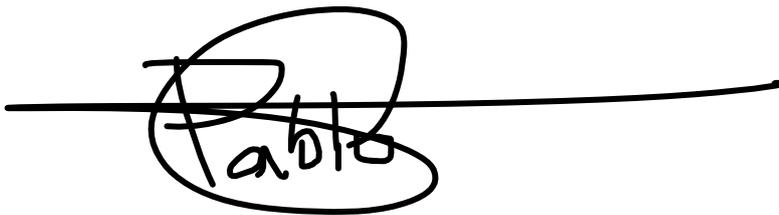
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Pablo', is written over a horizontal line that extends across the page.

Fdo.: Pablo García López-Arias

Fecha: 20/08/2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pablo', is written below the text.

Fdo.: Pablo Magliarella

Fecha: 20/08/2025





# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## DESARROLLO DE UNA SMART CITY EN PONTEVEDRA: GESTIÓN DEL TRÁFICO Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE ESTRUCTURA V2G

Autor: Pablo García López-Arias

Director: Pablo Magliarella

Madrid

Agosto de 2025

# **DESARROLLO DE UNA SMART CITY EN PONTEVEDRA: GESTIÓN DEL TRÁFICO Y OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE ESTRUCTURA V2G**

**Autor: García López-Arias, Pablo.**

Director: Magliarella, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este trabajo propone una infraestructura urbana inteligente para Pontevedra, basada en sensórica distribuida, tecnología V2G y arquitectura Cloud–Edge. Su objetivo es optimizar la movilidad periférica, reducir el uso del vehículo privado y mejorar la eficiencia energética. Los análisis muestran beneficios ambientales y operativos medibles. El modelo es escalable y aplicable a otras ciudades intermedias.

**Palabras clave:** Smart City, Vehicle-to-Grid, Energía, IoT, Edge Computing, Sostenibilidad urbana.

### **1. Introducción**

Las ciudades inteligentes se han consolidado como una pieza clave en la evolución urbana contemporánea. Este Trabajo Fin de Máster se enmarca en ese escenario, centrando su propuesta en el diseño de una infraestructura orientada a mejorar la gestión del tráfico de acceso a Pontevedra. Aprovechando las oportunidades que ofrecen la movilidad eléctrica y la sensórica distribuida, se plantea un sistema que no solo reorganiza los flujos de entrada a la ciudad, sino que también impulsa el uso de modos de transporte sostenibles y permite convertir los vehículos eléctricos en aliados del sistema energético municipal gracias a la tecnología V2G [1][3].

### **2. Definición del proyecto**

La solución propuesta gira en torno a un sistema inteligente desplegado en aparcamientos disuasorios periféricos, que integra puntos de recarga bidireccional, sensores de tráfico y ocupación, conectividad IoT y procesamiento distribuido mediante nodos Edge y servicios Cloud. Todo ello se gestiona desde una plataforma central que permite el seguimiento en tiempo real, el control operativo y la generación de informes personalizados. El diseño abarca desde la arquitectura técnica hasta el análisis legal y económico, con un enfoque práctico que busca compatibilizar tecnología, sostenibilidad

y funcionalidad urbana. El sistema no solo mejora el acceso ordenado a la ciudad, sino que también convierte los VE en almacenes energéticos temporales para apoyar la red local [2][4].

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El sistema se organiza en cuatro capas funcionales: sensores urbanos, infraestructura de carga, red de comunicaciones y plataforma de gestión. Los sensores captan datos sobre ocupación, movilidad y condiciones ambientales. Los cargadores permiten no solo la carga de vehículos eléctricos, sino también la devolución de energía a la red en momentos de mayor demanda. El procesamiento inicial se realiza localmente mediante nodos Edge, y posteriormente se sincroniza con una plataforma Cloud, que ofrece visualización avanzada y control remoto.

Esta arquitectura modular y escalable está diseñada para facilitar la integración de nuevos servicios urbanos a futuro. La plataforma se basa en tecnologías de nube pública, con herramientas de análisis en tiempo real y paneles de control configurables, adaptados a las necesidades operativas del Ayuntamiento [4][5].

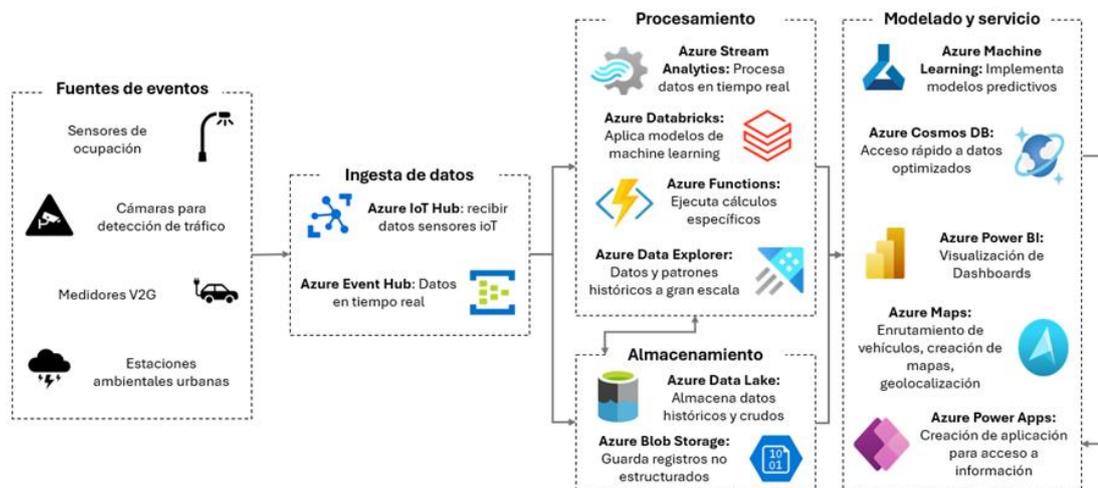
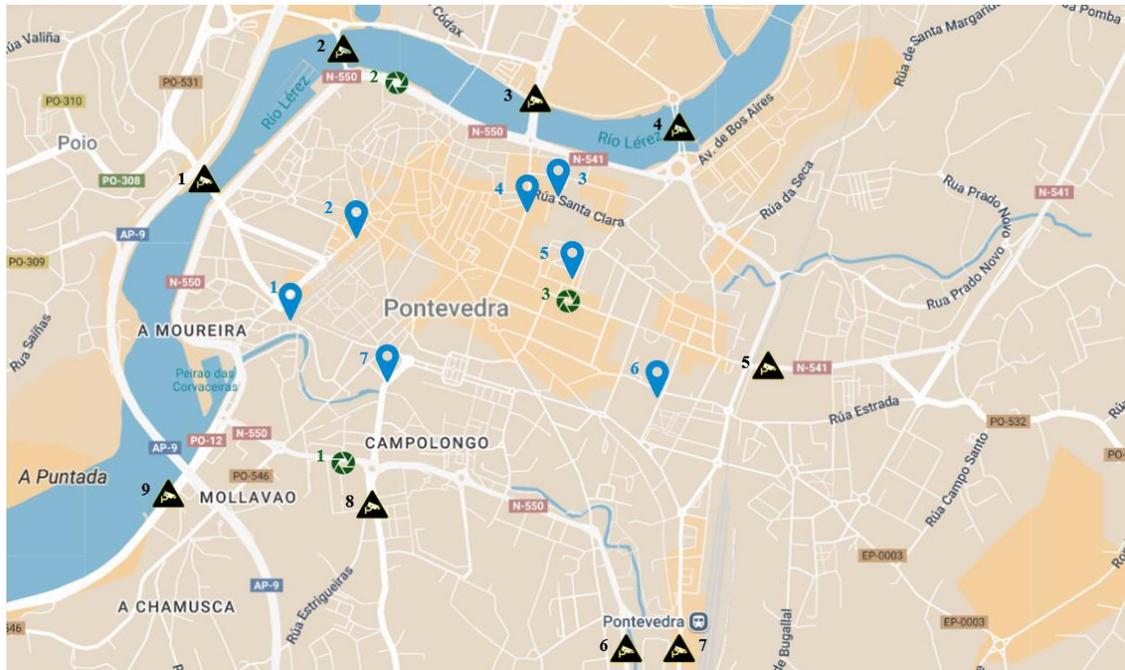


Ilustración 1. Esquema de la arquitectura basada en Azure.

### 4. Resultados

El sistema diseñado permitiría inyectar hasta 75.000 kWh al año en la red eléctrica municipal a través de tecnología V2G, generando un ahorro estimado de 11.000 € anuales. Desde el punto de vista medioambiental, la reorganización del tráfico urbano podría reducir en torno a un 2 % las emisiones relacionadas con la movilidad, lo que se traduce en un ahorro potencial de hasta 2.800 toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Además, se espera

una mejora en la eficiencia de los servicios públicos y una mayor implicación ciudadana gracias al acceso transparente a los datos energéticos. El sistema, concebido como una solución modular y escalable, se alinea con los objetivos del PNIEC, la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética, y los ODS 7, 11 y 13 [6].



*Ilustración 2. Lay-out de dispositivos de captación en Pontevedra.*

## 5. Conclusiones

El proyecto demuestra que es posible aplicar tecnología de forma realista, eficiente y sostenible al contexto urbano actual. La combinación de sensórica distribuida, infraestructura de carga inteligente y gestión basada en datos convierte la movilidad eléctrica en una palanca estratégica para mejorar la eficiencia energética municipal y la planificación del espacio urbano. La solución propuesta no solo responde a los retos actuales de Pontevedra, sino que presenta un modelo adaptable a otros municipios, contribuyendo así al avance hacia ciudades más sostenibles, conectadas y resilientes [3][6].

## 6. Referencias

- [1] Deakin, M. (2014). Smart cities: The state-of-the-art and governance challenge. Deakin Triple Helix, 1(7). <https://doi.org/10.1186/s40604-014-0007-9>
- [2] Orejon-Sanchez, R. D., Crespo-Garcia, D., & Andres-Diaz, J. R. (2022). Smart cities' development in Spain: A comparison of technical and social indicators with reference to

- European cities. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103828>
- [3] Correia, D., Marques, J. L., & Teixeira, L. (2022). The state-of-the-art of smart cities in the European Union. *Smart Cities*, 5(4), 1776–1810. <https://doi.org/10.3390/smartcities5040089>
- [4] Savithramma, R. M., & Ashwini, B. P. (2022). Smart mobility implementation in smart cities: A comprehensive review on state-of-art technologies. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716288>
- [5] Liu, C., Chau, K. T., Wu, D., & Gao, S. (2013). *Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies*. *Proceedings of the IEEE*, 101(11), 2409–2425. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2271951>
- [6] On The Road Trends. (2023). Pontevedra: un ejemplo a seguir en movilidad sostenible. <https://www.ontheroadtrends.com/pontevedra-ejemplo-a-seguir-en-gestion-movilidad-sostenible>

# **SMART CITY DEVELOPMENT IN PONTEVEDRA: TRAFFIC MANAGEMENT AND ENERGY OPTIMIZATION THROUGH V2G INFRASTRUCTURE**

**Author: García López-Arias, Pablo.**

Supervisor: Magliarella, Pablo.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

This project explores the design of an intelligent urban infrastructure tailored for the city of Pontevedra, integrating distributed sensors, Vehicle-to-Grid (V2G) technology, and a hybrid Cloud–Edge architecture. The goal is to streamline peripheral mobility, curb private vehicle usage, and boost municipal energy efficiency. The analysis highlights measurable operational and environmental benefits. The system is scalable, modular, and adaptable to other medium-sized urban environments.

**Keywords:** Smart City, Vehicle-to-Grid, Energy, IoT, Edge Computing, Urban Sustainability.

## **1. Introduction**

Smart cities are increasingly central to contemporary urban development. This master's thesis builds upon that vision by proposing a system to improve traffic access in Pontevedra while embracing the advantages of electric mobility and urban sensing. The approach rethinks traffic flows, promotes sustainable transport, and transforms electric vehicles into energy assets through V2G integration [1][3].

## **2. Project definition**

The proposed solution is centered on an intelligent system deployed in peripheral park-and-ride facilities, combining bidirectional EV charging, mobility and occupancy sensors, IoT communications, and decentralized processing via Edge and Cloud platforms. All system components are integrated through a central interface that enables real-time monitoring, operational control, and customized data reporting. The project includes technical design, economic analysis, legal evaluation, and implementation planning, bridging innovation and practical governance. Ultimately, it empowers parked EVs to act as temporary energy storage to support the local grid [2][4].

### 3. System description

The system is organized into four key layers: sensing, electrical infrastructure, communications, and central management. Sensors capture data on vehicle flow, occupancy, and environmental conditions. Bidirectional chargers enable grid energy injection during peak demand. Edge devices handle initial processing, with synchronization to the cloud for analytics, remote access, and dashboard visualization.

The system is designed to be modular and scalable, supporting future urban services. It leverages public cloud technologies for real-time insights and operational flexibility, tailored to the needs of city managers [4][5].

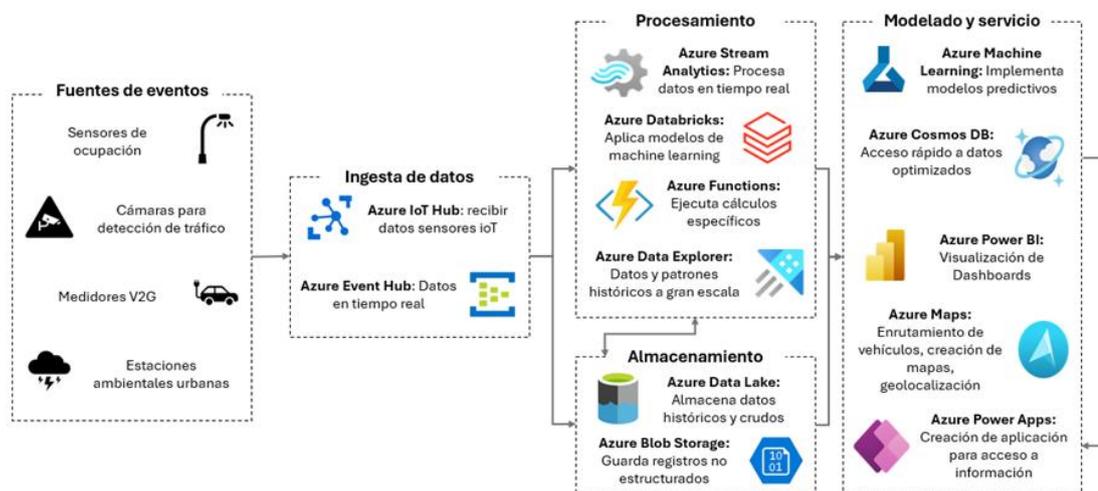
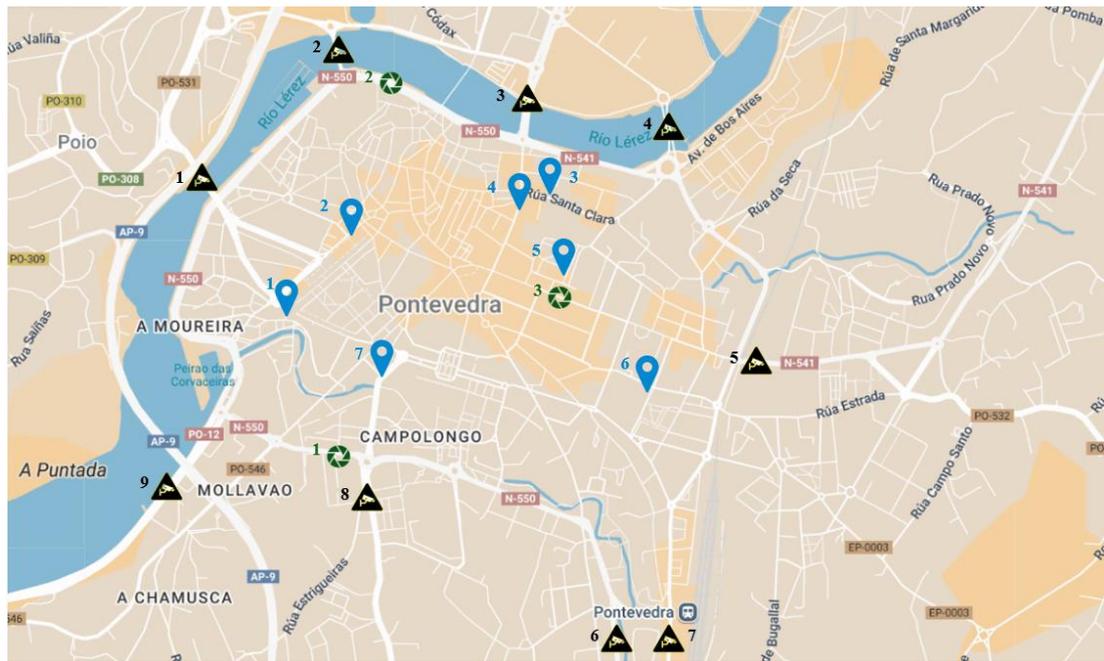


Illustration 3. System's architecture based in Azure.

### 4. Results

The system is estimated to inject up to 75,000 kWh per year into the municipal grid via V2G, yielding an annual savings of approximately €11,000. Environmentally, improved traffic distribution could reduce urban mobility-related emissions by 2%, avoiding up to 2,800 tons of CO<sub>2</sub> annually. The system also enhances public service efficiency and encourages citizen engagement by enabling transparent access to real-time energy data. The entire framework aligns with Spain's PNIEC strategy, Law 7/2021 on Climate Change, and the UN Sustainable Development Goals, particularly SDGs 7, 11, and 13 [6].



*Illustration 4. Sensor's lay-out in Pontevedra city*

## 5. Conclusions

This project demonstrates the feasibility of applying smart technologies to urban contexts in a realistic and impactful way. By combining sensor networks, V2G charging, and cloud-based management, electric mobility becomes a strategic lever for optimizing energy use and urban planning. While tailored to Pontevedra, the solution is adaptable to other municipalities, positioning it as a valuable reference for cities seeking to become more connected, efficient, and sustainable [3][6].

## 6. References

- [1] Deakin, M. (2014). Smart cities: The state-of-the-art and governance challenge. *Deakin Triple Helix*, 1(7). <https://doi.org/10.1186/s40604-014-0007-9>
- [2] Orejon-Sanchez, R. D., Crespo-Garcia, D., & Andres-Diaz, J. R. (2022). Smart cities' development in Spain: A comparison of technical and social indicators with reference to European cities. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103828>
- [3] Correia, D., Marques, J. L., & Teixeira, L. (2022). The state-of-the-art of smart cities in the European Union. *Smart Cities*, 5(4), 1776–1810. <https://doi.org/10.3390/smartcities5040089>
- [4] Savithramma, R. M., & Ashwini, B. P. (2022). Smart mobility implementation in smart cities: A comprehensive review on state-of-art technologies. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716288>

- [5] Liu, C., Chau, K. T., Wu, D., & Gao, S. (2013). *Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies*. Proceedings of the IEEE, 101(11), 2409–2425. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2271951>
- [6] On The Road Trends. (2023). Pontevedra: un ejemplo a seguir en movilidad sostenible. <https://www.ontheroadtrends.com/pontevedra-ejemplo-a-seguir-en-gestion-movilidad-sostenible>

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción y contexto.....</b>	<b>20</b>
1.1 Problemática actual de Pontevedra.....	20
1.1.1 Movilidad.....	20
1.1.2 Gestión energética.....	21
1.2 Objetivos del proyecto.....	22
1.3 Estado del arte: Smart Cities, V2G y modelos de tráfico.....	23
1.3.1 Smart Cities.....	23
1.3.2 Vehicle-to-grid (V2G).....	29
1.3.3 Modelos de gestión del tráfico.....	33
1.4 Justificación de Azure y tecnologías Smart Grid.....	37
1.4.1 Azure y otras opciones.....	37
1.4.2 Tecnologías Smart Grid.....	40
1.5 Regulaciones y normativas aplicables.....	44
1.5.1 Marco normativo europeo.....	44
1.5.2 Normativa española.....	45
1.5.3 Normativa sobre tecnologías digitales y computación en la nube.....	45
1.5.4 Normativa autonómica y local.....	45
<b>Capítulo 2. Diseño técnico del sistema.....</b>	<b>47</b>
2.1 Diagnóstico urbano y distribución de sensores.....	47
2.1.1 Problemática urbana detectada.....	47
2.1.2 Tipología de sensores requeridos.....	49
2.1.3 Ubicación propuesta de sensores.....	51
2.1.4 Criterios de apertura o cierre de calles.....	54
2.2 Tecnologías habilitadoras: cloud y sensores.....	57
2.2.1 Arquitectura general de la solución.....	57
2.2.2 Integración funcional de sensores.....	61
2.3 Implementación de V2G en los estacionamientos.....	63
2.4 Diseño de despliegue y operación.....	65
2.4.1 Plan maestro de implementación.....	65
2.4.2 Estimación del parque tecnológico.....	69

2.4.3	<i>Logística de despliegue y mantenimiento</i> .....	72
2.5	Seguridad y privacidad en la gestión de datos.....	74
2.5.1	<i>Medidas de seguridad técnica</i> .....	74
2.5.2	<i>Privacidad y adecuación normativa</i> .....	75
2.5.3	<i>Mecanismos adicionales de protección</i> .....	75
2.5.4	<i>Normativas y buenas prácticas aplicadas</i> .....	76
2.6	Riesgos técnicos y mitigaciones.....	76
<b>Capítulo 3. Análisis de viabilidad y evaluación del impacto</b> .....		<b>80</b>
3.1	Evaluación técnica.....	80
3.1.1	<i>Latencia esperada y procesamiento en tiempo real</i> .....	80
3.1.2	<i>Escalabilidad del sistema</i> .....	81
3.1.3	<i>Fiabilidad operativa y tolerancia a fallos</i> .....	82
3.1.4	<i>Conclusión técnica</i> .....	82
3.2	Evaluación económica.....	83
3.2.1	<i>Plan de inversión inicial</i> .....	83
3.2.2	<i>Costes operativos y de mantenimiento</i> .....	84
3.2.3	<i>Retorno de inversión y beneficios esperados</i> .....	85
3.2.4	<i>Análisis de sensibilidad</i> .....	93
3.2.5	<i>Análisis de riesgos económicos</i> .....	94
3.3	Evaluación ambiental.....	97
3.4	Evaluación administrativa y legal.....	98
3.4.1	<i>Marco normativo</i> .....	98
3.4.2	<i>Forma jurídica de implementación</i> .....	105
3.4.3	<i>Recursos humanos requeridos</i> .....	107
3.4.4	<i>Licencias y convenios necesarios</i> .....	109
3.4.5	<i>Sistema de gestión administrativa propuesto</i> .....	111
3.4.6	<i>Organigrama del proyecto</i> .....	112
3.5	Evaluación comercial.....	114
3.5.1	<i>Cliente objetivo</i> .....	114
3.5.2	<i>Estrategia de adopción y fases de despliegue</i> .....	115
3.5.3	<i>Estimación de impacto</i> .....	117
<b>Capítulo 4. Conclusiones y líneas futuras</b> .....		<b>119</b>

---

4.1	Resumen de los objetivos alcanzados.....	119
4.2	Conclusiones e impacto del proyecto.....	120
4.3	Limitaciones del estudio.....	121
4.4	Líneas de trabajo futuras .....	123
4.5	Reflexión final.....	124
	<b>Capítulo 5. Bibliografía.....</b>	<b>126</b>
	<b><i>ANEXO I – Visualización de la congestión urbana típica en Pontevedra (Google Maps)</i></b>	
	<b><i>133</i></b>	
	<b><i>ANEXO II – Proyección económico-financiera anual del proyecto según escenarios. 142</i></b>	

## *Índice de figuras*

Ilustración 1. Esquema de la arquitectura basada en Azure. ....	7
Ilustración 2. Lay-out de dispositivos de captación en Pontevedra. ....	8
Illustration 3. System's architecture based in Azure. ....	11
Illustration 4. Sensor's lay-out in Pontevedra city ....	12
Ilustración 5. Cruce en la avenida Reina Victoria (Pontevedra), donde el tráfico está regulado mediante semáforos y elementos disuasorios, integrados en un entorno urbano diseñado para la prioridad peatonal. Fuente: Asociación Ciudades que Caminan (2022) [41]. ....	48
Ilustración 6. Localización propuesta de sensores de tráfico en accesos y vías perimetrales de Pontevedra. ....	52
Ilustración 7. Distribución de sensores de ocupación y medidores inteligentes en aparcamientos estratégicos del centro urbano. ....	53
Ilustración 8. Ubicación planificada de estaciones medioambientales para el control de la calidad del aire en zonas de alta intensidad de tráfico. ....	54
Ilustración 9. Panel informativo en la rotonda del Puente de las Corrientes, Pontevedra [42] .....	56
Ilustración 10. Esquema de la arquitectura basada en Azure. ....	60
Ilustración 11. Cronograma consolidado del plan de implementación .....	69
Ilustración 12. Organigrama del proyecto .....	114
Ilustración 13. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un lunes a las 09:00 .....	134
Ilustración 14. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un martes a las 09:00 .....	134
Ilustración 15. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un miércoles a las 09:00 .....	135
Ilustración 16. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un jueves a las 09:00 .....	135
Ilustración 17. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un viernes a las 09:00 .....	136
Ilustración 18. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un lunes a las 14:30 .....	136
Ilustración 19. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un martes a las 14:30 .....	137
Ilustración 20. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un miércoles a las 14:30 .....	137
Ilustración 21. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un jueves a las 14:30 .....	138
Ilustración 22. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un viernes a las 14:30 .....	138

---

Ilustración 23. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un lunes a las 19:10 .....	139
Ilustración 24. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un martes a las 19:10.....	139
Ilustración 25. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un miércoles a las 19:10 .....	140
Ilustración 26. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un jueves a las 19:10 .....	140
Ilustración 27. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un viernes a las 19:10 .....	141

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Comparación entre Azure, AWS y Google Cloud. ....	40
Tabla 2. Dispositivos de captación elegidos para el proyecto junto con sus principales características técnicas.....	51
Tabla 3. Estimación del parque tecnológico.....	70
Tabla 4. Periodicidad estimada de mantenimiento, sustitución de equipos y distribución de responsabilidades operativas según el tipo de dispositivo en el sistema inteligente de Pontevedra. ....	73
Tabla 5. Matriz de riesgos técnicos del sistema inteligente propuesto, con probabilidad, impacto estimado y medidas de mitigación asociadas. ....	77
Tabla 6. CAPEX inicial del proyecto .....	84
Tabla 7. OPEX anual del proyecto .....	85
Tabla 8. Ingresos y ahorros anuales estimados .....	86
Tabla 9. Indicadores financieros clave .....	92
Tabla 10. Indicadores financieros clave en distintos escenarios .....	94
Tabla 11. Matriz de riesgos económicos .....	95
Tabla 12. Perfiles técnicos requeridos para la fase operativa del sistema, junto con una estimación de su retribución anual bruta. ....	107
Tabla 13. Proyección económico-financiera anual del escenario base .....	142
Tabla 14. Proyección económico-financiera anual del escenario optimista.....	143
Tabla 15. Proyección económico-financiera anual del escenario pesimista .....	144

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO**

Las ciudades están avanzando hacia modelos urbanos más sostenibles e inteligentes, incorporando tecnologías de vanguardia para optimizar tanto la movilidad como la gestión energética. En este contexto, Pontevedra se ha consolidado como un referente en sostenibilidad gracias a sus políticas de peatonalización y reducción del tráfico motorizado. No obstante, estas transformaciones han generado nuevos desafíos, particularmente en la regulación del tráfico y en la eficiencia energética, lo que pone de manifiesto la necesidad de explorar estrategias innovadoras para mejorar estos ámbitos de manera integrada.

Este capítulo ofrece un análisis exhaustivo de la situación actual de Pontevedra en términos de movilidad y consumo energético, estableciendo un marco conceptual que servirá como base para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se examinarán los principales desafíos identificados, contrastándolos con estrategias implementadas en otras ciudades que han abordado problemáticas similares. Asimismo, se evaluarán distintas soluciones tecnológicas con potencial de aplicación en Pontevedra, justificando su viabilidad y pertinencia en el contexto local. Finalmente, se definirán los objetivos específicos del proyecto y se detallarán las normativas aplicables, proporcionando una base metodológica sólida para la formulación de propuestas que permitan optimizar la movilidad y la eficiencia energética de la ciudad.

### ***1.1 PROBLEMÁTICA ACTUAL DE PONTEVEDRA***

#### **1.1.1 MOVILIDAD**

Pontevedra se ha consolidado como un referente global en movilidad sostenible gracias a sus innovadoras políticas de peatonalización y restricción del tráfico motorizado en su núcleo urbano. Desde 1999, la ciudad ha logrado una drástica reducción en la circulación vehicular dentro del casco histórico, disminuyendo el flujo diario de automóviles de 80.000 a 7.000, lo que ha supuesto una reducción del 70 % en las emisiones de CO<sub>2</sub> [1]. Este enfoque ha mejorado significativamente la seguridad vial, prácticamente eliminando los atropellos mortales, al tiempo que ha fomentado el uso de modos de transporte sostenibles, como la movilidad peatonal y ciclista.

No obstante, estas medidas también han planteado desafíos en la redistribución del tráfico. La restricción del tránsito en el centro ha desplazado una parte significativa de la circulación hacia las zonas periféricas y las arterias principales, lo que ha generado un aumento de la congestión en determinadas áreas, especialmente en horas pico. La mayor afluencia de vehículos en calles y avenidas adyacentes al casco histórico ha prolongado los tiempos de desplazamiento y ha intensificado la demanda de aparcamientos subterráneos, cuya ocupación ha crecido considerablemente [1].

Otro de los problemas identificados es la rigidez en la gestión del tráfico, ya que actualmente no existen mecanismos adaptativos que permitan regular la circulación en función de las necesidades del momento. Esta falta de flexibilidad ocasiona que, en periodos de alta afluencia, ciertas vías se saturen sin que se implemente una redistribución eficiente del tráfico, mientras que en otros horarios se detecta una infrautilización de algunas zonas. Asimismo, la planificación del estacionamiento y la gestión de la movilidad en eventos especiales continúan representando un desafío, ya que la infraestructura vial suele verse sobrepasada en estas ocasiones.

Conforme Pontevedra sigue expandiéndose y atrayendo un mayor número de visitantes, estos retos en materia de movilidad se hacen más notorios. Lograr un equilibrio entre la peatonalización y la fluidez del tráfico motorizado es una tarea compleja que requiere un análisis exhaustivo del impacto real de las restricciones y la formulación de estrategias que optimicen el uso de la infraestructura vial sin comprometer los avances en sostenibilidad alcanzados hasta el momento.

### **1.1.2 GESTIÓN ENERGÉTICA**

Si bien Pontevedra ha logrado una notable reducción en sus emisiones de carbono mediante la restricción del tráfico motorizado, su modelo de consumo energético urbano continúa presentando desafíos. Un ejemplo relevante es el gasto en alumbrado público, que asciende a 52,74 euros por habitante, una cifra superior a la media de las ciudades gallegas, que se sitúa en 47,79 euros. Esto evidencia que aún existe un margen significativo para mejorar la eficiencia energética en este ámbito [2].

Otro de los retos en la gestión energética municipal es la creciente incorporación de vehículos eléctricos (VE). A pesar del aumento progresivo en su adopción, la infraestructura urbana aún no está completamente preparada para absorber una expansión masiva de este tipo de movilidad. La

red de puntos de carga presenta limitaciones que podrían dificultar la distribución de la demanda eléctrica en el futuro. Además, el sistema energético urbano sigue dependiendo en gran medida de fuentes convencionales, lo que restringe el aprovechamiento del potencial sostenible que representa la movilidad eléctrica.

Asimismo, al igual que muchas otras ciudades, Pontevedra enfrenta el desafío de armonizar la generación y el consumo energético. Durante las horas diurnas, la producción de energía renovable puede superar la demanda local, mientras que en los periodos de menor generación es necesario recurrir a fuentes suplementarias. La ausencia de sistemas eficientes de almacenamiento y la falta de una infraestructura que permita una gestión dinámica de la energía disponible agravan esta problemática, impidiendo un aprovechamiento óptimo de los recursos renovables.

Para garantizar una gestión energética eficiente en los próximos años, la ciudad deberá abordar estos desafíos mediante estrategias que optimicen el consumo, favorezcan la integración de nuevas fuentes renovables y adapten la infraestructura a las crecientes exigencias de la movilidad eléctrica y del consumo energético urbano.

## ***1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO***

El propósito fundamental del presente Trabajo de Fin de Máster es desarrollar una propuesta tecnológica integral fundamentada en la infraestructura de Ciudad Inteligente (Smart City) para el municipio de Pontevedra. Esta solución busca fomentar la mejora de la movilidad urbana y optimizar la gestión del consumo energético, mediante la aplicación de tecnologías como las redes eléctricas inteligentes (Smart Grids), la comunicación entre dispositivos IoT y el uso de plataformas de computación en la nube, poniendo especial énfasis en la incorporación del modelo Vehicle-to-Grid (V2G). Para concretar este objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Examinar la situación actual de la movilidad y del uso energético en Pontevedra, identificando las principales ineficiencias tanto en la red de transporte como en el sistema eléctrico urbano. Esta evaluación técnica permitirá elaborar un diagnóstico preciso que respalde la necesidad de intervención.

- Investigar las tecnologías esenciales vinculadas a los conceptos de Ciudad Inteligente, Smart Grids y V2G, valorando su nivel de madurez tecnológica, sus beneficios potenciales y la factibilidad de su implementación dentro del contexto local. Esta revisión contemplará asimismo una comparación crítica entre diversas alternativas de computación en la nube y su pertinencia en este escenario.
- Formular una arquitectura de sistema integrada que conecte sensores de tráfico, contadores energéticos e infraestructuras de carga para vehículos eléctricos, todo ello gestionado mediante la plataforma Microsoft Azure, con el fin de habilitar el procesamiento de información en tiempo real y facilitar la automatización en la toma de decisiones.
- Configurar una estrategia para su implantación progresiva, delimitando las fases necesarias para llevar a cabo el despliegue de la solución propuesta, junto con los criterios técnicos, económicos y medioambientales que condicionan su viabilidad.
- Analizar el impacto potencial de la solución planteada, proyectando las mejoras en eficiencia energética, disminución de emisiones contaminantes, descongestión del tráfico urbano y retorno económico, con el objetivo de justificar su futura ejecución y su posible replicación en otras ciudades con características análogas.

### ***1.3 ESTADO DEL ARTE: SMART CITIES, V2G Y MODELOS DE TRÁFICO***

#### **1.3.1 SMART CITIES**

Las Smart Cities constituyen una transformación en la planificación y gestión urbana mediante la implementación de tecnologías avanzadas orientadas a mejorar la sostenibilidad, la eficiencia operativa y la calidad de vida de los ciudadanos. Su desarrollo ha sido catalizado por la digitalización, la expansión del Internet de las Cosas (IoT) y la gestión de datos en tiempo real, elementos que facilitan una toma de decisiones más precisa e informada.

En este contexto, el presente apartado expone un análisis detallado del estado del arte en torno a las Smart Cities, fundamentado en una revisión exhaustiva de la literatura científica. Se explorarán las principales tendencias tecnológicas, las estrategias de implementación adoptadas en distintas ciudades y los desafíos que aún persisten en su desarrollo. Asimismo, se abordará el impacto de estas innovaciones en ámbitos clave como la movilidad, la eficiencia energética y la gobernanza

urbana, proporcionando un marco conceptual sólido para contextualizar los avances y limitaciones de este modelo de ciudad inteligente.

### ***1.3.1.1 Concepto y evolución***

El concepto de Smart City ha experimentado una evolución significativa desde su origen en la década de 1990. En sus inicios, se centraba principalmente en la digitalización y la eficiencia tecnológica como mecanismos para optimizar la gestión urbana. Sin embargo, en la actualidad, el concepto ha adquirido un enfoque más amplio e integral, incorporando elementos clave como la gobernanza participativa, la sostenibilidad ambiental y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos [6].

En este contexto, la Comisión Europea ha desempeñado un papel fundamental en la promoción de iniciativas de Smart Cities, particularmente a través de programas de innovación urbana. Desde 2016, la Unión Europea ha desarrollado más de 34 proyectos activos en este ámbito, reflejando un cambio en el paradigma de planificación urbana que trasciende lo meramente tecnológico y prioriza aspectos sociales, ambientales y económicos [6].

De acuerdo con Deakin [3], una Smart City debe integrar infraestructura digital, gobernanza participativa y redes sociales para garantizar un desarrollo urbano sostenible y equitativo. Esta perspectiva se fundamenta en el modelo de la Triple Hélice, en el cual universidades, industria y gobierno colaboran en la generación de conocimiento e implementación de soluciones innovadoras para las ciudades. Este enfoque multidisciplinario no solo fortalece la capacidad de adaptación de los entornos urbanos, sino que también fomenta una planificación inclusiva y resiliente, alineada con los principios del desarrollo sostenible.

### ***1.3.1.2 Dimensiones***

Diversos estudios han identificado las principales dimensiones que estructuran el concepto de Smart City, destacando su enfoque multidimensional y la necesidad de una integración efectiva de sus componentes clave [4], [6]:

- **Smart Economy:** Fomento de un ecosistema innovador que promueva el desarrollo económico mediante incentivos para startups, digitalización de los servicios financieros y adopción de nuevas tecnologías en los sectores productivos.

- **Smart Governance:** Implementación de una administración pública transparente y participativa, basada en la toma de decisiones fundamentada en datos abiertos y herramientas digitales que faciliten la interacción entre ciudadanos y gobiernos.
- **Smart Mobility:** Uso de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data y sistemas de movilidad sostenible para optimizar el tráfico y el transporte urbano, promoviendo alternativas de movilidad menos contaminantes [5]
- **Smart Environment:** Gestión eficiente de los recursos naturales mediante la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, el fomento de las energías renovables y la implementación de estrategias de sostenibilidad ambiental [4].
- **Smart Living:** Mejora de la calidad de vida de la ciudadanía mediante la digitalización de servicios clave en salud, educación y seguridad pública, facilitando el acceso equitativo a estos recursos.
- **Smart People:** Desarrollo de capacidades digitales e impulso de la formación tecnológica, promoviendo la inclusión social y el empoderamiento ciudadano en el uso de herramientas digitales.

### ***1.3.1.3 Tecnologías***

El desarrollo de las Smart Cities ha sido viabilizado gracias a la convergencia de diversas tecnologías avanzadas, cuya integración permite una gestión urbana más eficiente, automatizada y sostenible. Entre las principales innovaciones que han impulsado este modelo se destacan:

- **Internet de las Cosas (IoT):** Implementación de dispositivos conectados que recopilan y procesan datos en tiempo real, facilitando la optimización de la gestión de infraestructuras y servicios urbanos, como el tráfico, el alumbrado público y la calidad del aire [4], [5].
- **Big Data y Analítica Avanzada:** Utilización de grandes volúmenes de datos para el análisis predictivo y la toma de decisiones basada en evidencia, mejorando la planificación urbana y la eficiencia operativa [6].
- **Inteligencia Artificial (IA) y Machine Learning:** Aplicación de modelos de aprendizaje automático para la optimización del tráfico, la gestión del consumo energético y la prestación de servicios urbanos, permitiendo una respuesta adaptativa y eficiente ante cambios en la demanda.

- Redes 5G y Comunicaciones Avanzadas: Desarrollo de infraestructuras de telecomunicaciones que garantizan una conectividad en tiempo real y una interoperabilidad efectiva entre los sistemas urbanos, favoreciendo la integración de dispositivos IoT y servicios digitales [4].
- Blockchain: Aplicación en seguridad de transacciones digitales, gestión de identidad digital y transparencia en la administración urbana, contribuyendo a la confianza y eficiencia de los sistemas descentralizados [3].
- Energías Renovables y Gestión Inteligente de Recursos: Implementación de redes eléctricas inteligentes (smart grids) que optimizan la producción y el consumo energético, promoviendo el uso de fuentes renovables y reduciendo el impacto ambiental [4].

La sinergia entre estas tecnologías no solo permite una gestión más automatizada y eficiente de las ciudades, sino que también contribuye a la reducción de costes operativos y la mejora en la calidad de los servicios urbanos, consolidando un modelo de desarrollo sostenible y resiliente.

#### ***1.3.1.4 Casos de éxito***

Algunas ciudades han sido pioneras en la implementación de modelos de Smart City, destacándose por su capacidad de innovación y la efectividad de sus estrategias urbanas. Entre los casos más representativos se encuentran:

- Barcelona: Referente en transformación digital, la ciudad ha desarrollado una infraestructura basada en Internet de las Cosas (IoT) y redes de sensores para la gestión del tráfico y la movilidad. Además, ha implementado sistemas de energía inteligente, mejorando la eficiencia en el consumo y distribución de recursos urbanos [6].
- Ámsterdam: Ha consolidado un modelo de Smart City fundamentado en la sostenibilidad y la participación ciudadana. Su enfoque incluye plataformas digitales que permiten una gestión urbana colaborativa, facilitando la interacción entre ciudadanos, empresas y administraciones públicas para optimizar los servicios urbanos [6].
- Copenhague: Ha orientado su estrategia hacia la reducción de emisiones de carbono y el fomento del transporte sostenible. La ciudad ha realizado una inversión significativa en infraestructura para bicicletas y movilidad eléctrica, consolidándose como una de las urbes con menor huella de carbono en Europa [6].

- Santander: Destacado como un proyecto piloto de Smart City en España, cuenta con más de 20,000 sensores urbanos distribuidos estratégicamente para la monitorización del tráfico, la gestión del aparcamiento y el control de la calidad del aire. Este modelo ha permitido una optimización en la planificación urbana basada en datos en tiempo real [6].

Estos ejemplos evidencian que el éxito en la implementación de Smart Cities depende de una inversión estratégica en tecnología, una planificación clara y la participación activa de múltiples actores, incluyendo administraciones públicas, empresas y ciudadanos. La convergencia de estos elementos permite el desarrollo de entornos urbanos más eficientes, sostenibles e inclusivos.

### ***1.3.1.5 Retos y barreras***

A pesar de sus múltiples ventajas, la implementación de Smart Cities enfrenta diversos desafíos estructurales y operativos que deben ser abordados para garantizar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo [3], [6]:

- **Inversión y Sostenibilidad Económica:** La adopción de infraestructuras tecnológicas avanzadas implica altos costes de implementación y mantenimiento, lo que exige estrategias de financiamiento sostenibles y modelos de negocio innovadores para evitar la dependencia exclusiva de fondos públicos.
- **Privacidad y Seguridad de los Datos:** La recopilación masiva de información en entornos urbanos plantea riesgos en la protección de datos ciudadanos, requiriendo el fortalecimiento de políticas de ciberseguridad y marcos regulatorios que minimicen las vulnerabilidades frente a ataques informáticos.
- **Interoperabilidad de Sistemas:** La coexistencia de diversas plataformas tecnológicas y estándares puede generar dificultades en la integración de servicios urbanos. Es fundamental establecer protocolos de interoperabilidad que faciliten la comunicación entre diferentes infraestructuras digitales.
- **Brecha Digital y Participación Ciudadana:** La transformación digital debe garantizar que toda la población tenga acceso equitativo a la tecnología, evitando la exclusión de determinados sectores. Asimismo, es clave fomentar la inclusión digital y promover la participación ciudadana en la toma de decisiones urbanas.

- **Regulación y Gobernanza:** La evolución de las Smart Cities exige una actualización de los marcos normativos para adaptarse a los nuevos modelos de gestión urbana, asegurando una regulación equilibrada que fomente la innovación sin comprometer la seguridad ni los derechos ciudadanos.

Para mitigar estos desafíos, es necesario establecer un marco regulador flexible, desarrollar estrategias de financiamiento sostenibles y fortalecer la cooperación entre los sectores público y privado. La colaboración entre gobiernos, empresas tecnológicas, instituciones académicas y la sociedad civil será determinante para consolidar ciudades inteligentes inclusivas, seguras y sostenibles.

### ***1.3.1.6 Perspectivas futuras***

El futuro de las Smart Cities se orienta hacia una integración aún más profunda de tecnologías emergentes, con el objetivo de mejorar la eficiencia urbana, la sostenibilidad y la calidad de vida de los ciudadanos. Entre las principales tendencias que marcarán la evolución de estas ciudades destacan:

- **Ciudades Autónomas:** Implementación de Inteligencia Artificial (IA) para la gestión automatizada de infraestructuras urbanas, permitiendo una administración más eficiente y una respuesta adaptativa a las necesidades cambiantes del entorno.
- **Urbanismo Predictivo:** Uso de Big Data y analítica avanzada para anticipar tendencias en la planificación urbana, optimizando la distribución del espacio, el desarrollo de infraestructuras y la gestión de recursos en función de patrones de demanda y comportamiento ciudadano.
- **Movilidad Inteligente y Sostenible:** Expansión de soluciones de transporte eléctrico, vehículos autónomos y plataformas de movilidad compartida, fomentando alternativas más sostenibles que reduzcan la congestión y minimicen el impacto ambiental.
- **Ciudades Circulares:** Implementación de modelos de economía circular para reducir la generación de residuos, mejorar la eficiencia en el uso de materiales y promover la reutilización de recursos, alineándose con los principios de sostenibilidad y resiliencia urbana.

En conclusión, las Smart Cities constituyen una de las estrategias clave para el desarrollo urbano sostenible, integrando innovación tecnológica con modelos de gobernanza efectiva y participación ciudadana. Su éxito dependerá de la capacidad de los gobiernos y actores involucrados para consolidar un ecosistema urbano que no solo incorpore avances tecnológicos, sino que también garantice equidad, seguridad y eficiencia en la gestión de los entornos urbanos del futuro.

### **1.3.2 VEHICLE-TO-GRID (V2G)**

La tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) ha emergido como una solución innovadora en la intersección entre la movilidad eléctrica y la gestión de redes energéticas, permitiendo una integración más eficiente y flexible de los vehículos eléctricos (EVs) en el sistema eléctrico. Su principio fundamental radica en la capacidad de los EVs no solo para consumir energía de la red, sino también para almacenarla y devolverla cuando sea necesario, ya sea absorbiendo electricidad en períodos de baja demanda o inyectándola en momentos de picos de consumo [7].

Este enfoque aporta beneficios significativos a la infraestructura energética, al optimizar la gestión del suministro y la demanda, facilitando la incorporación de fuentes de energía renovable y contribuyendo a la estabilidad del sistema eléctrico [8]. La implementación de V2G no solo permite un uso más eficiente de la capacidad instalada, sino que también favorece la reducción de costos energéticos, al posibilitar una gestión dinámica de la energía almacenada en la flota de vehículos eléctricos. De este modo, se presenta como un elemento clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible y resiliente.

#### ***1.3.2.1 Principios fundamentales***

El concepto de Vehicle-to-Grid (V2G) permite que los vehículos eléctricos (EVs) actúen como sistemas de almacenamiento de energía distribuidos, desempeñando un papel clave en la gestión inteligente de la red eléctrica. Esta tecnología posibilita una serie de servicios esenciales para la estabilidad y eficiencia del sistema energético, tales como la regulación de frecuencia, la compensación de potencia reactiva y la gestión del balance energético [9]. Dentro de este modelo, se distinguen dos modos principales de operación:

- G2V (Grid-to-Vehicle): En este modo, los EVs funcionan como consumidores de energía, cargándose desde la red eléctrica. Este proceso se optimiza en períodos de menor demanda para minimizar costos y evitar sobrecargas en el sistema.
- V2G (Vehicle-to-Grid): En esta configuración, los EVs no solo consumen electricidad, sino que también pueden inyectar energía de vuelta a la red cuando se requiera, contribuyendo a la estabilidad del sistema eléctrico y facilitando una mayor integración de fuentes de energía renovable [7].

La implementación de estas estrategias no solo permite una gestión energética más flexible y eficiente, sino que también ofrece beneficios económicos tanto para los usuarios de EVs como para las compañías eléctricas, al incentivar un uso optimizado de la capacidad de almacenamiento distribuido disponible en la flota de vehículos eléctricos.

### ***1.3.2.2 Beneficios***

La tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) ofrece una serie de beneficios estratégicos tanto para la infraestructura energética como para los propietarios de vehículos eléctricos (EVs). Entre sus principales ventajas se destacan:

- Estabilidad de la Red: Los EVs pueden actuar como sistemas de almacenamiento temporal, absorbiendo excedentes de producción de energías renovables intermitentes, como la solar y eólica, y liberando electricidad en momentos de alta demanda. Esto ayuda a mitigar fluctuaciones en la generación energética, mejorando la fiabilidad y resiliencia de la red eléctrica [10].
- Optimización del Consumo Energético: La integración de V2G permite una reducción de la dependencia de fuentes fósiles, ya que la energía almacenada en los vehículos puede utilizarse estratégicamente para equilibrar la demanda, maximizando el uso de fuentes renovables y minimizando la necesidad de recurrir a plantas de generación convencionales [11].
- Generación de Ingresos para Usuarios de EVs: Los propietarios de vehículos eléctricos pueden obtener beneficios económicos al participar en mercados de servicios auxiliares, vendiendo la energía almacenada en sus baterías a la red cuando los precios de la electricidad son más elevados. De este modo, V2G no solo reduce costos energéticos, sino

que también convierte a los EVs en activos financieros dentro del ecosistema energético [8].

En conjunto, estos beneficios posicionan a V2G como una tecnología clave para la transición energética sostenible, fomentando la electromovilidad inteligente y la integración eficiente de energías renovables en las redes urbanas.

### ***1.3.2.3 Desafíos técnicos y económicos***

A pesar de sus múltiples beneficios, la implementación de la tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) enfrenta una serie de desafíos técnicos, regulatorios y económicos que deben ser abordados para garantizar su viabilidad y adopción a gran escala:

- **Impacto en la Degradación de Baterías:** Uno de los principales inconvenientes del V2G es el uso intensivo de las baterías de los vehículos eléctricos, lo que podría acelerar su desgaste y reducción de capacidad. Sin embargo, investigaciones recientes han desarrollado estrategias de carga optimizadas para minimizar este impacto, ajustando la frecuencia y profundidad de los ciclos de carga y descarga [9].
- **Infraestructura y Regulaciones:** La adopción de V2G requiere una evolución en la infraestructura de carga, ya que los sistemas convencionales no están diseñados para soportar flujos bidireccionales de energía. Además, su despliegue a gran escala exige la armonización de normativas y estándares técnicos que faciliten la interoperabilidad entre diferentes redes y operadores eléctricos [12].
- **Modelos de Negocio y Costos:** La viabilidad económica del V2G depende de la existencia de incentivos adecuados y esquemas de compensación atractivos para los propietarios de EVs. Sin mecanismos de monetización claros y tarifas dinámicas que reflejen la demanda de energía, la adopción de esta tecnología podría verse limitada [8].

Para superar estos desafíos, es fundamental que las instituciones gubernamentales, las empresas energéticas y la industria automotriz colaboren en el desarrollo de infraestructuras inteligentes, regulaciones flexibles y modelos de negocio sostenibles, garantizando que V2G se convierta en una solución viable y escalable dentro del ecosistema de las Smart Cities y la transición energética global.

#### ***1.3.2.4 Aplicaciones y casos de éxito***

Algunas ciudades y regiones han comenzado a integrar la tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) en sus redes energéticas, explorando su potencial para mejorar la estabilidad del sistema eléctrico y fomentar la integración de energías renovables. Entre los casos más destacados se encuentran:

- **Dinamarca:** Pionero en la adopción de V2G, ha desarrollado programas piloto exitosos que han demostrado su viabilidad para la gestión de la red y la optimización del uso de energía eólica. Este país ha liderado proyectos que permiten a los vehículos eléctricos no solo consumir, sino también inyectar energía en momentos clave, reduciendo la dependencia de fuentes convencionales [8].
- **Estados Unidos:** Ha implementado V2G en flotas de autobuses eléctricos, especialmente en centros urbanos y sistemas de transporte público, con el objetivo de reducir costos operativos y proporcionar soporte energético a la red durante picos de demanda. Además, algunas empresas energéticas han desarrollado incentivos para que los propietarios de vehículos eléctricos participen en programas de intercambio de energía [11].
- **Japón:** Utiliza V2G en combinación con energías renovables para reforzar la estabilidad del sistema eléctrico, especialmente en zonas propensas a desastres naturales. La capacidad de los EVs para funcionar como fuentes de energía de emergencia ha sido clave en la gestión de crisis, permitiendo a las comunidades mantener el suministro eléctrico en situaciones de apagón [13].

Estos casos demuestran que la integración de V2G en las redes energéticas requiere coordinación entre gobiernos, empresas de energía y fabricantes de vehículos, así como una infraestructura de carga avanzada y marcos regulatorios adaptados. A medida que estas iniciativas continúan expandiéndose, V2G se perfila como un pilar clave en la transición hacia sistemas eléctricos más inteligentes, resilientes y sostenibles.

#### ***1.3.2.5 Perspectivas futuras***

El futuro de la tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) estará determinado por varios factores clave que influirán en su viabilidad, escalabilidad y adopción global. Entre los aspectos más relevantes se encuentran:

- **Mejoras en la Tecnología de Baterías:** La evolución en el desarrollo de baterías de estado sólido y aquellas con mayor densidad energética reducirá significativamente el impacto del V2G en la degradación de las baterías. Estos avances permitirán mayores ciclos de carga y descarga sin afectar la capacidad de almacenamiento, aumentando la rentabilidad de los sistemas V2G para los propietarios de vehículos eléctricos [7].
- **Integración con Redes Inteligentes (Smart Grids):** La convergencia de V2G con redes eléctricas inteligentes permitirá una gestión más eficiente del flujo bidireccional de energía. Gracias a los avances en inteligencia artificial (IA) y sistemas de gestión energética, será posible predecir patrones de demanda y optimizar la interacción entre los vehículos eléctricos y la red, maximizando la estabilidad y el aprovechamiento de energías renovables [10].
- **Regulación y Políticas Públicas:** La implementación masiva de V2G dependerá en gran medida de la creación de marcos regulatorios adecuados que incentiven su adopción. Las políticas gubernamentales deberán establecer estándares de interoperabilidad, modelos de compensación económica atractivos y esquemas de incentivos fiscales para fomentar la participación de usuarios y empresas en estos sistemas [12].

En conjunto, estos factores definirán el papel de V2G en la transición hacia un modelo energético más sostenible y resiliente. Con las mejoras tecnológicas, la digitalización de la red eléctrica y el respaldo normativo adecuado, el V2G tiene el potencial de convertirse en un componente esencial de las ciudades inteligentes y de la movilidad del futuro.

### **1.3.3 MODELOS DE GESTIÓN DEL TRÁFICO**

El modelado del tráfico desempeña un papel esencial en la planificación del transporte, ya que permite analizar la movilidad urbana, predecir congestiones y optimizar la infraestructura vial. Tradicionalmente, estos modelos se basaban en enfoques matemáticos y estadísticos para representar el flujo vehicular y la interacción entre distintos modos de transporte. Sin embargo, en los últimos años, el avance de tecnologías como Big Data, Inteligencia Artificial (IA) e Internet de las Cosas (IoT) ha revolucionado este campo, permitiendo el desarrollo de modelos más precisos, dinámicos y adaptativos.

La combinación de sensores IoT, cámaras de tráfico, datos de telefonía móvil y plataformas de gestión inteligente proporciona una cantidad masiva de información en tiempo real, lo que facilita la implementación de algoritmos predictivos y técnicas de aprendizaje automático para anticipar patrones de congestión y mejorar la distribución del tráfico. Estos modelos avanzados no solo ayudan a optimizar semáforos y redes viales, sino que también favorecen la integración de movilidad sostenible, promoviendo el uso eficiente del transporte público y los vehículos de bajas emisiones.

A medida que las ciudades continúan evolucionando hacia entornos más digitalizados e inteligentes, el modelado del tráfico se consolida como una herramienta clave para garantizar una movilidad más fluida, eficiente y ambientalmente sostenible [17].

### ***1.3.3.1 Clasificación***

El modelado del tráfico se puede clasificar en tres enfoques principales: macroscópico, mesoscópico y microscópico, cada uno con distintas aplicaciones y niveles de detalle. La elección del modelo adecuado depende de los objetivos del análisis, la disponibilidad de datos y la capacidad computacional.

- Modelos macroscópicos: escriben el tráfico desde una perspectiva agregada, considerando el flujo vehicular como un fluido continuo. Se fundamentan en ecuaciones diferenciales que establecen la relación entre densidad, velocidad y flujo de vehículos, permitiendo representar el comportamiento del tráfico a gran escala. Estos modelos son ampliamente utilizados debido a su bajo coste computacional y facilidad de implementación, lo que los hace adecuados para el análisis de redes viales extensas. Sin embargo, presentan ciertas limitaciones, ya que no capturan el comportamiento individual de los conductores ni representan con precisión fenómenos dinámicos complejos, como la formación y disipación de congestión [17].
- Modelos mesoscópicos: representan un enfoque intermedio, combinando elementos de los modelos macroscópicos y microscópicos. En este caso, se modelan grupos de vehículos en lugar de individuos, lo que permite conservar cierto grado de interacción entre conductores sin comprometer significativamente la eficiencia computacional.

Estos modelos son utilizados frecuentemente en simulaciones de tráfico urbano, donde es necesario lograr un equilibrio entre precisión y escalabilidad. A pesar de ofrecer una representación más detallada que los modelos macroscópicos, los enfoques mesoscópicos dependen de supuestos estadísticos y requieren una calibración adecuada para ajustarse a las condiciones reales del tráfico [14].

- Modelos microscópicos: se centran en la simulación del tráfico a nivel individual, analizando el comportamiento de cada vehículo y su interacción con otros conductores y el entorno. Este enfoque permite modelar aspectos detallados como la toma de decisiones de los usuarios, los tiempos de reacción y las estrategias de adelantamiento, lo que los hace ideales para el estudio de dinámicas complejas del tráfico.

Debido a su alta precisión, los modelos microscópicos son utilizados en simulaciones detalladas para evaluar intervenciones en infraestructura vial, políticas de movilidad y sistemas de transporte autónomo. Sin embargo, su implementación demanda un alto costo computacional y requiere una gran cantidad de datos detallados, lo que puede dificultar su aplicación en redes de gran escala [15].

### ***1.3.3.2 Aplicaciones***

Los modelos de tráfico han evolucionado significativamente en los últimos años, incorporando tecnologías avanzadas como inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático, Internet de las Cosas (IoT) y Big Data. Estas herramientas han permitido mejorar la precisión de las predicciones, optimizar la movilidad y facilitar la integración de los sistemas de transporte en entornos urbanos inteligentes. A continuación, se presentan las principales aplicaciones de los modelos de tráfico:

- Predicción y simulación: El modelado del tráfico ha avanzado hacia enfoques basados en IA y analítica de datos, permitiendo realizar predicciones precisas sobre la congestión y las condiciones viales. Gracias al uso de datos históricos y en tiempo real, los modelos actuales pueden identificar patrones de tráfico, anticipar situaciones de alta demanda y optimizar la movilidad.

El uso de aprendizaje automático ha mejorado notablemente la precisión de las estimaciones y ha permitido la automatización de la planificación del tráfico. Sin embargo, la dependencia de datos de alta calidad sigue siendo un desafío clave para su

implementación efectiva, ya que la precisión del modelo depende de la disponibilidad y actualización constante de la información [14].

- **Control y optimización:** Los modelos de tráfico han sido fundamentales en la implementación de sistemas de semáforos inteligentes y estrategias de control dinámico del flujo vehicular. Estas soluciones permiten ajustar la sincronización de señales de tráfico en función de la demanda, reduciendo los tiempos de espera en intersecciones y mejorando la eficiencia del tránsito.

Además, el uso de sensores IoT y algoritmos de optimización facilita la adaptación en tiempo real de la red vial, permitiendo una respuesta más eficiente a eventos como accidentes, congestiones inesperadas y variaciones en el flujo vehicular. No obstante, la efectividad de estos sistemas depende en gran medida de la infraestructura disponible y de la interoperabilidad entre los diferentes dispositivos tecnológicos [16].

- **Integración con Smart Cities:** Las ciudades inteligentes han integrado modelos de tráfico en sus plataformas de gestión urbana, utilizando sensores IoT, computación en la nube y sistemas de inteligencia artificial para optimizar la movilidad. Estas tecnologías han permitido:
  - Reducir la congestión vial mediante la adaptación dinámica de rutas y la gestión eficiente del tráfico.
  - Mejorar la planificación del transporte público, facilitando la integración con sistemas de movilidad compartida.
  - Optimizar el diseño de infraestructuras viales, utilizando datos en tiempo real para la toma de decisiones estratégicas.

Sin embargo, la implementación de estos modelos en ciudades inteligentes sigue enfrentando desafíos importantes, como la interoperabilidad entre sistemas tecnológicos heterogéneos y la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos en tiempo real [17].

### ***1.3.3.3 Desafíos y perspectivas futuras***

A pesar de los avances, el modelado del tráfico enfrenta varios desafíos clave [14], [15]:

- **Calibración y calidad de datos:** La precisión de los modelos depende de una correcta parametrización y la disponibilidad de datos fiables, lo que sigue siendo un reto.

- Computación en tiempo real: Los modelos avanzados requieren alto poder de procesamiento, dificultando su implementación en redes viales dinámicas.
- Integración con infraestructuras existentes: La modernización de sistemas tradicionales para adaptarlos a tecnologías emergentes sigue siendo costosa y compleja.
- Vehículos autónomos y conectados: Su adopción exige nuevos modelos de simulación y marcos regulatorios adecuados.

Superar estos desafíos es esencial para lograr una movilidad eficiente, segura y sostenible, impulsando la evolución de las ciudades inteligentes.

## ***1.4 JUSTIFICACIÓN DE AZURE Y TECNOLOGÍAS SMART GRID***

La implementación de tecnologías avanzadas es crucial para la modernización y optimización de las redes eléctricas. En este contexto, el uso de Microsoft Azure y las tecnologías de Smart Grid se justifica a continuación.

### **1.4.1 AZURE Y OTRAS OPCIONES**

#### ***1.4.1.1 Ventajas de usar un servicio en la nube para Smart Grids***

La computación en la nube optimiza la gestión, seguridad y escalabilidad del sistema eléctrico. Con el aumento de la demanda energética y la expansión de la generación distribuida, se ha convertido en una herramienta clave para mejorar la infraestructura y la toma de decisiones en tiempo real. Entre las ventajas más importantes de la nube para Smart Grids destacan:

- Escalabilidad y flexibilidad: Ajusta recursos de procesamiento y almacenamiento según la demanda, evitando infraestructuras sobredimensionadas y reduciendo costos [24].
- Optimización del procesamiento de datos: Permite analizar grandes volúmenes de información en tiempo real, mejorando la estabilidad del sistema y la integración de energías renovables [22].
- Seguridad y resiliencia: Ofrece cifrado avanzado, protección contra ciberataques y cumplimiento normativo, asegurando la infraestructura eléctrica [24].
- Eficiencia operativa: La automatización y gestión remota reducen los tiempos de respuesta ante fallos, optimizando la calidad del suministro y los costos operativos [22].

En conclusión, la integración de soluciones en la nube mejora la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las redes eléctricas, permitiendo optimizar el consumo y reducir pérdidas.

#### ***1.4.1.2 Microsoft Azure y sus servicios clave***

Microsoft Azure es una de las plataformas en la nube más avanzadas para la gestión de Smart Grids, ofreciendo herramientas especializadas en conectividad, análisis de datos, automatización y seguridad. Su ecosistema permite mejorar la eficiencia, resiliencia e integración de energías renovables en la red eléctrica. Dentro de dicho ecosistema, se pueden destacar servicios claves relacionados con Smart Grids:

- Conectividad y gestión de dispositivos:
  - Azure IoT Hub: conexión segura en tiempo real de sensores y medidores inteligentes, permitiendo una monitorización continua de la red eléctrica [27].
  - Azure Event Grid: sistema de mensajería en tiempo real que automatiza respuestas ante eventos críticos como fluctuaciones de demanda o cortes de suministro [24].
- Análisis de datos y predicción de consumo
  - Azure Synapse Analytics: Plataforma de procesamiento masivo de datos que optimiza la distribución energética y mejora la eficiencia de la red [27].
  - Azure Machine Learning: Aplicación de inteligencia artificial para predecir patrones de consumo, detectar anomalías y anticipar fallos, reduciendo pérdidas [24].
  - Azure Digital Twins: Creación de réplicas digitales de la red eléctrica para simular escenarios y mejorar la planificación operativa [27].
- Seguridad y Gestión de Infraestructura
  - Azure Security Center: Protección avanzada contra ciberataques y accesos no autorizados, asegurando el cumplimiento de estándares de seguridad [23].
  - Azure Kubernetes Service (AKS): Gestión eficiente de aplicaciones en contenedores, facilitando el análisis de datos y la toma de decisiones en la red [24].

Por tanto, la integración de Azure en Smart Grids permite una gestión más segura, eficiente y automatizada, facilitando la transición energética hacia un modelo más sostenible e inteligente.

### 1.4.1.3 Comparación con AWS y Google Cloud

En la administración de Smart Grids, las plataformas de computación en la nube más utilizadas son Microsoft Azure, Amazon Web Services (AWS) y Google Cloud Platform (GCP). Estas soluciones ofrecen herramientas especializadas para conectividad, procesamiento de datos y ciberseguridad, aunque difieren en términos de compatibilidad, costos y facilidad de implementación.

<i>Característica</i>	<i>Azure</i>	<i>AWS</i>	<i>Google Cloud</i>
Integración con IoT	Alta compatibilidad con Azure IoT Hub y Digital Twins	AWS IoT Core, potente, pero con una configuración más compleja	Google Cloud IoT, menos utilizado en infraestructuras energéticas [27].
Análisis de datos en tiempo real	Azure Synapse Analytics permite el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos optimizando el consumo energético	AWS Kinesis ofrece análisis en streaming, aunque con costos más elevados	Google BigQuery es eficaz, pero presenta mayores latencias en el procesamiento [24].
Escalabilidad y costos	Modelo adaptable con costos optimizados en almacenamiento y procesamiento	Costos más elevados en almacenamiento prolongado	Menor precio en instancias grandes, aunque con menos opciones híbridas [25].
Ciberseguridad y cumplimiento normativo	Azure Security Center garantiza cumplimiento normativo avanzado y seguridad integrada	AWS Security Hub, con altos estándares, pero requiere una configuración más detallada	Buen nivel de seguridad, aunque menos especializado en Smart Grids [23].

Facilidad de uso e integración	Integración fluida con Power BI, Microsoft 365 y Active Directory	Documentación extensa y soporte robusto, pero configuración inicial más compleja	Interfaces intuitivas, aunque con menor flexibilidad para infraestructuras híbridas [24].
--------------------------------	---	--	---

*Tabla 1. Comparación entre Azure, AWS y Google Cloud.*

La comparativa mostrada en la tabla anterior demuestra como Microsoft Azure se posiciona como la opción más eficiente para la gestión de Smart Grids debido a su integración avanzada con tecnologías IoT y análisis predictivo, lo que permite la conexión en tiempo real con medidores inteligentes y sistemas automatizados en la red eléctrica [24]. Su capacidad de procesamiento escalable optimiza los costos al gestionar grandes volúmenes de datos sin generar gastos innecesarios, adaptándose a las necesidades del sector energético. Además, destaca por su cumplimiento normativo especializado, ofreciendo certificaciones avanzadas en seguridad y gestión de datos, lo que garantiza la protección de infraestructuras críticas [22].

Otra ventaja clave de Azure es su conectividad con herramientas empresariales, facilitando la integración con plataformas como Power BI y Microsoft Dynamics, lo que permite una mejor visualización y análisis de datos energéticos. Gracias a esta combinación de seguridad, escalabilidad y herramientas avanzadas de gestión, Azure se consolida como la mejor alternativa para impulsar la transición hacia redes eléctricas inteligentes, mejorando la eficiencia y sostenibilidad del sistema energético.

## **1.4.2 TECNOLOGÍAS SMART GRID**

### ***1.4.2.1 Necesidad de modernización de las redes eléctricas***

Durante décadas, las infraestructuras eléctricas convencionales han sido la base del suministro energético a nivel global. No obstante, en el contexto actual de crisis climática, aumento de la demanda y mayor integración de energías renovables, estas redes enfrentan desafíos significativos. La actualización del sistema eléctrico se vuelve esencial para mejorar su eficiencia, fiabilidad y sostenibilidad.

Las redes eléctricas convencionales siguen un esquema unidireccional, en el que la energía fluye desde las plantas generadoras hasta los consumidores sin un control dinámico del consumo. Esta estructura presenta diversas limitaciones:

- Pérdidas en transmisión y distribución: La ausencia de digitalización y automatización genera ineficiencias en el transporte de electricidad, resultando en pérdidas significativas de energía [19].
- Fiabilidad reducida: La falta de sistemas inteligentes de detección y respuesta ante fallos provoca frecuentes interrupciones del servicio, afectando la estabilidad del suministro [18].
- Dificultades para integrar energías renovables: Las redes actuales no están diseñadas para incorporar de manera eficiente la generación distribuida y fuentes intermitentes, como la solar y la eólica [18].
- Deficiencia en la respuesta a la demanda: La inexistencia de herramientas avanzadas para ajustar dinámicamente el suministro según el consumo impide optimizar el uso de la energía, generando ineficiencias en el sistema [19].

En el caso particular de Pontevedra, la necesidad de modernizar la infraestructura eléctrica responde a su ambicioso plan de sostenibilidad y movilidad urbana. Sin una red adaptada a las nuevas dinámicas de la ciudad, se generan problemas de congestión y se desperdician oportunidades para mejorar la eficiencia energética.

#### ***1.4.2.2 Smart Grids: Qué son y cómo funcionan***

Las Smart Grids, o redes eléctricas inteligentes, representan un modelo innovador de gestión de la electricidad que mejora la eficiencia, estabilidad y sostenibilidad del sistema energético. A diferencia de las infraestructuras convencionales, donde la electricidad fluye en una sola dirección (desde las centrales hasta los usuarios), las Smart Grids posibilitan un flujo bidireccional, permitiendo que los consumidores no solo consuman, sino que también generen y compartan energía con la red [19].

El funcionamiento de una Smart Grid se sustenta en tres pilares esenciales:

- Comunicación en tiempo real: a través de sensores, medidores inteligentes y redes digitales, las Smart Grids recopilan información en tiempo real sobre el consumo y la

distribución de energía. Esto permite detectar fallos, prevenir apagones y optimizar el flujo eléctrico, mejorando la confiabilidad del sistema [18].

- Integración de energías renovables: una de sus principales ventajas es la capacidad de incorporar fuentes de energía renovable como la solar y la eólica. Esto permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y aprovechar al máximo la energía limpia, favoreciendo una transición energética más sostenible [18].
- Mayor eficiencia y ahorro energético: la automatización y digitalización de la red minimiza pérdidas de energía, permitiendo que la producción se ajuste dinámicamente a la demanda real. Además, los consumidores pueden monitorear su consumo eléctrico en tiempo real y ajustar su uso, lo que resulta en facturas más bajas y un consumo energético más eficiente

### ***1.4.2.3 Comparación entre red tradicional y Smart Grids***

Las redes eléctricas convencionales operan bajo un modelo unidireccional, en el que la energía se genera en plantas centrales y se distribuye a los usuarios sin posibilidad de interacción ni control dinámico. Aunque este sistema ha sido efectivo durante décadas, presenta ineficiencias en la transmisión, limitaciones para integrar fuentes renovables y escasa flexibilidad ante variaciones en la demanda [20].

En contraste, las Smart Grids adoptan un modelo bidireccional, permitiendo que la electricidad circule en ambas direcciones, lo que posibilita a los usuarios no solo consumir energía, sino también generarla y almacenarla. A través de la implementación de sensores, contadores inteligentes y sistemas automatizados, estas redes pueden optimizar la distribución energética en tiempo real, incrementando la eficiencia del sistema y reduciendo pérdidas eléctricas.

La adopción de una Smart Grid en Pontevedra es una estrategia clave para consolidar su modelo de ciudad sostenible. Su implementación aportaría mayor eficiencia, estabilidad y sostenibilidad al sistema eléctrico, alineándose con los objetivos de movilidad y transición energética de la ciudad.

- Optimización de la movilidad eléctrica: la integración de Vehicle-to-Grid (V2G) permitiría una gestión eficiente de la carga de vehículos eléctricos, evitando sobrecargas y mejorando el equilibrio de la red [22].

- Mayor estabilidad y resiliencia: la capacidad de detectar y corregir fallos automáticamente minimizaría interrupciones en el suministro, asegurando un servicio más fiable [21].
- Reducción de costos y emisiones: disminuir pérdidas energéticas y fomentar el uso de energías renovables contribuiría a un sistema más económico y sostenible [22].
- Participación activa de la ciudadanía: gracias a la digitalización, los consumidores podrían monitorear y optimizar su consumo, reduciendo gastos y fomentando un uso más eficiente de la energía [19].

En conclusión, las Smart Grids representan un avance estratégico frente a las redes eléctricas tradicionales, proporcionando mayor eficiencia, menor impacto ambiental y un suministro más seguro. En una ciudad como Pontevedra, donde la movilidad eléctrica y la eficiencia energética son pilares del desarrollo urbano, la modernización de la red eléctrica garantizaría un futuro más resiliente, sostenible e inteligente.

#### ***1.4.2.4 Precedentes de éxito***

La adopción de Smart Grids ha impulsado la modernización de redes eléctricas en diversas regiones, mejorando la eficiencia, integración de energías renovables y estabilidad del sistema. A continuación, se destacan algunos casos emblemáticos:

- Estados Unidos: Con una inversión de \$11 mil millones a través del American Recovery and Reinvestment Act (2009), se implementaron contadores inteligentes y automatización de la red en ciudades como Houston y Texas, optimizando el consumo y facilitando la integración de energías limpias.
- China: Ha desplegado 300 millones de medidores inteligentes y desarrollado el Sistema de Monitoreo de Área Amplia (WAMS) para mejorar la estabilidad de la red, reducir pérdidas en la transmisión y gestionar eficientemente la generación distribuida.
- Japón y Corea del Sur: Japón ha implementado microrredes inteligentes tras el terremoto de 2011 para reforzar la resiliencia energética, mientras que Corea del Sur ha desarrollado la Smart Grid en la Isla Jeju, integrando energías renovables y V2G para una gestión más eficiente del suministro eléctrico.
- Europa: La Unión Europea ha liderado la modernización energética con proyectos en Italia, Portugal y Alemania. En Milán, se ha desarrollado una infraestructura de red inteligente

urbana, mientras que, en Portugal, la gestión en tiempo real de energías renovables ha optimizado la estabilidad del sistema.

Estos casos demuestran que las Smart Grids son fundamentales para una gestión energética eficiente y sostenible, sirviendo como referencia para su posible implementación en Pontevedra [20].

## ***1.5 REGULACIONES Y NORMATIVAS APLICABLES***

La implantación de tecnologías avanzadas en entornos urbanos, como las Smart Grids, los esquemas Vehicle-to-Grid (V2G) o la administración inteligente tanto del tráfico como de la energía, debe desarrollarse bajo un marco normativo que garantice la legitimidad, la interoperabilidad y la coherencia con los objetivos estratégicos de sostenibilidad urbana. En este apartado se recogen las principales normativas que resultan determinantes en los planos europeo, estatal, autonómico y local, y que inciden, de modo directo o indirecto, en la viabilidad de la solución diseñada para Pontevedra.

### **1.5.1 MARCO NORMATIVO EUROPEO**

La Unión Europea viene liderando un proceso de modernización del sistema energético, promoviendo la digitalización de la red y la reducción de emisiones a través de distintas directivas y reglamentos:

- La Directiva (UE) 2019/944 articula el marco para un mercado eléctrico más participativo y digital, favoreciendo la implicación activa de los consumidores en la generación y gestión energética [28].
- El Reglamento (UE) 2022/869 se orienta a priorizar el desarrollo de infraestructuras energéticas inteligentes, facilitando la integración de renovables y el fomento de la eficiencia [29].
- El Reglamento (UE) 2016/679 (RGPD) constituye la referencia jurídica esencial en la protección de datos personales, adquiriendo especial relevancia para sistemas que gestionan información sensible derivada de sensores IoT o vehículos eléctricos [30].

## 1.5.2 NORMATIVA ESPAÑOLA

En el contexto nacional, existe un entramado legal que tanto condiciona como estimula la adopción de tecnologías energéticas avanzadas, la electromovilidad y la digitalización de infraestructuras:

- La Ley 24/2013, del Sector Eléctrico, estructura el acceso a la red, regula la generación distribuida y define el rol de los usuarios activos [31].
- El Real Decreto 647/2011, relativo a la gestión de la demanda, habilita herramientas fundamentales como la respuesta activa a la demanda, aspecto clave para los sistemas V2G [32].
- La Ley 7/2021, de Cambio Climático y Transición Energética, fija metas nacionales relativas a la electrificación del transporte, la digitalización de las redes y la mejora de la eficiencia [33].
- El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 recoge medidas concretas para fomentar las Smart Grids, digitalizar la red de distribución e impulsar el almacenamiento energético [34].

## 1.5.3 NORMATIVA SOBRE TECNOLOGÍAS DIGITALES Y COMPUTACIÓN EN LA NUBE

Dado que la solución propuesta se fundamenta en plataformas cloud como Microsoft Azure, resulta imprescindible considerar la normativa aplicable al tratamiento y protección de datos:

- La Ley Orgánica 3/2018, que adapta el RGPD al ordenamiento jurídico español, regula el tratamiento de datos personales en el ámbito digital [35].
- Tanto el Esquema Nacional de Seguridad (ENS) como el Esquema Nacional de Interoperabilidad (ENI) establecen los requisitos técnicos y organizativos para sistemas que manipulan datos públicos o de carácter crítico [36].

## 1.5.4 NORMATIVA AUTONÓMICA Y LOCAL

A nivel territorial, existen instrumentos estratégicos que enmarcan el desarrollo de la solución:

- La Estratexia Enerxética de Galicia 2030, promovida por la Xunta, determina objetivos concretos en redes inteligentes, generación distribuida y electrificación del transporte [37].

- 
- El Plan de Acción por el Clima y la Energía Sostenible (PACES) de Pontevedra recoge compromisos específicos de reducción de emisiones, eficiencia urbana y mejora de la movilidad, perfectamente alineados con la propuesta [38].
  - La normativa urbanística local regula la localización de sensores, puntos de recarga o centros de control, imponiendo criterios de integración paisajística, accesibilidad y compatibilidad con las normas municipales de telecomunicaciones y electricidad.

## **Capítulo 2. DISEÑO TÉCNICO DEL SISTEMA**

### **2.1 *DIAGNÓSTICO URBANO Y DISTRIBUCIÓN DE SENSORES***

#### **2.1.1 PROBLEMÁTICA URBANA DETECTADA**

En los últimos años, el casco urbano de Pontevedra ha sido testigo de una transformación profunda, orientada a priorizar la movilidad peatonal. La peatonalización de la avenida Reina Victoria, vigente desde septiembre de 2020, constituye uno de los hitos más representativos de esta nueva orientación. El gobierno local ha centrado sus esfuerzos en restringir drásticamente el tránsito de vehículos motorizados en el centro histórico, lo que ha resultado en una notable reducción del tráfico local, cifrada en un 97 %. Esta estrategia se ha visto acompañada por la progresiva sustitución de semáforos por rotondas y el estrechamiento de las calzadas, buscando así conceder mayor protagonismo tanto a peatones como a ciclistas [39].

En paralelo, se ha reestructurado el sistema de estacionamiento, eliminando numerosas plazas en superficie en el centro y promoviendo el uso de aparcamientos subterráneos, bajo la convicción de que la congestión vehicular se debía fundamentalmente a la circulación generada por la búsqueda de aparcamiento. Esta nueva concepción urbana ha relegado al automóvil a un papel secundario, considerándolo prácticamente un “invitado” en el espacio público [39] [40].

Sin embargo, el análisis de los datos oficiales evidencia que los flujos de tráfico siguen siendo considerablemente elevados en las principales vías de acceso a la ciudad. Según el Mapa de Tráfico 2022 del MITMA, la intensidad media diaria en puntos como la N-550 a la altura de Salcedo supera los 23.000 vehículos, y cifras similares se observan en la PO-11 en Mollabao. Los accesos a la autopista AP-9 presentan incluso valores más altos, con hasta 47.893 vehículos diarios en Pontevedra Norte, de los cuales una parte significativa corresponde a transporte pesado. Esta realidad contrasta con los niveles registrados en el centro urbano a finales de los años noventa, que apenas alcanzaban las 7.000 unidades diarias [39]. Así, el tráfico, desplazado por la peatonalización y el corte de arterias principales, se ha concentrado en los corredores periféricos y en las vías de acceso, generando importantes cuellos de botella en la entrada a la ciudad.

Esta situación se visualiza de forma elocuente en las imágenes de Google Maps tomadas en días laborables, donde los principales accesos presentan franjas de saturación, especialmente en las horas punta de mañana y tarde. El cierre de la avenida Reina Victoria ha obligado a redistribuir la circulación urbana hacia itinerarios alternativos, como a la avenida Manuel del Palacio, que conecta con la PO-11, entre otras. Todo esto ha incrementado la presión sobre las rutas de acceso y ha generado retenciones periódicas en los horarios de mayor afluencia, como son las franjas de 8:00-10:00, 13:30-15:00 y 18:30-20:00, donde existe una alta densidad de vehículos y una circulación extremadamente lenta.



*Ilustración 5. Cruce en la avenida Reina Victoria (Pontevedra), donde el tráfico está regulado mediante semáforos y elementos disuasorios, integrados en un entorno urbano diseñado para la prioridad peatonal. Fuente: Asociación Ciudades que Caminan (2022) [41].*

La problemática se ve acentuada por las recientes medidas adoptadas en materia de estacionamiento. La supresión de plazas en el centro, junto con la habilitación de más de 1.600 plazas gratuitas en la periferia bajo el modelo “aparca y camina”, ha inducido un cambio en los patrones de movilidad, promoviendo recorridos peatonales desde las zonas exteriores hacia el núcleo urbano. Sin embargo, esta reorganización implica también nuevos retos: la gestión eficaz del uso de estas plazas periféricas, la planificación de rutas alternativas, y la priorización de opciones de transporte más sostenibles requieren de un control más preciso y en tiempo real de los

flujos urbanos. A ello se suma la ausencia de mecanismos de control activo en los accesos, como peajes urbanos o sistemas de etiquetas, lo que pone de manifiesto la necesidad de herramientas inteligentes para monitorizar el tráfico y anticipar situaciones de saturación [39].

Frente a este escenario, emerge la importancia de dotar a la ciudad de una infraestructura tecnológica avanzada basada en una red de sensores distribuidos estratégicamente. Esta sensorización urbana debe ser capaz de recopilar datos tanto sobre movilidad como sobre consumo energético, permitiendo así correlacionar información en tiempo real para la gestión dinámica de los flujos residuales, la activación de respuestas automáticas, como desvíos, avisos a la ciudadanía o ajustes en la programación semafórica, y la optimización de sistemas innovadores como el V2G (Vehicle-to-Grid) en los aparcamientos inteligentes. La integración de estos dispositivos se convierte en un elemento esencial para afrontar los desafíos detectados y articular soluciones adaptativas, sentando las bases para el análisis de la tipología de sensores requeridos en el siguiente apartado.

### **2.1.2 TIPOLOGÍA DE SENSORES REQUERIDOS**

La creación de una red inteligente de movilidad y gestión energética en Pontevedra exige el despliegue de una infraestructura de sensores capaz de suministrar información fidedigna y en tiempo real sobre la dinámica del tráfico, la ocupación de los espacios urbanos, la gestión de la carga energética y las variables ambientales. La selección de cada tecnología sensorial ha sido guiada por criterios de robustez, precisión operativa, compatibilidad con arquitecturas IoT, y un historial comprobado en aplicaciones urbanas, procurando siempre una relación equilibrada entre calidad y viabilidad económica. Los sistemas elegidos se encuentran alineados con las recomendaciones vigentes para la implementación de ciudades inteligentes y redes eléctricas avanzadas.

- Cámaras para la detección de tráfico y ocupación: Para supervisar el flujo vehicular en los accesos a la ZBE, intersecciones críticas y áreas peatonales reguladas, se opta por cámaras IP equipadas con procesamiento embebido. El modelo Hikvision iDS-2CD7146G0-IZS posibilita el conteo automático de vehículos, la identificación de congestiones y su categorización por tipología gracias a algoritmos de Deep Learning, eliminando la necesidad de servidores externos. Su robustez frente a condiciones meteorológicas

adversas y su integración eficiente en entornos IoT la posicionan como una solución óptima para el ámbito urbano. Esta tecnología ha sido extensamente empleada en sistemas ITS (Intelligent Transportation Systems) debido a su fiabilidad y capacidad de escalado.

- **Sensores de ocupación para aparcamientos (V2G):** La gestión de la disponibilidad en aparcamientos dotados de infraestructura de carga bidireccional se realizará mediante sensores magnéticos, como el modelo Urbiotica U-Spot M2M. Este sensor identifica de manera instantánea si una plaza se encuentra libre u ocupada, transmitiendo la información a través de LoRaWAN a las pasarelas urbanas. Su autonomía superior a una década, su resistencia a la intemperie y su precisión en entornos urbanos han sido validadas en numerosas ciudades europeas. Asimismo, su instalación no implica obras civiles, lo que representa una reducción significativa de los costes de implementación.
- **Medidores inteligentes en estaciones V2G:** En los puntos de recarga para vehículos eléctricos, se instalarán equipos de medición como el Teltonika TSM250, homologado conforme al estándar OCPP 2.0.1 y con certificación MID. Estos dispositivos permiten monitorizar en tiempo real el flujo energético, tanto de carga como de descarga, facilitando la integración de estos datos en plataformas basadas en la nube. Su empleo es fundamental para garantizar un equilibrio energético flexible y eficiente en la operativa V2G, y son reconocidos por su interoperabilidad con infraestructuras de control energético avanzado.
- **Estaciones ambientales urbanas:** En áreas sensibles, como entornos escolares, corredores peatonales o zonas de elevada densidad poblacional, se prevé la instalación de estaciones compactas, como la Airly PM Sensor Pro, capaces de medir partículas en suspensión (PM1, PM2.5, PM10), contaminantes gaseosos (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) y niveles sonoros. La información generada contribuye a la toma de decisiones respecto a restricciones temporales de tráfico o la adopción de medidas de sostenibilidad reforzadas. Estas estaciones, conectadas a la nube, se integran con facilidad en plataformas de visualización y análisis de datos, como Power BI.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los dispositivos propuestos junto con sus principales capacidades técnicas:

Tabla 2. Dispositivos de captación elegidos para el proyecto junto con sus principales características técnicas.

Sensor	Parámetro	Conectividad	Alimentación	Resolución	Entorno de uso
Urbiotica U-Spot	Ocupación de plaza (parking)	LoRaWAN	Batería interna (hasta 10 años)	Alta (>98%)	Vías urbanas, aparcamiento en superficie
Hikvision iDS-2CD7146G 0-IZS	Imagen + conteo de vehículos	Ethernet (PoE)	Conexión eléctrica	4 MP, análisis de vídeo con IA	Entradas ZBE, intersecciones
Teltonika RUTX08 / RUTX11	Gestión de red / gateway	Ethernet / LTE	Conexión eléctrica	Alta fiabilidad (redundancia WAN)	Armarios técnicos, nodos de red
Sensor Airly PM	PM1, PM2.5, PM10, gases (NO2, O3)	WiFi / LTE / LoRa	Batería o red	±10% (PM), ±15% (gases)	Áreas sensibles (colegios, hospitales)
SmartMeter r Teltonika (ej. TSM250)	Energía consumida / devuelta (V2G)	Ethernet / RS485	Conexión eléctrica	±1% (clase 1 precisión)	Estaciones de recarga, parkings

### 2.1.3 UBICACIÓN PROPUESTA DE SENSORES

Para avanzar en la gestión inteligente tanto del tráfico como del consumo energético en Pontevedra, resulta indispensable desplegar una infraestructura sensorial adecuada en puntos estratégicos del entorno urbano. La configuración propuesta responde a tres objetivos centrales: la supervisión dinámica de los accesos y corredores viales de alta intensidad; la detección de la ocupación en los principales aparcamientos, facilitando la integración de tecnología V2G; y la monitorización ambiental para relacionar la calidad del aire con los niveles de tráfico.

- a. Sensores de tráfico en accesos y vías principales: El diseño contempla la instalación de cámaras IP con capacidades avanzadas de análisis y detección vehicular en tiempo real, distribuidas en nueve localizaciones clave. Estas cámaras, colocadas en los principales accesos y arterias con mayor carga circulatoria, tal y como se muestra en la Ilustración 6, permitirán identificar de manera temprana situaciones de congestión recurrente, constituyendo nodos esenciales para la activación automática de medidas como desvíos, cortes puntuales o ajustes semafóricos. Entre las ubicaciones propuestas se encuentran:
1. PO-531 - a la altura del Puente de la Barca
  2. Puente de las Corrientes
  3. N-550 - altura del Puente de Santiago
  4. Puente de los Tirantes
  5. N-541 - intersección con Calle Doctor Loureiro Crespo y José Malvar Figueroa
  6. N-550 - Avenida de Josefina Arruti
  7. Calle Ramón Otero Pedrayo - junto a la estación de autobuses
  8. PO-0012 - Avenida de Eduardo Blanco Amor
  9. PO-12 - altura de Avenida de Marín

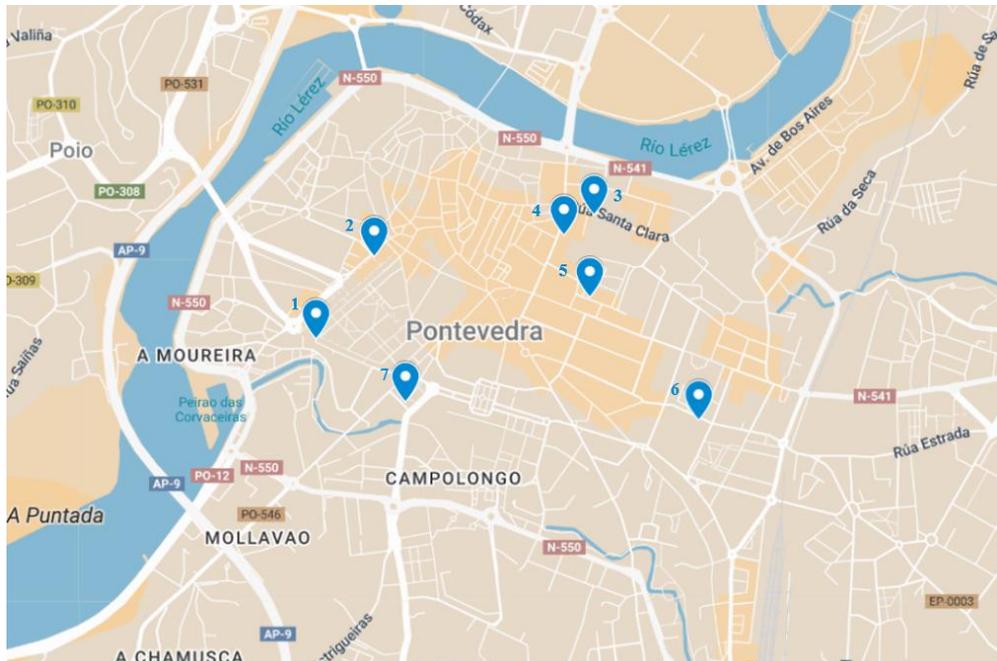


*Ilustración 6. Localización propuesta de sensores de tráfico en accesos y vías perimetrales de Pontevedra.*

- b. Control de ocupación y sensorización en aparcamientos estratégicos: Con el objetivo de optimizar tanto la gestión de plazas como la integración de sistemas inteligentes V2G, se

plantea la instalación de sensores de ocupación específicos en siete aparcamientos de alta demanda. Cada plaza estaría dotada de un sensor magnético individual, mientras que la infraestructura eléctrica de cada aparcamiento contaría con uno o varios medidores inteligentes, en función de las necesidades energéticas y la configuración trifásica de cada instalación. Los aparcamientos incluidos en este despliegue abarcan tanto los principales puntos de entrada como el núcleo urbano. Su distribución se puede observar en la Ilustración 7, donde se relacionan los iconos con los siguientes aparcamientos:

1. Parking Alameda de Pontevedra – Av. Reina Victoria.
2. Parking Plaza de España - Plaza de España.
3. Parking Santa Clara - Calle Santa Clara, 2.
4. Parking Garaje Plaza - Calle Cobián Roffignac, 20.
5. Parking Plaza Barcelos - Plaza de Barcelos.
6. Parking Venezuela - Calle Joaquín Costa, 66.
7. Parking APK2 Central - Calle Gagos de Mendoza.

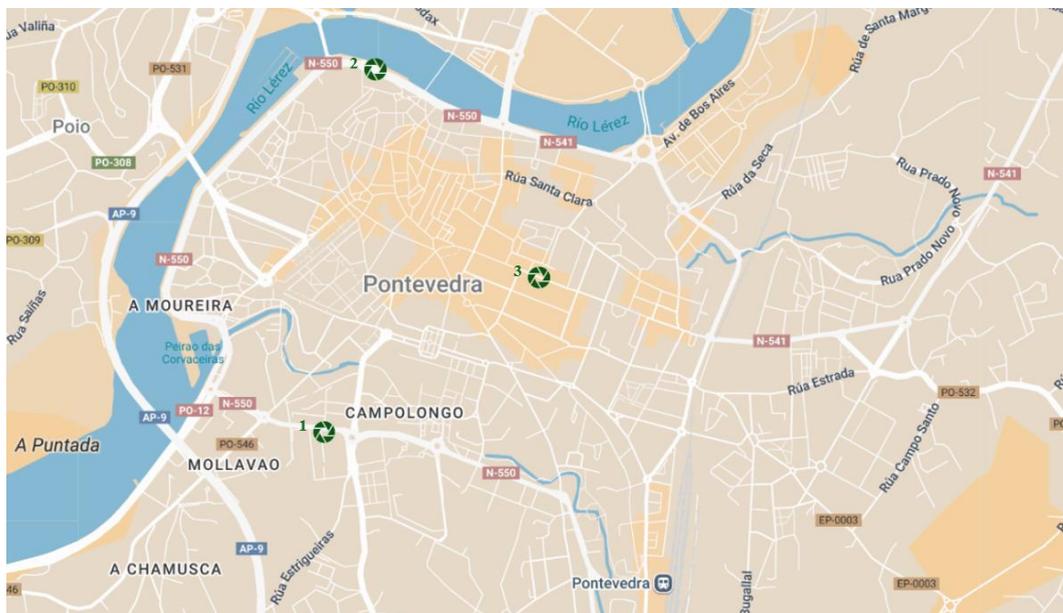


*Ilustración 7. Distribución de sensores de ocupación y medidores inteligentes en aparcamientos estratégicos del centro urbano.*

- c. Estaciones de calidad del aire: Para comprender mejor la relación entre la congestión y el impacto ambiental, se han seleccionado tres puntos estratégicos para instalar estaciones de

medición de la calidad del aire. Estas estaciones, equipadas para analizar parámetros como dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), partículas finas (PM<sub>2.5</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y temperatura, estarán ubicadas en los accesos sur y norte, tal y como se ilustra en la siguiente imagen, donde cada índice corresponde a las siguientes ubicaciones:

1. N-550 - altura de Av. de Manuel del Palacio
2. N-550 - altura de Av. de Uruguay
3. Calle de Benito Corbal



*Ilustración 8. Ubicación planificada de estaciones medioambientales para el control de la calidad del aire en zonas de alta intensidad de tráfico.*

## 2.1.4 CRITERIOS DE APERTURA O CIERRE DE CALLES

En este apartado se detallan las calles susceptibles de gestión dinámica a través del sistema inteligente propuesto, junto con los principales factores técnicos y de contexto que fundamentarán la decisión de abrir o cerrar su acceso en tiempo real. La intervención sobre la red viaria se llevará a cabo de forma selectiva y controlada, únicamente en aquellos tramos donde se demuestre que dicha medida puede mejorar la movilidad urbana y garantizar, al mismo tiempo, condiciones de seguridad y automatización en su ejecución.

#### ***2.1.4.1 Identificación de tramos estratégicos para regulación flexible***

El estudio de la estructura vial de Pontevedra y del papel que desempeña cada calle dentro del entramado urbano permite señalar, entre otros, tres corredores fundamentales, actualmente con acceso exclusivo para el peatón, cuya regulación flexible podría aportar beneficios tangibles a la movilidad general:

- Avenida Reina Victoria, eje tradicional de conexión entre el este y el oeste de la ciudad, así como conexión clave con el puente de la Barca, que conecta la localidad de Poio con Pontevedra, está actualmente reservado al uso peatonal. Reabrir este tramo de manera intermitente, en momentos de alta congestión en arterias como Manuel del Palacio o Eduardo Pondal, permitiría aliviar la presión sobre las vías perimetrales, actuando, así como una vía de descompresión para el tráfico.
- Calle Alfonso XII, que constituye una alternativa de acceso al centro urbano desde el sector norte y desemboca igualmente en el puente de la Barca. Su gestión dinámica podría adaptarse a las necesidades del tráfico en el entorno de la Avenida de Uruguay o de la Calle de la Alameda, modulando la apertura o el cierre según la demanda registrada en las vías principales.
- Puente del Burgo, paso esencial sobre el río Lérez. Controlar su acceso de manera flexible facilitaría el reparto del flujo de vehículos entre los diferentes puentes de la ciudad (incluidos los de Santiago, los Tirantes y la Barca), permitiendo respuestas ágiles ante episodios de saturación o necesidades logísticas específicas.

Estos tramos funcionarán, en esencia, como válvulas de escape o de contención, según lo requieran las circunstancias del momento. La apertura puntual de cualquiera de estas calles irá acompañada, cuando sea necesario, de señalización activa y comunicaciones dirigidas a los conductores en otras vías estratégicas, como la Avenida de Manuel del Palacio o Josefina Arruti, para asegurar que los desvíos se realicen de forma informada y coordinada, sin recurrir a cierres estrictos innecesarios. Para ello, el sistema se puede aprovechar de los paneles informativos ya instalados por el ayuntamiento, a lo largo de las entradas de la ciudad, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.



*Ilustración 9. Panel informativo en la rotonda del Puente de las Corrientes, Pontevedra [42]*

#### **2.1.4.2 Principios para la toma de decisiones**

El sistema actuará guiado por la monitorización en tiempo real de diferentes indicadores obtenidos a través de la red de sensores desplegada en la ciudad. Los criterios que fundamentarán la decisión de modificar el acceso a estas vías son los siguientes:

- Intensidad del tráfico en accesos principales: Cuando se detecten niveles de circulación elevados en puntos neurálgicos como la N-550, N-541 o PO-11, se podrá optar por abrir calles interiores, redistribuyendo así la carga y previniendo la congestión en las arterias periféricas.
- Horarios de actividad escolar: En las franjas de entrada y salida de los centros educativos próximos, el sistema priorizará el cierre temporal de calles cercanas para incrementar la seguridad de los peatones y reducir la exposición de los escolares a contaminantes.
- Condiciones ambientales: Si los sensores medioambientales registran valores críticos de NO<sub>2</sub> o partículas finas (PM<sub>2.5</sub>), el sistema dará preferencia al cierre de aquellas calles que

experimenten mayor intensidad de tráfico, minimizando la exposición de la población a episodios de contaminación.

- Disponibilidad de aparcamiento: Cuando los sistemas V2G detecten que los parkings céntricos han alcanzado una ocupación elevada, se podrá habilitar la apertura temporal de vías alternativas para mejorar el acceso a zonas con plazas libres o, por el contrario, restringir la entrada para evitar el aumento del tráfico inducido.
- Eventos excepcionales o emergencias: En circunstancias especiales como obras, accidentes, celebraciones masivas o necesidades operativas, el sistema contará con la capacidad de abrir o cerrar estos tramos de forma inmediata, conforme a protocolos establecidos previamente.

Estos principios conforman la base sobre la que se desarrollará, en capítulos posteriores, la lógica operativa del sistema inteligente. La gestión de estas decisiones recaerá en servicios digitales en la nube, lo que permitirá respuestas automatizadas y adaptativas, siempre orientadas a la eficiencia en la movilidad urbana y a la preservación del modelo peatonal que define a la ciudad de Pontevedra.

## ***2.2 TECNOLOGÍAS HABILITADORAS: CLOUD Y SENSORES***

### **2.2.1 ARQUITECTURA GENERAL DE LA SOLUCIÓN**

La solución presentada descansa sobre una arquitectura modular y fácilmente escalable, organizada en cinco capas funcionales que permiten gestionar en tiempo real los distintos eventos urbanos. Este enfoque, que sigue las directrices de las plataformas IoT modernas en la nube, hace posible integrar sensores de distintas tecnologías, analizar datos de forma distribuida y ofrecer servicios avanzados tanto a la ciudadanía como a los responsables municipales.

#### ***2.2.1.1 Fuentes de eventos***

En la base del sistema se sitúan distintos sensores inteligentes desplegados en localizaciones estratégicas a lo largo de la ciudad. Estos dispositivos se agrupan, principalmente, en tres categorías:

- Sensores de tráfico, instalados en los principales accesos y vías perimetrales, que miden variables como el volumen, la densidad y la velocidad de los vehículos en tiempo real.
- Sensores de ocupación y consumo energético en aparcamientos públicos clave, que informan tanto sobre la disponibilidad de plazas como sobre el flujo energético relacionado con la tecnología V2G.
- Estaciones medioambientales dedicadas a monitorizar parámetros como la concentración de partículas, el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), facilitando así el seguimiento de la calidad del aire en el entorno urbano.

La información recopilada por esta red sensorica sirve como entrada continua para el sistema, alimentando el proceso de toma de decisiones automatizada. Por ejemplo, en el entorno de Azure, estos dispositivos pueden integrarse mediante Azure IoT Hub, que permite gestionar la recepción segura y eficiente de grandes volúmenes de eventos en tiempo real.

### ***2.2.1.2 Capa de ingesta de datos***

La siguiente etapa es la ingesta, que se produce en tiempo real a través de canales resistentes y preparados para evitar pérdidas. Durante esta fase, los datos se normalizan, se etiquetan según su origen y se preparan para su análisis posterior, asegurando que la información sea coherente y relevante.

En Azure, herramientas como Event Hub o IoT Hub, combinadas con Azure Stream Analytics, son habituales para recoger y canalizar estos datos hacia las siguientes capas del sistema.

### ***2.2.1.3 Procesamiento de datos***

Una vez recopilados, los datos pasan a ser analizados, tanto en streaming como por lotes. Aquí el sistema es capaz de detectar anomalías, reconocer patrones relevantes, por ejemplo, una congestión puntual o la superación de límites en la calidad del aire, y tomar decisiones automatizadas en respuesta. Además, pueden emplearse modelos predictivos entrenados previamente para anticipar tendencias o comportamientos urbanos.

Para este tipo de análisis, soluciones como Azure Databricks permiten trabajar en tiempo real mediante notebooks Spark, y Azure Functions posibilitan respuestas automáticas ante determinados eventos.

#### ***2.2.1.4 Almacenamiento y modelado***

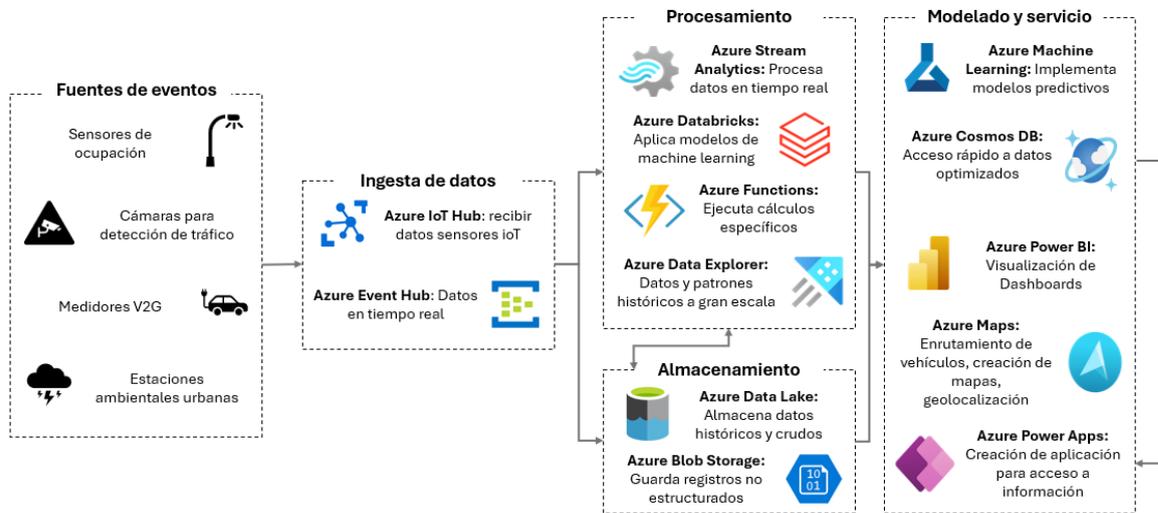
Todos los datos, tanto los estructurados como los no estructurados, se almacenan en una arquitectura de tipo lakehouse, lo que posibilita su explotación tanto a corto plazo (operativa diaria) como en análisis históricos. Esta capa resulta esencial para garantizar la trazabilidad de la información, alimentar modelos de aprendizaje automático y facilitar auditorías sobre las decisiones tomadas por el sistema.

Azure Data Lake Storage Gen2 suele emplearse como repositorio central, con la opción de usar Azure Synapse Analytics para consultas complejas y visualización de datos en dashboards interactivos.

#### ***2.2.1.5 Capa de servicio***

Por último, la capa de servicios traduce los resultados del análisis y modelado en herramientas y acciones concretas: desde paneles de control para la administración, hasta APIs para la integración con otras plataformas municipales, o la activación de elementos físicos como paneles informativos, semáforos o barreras de acceso. Esta capa es la que hace visible y útil la inteligencia del sistema, tanto para los técnicos encargados de la gestión urbana como para los propios ciudadanos.

Como ejemplo, Power BI puede emplearse para mostrar los principales indicadores urbanos en paneles visuales, mientras que Azure App Services facilita la publicación de APIs y servicios digitales para otros sistemas o desarrolladores externos. La modularidad y la independencia de cada capa tecnológica facilitan el mantenimiento y la actualización del sistema, y al mismo tiempo dejan la puerta abierta a futuras integraciones con otros servicios urbanos, tales como sistemas de movilidad compartida, alumbrado inteligente o gestión de residuos.



*Ilustración 10. Esquema de la arquitectura basada en Azure.*

La Ilustración 10 muestra de forma clara la arquitectura lógica de la solución propuesta. El recorrido de los datos se desarrolla en varias etapas:

1. Captura de datos: Diversos sensores IoT, como los de ocupación, cámaras, sistemas V2G y sensores ambientales, recogen información en tiempo real desde distintos puntos urbanos.
2. Transmisión de datos: Esa información se transmite a través de pasarelas de red hacia Azure IoT Hub o Event Hub, donde se lleva a cabo la ingesta en tiempo real.
3. Procesamiento en tiempo real: Los datos son procesados mediante Azure Stream Analytics o Azure Functions, aplicando reglas específicas o cálculos definidos.
4. Almacenamiento y análisis histórico: La información ya procesada se guarda en Azure Data Lake o Blob Storage. Posteriormente, los datos históricos pueden ser explorados en profundidad mediante Azure Data Explorer.
5. Explotación de los datos: Los datos almacenados se utilizan en distintos servicios, como Power BI para la elaboración de dashboards, Machine Learning para realizar predicciones, o Cosmos DB para obtener respuestas ágiles.
6. Acceso del usuario final: Finalmente, los usuarios acceden a estos servicios a través de interfaces como Power Apps o aplicaciones web diseñadas para la gestión urbana.

## **2.2.2 INTEGRACIÓN FUNCIONAL DE SENSORES**

### ***2.2.2.1 Integración técnica en la arquitectura***

Todos los sensores instalados, incluyendo cámaras de tráfico, sensores de ocupación en aparcamientos, estaciones medioambientales y contadores inteligentes vinculados a infraestructura V2G, se conectan mediante redes seguras a una pasarela IoT, que actúa como punto de acceso unificado del sistema. Esta pasarela se implementa a través de Azure IoT Hub, una solución que permite registrar, autenticar y administrar los dispositivos de forma centralizada, además de recopilar los datos que estos generan.

Una vez captados, los datos se transmiten a la nube utilizando protocolos estandarizados como MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) o HTTPS, reconocidos por su eficiencia en el uso del ancho de banda y su compatibilidad con dispositivos embebidos. Para facilitar la interoperabilidad, los sensores emplean formatos de datos estructurados como JSON o XML, lo cual simplifica su integración con los servicios cloud posteriores [26].

### ***2.2.2.2 Flujo de datos y tratamiento***

El sistema realiza una recolección continua de datos relacionados con el tráfico y la energía, permitiendo su procesamiento en tiempo real. Esta información es enviada a Azure Stream Analytics, una plataforma que posibilita el análisis inmediato de los flujos, la detección de patrones relevantes y la generación automática de alertas o eventos, como la apertura temporal de una vía o el ajuste dinámico de carga en un punto V2G.

Tras el análisis inicial, los datos se almacenan en Azure Data Lake, donde se organizan de forma estructurada para facilitar estudios históricos, modelado energético y entrenamiento de algoritmos predictivos. La arquitectura está diseñada para crecer horizontalmente, lo que permite incorporar nuevos tipos de sensores o fuentes de datos futuras sin necesidad de modificar la estructura fundamental del sistema [27].

### ***2.2.2.3 Coordinación entre fuentes de tráfico y energía***

A pesar de que los sensores vinculados al tráfico y al consumo energético pertenecen a dominios distintos, la arquitectura propuesta permite correlacionar sus datos de manera integrada, fomentando decisiones coordinadas. Por ejemplo, si un aparcamiento V2G alcanza un nivel crítico

de ocupación, el sistema puede emitir recomendaciones para regular el acceso de vehículos, considerando la densidad de tráfico en las vías circundantes [27].

Esta capacidad para integrar múltiples perspectivas refuerza la toma de decisiones de manera holística y adaptativa, un aspecto esencial para el desarrollo exitoso de una ciudad verdaderamente inteligente.

#### ***2.2.2.4 Mecanismos de conectividad entre sensores y plataforma cloud***

La variedad de dispositivos IoT presentes en el sistema exige una arquitectura de conectividad flexible, capaz de integrar distintas tecnologías de red según el tipo de sensor, su ubicación y sus necesidades operativas. Esta diversidad se gestiona mediante una arquitectura en capas, que distingue entre sensores con acceso directo a la nube y aquellos que requieren pasarelas intermedias (gateways).

Los sensores de ocupación, instalados en plazas de aparcamiento, emplean tecnología LoRaWAN, que ofrece eficiencia energética y buena cobertura. Como no cuentan con conectividad IP directa, requieren gateways LoRa que captan las señales por radiofrecuencia sub-GHz y las reenvían mediante Ethernet o LTE a la nube. Estos gateways se instalan en lugares estratégicos, como farolas o semáforos, y agrupan datos de decenas o cientos de sensores, lo cual resulta eficaz en zonas urbanas sin infraestructura fija o suministro eléctrico continuo [27].

En cambio, las cámaras de tráfico, que manejan flujos de datos más complejos, se conectan por Ethernet con alimentación PoE, utilizando protocolos como RTSP, ONVIF o APIs específicas. Pueden enviar datos directamente a la nube o a nodos de borde, donde se realiza un análisis preliminar, como detección de matrículas o clasificación vehicular, antes de reenviarlos. Esta arquitectura edge-cloud mejora la eficiencia al reducir la latencia y el tráfico innecesario [45].

Los sensores ambientales, dedicados a medir partículas, gases o temperatura, suelen integrar conectividad WiFi o LTE, lo que permite su conexión directa con Azure IoT Hub. Usan protocolos livianos como MQTT o HTTPS, adecuados para dispositivos con recursos limitados. Su tráfico es bajo y periódico, por lo que solo requieren gateways si hay problemas de cobertura [46].

Los medidores inteligentes de la infraestructura V2G emplean protocolos industriales como RS-485 o Modbus TCP/IP, y se conectan a concentradores que recogen los datos, los estructuran y los

envían a la nube. Estos concentradores también pueden ejecutar lógica de control local, como priorización de carga o desconexión automática, lo que refuerza la resiliencia del sistema.

Desde el punto de vista lógico, todos los dispositivos transmiten datos en formatos estructurados como JSON, lo que permite su integración directa con servicios como Azure Stream Analytics, Data Lake o Time Series Insights. La capa de comunicación está separada de la lógica de aplicación, lo que facilita incorporar nuevos sensores sin modificar el sistema, bastando con registrarlos en IoT Hub y configurar sus reglas de procesamiento y almacenamiento. Este enfoque garantiza interoperabilidad, modularidad y escalabilidad, en línea con los principios actuales de diseño en sistemas distribuidos y ciudades inteligentes [27][45][46].

### ***2.3 IMPLEMENTACIÓN DE V2G EN LOS ESTACIONAMIENTOS***

La tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) transforma el papel de los vehículos eléctricos dentro de la red energética urbana. Ya no se limitan a ser simples puntos de carga: ahora pueden actuar como unidades móviles de almacenamiento de energía. Cuando están conectados, los vehículos pueden inyectar electricidad a la red (modo descarga) o bien absorber excedentes energéticos (modo carga), según las necesidades del sistema. En esencia, se convierten en agentes activos de gestión de la demanda: almacenan energía cuando hay producción sobrante, por ejemplo, durante las horas valle o en momentos de alta generación renovable, y la devuelven a la red cuando el consumo se dispara [43], [44].

Esta capacidad de respuesta ayuda a estabilizar el sistema eléctrico, optimiza el uso de energías renovables y reduce la necesidad de instalar baterías estacionarias adicionales. En el marco de esta propuesta, los aparcamientos públicos seleccionados contarán con estaciones de carga bidireccionales, capaces de gestionar tanto la carga como la descarga de energía desde y hacia los vehículos. Estos cargadores, compatibles con protocolos abiertos como OCPP 2.0.1, se integran en una plataforma centralizada que coordina dos funciones principales:

1. Almacenamiento energético en los vehículos: Cuando la red eléctrica muestra un excedente, por ejemplo, por la baja demanda nocturna o por una fuerte producción fotovoltaica, el sistema lo detecta a través de los medidores inteligentes y activa la carga de los vehículos eléctricos disponibles. Así, las baterías de los EV se llenan

en el momento más eficiente. La plataforma puede incluso reservar plazas de aparcamiento durante las horas valle para facilitar esta estrategia de carga programada.

2. Descarga energética desde los vehículos hacia la red: En momentos de alta demanda, el sistema invierte el flujo energético: ordena que los cargadores bidireccionales extraigan energía de las baterías de los EV conectados para aliviar la carga de la red. Estas operaciones se ejecutan considerando la autonomía mínima requerida por los conductores y el estado de las baterías, de modo que se presten servicios auxiliares, como la regulación de frecuencia, sin comprometer la experiencia del usuario [45].

Para que este modelo funcione, la infraestructura sensórica desempeña un papel clave. Los sensores de ocupación instalados en las plazas de aparcamiento (ya sean magnéticos u ópticos) indican la presencia y conexión de vehículos, mientras que los medidores inteligentes compatibles con OCPP (como el Teltonika TSM250) registran en tiempo real el flujo energético en ambos sentidos. Esta información permite a la plataforma identificar qué vehículos están disponibles para participar en el esquema V2G y cuánta energía se puede gestionar en cada momento.

La comunicación entre los diferentes componentes del sistema se basa en estándares abiertos y servicios cloud. Los cargadores se comunican con el sistema central mediante el protocolo OCPP, que garantiza la interoperabilidad entre estaciones de distintos fabricantes. Las últimas versiones del protocolo (2.0.1 y 2.1) incluso incorporan funcionalidades específicas para la carga bidireccional, habilitando la interacción energética completa de los vehículos con la red [46].

En paralelo, la plataforma IoT en la nube, basada en Azure, registra la telemetría de los cargadores a través de Azure IoT Hub. Cada estación transmite datos sobre sus procesos de carga y descarga, que son procesados en tiempo real. Estos eventos pueden canalizarse mediante Azure Event Grid, un servicio que distribuye notificaciones a otros componentes del sistema. Esto permite, por ejemplo, que se activen automáticamente funciones en la nube (Azure Functions) cuando se detecten umbrales críticos de demanda, desencadenando la descarga energética de vehículos sin intervención humana.

Gracias a esta arquitectura, el sistema puede operar de forma automatizada, con supervisión en tiempo real mediante herramientas como Power BI, y sin necesidad de intervención manual constante. En conjunto, se aprovecha la infraestructura sensórica ya prevista (sensores de ocupación y medidores inteligentes) y se integran estándares abiertos del ecosistema IoT (como OCPP, IoT Hub, Event Grid y Azure Functions) para materializar el modelo V2G en los aparcamientos públicos de Pontevedra [26], [47].

Así, los vehículos eléctricos dejan de ser simples consumidores de energía y pasan a convertirse en activos dinámicos de la red, aportando flexibilidad, resiliencia y eficiencia al sistema eléctrico urbano.

## ***2.4 DISEÑO DE DESPLIEGUE Y OPERACIÓN***

### **2.4.1 PLAN MAESTRO DE IMPLEMENTACIÓN**

La implementación del sistema se organiza en fases diferenciadas, lo que permite una ejecución progresiva, controlada y eficaz. Esta estrategia busca reducir el impacto sobre la infraestructura urbana, coordinar a todos los actores implicados (administraciones, proveedores, contratistas y operadores cloud) y validar cada componente antes de su puesta en producción.

El cronograma parte del diseño técnico detallado y culmina con la operación y el mantenimiento continuo. Cada fase tiene una duración estimada, responsables asignados y tareas específicas. Este enfoque facilita la gestión escalonada de riesgos y permite corregir desvíos mediante revisiones periódicas.

A continuación, se describen las fases del plan maestro de implementación.

#### ***2.4.1.1 Fase 1 – Preparación técnica y planificación***

Esta fase, que abarca los tres primeros meses del proyecto, sienta las bases técnicas, logísticas y normativas para una ejecución eficaz. En este periodo se concretan los siguientes aspectos:

- Inventario y tipología de sensores: A partir del análisis urbano del apartado 2.1, se determina cuántos sensores de cada tipo se necesitarán, con estimaciones de cobertura por unidad. Este detalle se ampliará en el 2.4.2.

- Zonificación urbana y priorización por fases: Con base en la distribución de sensores (2.1.3) y los criterios de apertura de calles (2.1.4), se define una secuencia de actuación por zonas, priorizando áreas clave para el tráfico o el suministro energético.
- Validación legal y de compatibilidad: Se revisan los requisitos normativos y de protección de datos (2.5.2) para asegurar el cumplimiento del RGPD, la Ley 7/2021 y el Esquema Nacional de Seguridad, así como la compatibilidad técnica con la infraestructura cloud descrita en el 2.2.1.
- Configuración preliminar de la arquitectura en la nube: Se despliega una instancia piloto en Azure que replica la arquitectura general (2.2.1), incluyendo IoT Hub, Stream Analytics y Data Lake, con el fin de verificar la conectividad y el flujo correcto de datos [24][25][27].
- Estudio de viabilidad operativa: Se realiza una estimación inicial de costes y logística por componente (instalación, mantenimiento, energía), lo que permite ajustar el cronograma y definir si la gestión será directa o externalizada, como se detalla en el 2.4.3.
- Plan de formación y manuales operativos: Se elabora documentación técnica para el personal municipal y guías para técnicos externos, con protocolos de configuración, alta en Azure y gestión de incidencias.

#### ***2.4.1.2 Fase 2 – Despliegue e integración funcional***

Esta fase, que abarca aproximadamente del mes 4 al 11 del proyecto, representa el corazón operativo del plan. Se enfoca en la instalación física de los dispositivos, su integración con la nube y la activación parcial del sistema en entornos reales. El despliegue se realiza de forma progresiva para validar cada componente por etapas y reducir riesgos.

- Instalación por lotes de sensores y pasarelas: Los dispositivos se despliegan por zonas, siguiendo la planificación previa. Los sensores de ocupación se colocan en aparcamientos prioritarios, los medioambientales en áreas sensibles como escuelas o avenidas transitadas, y las cámaras en accesos restringidos y cruces clave. Al mismo tiempo, se instalan las pasarelas necesarias (gateways LoRa o concentradores RS485), garantizando que cada lote esté operativo antes de pasar al siguiente.
- Alta y configuración en Azure IoT Hub: Cada dispositivo, una vez instalado, se registra en Azure IoT Hub con claves de acceso, ubicación y esquema de datos. Este paso es esencial para asegurar trazabilidad, detectar fallos y gestionar permisos de forma adecuada.

- Configuración de flujos de datos y análisis: Los datos se canalizan hacia Azure Stream Analytics, donde se aplican reglas en tiempo real para identificar eventos como ocupación crítica, congestión o niveles ambientales elevados. Estas reglas activan alertas y almacenan la información en Azure Data Lake, facilitando consultas, análisis históricos y entrenamiento de modelos predictivos (según 2.2.2.2).
- Interoperabilidad entre fuentes heterogéneas: Se comprueba que los datos de distintas fuentes (tráfico, energía, medioambiente) se integren correctamente. La arquitectura descrita en 2.2.2.3 permite cruzar flujos de información para tomar decisiones combinadas, como ajustar accesos según el tráfico y la disponibilidad de carga V2G.
- Activación de visualizaciones y alertas: Se habilitan paneles internos para el personal técnico, mediante Power BI Embedded u otras herramientas con APIs REST. Además, se configuran alertas automáticas por correo o notificación push ante eventos críticos del sistema.

#### ***2.4.1.3 Fase 3 – Validación y operación inicial***

Esta fase, que transcurre entre los meses 12 y 16, marca la transición hacia un sistema plenamente operativo y estable. El objetivo principal es validar su funcionamiento en condiciones reales, ajustar procesos según la experiencia de uso y formalizar el modelo de operación.

- Supervisión técnica en entorno real: El Concello de Pontevedra asume un rol protagonista en la verificación del sistema, comprobando que los sensores recogen los datos esperados, que las pasarelas mantienen su conectividad y que el flujo hacia la nube es estable, sin pérdidas ni duplicidades. Se llevan a cabo auditorías conjuntas entre el equipo municipal y los operadores, a través de pruebas estructuradas en escenarios críticos (alta ocupación, clima adverso, interrupciones de red, etc.).
- Ajuste fino de parámetros y lógica analítica: Los datos obtenidos permiten refinar umbrales en Azure Stream Analytics, modificar reglas de alerta o ajustar la frecuencia de muestreo de algunos sensores. También se optimizan los procesos de almacenamiento en Azure Data Lake, corrigiendo latencias o redundancias. Las estaciones medioambientales se recalibran, y las cámaras se realinean si han sufrido desplazamientos por obras o condiciones externas.
- Formación operativa y protocolos de uso: Se forma al personal técnico del Concello en el manejo del sistema: uso de paneles, gestión de alertas, revisión periódica y respuesta ante

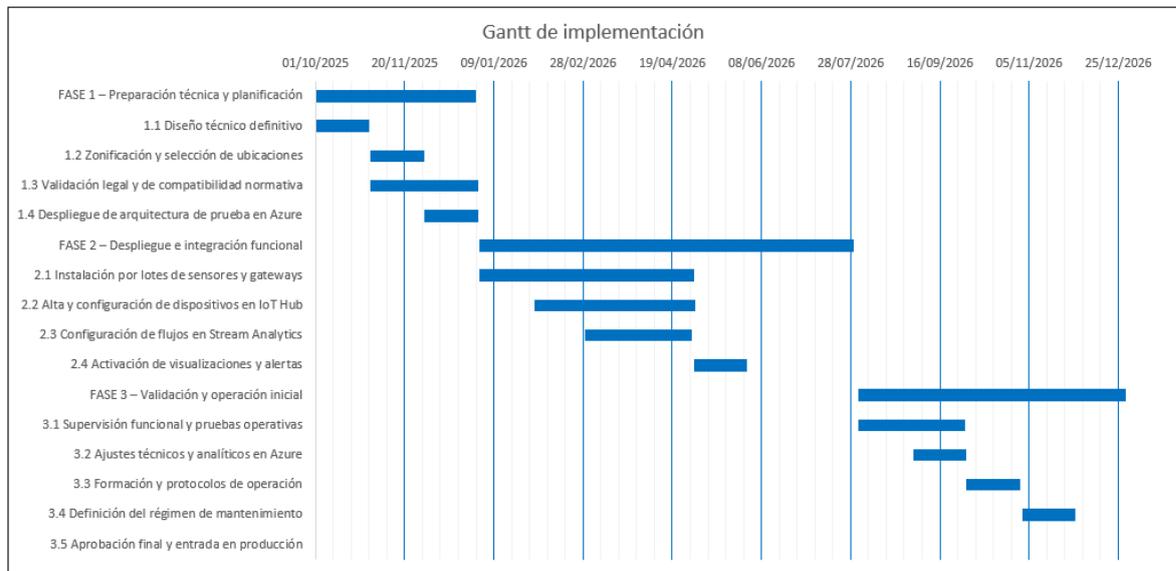
incidencias. Además, se entregan manuales simplificados con procedimientos estandarizados para sustituciones, reinicios o comprobaciones de conectividad.

- **Activación del régimen de mantenimiento:** Se define el modelo de mantenimiento definitivo, incluyendo acuerdos con proveedores o contratas locales para la revisión, limpieza y calibración de los dispositivos. Las frecuencias y responsables se especifican en el apartado 2.4.3.
- **Revisión final y entrada en producción completa:** Tras superar las auditorías y validar el comportamiento del sistema en situaciones normales y exigentes, se elabora un informe técnico de conformidad. Una vez aprobado, el sistema entra oficialmente en producción, funcionando de forma autónoma bajo supervisión y alimentando directamente los sistemas municipales de movilidad, medioambiente y energía.

#### ***2.4.1.4 Cronograma consolidado del plan de implementación***

Para ofrecer una visión clara y ordenada del desarrollo del proyecto, se ha diseñado el siguiente diagrama de Gantt. En él se detallan las fases principales del plan maestro vistas en los apartados anteriores dentro del 2.4.1, junto con sus tareas asociadas, fechas estimadas de inicio y fin, y las dependencias entre ellas. Este cronograma facilita la identificación de hitos clave, el seguimiento del progreso y la detección anticipada de posibles cuellos de botella operativos.

A continuación, se presenta la planificación temporal prevista, desde el inicio del proyecto en octubre de 2025 hasta su entrada en producción en diciembre de 2026:



*Ilustración 11. Cronograma consolidado del plan de implementación*

## 2.4.2 ESTIMACIÓN DEL PARQUE TECNOLÓGICO

El despliegue del sistema requiere una planificación minuciosa de todos los sensores, dispositivos de control y nodos de conectividad que darán forma al ecosistema inteligente. Esta estimación parte del análisis funcional desarrollado en los apartados 2.1 y 2.2, y tiene como objetivo dimensionar correctamente la infraestructura tecnológica necesaria para garantizar una monitorización eficaz del entorno urbano y una gestión dinámica de accesos, aparcamientos y parámetros ambientales.

La siguiente tabla recoge los componentes clave del sistema, el número estimado de unidades, sus costes aproximados y su función dentro del conjunto. En total, se prevé una inversión inicial de 442.715€ en equipamiento físico, que servirá como base para la planificación económica y operativa del proyecto. Esta cifra será revisada y ajustada durante el proceso de licitación técnica, según las especificaciones finales y los acuerdos que se alcancen con los proveedores.

Tabla 3. Estimación del parque tecnológico

<i>Tipo de dispositivo</i>	<i>Nº estimado</i>	<i>Coste unitario aprox. (€)</i>	<i>Coste total aprox. (€)</i>	<i>Justificación técnica y funcional</i>
Sensor de ocupación por plaza (LoRa)	2.421	160	387.360	Detección individual para análisis granular.
Cámara de tráfico inteligente (IP/PoE)	9	725	6.525	1 por cada acceso conflictivo. Visión orientada al control de flujos y matrículas.
Estación medioambiental urbana	3	750	2.250	Ubicadas en zonas de alta sensibilidad ambiental. Sensores PM, NO <sub>2</sub> , ruido, etc.
Contador inteligente (V2G)	218	110	23.980	Uno por cada plaza electrificada (218 plazas) con capacidad de recarga
Gateways IoT (LoRa o LTE)	4	400	1.600	Repartidos por azoteas o edificios municipales. Reciben datos de sensores sin red.
Postes automáticos / vallas levadizas	14	1.500	21.000	Control físico de accesos. Integración con el sistema IoT para regulación

La estimación de sensores de ocupación parte de las más de 2.400 plazas entre los siete parkings mencionados en el apartado 2.1.3. Estos sensores permiten una detección precisa por plaza individual, facilitando tanto la visualización en tiempo real como el análisis predictivo. Se propone el uso de modelos como el Urbiotica U-Spot M2M, que ofrece hasta 10 años de autonomía y conectividad LoRaWAN (ver: <https://urbiotica.com/producto-hardware/u-spot-deteccion-iot-plaza-a-plaza/>).

Las nueve cámaras de tráfico deberán contar con visión nocturna, capacidad de reconocimiento de matrículas (OCR) y resistencia frente a condiciones ambientales adversas. Modelos como la Hikvision DS-2CD4A26FWD-IZS, con certificación IP67, alimentación PoE y funciones inteligentes, cumplen con estos requisitos y tienen un precio aproximado de 725 € (ver: <https://protectionic.com/product/ds-2cd4a26fwd-izs-p/>).

Las tres estaciones medioambientales seleccionadas deben medir partículas PM2.5, NO<sub>2</sub>, temperatura y humedad. Un ejemplo adecuado es la Kunak AIR Lite, diseñada para entornos urbanos y ya implantada en ciudades como Barcelona o Zaragoza, con un coste estimado entre 700 y 800 € (ver: <https://kunakair.com/es/estacion-de-monitoreo-de-calidad-del-aire/>).

Para los contadores V2G, se han previsto 218 unidades, una por cada plaza electrificada entre todos los parkings mencionados, basándose en equipos industriales compatibles con RS485 o Modbus TCP. El modelo Circutor CVM-C4-ITF-485-ICT2, de integración sencilla en plataformas IoT, tiene un coste cercano a los 110 € por unidad (ver: <https://www.mercantilectrico.com/analizador-de-redes-fijo-multimetro-panel-96x96-cvm-c4-itf-485-ict2-circutor-m52706.html>).

Los gateways LoRa necesarios para enlazar sensores con la nube pueden cubrir distancias de hasta 1 km en entornos urbanos. Dispositivos como el MultiTech Conduit MTCDDT Series (modelo global EU868 o similar) permiten gestionar múltiples sensores desde un único nodo y están disponibles en un rango de 350 a 450 €, según la configuración (ver: <https://multitech.com/all-products/cellular/cellular-gateways/multitech-conduit/>).

Finalmente, aunque no se describieron en el apartado 2.1, se incluyen los elementos físicos de control de accesos, como postes retráctiles o barreras automáticas, fundamentales para la

regulación dinámica del tráfico. Aunque no son sensores como tal, son cruciales para el cierre operativo del sistema. Su coste, dependiendo del tipo y la obra civil necesaria, oscila entre los 1.000 y 3.000 €, según soluciones estándar de fabricantes como el Pilomat 275/K12EMB 900A (ver: <https://www.pilomat.com/products/automatic-bollards/products-automatic-bollards-anti-terrorism-k12-m50-emb-series/>).

Esta estimación inicial servirá de referencia para el presupuesto (capítulo 4) y para la planificación logística y de mantenimiento (apartado 2.4.3), aunque deberá validarse durante la licitación técnica, en función de las especificaciones finales, las economías de escala y los acuerdos con proveedores.

### **2.4.3 LOGÍSTICA DE DESPLIEGUE Y MANTENIMIENTO**

La logística operativa del sistema inteligente no solo debe asegurar que todo quede bien instalado al principio, sino también que los equipos funcionen de forma estable a lo largo del tiempo. Para ello, es clave contar con una estrategia de mantenimiento bien definida. En esta sección se detallan la frecuencia recomendada de revisión, limpieza y sustitución de dispositivos, así como quién se encarga de cada tarea, entre el Concello y los agentes técnicos involucrados.

#### ***2.4.3.1 Periodicidad y operaciones de mantenimiento***

Cada dispositivo necesita cuidados distintos, según su exposición al entorno, su importancia dentro del sistema y cuánto se usa:

- Cámaras y radares de tráfico: limpieza e inspección mensual, calibración cada seis meses y revisión completa una vez al año.
- Estaciones medioambientales: mantenimiento cada dos meses, cambio de piezas de muestreo y calibración anual de sensores.
- Sensores de ocupación en aparcamientos: revisión trimestral y recalibración anual.
- Infraestructura V2G (cargadores eléctricos): mantenimiento técnico cada seis meses y limpieza mensual del equipo.
- Gateways IoT y red de comunicación: chequeo trimestral de conectividad y reemplazo cada tres años, como medida preventiva.

- Sistemas de control de accesos (barreras y bolardos): revisión mensual y pruebas funcionales trimestrales.

Estas pautas están en línea con la literatura técnica sobre ciudades inteligentes, que insiste en adaptar el mantenimiento a cada tipo de tecnología, sobre todo en entornos urbanos con alta demanda operativa [5].

#### 2.4.3.2 *Gestión de operación y mantenimiento*

El modelo está pensado para que el Concello de Pontevedra sea quien lidere la operación, al ser el principal impulsor del proyecto. Aun así, hay tareas que conviene externalizar, como el mantenimiento de gateways, estaciones de carga o redes, que pueden ser gestionadas por empresas especializadas bajo contratos “llave en mano”.

Se adopta un modelo de gestión mixto:

- Concello de Pontevedra: supervisa, toma decisiones y gestiona el día a día desde su área de Smart City o Innovación Urbana.
- Proveedores especializados: se encargan del mantenimiento técnico, reemplazo de equipos, soporte en la plataforma Azure (IoT Hub, Stream Analytics, Data Lake...), según acuerdos de nivel de servicio (SLA) definidos.

Este enfoque dual sigue la práctica habitual en otras ciudades europeas que apuestan por lo smart: el gobierno local mantiene el control estratégico y delega lo técnico en manos expertas [5].

*Tabla 4. Periodicidad estimada de mantenimiento, sustitución de equipos y distribución de responsabilidades operativas según el tipo de dispositivo en el sistema inteligente de Pontevedra.*

<i>Tipo de dispositivo</i>	<i>Periodicidad de revisión</i>	<i>Sustitución estimada</i>	<i>Responsable</i>
Sensor de tráfico	Cada 6 meses	Cada 5 años	Concello/Externo
Estación medioambiental	Cada 6 meses	Cada 7 años	Concello/Externo

Cámaras de reconocimiento	Trimestral	Cada 6 años	Concello/Externo
Contadores V2G	Cada 12 meses	Cada 8 años	Proveedor externo
Pasarelas IoT/Gateways	Anual	Cada 6 años	Concello
Postes de control de acceso	Trimestral	Cada 10 años	Concello
Infraestructura de red (fibra)	Anual	Según obsolescencia	Proveedor externo

## **2.5 SEGURIDAD Y PRIVACIDAD EN LA GESTIÓN DE DATOS**

Aunque el sistema diseñado no recopila directamente información personal identificable, los datos urbanos que gestiona, como los relacionados con el consumo energético, la ocupación de aparcamientos o el flujo vehicular, presentan una sensibilidad considerable. A pesar de generarse de forma anónima, su análisis cruzado puede revelar patrones de movilidad, hábitos cotidianos o niveles de actividad específicos en ciertas zonas. Por ejemplo, la combinación de registros de ocupación de parkings con la secuencia temporal de sensores de paso podría permitir inferencias sobre los desplazamientos regulares de determinados colectivos. Por ello, la protección de la privacidad y la seguridad de estos datos debe abordarse desde el propio diseño del sistema [48].

### **2.5.1 MEDIDAS DE SEGURIDAD TÉCNICA**

La solución se apoya en la infraestructura de Microsoft Azure, lo que permite integrar mecanismos avanzados de seguridad de forma nativa, entre ellos:

- Cifrado de datos en tránsito y en reposo: Todos los datos, tanto mientras circulan por la red como cuando quedan almacenados, son protegidos automáticamente mediante algoritmos robustos como AES-256 y protocolos TLS 1.2 o superiores.

- Gestión centralizada de claves: Azure Key Vault se encarga del almacenamiento seguro de certificados y credenciales, restringiendo su acceso incluso para administradores del sistema.
- Control de acceso basado en roles (RBAC): Se implementa el principio de mínimo privilegio, de modo que cada usuario o servicio solo accede a los recursos estrictamente necesarios para su función.
- Aislamiento de red y segmentación: Los componentes críticos del sistema operan dentro de subredes diferenciadas, protegidas mediante Network Security Groups (NSG) y conexiones privadas, reduciendo la exposición a riesgos externos.
- Supervisión continua y alertas proactivas: Azure Defender for Cloud permite monitorear de forma constante la postura de seguridad del entorno, identificando vulnerabilidades, desviaciones de políticas y comportamientos sospechosos mediante alertas automatizadas [49].

### **2.5.2 PRIVACIDAD Y ADECUACIÓN NORMATIVA**

El sistema se ha diseñado conforme a los principios del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), aplicando una lógica de privacidad desde el inicio y por defecto. En este sentido:

- Se ha limitado al máximo la recogida de información. Por ejemplo, las cámaras no graban ni transmiten vídeo, sino que extraen métricas como conteos de vehículos o detección de presencia.
- Los sensores ambientales y de consumo energético no recogen datos que permitan identificar a individuos ni realizan geolocalización personalizada.
- No se ejecutan decisiones automatizadas que afecten de forma significativa o legal a los ciudadanos, ni se construyen perfiles individuales.
- La estructura de los datos excluye campos innecesarios, y el análisis se realiza sobre información agregada, tal como recomienda el considerando 26 del RGPD [50].

### **2.5.3 MECANISMOS ADICIONALES DE PROTECCIÓN**

Para fortalecer aún más la privacidad y la ciberseguridad del sistema, se incorporan medidas adicionales como:

- Anonimización o seudonimización de conjuntos de datos históricos, eliminando o sustituyendo campos que pudieran facilitar la reidentificación por correlación.
- Acceso seguro a las APIs, restringido mediante el uso de tokens temporales y desechables, que evitan la persistencia de credenciales sensibles.
- Registros de acceso auditables, con trazabilidad completa de todas las operaciones críticas, incluyendo información como fecha, origen y finalidad de cada acción.
- Historial de decisiones automatizadas, especialmente aquellas relacionadas con la gestión energética o del aparcamiento, que quedará registrado para su posterior verificación y auditoría.

#### **2.5.4 NORMATIVAS Y BUENAS PRÁCTICAS APLICADAS**

El diseño del sistema también incorpora recomendaciones de organismos especializados a nivel nacional e internacional, entre las que se encuentran:

- ENISA, cuyo informe sobre ciberseguridad en ciudades inteligentes subraya la necesidad de segmentar lógicamente la infraestructura, aplicar controles de acceso granulares y auditar constantemente el flujo de datos [51].
- CCN-CERT, que en su guía STIC 457 identifica riesgos específicos en entornos urbanos conectados, y sugiere mecanismos como la defensa en profundidad y la detección basada en comportamiento [52].
- NIST, a través de su documento IR 8228, resalta la importancia de evaluar impactos en la privacidad incluso en sistemas que no recopilen datos personales explícitos, dada la posibilidad de inferencia por correlación de fuentes [53].

## **2.6 RIESGOS TÉCNICOS Y MITIGACIONES**

El análisis de riesgos técnicos es una herramienta fundamental para anticipar posibles fallos en la operación del sistema y preparar respuestas eficaces antes de que se produzcan. En esta sección se identifican las amenazas más relevantes asociadas a los componentes tecnológicos clave, como comunicaciones, sensores, infraestructura cloud, seguridad y operación física, valorando su probabilidad e impacto, y proponiendo medidas preventivas o correctivas. La matriz de riesgos

sigue estándares habituales de gestión en entornos urbanos inteligentes, adaptados al contexto técnico y operativo del sistema propuesto.

*Tabla 5. Matriz de riesgos técnicos del sistema inteligente propuesto, con probabilidad, impacto estimado y medidas de mitigación asociadas.*

<i>Riesgo técnico identificado</i>	<i>Causa probable</i>	<i>Prob.</i>	<i>Impacto</i>	<i>Nivel de riesgo</i>	<i>Medidas de mitigación</i>
Pérdida de conectividad LoRa	Interferencias, sobrecarga o fallo del gateway	Media	Alta	Alto	Instalar gateways redundantes, realizar pruebas de cobertura previas y habilitar respaldo por red móvil.
Caída del servicio en Azure IoT	Interrupción en la nube o fallo en IoT Hub	Baja	Muy alta	Alto	Arquitectura con tolerancia a fallos, copias de seguridad en Data Lake y contrato SLA con Azure.
Vandalismo o robo de equipos	Interrupción en la nube o fallo en IoT Hub	Alta	Media	Alto	Equipos antivandálicos, fijaciones reforzadas y vigilancia mediante cámaras IP.
Retrasos en el procesamiento de datos	Sobrecarga o cuellos de botella en la nube	Media	Alta	Alto	Escalado horizontal en Azure, buffers en IoT Hub y pruebas de rendimiento.

Desincronización entre sensores y análisis	Fallos de hora o formatos inconsistentes	Media	Media	Medio	Sincronización NTP, validación en la entrada y uso de formatos estandarizados (JSON).
Obsolescencia prematura del hardware	Durabilidad menor a la esperada	Media	Media	Medio	Plan de renovación tecnológica a 5 años y evaluación periódica del equipamiento.
Errores en la configuración de pasarelas	Fallos humanos durante la instalación	Media	Alta	Alto	Uso de plantillas estándar, automatización del despliegue y revisiones externas.
Fallo de cámaras de tráfico	Avería o pérdida de conexión	Alta	Media	Alto	Mantenimiento preventivo, pruebas periódicas y alertas automáticas desde Azure Monitor.
Fallo en estaciones de carga V2G	Sobrecarga o problemas de compatibilidad con vehículos	Baja	Alta	Medio	Certificación técnica previa, pruebas en entorno controlado y actualizaciones OTA.
Incompatibilidad con sistemas municipales	Dificultad para integrarse con plataformas ya existentes	Baja	Media	Bajo	Diseño con APIs abiertas, estandarización y coordinación con técnicos.

Pérdida o fuga de datos	Fallos en transmisión, almacenamiento o permisos	Baja	Muy alta	Alto	Cifrado de datos, copias de seguridad automáticas y control estricto de accesos.
Rechazo del sistema por parte de usuarios	Baja aceptación por técnicos o ciudadanía	Media	Media	Medio	Campañas de comunicación, formación técnica y paneles de control amigables.

La arquitectura basada en tecnologías cloud como Azure IoT Hub, Stream Analytics o Data Lake proporciona una base sólida para mitigar muchos de estos riesgos. Su capacidad para escalar horizontalmente, supervisar dispositivos de forma remota y automatizar alertas y respuestas correctivas contribuye a garantizar una alta disponibilidad y continuidad del servicio. Además, el enfoque modular del sistema facilita la detección precoz de fallos y su aislamiento, evitando afectaciones al conjunto.

Aun así, persisten ciertos riesgos residuales que no pueden eliminarse por completo, como errores humanos en la configuración o el mantenimiento, o incidentes externos imprevistos, como fenómenos meteorológicos extremos o actos de sabotaje. Aunque poco probables, estos escenarios deben estar contemplados en los planes de contingencia y recuperación, especialmente en los elementos más críticos del sistema, como la infraestructura de control de accesos, los gateways de comunicación o los nodos V2G.

---

## **Capítulo 3. ANÁLISIS DE VIABILIDAD Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO**

### **3.1 EVALUACIÓN TÉCNICA**

Dado que este proyecto aún se encuentra en la etapa de diseño y planificación, la evaluación de su desempeño técnico se plantea desde una mirada anticipatoria. El propósito de esta sección es proyectar el comportamiento que se espera del sistema una vez que esté en funcionamiento, tomando como base las capacidades teóricas de los servicios seleccionados, principalmente los ofrecidos por el entorno Microsoft Azure, el tipo de sensores incorporados y las buenas prácticas documentadas en iniciativas comparables de ciudades inteligentes. Esta estimación se organiza en torno a cinco dimensiones clave: la latencia en el procesamiento de datos, la fiabilidad del sistema, su capacidad de escalamiento, la disponibilidad a nivel global y la resiliencia frente a fallos. Cada una de estas dimensiones se fundamenta en fuentes técnicas, especificaciones de fabricantes y estudios académicos sobre implementaciones urbanas de tecnologías IoT.

#### **3.1.1 LATENCIA ESPERADA Y PROCESAMIENTO EN TIEMPO REAL**

Uno de los propósitos fundamentales del sistema propuesto es facilitar una respuesta urbana en tiempo real ante eventos detectados por los sensores, como la congestión vehicular, la disponibilidad de plazas de aparcamiento o la saturación en estaciones V2G. Para alcanzar este objetivo, la arquitectura diseñada se apoya en Azure IoT Hub como punto de ingreso de datos y en Azure Stream Analytics para su procesamiento inmediato. Este flujo se enmarca dentro de un modelo de arquitectura del tipo hot path, en el que la latencia reviste un carácter crítico.

De acuerdo con pruebas documentadas en implementaciones reales con medidores inteligentes en entornos urbanos, la combinación de IoT Hub y Stream Analytics permite detectar y reaccionar ante eventos con una latencia media inferior a los 2 segundos, siempre que se utilicen protocolos ligeros como MQTT y se mantenga una conexión de red local estable [27].

En el contexto urbano de Pontevedra, donde el volumen de eventos simultáneos se mantiene dentro de márgenes manejables (menos de 10.000 eventos por minuto), se espera que el sistema alcance un rendimiento comparable. Además, la integración de pasarelas IoT locales (gateways) permite incorporar lógica de buffering y mecanismos de reintento ante pérdidas puntuales de conectividad, lo que reduce significativamente el riesgo de latencia acumulada o pérdida de datos esenciales.

La adopción de este modelo arquitectónico garantiza que decisiones operativas, como la regulación de accesos, la priorización del tráfico o la redirección de usuarios hacia aparcamientos alternativos, puedan ejecutarse con una inmediatez efectiva, incrementando notablemente la eficiencia de la gestión urbana frente a modelos manuales o sistemas con alta latencia.

### **3.1.2 ESCALABILIDAD DEL SISTEMA**

Desde su concepción, el sistema ha sido diseñado con un enfoque modular y escalable, lo que facilita la incorporación de nuevos sensores, funcionalidades o fuentes de información sin que sea necesario alterar la estructura central. Esta cualidad representa una ventaja estratégica significativa, ya que permite que el despliegue inicial en el núcleo urbano de Pontevedra pueda extenderse progresivamente a otras áreas del municipio o incluso a localidades vecinas, manteniendo un coste incremental reducido.

La experiencia acumulada en desarrollos análogos sustentados en la infraestructura de Azure respalda la viabilidad de esta arquitectura frente a incrementos sustanciales en el número de dispositivos conectados y en el volumen de datos, sin que ello comprometa la estabilidad del sistema. En particular, la solución analizada en [27] reproduce un escenario de medidores inteligentes a gran escala mediante servicios como Azure IoT Hub, Stream Analytics y Data Lake, ofreciendo evidencia empírica del comportamiento escalable de la plataforma en contextos urbanos de alta exigencia.

Este potencial de escalado horizontal se ve reforzado por la adopción de servicios con elasticidad nativa, los cuales ajustan dinámicamente su capacidad de procesamiento y almacenamiento en función de la demanda operativa. Asimismo, la separación lógica entre los módulos responsables de la captura, el análisis, el almacenamiento y la visualización de datos permite actualizar o extender componentes específicos sin afectar el funcionamiento global, asegurando así la

capacidad del sistema para adaptarse a futuros cambios normativos, avances tecnológicos o nuevas exigencias funcionales.

### **3.1.3 FIABILIDAD OPERATIVA Y TOLERANCIA A FALLOS**

Desde su concepción, el sistema ha sido diseñado con un enfoque modular y escalable, lo que facilita la incorporación de nuevos sensores, funcionalidades o fuentes de información sin que sea necesario alterar la estructura central. Esta cualidad representa una ventaja estratégica significativa, ya que permite que el despliegue inicial en el núcleo urbano de Pontevedra pueda extenderse progresivamente a otras áreas del municipio o incluso a localidades vecinas, manteniendo un coste incremental reducido.

La experiencia acumulada en desarrollos análogos sustentados en la infraestructura de Azure respalda la viabilidad de esta arquitectura frente a incrementos sustanciales en el número de dispositivos conectados y en el volumen de datos, sin que ello comprometa la estabilidad del sistema. En particular, la solución analizada en [27] reproduce un escenario de medidores inteligentes a gran escala mediante servicios como Azure IoT Hub, Stream Analytics y Data Lake, ofreciendo evidencia empírica del comportamiento escalable de la plataforma en contextos urbanos de alta exigencia.

Este potencial de escalado horizontal se ve reforzado por la adopción de servicios con elasticidad nativa, los cuales ajustan dinámicamente su capacidad de procesamiento y almacenamiento en función de la demanda operativa. Asimismo, la separación lógica entre los módulos responsables de la captura, el análisis, el almacenamiento y la visualización de datos permite actualizar o extender componentes específicos sin afectar el funcionamiento global, asegurando así la capacidad del sistema para adaptarse a futuros cambios normativos, avances tecnológicos o nuevas exigencias funcionales.

### **3.1.4 CONCLUSIÓN TÉCNICA**

La evaluación técnica del sistema permite anticipar un comportamiento sólido, dinámico y escalable, en consonancia con las exigencias operativas propias de una ciudad intermedia como Pontevedra. La integración de tecnologías cloud consolidadas, como Azure IoT Hub y Stream Analytics, junto con una arquitectura modular y desacoplada, asegura que el sistema pueda

absorber aumentos tanto en complejidad como en volumen sin comprometer su estabilidad funcional. Asimismo, la incorporación de pasarelas locales con capacidades de buffering añade una capa suplementaria de resiliencia frente a eventuales interrupciones en la conectividad.

Sin embargo, desde una perspectiva crítica, es pertinente subrayar que la fiabilidad técnica no dependerá exclusivamente de las prestaciones de la infraestructura en la nube, sino también del diseño adecuado de los procedimientos de mantenimiento, la calidad del hardware implementado y la monitorización continua del rendimiento una vez que el sistema se encuentre operativo. La literatura especializada pone de manifiesto que incluso las arquitecturas más sólidas pueden enfrentarse a cuellos de botella o fallos impredecibles si no se sustentan sobre una gobernanza tecnológica eficaz.

En este contexto, una de las principales fortalezas de la propuesta radica en su potencial para incorporar mejoras evolutivas: tanto en el ámbito tecnológico (nuevos dispositivos, modelos analíticos avanzados) como en el organizativo (ampliación territorial o establecimiento de alianzas institucionales). Por ende, se considera que la solución no solo resulta técnicamente factible en su etapa inicial, sino que se perfila como una plataforma robusta sobre la cual construir capacidades adicionales de ciudad inteligente en fases sucesivas. La sostenibilidad de esta evolución dependerá de mantener una vigilancia proactiva y de aplicar estrategias de mejora continua durante su operación en entornos reales.

## **3.2 *EVALUACIÓN ECONÓMICA***

### **3.2.1 PLAN DE INVERSIÓN INICIAL**

La inversión inicial requerida para la implementación del sistema inteligente en Pontevedra se estima a partir del conjunto tecnológico descrito en la Tabla 3, donde se especifican los tipos de dispositivos considerados, su cantidad aproximada, su función dentro del sistema y su coste unitario estimado. El valor total del equipamiento asciende a 442.715 €, e incluye sensores de ocupación, cámaras de tráfico, estaciones medioambientales, contadores V2G, gateways IoT y dispositivos de control de accesos.

A este importe debe añadirse el coste asociado a las labores de instalación y puesta en funcionamiento. Esta categoría comprende tanto intervenciones físicas, como la fijación de dispositivos, obra civil menor, cableado y conexión eléctrica, como tareas técnicas relacionadas con la integración, configuración en la nube y validación operativa del sistema. Basándose en experiencias previas documentadas en proyectos urbanos afines, se considera apropiado aplicar un coeficiente del 15 % sobre el valor del equipamiento como estimación conservadora para estos trabajos iniciales [20].

*Tabla 6. CAPEX inicial del proyecto*

Equipamiento	442.715 €
Coste estimado de instalación y puesta en marcha	66.408 €
<b>Inversión total inicial estimada</b>	<b>509.123 €</b>

Este monto contempla la totalidad de los componentes necesarios para poner en marcha el sistema durante su fase piloto, sin considerar aún los costes operativos anuales, los cuales serán detallados en el apartado siguiente. Cabe destacar que la solución ha sido diseñada con un enfoque modular y escalable, lo cual permitirá su expansión progresiva hacia otras zonas urbanas o la incorporación de nuevas funcionalidades sin requerir una reinversión estructural.

### **3.2.2 COSTES OPERATIVOS Y DE MANTENIMIENTO**

El funcionamiento ininterrumpido del sistema requiere la ejecución periódica de diversas operaciones destinadas a preservar la fiabilidad del conjunto. Estas incluyen el mantenimiento físico de sensores y cámaras, tareas de limpieza y revisión técnica, sustitución de componentes, soporte remoto y utilización de la plataforma en la nube. Tal como se expone en el apartado 2.4.3, dichas labores serán distribuidas entre el Concello de Pontevedra y empresas especializadas contratadas para la operación técnica del sistema.

Aunque en etapas posteriores será posible ajustar estos costes a partir de datos empíricos obtenidos durante la operación real, en esta fase preliminar se ha optado por seguir las recomendaciones formuladas en estudios internacionales sobre redes y ciudades inteligentes. En particular, se señala que los costes operativos anuales para este tipo de proyectos suelen oscilar entre el 10 % y el 20 %

de la inversión inicial, abarcando tanto los gastos de mantenimiento como los servicios vinculados al entorno cloud [20].

Tomando como base una inversión inicial de 509.123 €, el rango estimado de costes operativos anuales se sitúa entre 50.912 € y 101.824 €, dependiendo del modelo de contratación y del ritmo de evolución tecnológica. Para esta propuesta, se adopta un valor del 12,5 %, lo que representa un equilibrio razonable entre eficiencia presupuestaria y robustez operativa:

*Tabla 7. OPEX anual del proyecto*

<b>Coste operativo anual estimado</b>	<b>63.640 €</b>
---------------------------------------	-----------------

Este importe contempla las siguientes partidas:

- Mantenimiento físico y revisión técnica de sensores, cámaras y estaciones.
- Sustitución programada de dispositivos conforme a su vida útil estimada.
- Supervisión remota, uso de paneles de control y análisis de datos en Azure.
- Consumo energético, conectividad y licencias necesarias para el funcionamiento.
- Soporte técnico especializado en modalidad de contratación externa.

Aunque este valor será objeto de revisión en futuras fases conforme se disponga de información operacional detallada, constituye una estimación inicial verosímil, transparente y coherente con experiencias comparables en entornos urbanos.

### **3.2.3 RETORNO DE INVERSIÓN Y BENEFICIOS ESPERADOS**

El análisis del retorno esperado del sistema se fundamenta en una estimación razonada de los flujos económicos generados, tanto directos como indirectos, mediante ahorros operativos, eficiencia energética y optimización urbana. En esta sección se cuantifican dichos flujos anuales proyectados, según los escenarios previamente definidos, para evaluar su potencial económico desde una perspectiva municipal.

Con base en estos valores, se calcula el retorno esperado a través de indicadores financieros clave (VAN, TIR y periodo de recuperación), complementado con una valoración cualitativa de su impacto estratégico. Esta aproximación combinada permite considerar no solo la rentabilidad contable, sino también el valor añadido en términos de sostenibilidad, transformación digital y mejora de los servicios urbanos.

### ***3.2.3.1 Estimación de flujos económicos anuales derivados del sistema***

Se expone una estimación de los flujos económicos anuales que el sistema propuesto podría generar, diferenciando entre ahorros directos, ingresos vinculados y beneficios inducidos. Estos flujos permiten visualizar el potencial del proyecto para generar retorno mediante una gestión más eficiente de los recursos, mejoras en el rendimiento energético y una valorización progresiva de los servicios urbanos.

*Tabla 8. Ingresos y ahorros anuales estimados*

Ahorro energético total por V2G	11.309 €
Mejora estimada en la eficiencia de aparcamientos inteligentes	42.000 €
Ahorro derivado de la optimización del tráfico urbano	30.000 €
Ahorro en gestión urbana digitalizada (datos, IoT...)	18.000 €
Ingresos por cesión de datos anonimizados	3.000 €
Otros ingresos	10.000 €
<b>Total ingresos y ahorros anuales estimados</b>	<b>114.309 €</b>

#### **3.2.3.1.1 Ahorro energético anual por V2G**

Uno de los principales vectores de retorno económico indirecto del sistema radica en la infraestructura Vehicle-to-Grid (V2G) desplegada en los aparcamientos periféricos conectados. Esta tecnología permite a los vehículos eléctricos transferir energía desde sus baterías hacia la red o a instalaciones municipales, contribuyendo al equilibrio energético y reduciendo el consumo eléctrico.

En Pontevedra se han previsto 218 plazas con capacidad V2G, aunque no todas estarán activas de forma simultánea ni todos los usuarios dispondrán de vehículos compatibles o permitirán la

bidireccionalidad. Según estudios recientes en entornos urbanos, la tasa de uso efectiva oscila entre el 15 % y el 25 % [5]; aquí se adopta una estimación prudente del 20 %, lo que equivale a 43 vehículos activos por día.

Diversas fuentes establecen que cada unidad puede verter entre 6 y 10 kWh diarios sin afectar la durabilidad de la batería [44]; se toma como referencia un valor medio de 7 kWh. Considerando 250 días operativos al año y un precio medio de energía compensada de 0,15 €/kWh, coherente con el coste eléctrico municipal medio en España [5][44], se obtiene un ahorro energético estable y cuantificable.

### **3.2.3.1.2 Mejora estimada en la eficiencia de aparcamientos inteligentes**

Aunque el sistema propuesto no administra directamente todos los aparcamientos de Pontevedra, algunos bajo gestión privada, sí impacta en su eficiencia operativa mediante sensores de ocupación, integración IoT y visualización en paneles y aplicaciones públicas. Estas mejoras optimizan la distribución de vehículos, evitan aglomeraciones y favorecen una mayor rotación de plazas al reducir tiempos de búsqueda y aumentar la ocupación efectiva.

Estudios en ciudades con soluciones similares estiman que estos sistemas pueden aumentar los ingresos netos entre un 10 % y un 20 % gracias a una rotación más alta, menor número de plazas vacías, distribución equilibrada de la demanda y mejor experiencia de usuario [5], [27].

En este caso, se adopta un valor moderado del 15 %, aplicado a una media estimada de ingresos anuales por parking de 100.000 € para una ciudad con un ticket medio inferior al de otras ciudades más grandes, lo que se traduce en:

- 15.000 € de mejora por parking
- $15.000 \text{ €} \times 7 \text{ parkings} = 105.000 \text{ €}$  anuales de retorno estimado

Este flujo representa un retorno económico indirecto. Aunque no repercute directamente en las arcas municipales, contribuye a la eficiencia urbana y justifica la inversión pública. Además, allana el camino para implementar sistemas de guiado, reservas y esquemas dinámicos de aparcamiento vinculados a objetivos de sostenibilidad.

### **3.2.3.1.3 Ahorro derivado de la optimización del tráfico urbano**

Uno de los beneficios indirectos más significativos del sistema es la reducción de costes asociados a la congestión urbana, especialmente en el centro histórico y accesos principales de Pontevedra. Aunque se trata de una ciudad media-pequeña, con casi 120 km<sup>2</sup> y menos de 85.000 habitantes, la congestión puntual en horas punta genera pérdidas ligadas al consumo de combustible y al tiempo improductivo de los usuarios.

Estudios en ciudades europeas de características similares han demostrado que la regulación semafórica inteligente, combinada con monitorización en tiempo real, puede reducir entre un 1,5 % y un 4 % el tiempo medio de viaje en zonas críticas, gracias a la redistribución dinámica del tráfico y el ajuste automático de fases [5]. Estos beneficios implican ahorro energético, mayor productividad, menor desgaste de vehículos y reducción de emisiones.

Según estudios aplicados a ciudades de tamaño comparable, el coste total de la congestión (combustible, tiempo y efectos colaterales) puede oscilar entre 1 y 3 millones de euros anuales, incluso en municipios con menos de 100.000 habitantes [16]. Adoptando una estimación prudente de 1,5 millones para Pontevedra y un ahorro potencial del 2 % gracias al sistema inteligente, se proyecta el siguiente impacto económico:

- $1.500.000 \text{ €} \times 2 \% = 30.000 \text{ € anuales}$

Este ahorro deriva de una mayor fluidez en el tráfico, menos esperas en cruces clave y una redistribución automatizada de vehículos, en línea con los principios de movilidad urbana inteligente [27].

#### **3.2.3.1.4 Ahorro en gestión urbana digitalizada (datos, IoT...)**

La implementación de un sistema inteligente basado en datos y automatización permite aliviar la carga operativa del Concello en tareas como la supervisión urbana, el control de accesos, la regulación del tráfico y el mantenimiento preventivo. En una ciudad de aproximadamente 120 km<sup>2</sup>, con un gasto anual estimado en movilidad y seguridad de 8,8 millones € (2020), se estima que hasta un 20 % de dicho presupuesto podría optimizarse mediante decisiones automatizadas apoyadas en IoT. [ver: [https://www.pontevedraviva.com/es/general/pontevedra-eleva-su-presupuesto-hasta-los-116-5-millones-de-euros-tras-liquidar-las-cuentas-de-2023\\_353428\\_102.html](https://www.pontevedraviva.com/es/general/pontevedra-eleva-su-presupuesto-hasta-los-116-5-millones-de-euros-tras-liquidar-las-cuentas-de-2023_353428_102.html)]

En 2024, el presupuesto total del Concello ascendió a 94,7 millones €, de los cuales 28,3 millones € corresponden a gasto de personal. Si se considera que aproximadamente un 30 % de este gasto está vinculado a áreas operativas como movilidad, seguridad y medio ambiente, el coste anual asociado a personal en estas funciones rondaría los 8,5 millones €. [ver: <https://www.lavozdegalicia.es/noticia/pontevedra/pontevedra/2023/12/15/gobierno-local-pontevedra-aprueba-presupuesto-947-millones-euros-2024/00031702641299901540796.htm>]

Asumiendo una mejora del 15 % en eficiencia operativa, gracias a la automatización de tareas como reportes, control semafórico, gestión de accesos o generación de alertas, se proyectaría un ahorro de:

- $8,5 \text{ millones } \text{€} \times 15 \% = 1.275.000 \text{ € anuales}$

No obstante, dado que el sistema se enfoca en funciones específicas, se adopta una estimación más conservadora: una mejora del 1,5 % sobre el gasto global en personal operativo, equivalente a unos 18.000 € anuales.

Este valor, prudente y alineado con la dimensión real de Pontevedra, coincide con estimaciones académicas que sitúan la reducción de costes operativos entre el 10 % y el 15 % en áreas urbanas con despliegues IoT [5], [27].

### **3.2.3.1.5 Ingresos por cesión de datos anonimizados**

El sistema propuesto combina sensores de tráfico, ocupación de aparcamientos y estaciones medioambientales conectados a una infraestructura cloud (Azure IoT Hub), lo que permite recopilar datos urbanos estructurados y en tiempo real. Si bien muchos municipios optan por esquemas de datos abiertos, existe un interés creciente por parte de empresas tecnológicas, centros de investigación y universidades en acceder a datos anonimizados de calidad, especialmente en entornos con políticas activas de movilidad y eficiencia energética.

La literatura especializada resalta el valor económico de estos datos, en particular aquellos que permiten analizar patrones de tráfico, emisiones o comportamiento ciudadano. El informe [5] identifica la monetización de datos como uno de los modelos emergentes de sostenibilidad financiera en proyectos Smart City, mediante acuerdos de uso limitado o licencias temporales.

Para Pontevedra, se estima de forma prudente un ingreso anual de 3.000 €, derivados de:

- Cesión controlada de datasets anonimizados a entidades académicas o centros tecnológicos con interés en movilidad o planificación urbana.
- Colaboraciones puntuales con empresas de logística o movilidad compartida, interesadas en datos brutos o consolidados.

### 3.2.3.1.6 Otros ingresos

Además de los ingresos y ahorros directos, el sistema podría beneficiarse de subvenciones asociadas a la digitalización urbana, la movilidad inteligente y la adopción de tecnologías IoT, en el marco de programas nacionales y europeos actualmente vigentes.

Pontevedra, reconocida por su modelo urbano sostenible, presenta un perfil favorable para acceder a fondos públicos orientados a iniciativas Smart City. Aunque no se contabilizan ayudas específicas en este documento, la experiencia de otros municipios de tamaño similar sugiere un flujo potencial estimado de 10.000 € anuales, ya sea mediante convocatorias competitivas, ayudas directas o proyectos piloto.

Por ejemplo, Aranda de Duero ( $\approx 32.000$  habitantes) ha incorporado una partida de 300.000 € en su presupuesto para una plataforma de ciudad inteligente, financiada en parte con fondos externos [ver: <https://cadenaser.com/castillayleon/2025/05/29/aranda-de-duero-se-suma-a-la-red-espanola-de-ciudades-inteligentes-radio-aranda/>]. Asimismo, Onda ha sido seleccionada como Ciudad Laboratorio 2025, recibiendo apoyo económico para proyectos de innovación urbana [ver: <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2025/05/06/onda-reconocida-como-ciudad-laboratorio-2025-para-desarrollar-un-nuevo-proyecto-de-innovacion-urbana-radio-castellon/>].

Estos precedentes permiten anticipar, de forma conservadora, que Pontevedra podría acceder a financiación complementaria que refuerce la viabilidad del sistema, ya sea durante su despliegue inicial o en su mantenimiento y mejora continua.

### 3.2.3.2 *Indicadores financieros clave*

Antes de abordar el cálculo de los principales indicadores financieros del proyecto, es imprescindible definir dos parámetros fundamentales que enmarcan la evaluación económica: el horizonte temporal del análisis y la tasa de descuento seleccionada.

- Horizonte de análisis: 10 años. Se ha establecido este un horizonte temporal para la evaluación del sistema, considerado apropiado en el ámbito de las infraestructuras tecnológicas urbanas como plataformas IoT y servicios cloud. Este plazo coincide con la vida útil estimada de componentes clave como sensores, gateways y servicios en la nube. Asimismo, responde al estándar utilizado en evaluaciones coste-beneficio del sector público europeo en materia de digitalización urbana. Como referencia, la guía del programa Connecting Europe Facility (CEF) recomienda plazos de hasta 10 años para proyectos tecnológicos interconectados en ámbitos urbanos y de transporte inteligente. (ver: [https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/guidance/cinea-guidance-on-economic-appraisal\\_cef-t\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/cef/guidance/cinea-guidance-on-economic-appraisal_cef-t_en.pdf))
- Tasa de descuento: 4 % (real, en euros constantes). Este valor está respaldado por normas como la establecida por EUROCONTROL, que también ha sido asumida por otras agencias comunitarias para valorar inversiones públicas. La tasa seleccionada proporciona un equilibrio adecuado entre el valor temporal del dinero y un nivel de riesgo moderado, y es frecuentemente empleada en análisis coste-beneficio en la eurozona. (ver: [https://ansperformance.eu/economics/cba/standard-inputs/v9.0.3/chapters/discount\\_rate.html](https://ansperformance.eu/economics/cba/standard-inputs/v9.0.3/chapters/discount_rate.html))

Una vez establecidos estos parámetros, se obtienen los siguientes resultados para el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

El análisis financiero muestra resultados consistentes que avalan la rentabilidad del sistema. El Valor Actual Neto (VAN) se sitúa en 412.834,41 €, lo que indica que, una vez descontados los costes iniciales y operativos, el proyecto generará un excedente económico relevante a lo largo del horizonte evaluado. Este indicador es fundamental para valorar si una inversión aporta valor neto, y en este caso, confirma claramente su viabilidad económica.

La Tasa Interna de Retorno (TIR), por su parte, alcanza el 18 %, muy por encima de la tasa de descuento del 4 % empleada en el cálculo del VAN. Este margen evidencia que la rentabilidad esperada del proyecto supera ampliamente el coste de oportunidad del capital, situándolo como una opción financieramente atractiva.

En cuanto al Período de Retorno de la Inversión (PRI), se estima en 4 años y 6 meses, lo que implica que la inversión inicial se recuperaría en menos de la mitad de la vida útil proyectada (10 años), reforzando la solidez y eficiencia del modelo económico propuesto.

*Tabla 9. Indicadores financieros clave*

VAN	412.834,41 €
TIR	18%
PRI	4 años y 6 meses

En conjunto, estos indicadores no solo ratifican la sostenibilidad económica del sistema, sino que lo consolidan como una inversión estratégica para el Concello, al combinar retorno económico, impacto urbano y mejora operativa. Con estos fundamentos, se justifica plenamente tanto el desembolso inicial como su continuidad a través de estrategias de mejora y reinversión progresiva. La proyección detallada de la evolución anual y acumulada del flujo de caja puede consultarse en el Anexo II.

### ***3.2.3.3 Beneficios cualitativos y estratégicos***

Más allá de los indicadores financieros, la implementación del sistema propuesto aporta beneficios cualitativos y estratégicos que fortalecen su valor para Pontevedra, consolidando su posición como referente en sostenibilidad urbana e innovación tecnológica.

La incorporación de infraestructuras IoT y plataformas cloud como Azure permite una gestión urbana basada en datos, capaz de adaptarse en tiempo real a los eventos del entorno. Esta capacidad facilita decisiones más eficientes, reduce la intervención manual y permite anticipar incidencias mediante analítica predictiva, mejorando así los servicios públicos y la experiencia ciudadana.

Asimismo, el despliegue de estaciones V2G en parkings clave convierte la flota eléctrica en una red energética distribuida y flexible, reforzando la resiliencia del sistema local. Este modelo, alineado con los objetivos europeos de transición ecológica, posiciona al Concello como pionero en la adopción de soluciones energéticas descentralizadas.

En materia de movilidad, los sensores de tráfico, control de accesos y sistemas inteligentes de guiado permiten optimizar la circulación, reducir los tiempos de búsqueda de aparcamiento y disminuir la congestión urbana. Esto se traduce en una mejora de la calidad de vida y una reducción significativa de emisiones y contaminación acústica, en consonancia con las políticas locales y comunitarias de sostenibilidad.

El sistema también contribuye a la transparencia y gobernanza digital, al facilitar la publicación de datos abiertos y métricas de desempeño urbano, promoviendo una gestión pública más trazable y eficiente. A su vez, refuerza la imagen institucional del Concello como administración innovadora, lo que puede favorecer su acceso a programas europeos como los fondos Next Generation EU.

Finalmente, su diseño modular y escalable permite replicar el modelo en otros ámbitos, como alumbrado público, gestión de residuos o control ambiental, ampliando el retorno de la inversión y consolidando una infraestructura adaptable y preparada para los retos futuros.

En conjunto, los beneficios estratégicos del sistema trascienden la dimensión económica, aportando valor operativo, social, ambiental e institucional, y posicionando a Pontevedra como una ciudad preparada para liderar la nueva gobernanza urbana inteligente.

### **3.2.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

Dado que los resultados económicos del proyecto están sujetos a variables con cierto grado de incertidumbre, como los costes operativos reales, la adopción de tecnologías como V2G o la valorización del ahorro energético, se ha realizado un análisis de sensibilidad para evaluar la solidez del modelo financiero ante distintos escenarios.

Se han definido tres escenarios comparativos:

- Escenario base: ingresos anuales de 177.309 €, inversión inicial (CAPEX) de 509.123 € y costes operativos (OPEX) del 12,5 % (63.640 €).
- Escenario pesimista: ingresos un 20 % inferiores (141.847 €) y OPEX un 20 % superior (76.368 €).
- Escenario optimista: ingresos un 20 % superiores (212.771 €) y OPEX un 20 % inferior (50.912 €).

La proyección detallada de cada uno de estos escenarios, junto con la evolución anual y acumulada del flujo de caja, puede consultarse en el Anexo II.

A partir de estos supuestos, se han recalculado los Valores Actuales Netos (VAN) considerando un horizonte de 10 años y una tasa de descuento del 4 %.

*Tabla 10. Indicadores financieros clave en distintos escenarios*

<i>Escenario</i>	<i>VAN</i>	<i>TIR</i>	<i>PRI</i>
Base	412.834,41€	18%	4 años y 6 meses
Pesimista	21.971,91€	5%	7 años y 10 meses
Optimista	803.696,86€	29%	3 años y 2 meses

Como resultado, incluso en el escenario pesimista el proyecto mantiene un VAN positivo, lo que indica que la inversión se recuperaría dentro del periodo previsto sin generar pérdidas. En el escenario optimista, el retorno se incrementa notablemente, consolidando el atractivo del proyecto como una infraestructura rentable y con capacidad de expansión.

Este análisis confirma que el modelo económico propuesto posee una notable resiliencia financiera, y que su viabilidad no se basa en supuestos optimistas, sino en parámetros prudentes y justificados.

### **3.2.5 ANÁLISIS DE RIESGOS ECONÓMICOS**

Como toda inversión tecnológica en el ámbito urbano, el sistema propuesto implica ciertos riesgos económicos, derivados tanto de la incertidumbre asociada a los costes como de la variabilidad en los beneficios proyectados. Estos riesgos se ven acentuados por el carácter piloto del proyecto, su

elevada componente tecnológica y un modelo de retorno basado, en gran medida, en ahorros, mejoras de eficiencia y servicios digitales de valor añadido.

A continuación, se presenta una matriz con los principales riesgos económicos identificados:

*Tabla 11. Matriz de riesgos económicos*

<i>Riesgo económico identificado</i>	<i>Prob.</i>	<i>Impacto</i>	<i>Nivel de riesgo</i>	<i>Medidas de mitigación</i>
Incremento inesperado en los costes de adquisición o instalación	Media	Alto	Alto	Licitación abierta y competitiva; provisión de márgenes presupuestarios; implementación por fases
Aumento de los costes operativos (mantenimiento, telecomunicaciones, energía)	Media	Medio	Medio	Externalización parcial con contratos de coste fijo; aplicación de mantenimiento predictivo
Baja adopción de tecnología V2G por parte de usuarios particulares	Alta	Medio	Alto	Campañas de sensibilización e incentivos; colaboración con servicios de carsharing y flotas públicas
Retrasos o cancelación de subvenciones públicas o ayudas externas	Media	Medio	Medio	Planificación financiera basada en autofinanciación; búsqueda activa de financiación diversificada
Sobreestimación de los beneficios proyectados en tráfico o gestión operativa	Baja	Bajo	Bajo	Revisión periódica de indicadores de rendimiento (KPIs); ajustes basados en datos reales

Escasa monetización efectiva de los datos urbanos generados	Media	Bajo	Bajo	Establecimiento de convenios con instituciones académicas; apertura controlada de datasets
Costes imprevistos por actualización tecnológica o renovación de dispositivos	Media	Medio	Medio	Planificación de renovación tecnológica quinquenal; seguimiento de ciclos de obsolescencia
Cambios regulatorios que afecten el uso de datos, energía o acceso urbano	Baja	Alto	Medio	Vigilancia normativa constante; diseño flexible conforme a estándares legales desde el inicio
Dependencia excesiva de proveedores tecnológicos específicos (vendor lock-in)	Media	Alto	Alto	Adopción de estándares abiertos; inclusión de cláusulas técnicas de salida en contratos
Falta de apoyo político o institucional sostenido a medio plazo	Baja	Medio	Bajo	Construcción de consensos institucionales; difusión periódica de resultados y beneficios
Costes de formación o adaptación del personal mayores a los previstos	Media	Bajo	Bajo	Formación técnica integrada desde el inicio; uso de interfaces intuitivas
Riesgos inflacionarios en costes energéticos o servicios externalizados	Alta	Medio	Alto	Inclusión de cláusulas de revisión en contratos; previsión en la planificación presupuestaria plurianual

No obstante, tal como se ha demostrado en el análisis de sensibilidad del apartado anterior, incluso bajo escenarios conservadores el proyecto mantiene indicadores financieros positivos. Esta

resiliencia económica se sustenta en una arquitectura escalable, con costes operativos controlables y beneficios diversificados en distintas áreas: energía, movilidad, gestión digital y monetización de datos.

Además, el diseño modular del sistema permite su implementación progresiva, lo que reduce la exposición financiera inicial y facilita su adaptación a posibles fuentes de financiación externa o modificaciones regulatorias.

La capacidad de supervisión en tiempo real, el uso de paneles de control con analítica avanzada y la flexibilidad para reconfigurar servicios refuerzan aún más la adaptabilidad del sistema ante contingencias, consolidando su sostenibilidad económica a medio y largo plazo.

### **3.3 *EVALUACIÓN AMBIENTAL***

El sistema propuesto constituye un instrumento estratégico para la sostenibilidad urbana, al incidir directamente en la eficiencia energética, la gestión inteligente del tráfico y la promoción de tecnologías limpias como el Vehicle-to-Grid (V2G). Su despliegue refuerza los objetivos ambientales recogidos en las estrategias locales, autonómicas y europeas, alineándose con compromisos como el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030 y la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética [54, 55].

Uno de los beneficios ambientales más destacados es la reducción de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero. La gestión inteligente de semáforos, accesos y flujos vehiculares permite disminuir situaciones de congestión prolongada, lo que conlleva menores tiempos de inactividad en ralentí, menos emisiones por vehículo y una reducción significativa de trayectos improductivos. Ciudades como Vitoria-Gasteiz han reportado disminuciones superiores al 25 % en emisiones de CO<sub>2</sub> tras la implementación de sistemas de movilidad urbana inteligente [56].

En el caso de Pontevedra, una estimación prudente del 2 % de reducción de emisiones asociadas al tráfico urbano supondría evitar aproximadamente 2.800 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, tomando como referencia el uso medio del vehículo privado, las tasas de emisión por kilómetro y la población local. Este impacto se traduce en una mejora tangible de la calidad del aire urbano y

contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular el ODS 11 (Ciudades sostenibles) y el ODS 13 (Acción climática) [57].

Desde una perspectiva energética, la infraestructura V2G instalada en aparcamientos periféricos permite recuperar y reintegrar parte de la energía almacenada en los vehículos eléctricos durante el estacionamiento. Tal como se recoge en el apartado 3.2.3.1, se estima una inyección anual de hasta 75.000 kWh, lo que representa un ahorro directo de aproximadamente 11.000 € en consumo eléctrico municipal. Esta cifra podrá aumentar en la medida en que se amplíe la flota de vehículos eléctricos y se consolide la adopción de tecnologías de carga bidireccional [12].

Adicionalmente, la automatización de tareas urbanas, como el control de accesos, la vigilancia medioambiental o la supervisión del tráfico mediante sensores, permite reducir considerablemente los desplazamientos físicos del personal municipal, así como el uso de recursos materiales, energía y tiempo operativo. Aunque de difícil cuantificación, este ahorro indirecto contribuye a una gestión urbana más eficiente y con menor huella ecológica [5].

En suma, el sistema actúa como una palanca transformadora en términos ambientales, no solo por su capacidad de generar ahorros directos en consumo y emisiones, sino también por su potencial para habilitar políticas públicas sostenibles y decisiones basadas en datos, consolidando una gobernanza urbana alineada con los retos de la transición ecológica.

### ***3.4 EVALUACIÓN ADMINISTRATIVA Y LEGAL***

#### **3.4.1 MARCO NORMATIVO**

El desarrollo e implementación de una solución tecnológica orientada a la gestión inteligente de la movilidad y a la integración energética mediante tecnología V2G en Pontevedra se encuentra supeditado a un conjunto de disposiciones normativas que operan en diversos niveles: europeo, estatal, autonómico y local. A continuación, se enumeran las principales normativas aplicables, así como su repercusión específica en el proyecto:

### **3.4.1.1 Nivel europeo**

- Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) - Reglamento (UE) 2016/679. El sistema propuesto contempla la recopilación de información sensible relacionada con la movilidad, como el geoposicionamiento de vehículos eléctricos, horarios de carga y posibles patrones de comportamiento. Este tipo de tratamiento exige una estricta conformidad con el RGPD. Será imprescindible justificar la base legal del tratamiento de datos, ya sea por interés público o por el ejercicio legítimo de poderes públicos. Asimismo, deberán aplicarse rigurosamente los principios de minimización de datos y de privacidad desde el diseño. En caso de que se estime que el tratamiento puede representar un riesgo significativo para los derechos y libertades de los ciudadanos, será obligatorio realizar previamente una Evaluación de Impacto en Protección de Datos (EIPD) [30]. En el caso concreto de este proyecto, la normativa exige establecer desde el principio un modelo claro de gobernanza de datos. Este modelo debe garantizar que los patrones de uso queden anonimizados y que se apliquen medidas técnicas específicas para proteger la información sensible que proviene tanto de los puntos de recarga como de los sistemas V2G.
- Directiva (UE) 2019/944 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. Esta directiva influye directamente en el componente energético del proyecto, al regular los roles de los operadores de puntos de carga y la interacción entre las empresas distribuidoras y comercializadoras de energía. Su aplicación es esencial para definir los mecanismos de integración de tecnologías V2G en la red eléctrica, garantizando además un acceso equitativo y no discriminatorio a los mercados energéticos locales [28]. Aplicada a este proyecto, la directiva establece los límites y posibilidades en lo referente a la interoperabilidad de los puntos de recarga con la red eléctrica actual. Además, influye directamente tanto en el diseño técnico del sistema como en los tipos de acuerdos contractuales que se puedan firmar con los distintos agentes del sector energético.
- Reglamento (UE) 2022/869 sobre las directrices para las redes transeuropeas de energía (TEN-E). Este reglamento establece el marco normativo para iniciativas de infraestructura energética de alcance europeo, en particular aquellas que promuevan la interoperabilidad con sistemas energéticos inteligentes. Aunque el presente proyecto se desarrolla en un contexto local, se alinea plenamente con los objetivos estratégicos definidos en esta normativa, especialmente en lo que respecta a la integración de la movilidad eléctrica y el

almacenamiento energético distribuido [29]. En la práctica, este reglamento refuerza la dirección estratégica del proyecto, que apuesta por una infraestructura conectada, escalable y alineada con el ecosistema energético digital europeo. Esto, a su vez, mejora sus opciones de ser considerado en el futuro para programas de financiación o para una posible ampliación a otros municipios.

#### **3.4.1.2 Nivel estatal (España)**

- Ley Orgánica 3/2018, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales (LOPDGDD). Esta normativa complementa el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) en el ámbito estatal, proporcionando un marco específico para el tratamiento de datos personales. En calidad de responsable del tratamiento, el Ayuntamiento deberá establecer un registro detallado de actividades, velar por la efectiva protección de los derechos de los interesados, y designar un Delegado de Protección de Datos (DPD) en caso de no existir esta figura previamente. Además, la ley contempla disposiciones sobre la reutilización de datos públicos y la difusión de información anonimizada, aspectos que resultan particularmente pertinentes para la estrategia de datos abiertos vinculada al presente proyecto [35]. En este contexto, la aplicación de la LOPDGDD obliga a establecer procesos claros de gobernanza interna para los datos que recoge el sistema V2G. Además, es necesario asegurar que estos datos puedan, en su caso, reutilizarse o publicarse en formatos abiertos sin poner en riesgo la privacidad de los usuarios.
- Esquema Nacional de Seguridad (ENS). Toda solución digital que interactúe con infraestructuras municipales o autonómicas deberá cumplir con los requisitos mínimos de seguridad establecidos por el Esquema Nacional de Seguridad (ENS), conforme al Real Decreto 311/2022. Este cumplimiento implica la implementación de medidas técnicas y organizativas como control de accesos, cifrado de las comunicaciones, trazabilidad de las actividades, autenticación reforzada y segmentación de redes. Tanto la infraestructura en la nube como los sistemas V2G que procesen datos bajo responsabilidad pública deberán alinearse estrictamente con estas directrices [36]. Para este proyecto, eso implica que toda la arquitectura tecnológica, desde los sensores hasta las plataformas de análisis, debe estar

concebida desde el principio con medidas de ciberseguridad que garanticen el cumplimiento del Esquema Nacional de Seguridad (ENS).

- Ley 24/2013, del Sector Eléctrico. Constituye el marco regulador general para la operación de infraestructuras de generación y almacenamiento eléctrico conectadas a la red. De manera particular, el artículo 9 regula el autoconsumo energético y el intercambio bidireccional de electricidad, elementos fundamentales para el funcionamiento de los sistemas V2G. Por tanto, la implementación de puntos de carga bidireccionales deberá adherirse estrictamente a los parámetros establecidos en esta legislación [31]. El impacto directo sobre el proyecto es que cualquier despliegue de infraestructura V2G deberá contar con una autorización administrativa específica y ajustarse a los requisitos técnicos y contractuales establecidos para el autoconsumo con excedentes.
- Real Decreto 647/2011, sobre gestión de la demanda energética. Este decreto cobra especial relevancia si el sistema contempla estrategias activas de gestión de la demanda, como la modulación de carga según el grado de congestión energética o el estado del tráfico. La norma regula los servicios de gestión de la demanda, permitiendo que los consumidores actúen como agentes activos en la estabilización del sistema eléctrico, lo cual encaja con los objetivos operativos del proyecto [32]. Por tanto, la aplicación de este decreto refuerza el modelo de inteligencia operativa planteado, al permitir que la flota municipal funcione como un agregador energético flexible frente a situaciones de alta demanda.
- Ley 7/2021, de Cambio Climático y Transición Energética. Establece metas vinculantes de descarbonización y electrificación del sector transporte, plenamente alineadas con el alcance del presente proyecto. La normativa impulsa el despliegue de infraestructuras de recarga inteligentes y promueve el uso intensivo de datos para mejorar la eficiencia energética en entornos urbanos, elementos clave para la transición energética a nivel local [33]. El proyecto se plantea como una acción concreta alineada con los objetivos nacionales de descarbonización, y actúa como una palanca para acelerar la transición energética de la flota municipal.
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Aunque de naturaleza estratégica, el PNIEC marca la hoja de ruta nacional hacia la electrificación del transporte y la integración de infraestructuras energéticas inteligentes. El proyecto de Pontevedra se

inserta directamente en esta planificación, contribuyendo a los objetivos de reducción de emisiones, aumento de la penetración del vehículo eléctrico y optimización del rendimiento de la red eléctrica nacional [34]. Esto refuerza la alineación institucional del proyecto, aumentando sus posibilidades de acceder a financiación estatal o europea y consolidándolo como un modelo replicable a escala nacional.

### ***3.4.1.3 Nivel autonómico y local (Galicia y Pontevedra)***

El sistema de movilidad inteligente y carga bidireccional propuesto para la ciudad de Pontevedra debe integrarse con el marco urbanístico, ambiental y estratégico vigente tanto a nivel autonómico como local, considerando especialmente la ocupación del espacio público y la contribución a los objetivos climáticos y energéticos establecidos por Galicia.

- Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) de Pontevedra. Este instrumento, actualmente en vigor y desarrollado por el Concello de Pontevedra, establece las directrices para la reorganización del tráfico urbano, la restricción progresiva del uso del vehículo privado y la promoción de modos de transporte sostenibles. La instalación de sensores, cargadores bidireccionales V2G y otras infraestructuras tecnológicas deberá estar en estricta consonancia con el PMUS, especialmente en lo referente a la gestión de Zonas de Bajas Emisiones (ZBE) y a la mejora de la eficiencia urbana. Se valorarán especialmente aquellas soluciones que permitan reducir de forma significativa el impacto ambiental del tráfico rodado [58]. Este marco influye directamente en la elección prioritaria de ubicaciones para los puntos de carga y sensores del sistema, que deberán instalarse en zonas estratégicas de la ciudad definidas por el PMUS, con el objetivo de maximizar su impacto en la reducción de emisiones y en la gestión del tráfico.
- Ordenanzas municipales de Pontevedra y Plan Xeral de Ordenación Municipal (PXOM). La implementación de infraestructura tecnológica en la vía pública requerirá autorización conforme a las ordenanzas municipales vigentes, las cuales regulan tanto la ocupación del espacio público como la compatibilidad urbanística de nuevas instalaciones. Asimismo, se establecen criterios estéticos y medioambientales de obligado cumplimiento. En aquellos casos en los que la infraestructura se sitúe sobre suelos de especial protección o en espacios verdes, será preceptiva la elaboración de un informe ambiental simplificado, conforme a la normativa municipal y autonómica aplicable [59]. Estas normativas inciden de forma

directa en la planificación técnica del despliegue físico, ya que determinan el diseño, los materiales y la ubicación de los dispositivos, además de requerir una evaluación ambiental previa en determinadas áreas de intervención.

- Estrategia Gallega de Cambio Climático y Energía 2050 (EGCCE-2050) y Agenda Energética Galicia 2030. La Comunidad Autónoma de Galicia ha definido una hoja de ruta hacia un modelo energético descarbonizado, priorizando la electrificación del transporte, el incremento de la eficiencia energética y la integración de tecnologías inteligentes como las redes V2G. El proyecto planteado se alinea directamente con los objetivos estratégicos de ambas iniciativas, al promover el despliegue de infraestructuras digitales, el almacenamiento energético distribuido y la participación activa de la ciudadanía en la transición energética [60]. Esta alineación con los planes autonómicos no solo refuerza la legitimidad política del proyecto, sino que también amplía sus posibilidades de acceder a financiación pública y a programas de innovación promovidos por la Xunta de Galicia.

#### ***3.4.1.4 Normativa técnica y sectorial***

Además del cumplimiento del marco normativo general, el desarrollo del sistema debe regirse por criterios técnicos que garanticen su fiabilidad operativa, su interoperabilidad con otras plataformas y su plena adecuación a las exigencias del sector público digital.

- Esquema Nacional de Seguridad (ENS). De conformidad con lo establecido en el Real Decreto 311/2022, toda plataforma que procese datos bajo responsabilidad de entidades públicas debe observar los requisitos del Esquema Nacional de Seguridad. Entre estos se incluyen la autenticación robusta, el cifrado tanto en tránsito como en reposo, el control de accesos, la segmentación lógica de redes, la auditoría de eventos y la gestión proactiva de incidentes de seguridad. La arquitectura tecnológica del sistema, en particular si se basa en infraestructuras cloud, deberá ser documentada en detalle, siguiendo los estándares definidos por el ENS [61]. En el caso de este proyecto, eso significa que desde el inicio debe plantearse una arquitectura de seguridad que pueda ser certificada, garantizando tanto la protección de los datos recogidos por los cargadores y sensores como el cumplimiento de las auditorías periódicas requeridas para las soluciones tecnológicas de titularidad pública.

- Guías técnicas del Centro Criptológico Nacional (CCN-STIC). Como extensión práctica del ENS, resulta recomendable la aplicación de las guías técnicas elaboradas por el Centro Criptológico Nacional. En particular, destacan la CCN-STIC 817 (relativa a servicios en la nube), la 823 (referente al registro de actividad) y la 826 (sobre autenticación robusta). Estas directrices proporcionan orientaciones concretas que permiten asegurar la seguridad, trazabilidad y resiliencia del sistema desde su fase de diseño hasta su despliegue operativo en entornos reales [62]. En el caso del sistema propuesto, estas guías resultan especialmente importantes para orientar el diseño de la infraestructura en la nube, establecer mecanismos seguros de control de acceso al panel de gestión energética, y garantizar un registro fiable de los eventos asociados al uso de los puntos de recarga.
- Normas ISO y UNE relevantes
  - ISO/IEC 27001: Norma internacional sobre sistemas de gestión de la seguridad de la información, aplicable en contextos donde se externaliza el procesamiento de datos o se recurre a infraestructuras cloud. En el contexto del proyecto, esta norma guía la organización del sistema de gestión de la seguridad de la información, especialmente en los casos en que se recurra a servicios externos bajo modelos SaaS o PaaS.
  - ISO 37120: Establece indicadores clave de desempeño para ciudades inteligentes, lo que permite evaluar el impacto del sistema en dimensiones como la movilidad, la sostenibilidad y la calidad urbana. Su adopción permitirá evaluar de forma objetiva los beneficios que aporta la solución, lo que facilitará su justificación ante organismos financiadores o entidades de evaluación pública.
  - UNE 178104 y UNE 178108: Normas técnicas españolas esenciales para el diseño de arquitecturas interoperables y plataformas de ciudad inteligente, cuya adopción garantiza la compatibilidad futura del sistema con otros entornos digitales municipales y autonómicos [63]. Estas normas influyen directamente en la estructura lógica y en los protocolos del sistema, asegurando una integración fluida con las plataformas ya existentes del Concello o de la Xunta.
- Protocolos V2G y estándares eléctricos. El sistema deberá incorporar el protocolo OCPP 2.0.1 (Open Charge Point Protocol), el cual asegura la interoperabilidad entre los puntos de carga, las plataformas de gestión energética y el sistema eléctrico. Asimismo, será

obligatoria la utilización de contadores eléctricos certificados conforme a la Measuring Instruments Directive (MID), tal como se especifica en la sección 2.4 del presente documento. Esta certificación es clave para garantizar la trazabilidad, exactitud y fiabilidad en los procesos de carga y descarga energética. Esto tiene un impacto directo en el diseño técnico del proyecto, ya que obliga a elegir tanto el hardware como el software compatibles con el estándar OCPP 2.0.1, y a garantizar que todos los dispositivos encargados de la medición energética cuenten con la certificación MID, evitando así discrepancias en la facturación o en la validación de servicios de red.

### **3.4.2 FORMA JURÍDICA DE IMPLEMENTACIÓN**

La puesta en marcha del sistema de movilidad inteligente y tecnología vehículo a red (V2G) en Pontevedra se canaliza mediante un procedimiento de contratación pública por licitación, conforme a lo establecido en la Ley 9/2017 de Contratos del Sector Público (LCSP) [1]. Esta fórmula permite al Ayuntamiento conservar la titularidad y el control estratégico del sistema, al tiempo que confía el desarrollo, despliegue y mantenimiento a empresas tecnológicas con experiencia acreditada en el sector.

La entidad encargada de operar el sistema será una Sociedad Limitada Unipersonal (SLU) con titularidad 100 % municipal. Esta figura jurídica ofrece al proyecto flexibilidad operativa, capacidad para formalizar contratos y gestionar recursos con autonomía, al tiempo que garantiza el control público sobre los datos, la infraestructura y las decisiones estratégicas.

Respecto al modelo de gestión, se opta por una fórmula pública con ejecución técnica descentralizada. En este esquema, el Ayuntamiento asume el papel de promotor y supervisor, mientras que la implementación, el soporte y la operación se llevan a cabo mediante contrataciones específicas a terceros especializados, organizadas por lotes. Este enfoque de colaboración público-privada resulta coherente con modelos exitosos aplicados en otras ciudades con proyectos tecnológicos complejos.

Este enfoque jurídico ha sido ya aplicado con éxito por otras administraciones locales en iniciativas análogas de sensorización urbana, electromovilidad y gestión energética, al combinar garantías normativas, eficiencia económica e interoperabilidad tecnológica.

- Organización por lotes y adjudicación especializada: El procedimiento de contratación se estructura en distintos lotes, lo que permite una adjudicación más precisa según la especialización técnica requerida:
  - Lote 1: Infraestructura física (sensores, cargadores bidireccionales, sistemas de comunicación).
  - Lote 2: Plataforma digital (gestión V2G, paneles de control, interfaces de programación - APIs).
  - Lote 3: Operación y soporte técnico.
  - Lote 4: Servicios en la nube y ciberseguridad.

Cada uno de estos lotes será asignado a empresas especializadas, asegurando la interoperabilidad entre componentes y la trazabilidad del sistema. El Ayuntamiento, por su parte, mantendrá la supervisión integral del cumplimiento del pliego y conservará tanto la propiedad de la infraestructura como de los datos generados.

- Requisitos fundamentales del pliego. Los pliegos de condiciones incorporarán:
  - Aspectos técnicos alineados con el Esquema Nacional de Seguridad (ENS) y con las normas UNE sobre ciudades inteligentes (178104 y 178108).
  - Compromisos de mantenimiento evolutivo para asegurar la actualización constante del sistema.
  - Cláusulas específicas sobre licencias de uso, reversión tecnológica y propiedad intelectual, permitiendo que el Concello pueda asumir la gestión directa del sistema si fuera necesario.
  - Condiciones estrictas de cumplimiento en materia de protección de datos, conforme al RGPD y la LOPDGDD.
- Coordinación institucional. La ejecución del proyecto está liderada por la concejalía de Medio Ambiente, Movilidad e Innovación Tecnológica, con el respaldo de un equipo técnico municipal y la supervisión de un comité de seguimiento. Las empresas adjudicatarias deberán garantizar la integración del sistema con las plataformas municipales existentes, como el sistema de información urbanística y el portal de transparencia.

Este modelo no solo garantiza un marco jurídico sólido y una gobernanza municipal efectiva, sino que también refuerza la profesionalización técnica del proyecto, facilitando además el acceso a fondos europeos y autonómicos destinados a iniciativas de movilidad sostenible y eficiencia energética.

### 3.4.3 RECURSOS HUMANOS REQUERIDOS

Las posiciones necesarias para implementar y mantener el sistema de movilidad inteligente y tecnología V2G en Pontevedra han sido dimensionadas conforme a los estándares actuales del mercado laboral en España. El Ayuntamiento ejerce la supervisión institucional del proyecto, mientras que la ejecución técnica recae en empresas adjudicatarias con experiencia especializada.

- Supervisión municipal. El Concello contará con un equipo propio encargado de supervisar y garantizar el correcto desarrollo del proyecto:
  - Responsable de proyecto municipal y Técnico de seguimiento y calidad: De acuerdo con los datos más recientes sobre empleo público en el sector TIC, estos perfiles, de nivel A1, perciben salarios brutos anuales que oscilan entre 45.000 € y 55.000 €, en función del grado de responsabilidad asumido y de la experiencia técnica acumulada.
- Equipo externo adjudicatario (fase de implantación). Durante la fase de implantación, se contará con personal contratado por las empresas adjudicatarias, cuyos perfiles técnicos y remuneración estimada responden a las condiciones actuales del mercado:

*Tabla 12. Perfiles técnicos requeridos para la fase operativa del sistema, junto con una estimación de su retribución anual bruta.*

<i>Rol</i>	<i>Nº personas</i>	<i>Funciones principales</i>	<i>Salario bruto anual estimado (€)</i>
Jefe/a de proyecto TIC	1	Coordinación técnica global y vínculo con Ayuntamiento	50.000-55.000

Ingeniero/a software full-stack	2	Desarrollo backend, frontend e integración V2G	32.500 por persona
Especialista IoT / Edge	1	Integración de sensores, gateways y comunicaciones	38.000
Analista de datos	1	Creación de dashboards y análisis de movilidad	38.000
Técnico/a de ciberseguridad	1	Implantación ENS y auditoría	38.000
Técnicos de instalaciones V2G	2	Instalación de cargadores y validación en campo	28.000 por persona

Estas estimaciones se fundamentan en estudios actualizados del sector tecnológico en España (años 2024 y 2025), que reflejan una media salarial de 32.500 € para desarrolladores full-stack, y superiores a 36.000 € en áreas especializadas como ciberseguridad o gestión de proyectos [65, 66]. Para técnicos de soporte e instalación, los promedios se sitúan en torno a los 27.000–28.000 € brutos anuales [67].

- Mantenimiento y fase operativa. Tras el despliegue del sistema, el equipo de soporte y operación estará integrado por:
  - Técnico de soporte N2: una persona encargada de la monitorización continua y resolución de incidencias (~27.000 €).
  - DevOps / Sysadmin: responsable de la gestión de la infraestructura en la nube, despliegues y actualizaciones del sistema (~40.000 €).
  - Analista funcional: orientado a la evolución funcional del sistema y atención a los requerimientos operativos (~35.000 €).

El coste anual estimado para esta fase operativa se sitúa en torno a los 100.000 € brutos.

### **3.4.4 LICENCIAS Y CONVENIOS NECESARIOS**

La implementación del sistema de movilidad inteligente y carga bidireccional (V2G) en Pontevedra exige un marco jurídico robusto que regule tanto la utilización del espacio público como los componentes tecnológicos involucrados. Este apartado delimita las licencias administrativas y los convenios de colaboración imprescindibles para garantizar su adecuada ejecución y sostenibilidad normativa.

#### ***3.4.4.1 Licencias administrativas municipales***

Dado que el sistema contempla la instalación de sensores, cargadores bidireccionales, cámaras y otros dispositivos en la vía pública, será indispensable gestionar las siguientes autorizaciones:

- Licencia de ocupación del dominio público para cada emplazamiento físico donde se instale equipamiento.
- Licencia de obra menor, en caso de requerirse canalizaciones, estructuras de soporte u otras intervenciones superficiales.
- Informe ambiental simplificado, si las instalaciones inciden en zonas verdes, espacios ecológicamente sensibles o entornos con valor patrimonial.

Estas licencias deberán tramitarse ante los servicios competentes de urbanismo, medio ambiente y movilidad del Concello de Pontevedra, conforme al Plan Xeral de Ordenación Municipal (PXOM) y las ordenanzas en vigor [68].

#### ***3.4.4.2 Licencias tecnológicas y de software***

Para la operación legal de los componentes informáticos del sistema, se precisará la obtención, adquisición o cesión de derechos de uso respecto de:

- Plataforma de gestión del sistema (backend y frontend): si su desarrollo corre a cargo de terceros, deberán contemplarse licencias que permitan el uso, modificación y eventual titularidad municipal del software.
- Herramientas de análisis de datos, paneles de control y motores de reglas: podrán ser de desarrollo propio, de código abierto o licenciadas bajo modelos SaaS (Software as a Service).
- Plataforma cloud y soluciones de ciberseguridad: su contratación deberá alinearse con el Esquema Nacional de Seguridad (ENS), garantizando que el proveedor cumpla con los requisitos de protección de datos, así como con mecanismos de reversibilidad y portabilidad del servicio [62].

Se recomienda que las licencias incluyan cláusulas de reversión tecnológica, que faculten al Concello para mantener el control funcional del sistema incluso ante un eventual cambio de adjudicatario en futuras contrataciones públicas.

#### ***3.4.4.3 Convenios de colaboración***

Será imperativo formalizar convenios de colaboración con entidades públicas y privadas, con el fin de facilitar la interoperabilidad, el acceso a datos externos y la integración del sistema en ecosistemas energéticos más amplios. Entre los acuerdos más relevantes se incluyen:

- Distribuidora eléctrica (por ejemplo, Naturgy – UFD u otra análoga): convenio que habilite la interacción de los puntos de carga con la red de baja tensión y regule el intercambio energético (inyección y redención V2G), conforme a lo dispuesto en la Ley 24/2013, del Sector Eléctrico [31].
- Proveedores de servicios cloud o plataformas Smart City: en caso de que se pretenda la integración con sistemas preexistentes a nivel autonómico o estatal.

- Consorcios o clústeres de innovación energética (Galicia Movilidad, Clúster Enerxía Galicia, entre otros): con el objetivo de facilitar el seguimiento, validación y escalabilidad del sistema.

Dichos convenios deberán incorporar cláusulas específicas relativas al cumplimiento normativo (ENS, LOPDGDD, RGPD), a la gobernanza de datos, y a la delimitación precisa de responsabilidades tanto técnicas como jurídicas.

### **3.4.5 SISTEMA DE GESTIÓN ADMINISTRATIVA PROPUESTO**

La administración del sistema de movilidad inteligente y de tecnología vehículo-a-red (V2G) en Pontevedra será estructurada bajo una gobernanza coordinada por el Concello, fundamentada en principios de eficiencia operativa, trazabilidad documental, control mediante indicadores y estricta adecuación al marco normativo vigente en materia de administración electrónica y contratación pública.

- Integración con el ecosistema municipal preexistente. El sistema propuesto se integrará de manera orgánica con las plataformas ya operativas en el Ayuntamiento, entre las que destacan:
  - El sistema de gestión económico-presupuestaria (ERP municipal), que permitirá realizar un seguimiento riguroso de la ejecución presupuestaria vinculada a los contratos derivados del proyecto.
  - El gestor de expedientes electrónicos, el cual garantizará la trazabilidad documental, la validación procedimental y la interacción formal con los adjudicatarios, en conformidad con la Ley 39/2015, del Procedimiento Administrativo Común [69].
  - La plataforma municipal de transparencia y participación ciudadana, desde la cual se podrá difundir información sintetizada sobre el rendimiento del sistema, indicadores clave de movilidad y datos anonimizados para su análisis público.
- Supervisión técnica y aseguramiento de la calidad. La gestión técnica se respaldará en los siguientes mecanismos:

- La constitución de un comité de seguimiento del proyecto, compuesto por representantes del Concello (áreas de Medio Ambiente, Urbanismo y Smart City) junto con el adjudicatario principal.
- La celebración de reuniones mensuales de seguimiento, que incluirán actas obligatorias y verificación de hitos técnicos conforme al cronograma establecido.
- El uso de indicadores clave de desempeño (KPIs), definidos en los pliegos contractuales, tales como: tiempo medio de disponibilidad del sistema, porcentaje de puntos operativos, tasa de resolución de incidencias dentro del SLA, y emisiones evitadas, entre otros.
- Gestión de incidencias y mantenimiento. Se implementará una plataforma digital de soporte y gestión de tickets, operada por la empresa adjudicataria, con el objetivo de:
  - Registrar y dar seguimiento a incidencias técnicas relacionadas con hardware, software o conectividad.
  - Monitorizar en tiempo real el estado del sistema, permitiendo una respuesta ágil ante eventualidades.
  - Coordinar de manera eficiente el mantenimiento preventivo y correctivo, en línea con los planes establecidos en el contrato.
- Auditoría, cumplimiento normativo y seguridad. El sistema deberá cumplir con los requerimientos del Esquema Nacional de Seguridad (ENS) en su nivel medio, prestando especial atención a los aspectos de:
  - Control de accesos y gestión de roles.
  - Registro detallado de la actividad mediante logs.
  - Procedimientos de respaldo y recuperación ante desastres.
  - Ejecución de auditorías periódicas de cumplimiento [61].

Además, el proveedor estará obligado a remitir al Concello informes detallados de cumplimiento normativo y evaluación de riesgos, conforme a las directrices establecidas por las guías CCN-STIC aplicables.

### **3.4.6 ORGANIGRAMA DEL PROYECTO**

El despliegue del sistema de movilidad inteligente y tecnología V2G en Pontevedra se fundamenta en una estructura organizativa mixta, que combina un liderazgo institucional sólido desde el

ámbito municipal con una ejecución técnica externalizada por lotes y un modelo de supervisión centralizado. Este enfoque organizativo garantiza tanto el control público del sistema como su interoperabilidad técnica, asegurando además el cumplimiento riguroso de los objetivos establecidos, tanto a nivel normativo como funcional.

La arquitectura organizativa del proyecto se articula en tres niveles jerárquicos claramente definidos:

1. Nivel estratégico (Ayuntamiento de Pontevedra).

En este ámbito se definen las metas generales del proyecto, se aprueban los presupuestos y se validan las decisiones estratégicas. Está conformado por responsables políticos y técnicos de las áreas municipales de Medio Ambiente, Urbanismo y Smart City, cuya función es orientar el proyecto en consonancia con las políticas públicas locales.

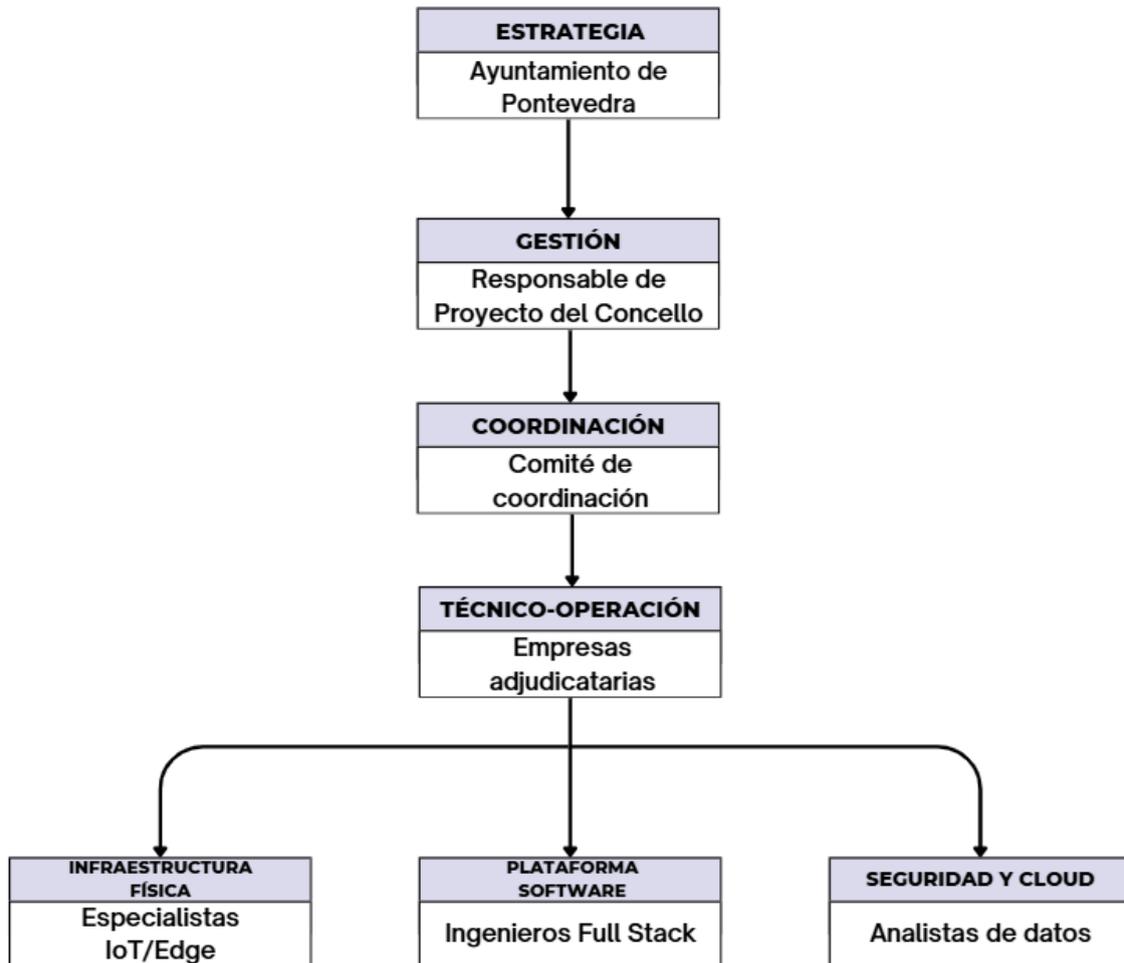
2. Nivel de gestión (equipo de coordinación).

Encabezado por un responsable de proyecto del Concello, este nivel se encarga de coordinar la ejecución transversal entre los distintos lotes, validar entregables técnicos, monitorizar indicadores clave y liderar las reuniones periódicas de seguimiento. Actúa además como vínculo operativo entre las empresas adjudicatarias y el comité de seguimiento institucional.

3. Nivel técnico-operativo (empresas adjudicatarias).

Este nivel comprende a las entidades encargadas de la ejecución directa de las soluciones técnicas, organizadas en lotes funcionales que incluyen:

- La instalación de infraestructura física (sensores, puntos de carga).
- El desarrollo e implementación de la plataforma software (tecnología V2G, tratamiento de datos, visualización mediante paneles).
- La provisión de servicios de seguridad y soluciones en la nube.
- El mantenimiento, soporte y la integración efectiva con los sistemas municipales preexistentes.



*Ilustración 12. Organigrama del proyecto*

Esta forma de organización descrita permite avanzar de manera especializada y eficiente, combinando la supervisión pública con el apoyo técnico de equipos externos.

### **3.5 EVALUACIÓN COMERCIAL**

#### **3.5.1 CLIENTE OBJETIVO**

El cliente principal del sistema propuesto es el Ayuntamiento de Pontevedra, que actúa no solo como promotor y financiador, sino también como beneficiario directo de la infraestructura inteligente que se plantea. Su implicación va más allá de una simple contratación: el Concello asume un rol activo en la definición de los objetivos estratégicos, la coordinación institucional, la supervisión del desarrollo del proyecto y la utilización de los datos y servicios generados.

En línea con su compromiso con la digitalización y la sostenibilidad, el Ayuntamiento lidera el proyecto no solo desde una perspectiva administrativa, sino también en términos de gobernanza tecnológica y operativa. Esto garantiza que la implementación del sistema esté orientada al interés público, con pleno control sobre los flujos de datos, la titularidad de la infraestructura y la toma de decisiones clave.

Tal como se detalla en el apartado 3.4.2, se contempla la creación de una Sociedad Limitada Unipersonal (SLU), íntegramente municipal, como vehículo operativo para la gestión del sistema. Esta figura jurídica otorga mayor autonomía al proyecto, permitiendo una gestión más ágil de contrataciones, licencias tecnológicas, mantenimiento evolutivo de la plataforma y posibles colaboraciones con el sector privado bajo fórmulas de partenariado público-privado.

Desde el punto de vista contractual, el Ayuntamiento actuará como entidad licitadora y adjudicadora de los distintos componentes funcionales del sistema, infraestructura, plataforma, operación y ciberseguridad, tal como también se expone en el apartado 3.4.2. Cada proveedor adjudicatario deberá cumplir con las exigencias técnicas, legales y organizativas establecidas por el propio Concello, que mantendrá en todo momento la titularidad y el control integral de la solución.

En consecuencia, el cliente objetivo del sistema no es una entidad genérica ni una empresa privada usuaria, sino una administración pública local firmemente comprometida con la transformación digital de la movilidad urbana, que lidera esta iniciativa como parte de su estrategia de ciudad inteligente, transición energética y mejora integral del entorno urbano.

### **3.5.2 ESTRATEGIA DE ADOPCIÓN Y FASES DE DESPLIEGUE**

La estrategia para la adopción del sistema se ha concebido como un proceso progresivo, estructurado por fases, con el objetivo de asegurar una implementación sólida desde el punto de vista institucional, técnico y operativo. Esta secuencia de despliegue permite minimizar riesgos, incorporar mejoras a partir de la experiencia práctica y facilitar una integración armónica con las estructuras organizativas del Ayuntamiento.

Si bien las fases técnicas del proyecto han sido desarrolladas en el apartado 2.4.1, desde una perspectiva orientada a la adopción institucional y operativa, dichas fases se complementan con

una hoja de ruta enfocada en el cliente final, el propio Ayuntamiento, así como en el establecimiento de relaciones funcionales y efectivas con los adjudicatarios y demás actores implicados.

A continuación, se presenta el detalle de las etapas previstas en esta estrategia de adopción.

#### ***3.5.2.1 Fase 1 – Pilotaje institucional (meses 0–6)***

- Se inicia con una implementación controlada en ubicaciones seleccionadas, como instalaciones municipales y aparcamientos públicos.
- Incluye la instalación de los primeros sensores y cargadores bidireccionales, así como una integración parcial con plataformas tecnológicas ya existentes del Concello.
- Se prevé formación técnica para el personal municipal, junto con sesiones demostrativas dirigidas a responsables políticos y operativos.
- Durante esta etapa, también se realizarán los primeros ajustes de la plataforma y se validará el modelo de datos.

#### ***3.5.2.2 Fase 2 – Expansión operativa (meses 6–18)***

- El sistema se extiende progresivamente a nuevas áreas, tales como Zonas de Bajas Emisiones o zonas con alta densidad peatonal y tráfico intermodal.
- El modelo de operación se consolida mediante la adjudicación de contratos por lote (ver apartado 3.4.2).
- Se incorporan funcionalidades adicionales en la plataforma digital, como visualización en tiempo real, cuadros de mando operativos y herramientas avanzadas de gestión energética.
- Asimismo, se impulsa una estrategia de comunicación institucional y apertura progresiva de datos para fomentar la transparencia y su reutilización.

#### ***3.5.2.3 Fase 3 – Adopción plena y explotación (a partir del mes 18)***

- El sistema se integra plenamente en los procesos de planificación urbana, movilidad y mantenimiento de infraestructuras municipales.
- La operación se normaliza, ya sea por parte de la SLU municipal o del área técnica correspondiente del Ayuntamiento.

- Se establecerá un mecanismo de monitorización continua del rendimiento e impacto, basado en indicadores clave (véase 3.5.3).
- Además, se dejarán sentadas las bases para futuras fases de ampliación intermunicipal o su integración en redes regionales.

Este enfoque escalonado permite generar una curva de aprendizaje institucional que facilite la adaptación progresiva, minimice resistencias internas y asegure que las herramientas tecnológicas respondan con precisión a las necesidades reales del Ayuntamiento. A su vez, la incorporación anticipada de criterios de interoperabilidad, seguridad y escalabilidad contribuye a consolidar la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

### **3.5.3 ESTIMACIÓN DE IMPACTO**

La implementación del sistema propuesto tiene el potencial de generar impactos positivos significativos en los ámbitos económico, social y medioambiental, convirtiéndose en una herramienta clave para avanzar hacia un modelo urbano más eficiente, sostenible y resiliente. Su diseño, basado en una red de sensorización distribuida, gestión energética avanzada y tecnologías V2G (Vehicle-to-Grid), se alinea con los principios del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y con los objetivos de neutralidad climática definidos por la Ley 7/2021 de Cambio Climático y Transición Energética.

#### ***3.5.3.1 Impacto económico***

Desde la perspectiva económica, el sistema contempla la creación de una red de aparcamientos periféricos dotados de cargadores bidireccionales para vehículos eléctricos, integrados en una infraestructura V2G. Según las proyecciones, esta red permitirá inyectar hasta 75.000 kWh anuales en la red eléctrica, lo que se traduciría en un ahorro directo cercano a los 11.000 € anuales en el consumo eléctrico del Ayuntamiento. Este ahorro, recurrente y sostenible, refuerza la eficiencia del gasto público y reduce la dependencia energética del municipio. Además, la digitalización de procesos y servicios urbanos facilitará una gestión más eficiente de recursos humanos y materiales, favoreciendo una mejor asignación del presupuesto operativo de los servicios municipales.

### ***3.5.3.2 Impacto social***

En el plano social, el sistema supondrá una mejora notable en la calidad de los servicios públicos y en la relación entre ciudadanía e infraestructura urbana. La gestión en tiempo real del tráfico, el monitoreo ambiental mediante sensores distribuidos y la accesibilidad a la información energética reforzarán la confianza de la ciudadanía y la percepción de una administración pública moderna y transparente. Asimismo, el componente pedagógico vinculado a la visualización de datos, a través de paneles informativos o aplicaciones móviles, contribuirá a fomentar una mayor concienciación y responsabilidad en el consumo energético, impulsando la participación activa de la ciudadanía en el proceso de transición ecológica.

### ***3.5.3.3 Impacto medioambiental***

En términos medioambientales, la redistribución del tráfico urbano mediante sensores y algoritmos de control, junto con el uso de aparcamientos disuasorios periféricos, permitirá estimar una reducción del 2 % en las emisiones asociadas a la movilidad. Esta disminución se traduce en un ahorro potencial de hasta 2.800 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales. A ello se suma la integración de tecnologías de almacenamiento energético y recarga inteligente, que facilitará una mayor incorporación de energías renovables al entorno urbano, disminuyendo la huella de carbono de la movilidad eléctrica y del funcionamiento de los servicios municipales. La reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas en suspensión también aportará beneficios directos para la salud pública.

### ***3.5.3.4 Conclusión***

En su conjunto, el sistema propuesto constituye una solución integral de alto impacto, con beneficios tangibles y medibles en múltiples dimensiones. Su arquitectura modular y escalable lo hace adaptable a otras ciudades de tamaño medio, posicionándolo como un referente para la planificación urbana inteligente. Además, su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular, el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), el ODS 11 (Ciudades sostenibles) y el ODS 13 (Acción por el clima), refuerza su valor estratégico y su alineación con las políticas públicas nacionales y europeas [57].

## **Capítulo 4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

### ***4.1 RESUMEN DE LOS OBJETIVOS ALCANZADOS***

El objetivo principal de este trabajo ha sido el diseño de un sistema inteligente de gestión urbana, fundamentado en tecnologías IoT, almacenamiento en la nube e integración de infraestructuras energéticas V2G, específicamente adaptado al contexto del municipio de Pontevedra. A lo largo del desarrollo del proyecto, se han alcanzado de manera satisfactoria los siguientes hitos:

- Diagnóstico del contexto urbano y normativo: Se ha realizado un análisis exhaustivo del marco jurídico aplicable, tanto a escala europea como nacional, complementado con un estudio detallado de las políticas municipales en materia de movilidad, transición energética y digitalización de los servicios públicos.
- Definición de la arquitectura técnica del sistema: Se ha concebido una arquitectura modular, escalable y segura, estructurada sobre una red de sensores distribuidos, nodos edge, comunicación LoRa, almacenamiento en la nube y herramientas de visualización. Esta configuración garantiza la interoperabilidad, la resiliencia del sistema y el estricto cumplimiento normativo.
- Integración de tecnología V2G: Se ha evaluado la viabilidad técnica y económica de emplear aparcamientos disuasorios como puntos de recarga bidireccional, capaces de inyectar energía a la red mediante tecnología V2G. Esta propuesta permitiría un ahorro estimado de 11.000 € anuales y contribuiría significativamente a la sostenibilidad energética del municipio.
- Planificación de la implementación y operación del sistema: Se ha elaborado un plan maestro de despliegue por fases, que incluye un cronograma detallado, una estrategia de mantenimiento y una tabla de dimensionamiento técnico con estimaciones de costes y proveedores de referencia.
- Análisis de factibilidad económica, social y medioambiental: Se ha estimado el impacto del sistema en términos económicos, sociales y ambientales, identificando un alto potencial

de replicabilidad en más de 140 municipios con características similares a las de Pontevedra.

- **Identificación de riesgos y garantías de seguridad:** Se han identificado los principales riesgos técnicos, operativos y legales, proponiendo medidas específicas de mitigación y protocolos de actuación. Asimismo, se han definido mecanismos robustos de ciberseguridad y protección de datos personales.

En conjunto, se ha logrado diseñar una solución integral, viable y alineada con los desafíos actuales que enfrentan las ciudades inteligentes. El proyecto cumple los objetivos establecidos inicialmente y sienta unas bases sólidas para su futura implementación y escalabilidad en entornos urbanos reales.

## ***4.2 CONCLUSIONES E IMPACTO DEL PROYECTO***

El desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster ha permitido constatar la viabilidad técnica, económica y normativa de un sistema inteligente de gestión urbana que combina tecnologías IoT, plataformas cloud y capacidades V2G como elementos clave para construir una ciudad más eficiente, sostenible y conectada.

Una de las conclusiones más destacadas del proyecto es que la digitalización de los aparcamientos periféricos, integrada con sistemas de recarga bidireccional y sensorización ambiental, puede convertirse en un eje estratégico para mejorar la movilidad urbana, reducir las emisiones contaminantes y optimizar el uso de los recursos energéticos municipales. Esta infraestructura no solo incrementa la eficiencia de los servicios públicos, sino que también sienta las bases para nuevos modelos de gobernanza urbana basados en el análisis de datos en tiempo real.

Desde el punto de vista económico, el sistema propuesto ofrece beneficios tangibles, como la reducción del consumo eléctrico municipal gracias a la inyección de energía desde vehículos eléctricos a la red local, con un ahorro estimado superior a los 11.000 € anuales. A ello se suman las ventajas operativas derivadas de la automatización y el control inteligente de los servicios. Además, se ha demostrado que la solución es escalable y replicable en un amplio espectro de municipios de tamaño medio, más de 140 en todo el territorio nacional, lo que incrementa su atractivo tanto para administraciones públicas como para actores del sector privado.

En términos medioambientales, el impacto del sistema es igualmente significativo. La reorganización del tráfico, el uso de datos en tiempo real y el impulso a la movilidad eléctrica permiten estimar una reducción de hasta 2.800 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales solo en Pontevedra. Este resultado contribuye directamente al cumplimiento de los objetivos marcados por el PNIEC, la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular los ODS 11 (Ciudades sostenibles) y 13 (Acción por el clima).

Desde el punto de vista normativo y administrativo, el proyecto ha identificado un entorno regulatorio favorable para su implantación, así como los principales requisitos legales en materia de protección de datos, interoperabilidad y contratación pública. Igualmente, se han analizado modelos de gestión público-privada que permitirían viabilizar su implementación y garantizar su sostenibilidad en el largo plazo.

En suma, el proyecto demuestra no solo que la tecnología está preparada para transformar la gestión urbana, sino que su aplicación estratégica puede generar valor económico, social y ambiental de forma simultánea. La propuesta desarrollada sitúa a los municipios como actores clave de la transición digital y ecológica, ofreciendo una solución realista, adaptable y alineada con las políticas actuales de ciudad inteligente y neutralidad climática, con capacidad de generar impacto desde las primeras fases de su ejecución.

### **4.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO**

A pesar de los avances alcanzados y del carácter multidisciplinar que ha caracterizado este proyecto, es importante reconocer una serie de limitaciones que condicionan tanto la profundidad del análisis como la aplicabilidad inmediata del sistema diseñado.

En primer lugar, este trabajo se ha centrado en la fase de diseño conceptual y análisis de viabilidad, sin que se haya llevado a cabo una implementación práctica en un entorno real. Aunque se han simulado diversos escenarios y se han formulado estimaciones económicas y energéticas basadas en datos reales del municipio de Pontevedra, será necesario validar dichas hipótesis mediante un proyecto piloto que permita contrastar empíricamente los resultados obtenidos.

En segundo lugar, el análisis de impacto ambiental y ahorro energético se ha elaborado a partir de supuestos conservadores y estimaciones indirectas, debido a la falta de una infraestructura de datos homogénea y actualizada sobre tráfico, emisiones y consumo energético a nivel municipal. Esta carencia puede limitar la precisión de las cifras proyectadas, si bien las tendencias generales identificadas son sólidas y se encuentran bien fundamentadas en la literatura y en estudios comparables.

Asimismo, debe señalarse una limitación vinculada a la dependencia tecnológica de ciertos proveedores específicos, especialmente en lo relativo a servicios en la nube, comunicaciones IoT y hardware para recarga bidireccional. Aunque el diseño del sistema se ha concebido desde una lógica de estándares abiertos e interoperabilidad, la elección de plataformas como Microsoft Azure podría condicionar, en ausencia de salvaguardas, la portabilidad o escalabilidad del sistema en el futuro.

Desde una perspectiva legal y administrativa, se ha abordado el marco normativo general aplicable, pero no se ha profundizado en aspectos concretos relacionados con la contratación pública, las licencias urbanísticas o la integración con sistemas técnicos ya existentes en el ámbito municipal. Estos aspectos requerirían un análisis jurídico y técnico más detallado, preferiblemente en colaboración directa con los servicios jurídicos y técnicos de la administración local.

Por último, el estudio no incorpora una evaluación empírica de la aceptación social del sistema, al no haberse desarrollado encuestas ciudadanas ni simulaciones de comportamiento de usuarios reales. Esta ausencia limita la capacidad de anticipar posibles barreras sociales o resistencias al cambio, aspecto que podría ser abordado en fases posteriores mediante metodologías participativas o estudios de usabilidad.

En suma, si bien el proyecto alcanza los objetivos inicialmente planteados y presenta una solución sólida y técnicamente viable, su desarrollo futuro deberá incluir pruebas piloto en entorno real, validación de resultados, análisis jurídico específico y evaluación de la aceptación ciudadana, a fin de garantizar su sostenibilidad e impacto a largo plazo.

#### **4.4 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS**

Con vistas a su evolución natural, el proyecto plantea diversas líneas de trabajo que permitirán consolidar, escalar y adaptar la solución propuesta a nuevas realidades y contextos:

1. Desarrollo de un proyecto piloto en entorno real: Se propone desplegar el sistema en uno de los aparcamientos disuasorios del municipio de Pontevedra, con el objetivo de validar su funcionamiento técnico, evaluar la calidad de los datos generados y contrastar las estimaciones energéticas y económicas con resultados medibles. Esta fase permitirá ajustar parámetros críticos y extraer aprendizajes valiosos de cara a una futura implantación a mayor escala.
2. Profundización en el modelo económico y jurídico: Será necesario abordar un análisis más detallado del retorno de la inversión y de la viabilidad financiera del sistema, incluyendo la evaluación de diferentes esquemas de gestión, ya sean de carácter público, privado o mixto. Asimismo, deberá elaborarse el diseño de los pliegos técnicos y administrativos necesarios para su licitación, de acuerdo con la normativa española vigente en materia de contratación pública.
3. Ampliación funcional del sistema: A partir de la arquitectura escalable ya planteada, se abre la posibilidad de integrar nuevas funcionalidades orientadas a otros servicios urbanos, tales como la gestión inteligente del alumbrado público, la optimización de la recogida de residuos o la monitorización ambiental. Esta evolución funcional reforzaría el carácter transversal y adaptable del sistema.
4. Estudios de aceptación ciudadana y organizativa: Para garantizar una adopción efectiva y sostenida del sistema, se recomienda llevar a cabo estudios de percepción y aceptación tanto por parte de la ciudadanía como de los equipos municipales. Estos estudios podrían incluir encuestas, talleres participativos y pruebas de visualización pública de datos, favoreciendo una mayor apropiación social del proyecto.
5. Estandarización y replicabilidad del modelo: Con el fin de facilitar su adaptación a otros contextos urbanos, se plantea la creación de una versión estandarizada del sistema, acompañada de documentación técnica reutilizable, plantillas configurables y una propuesta de valor clara dirigida a otras administraciones públicas o potenciales socios

tecnológicos. Esta estrategia contribuiría a escalar el impacto del proyecto más allá del ámbito local.

En conjunto, estas líneas de trabajo permiten consolidar el proyecto no solo como una solución viable para Pontevedra, sino también como una propuesta con alto potencial de replicabilidad a nivel nacional, en sintonía con los retos actuales de digitalización, eficiencia energética y sostenibilidad en la gestión urbana.

#### **4.5 REFLEXIÓN FINAL**

La elaboración de este proyecto ha representado una valiosa oportunidad para reflexionar sobre cómo la tecnología puede contribuir, de forma concreta y transformadora, al futuro de Pontevedra. A lo largo del trabajo se ha demostrado que es posible concebir una infraestructura urbana inteligente, basada en datos y energías limpias, alineada con los objetivos de sostenibilidad, eficiencia y mejora de los servicios públicos que el municipio ya impulsa.

El sistema propuesto no se limita a ofrecer soluciones técnicas viables, sino que responde a necesidades reales y específicas del contexto urbano pontevedrés: la movilidad en la periferia, la eficiencia energética de los servicios municipales, la optimización del espacio público y la reducción de emisiones contaminantes. Cada componente ha sido diseñado teniendo en cuenta su encaje funcional dentro del tejido urbano, institucional y social de la ciudad, con la aspiración de generar impactos positivos desde las primeras etapas de su implementación.

Más allá del planteamiento tecnológico, este proyecto encarna una forma de entender el progreso local no como una simple adopción de soluciones tecnológicas externas, sino como una evolución coherente y arraigada en las prioridades, valores y aspiraciones que definen a Pontevedra. La inteligencia urbana aquí no se presenta como un fin en sí mismo, sino como una herramienta al servicio de una ciudad más habitable, resiliente y comprometida con su entorno.

Desde una perspectiva personal, este trabajo ha supuesto también un ejercicio de compromiso con la ciudad. Ha brindado la posibilidad de aplicar conocimientos técnicos a una realidad cercana, con la ambición de contribuir de forma útil, realista y sostenible al desarrollo urbano. Aunque aún quedan etapas por recorrer, se han establecido unas bases sólidas para que Pontevedra continúe

---

consolidándose como referente en gestión urbana inteligente, no solo por los resultados que alcanza, sino por los principios que guían su actuación y el impacto social que genera.

## Capítulo 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] On The Road Trends. (2023). *Pontevedra: un ejemplo a seguir en movilidad sostenible*. <https://www.ontheroadtrends.com/pontevedra-ejemplo-a-seguir-en-gestion-movilidad-sostenible/>
- [2] Economía Digital. (2023). *Pontevedra y su gasto en alumbrado público: resultados del Atlas de Sostenibilidad*. <https://www.economiadigital.es/galicia/galicia-smart-business/atlas-urbano-de-la-sostenibilidad/pontevedra-resultados-ods-atlas.html>
- [3] Deakin, M. (2014). Smart cities: The state-of-the-art and governance challenge. *Deakin Triple Helix*, 1(7). <http://link.springer.com/article/10.1186/s40604-014-0007-9>
- [4] Orejon-Sanchez, R. D., Crespo-Garcia, D., & Andres-Diaz, J. R. (2022). Smart cities' development in Spain: A comparison of technical and social indicators with reference to European cities. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103828>
- [5] Savithramma, R. M., & Ashwini, B. P. (2022). Smart mobility implementation in smart cities: A comprehensive review on state-of-art technologies. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716288>
- [6] Correia, D., Marques, J. L., & Teixeira, L. (2022). The state-of-the-art of smart cities in the European Union. *Smart Cities*, 5(4), 1776–1810. <https://doi.org/10.3390/smartcities5040089>
- [7] Damiano, A., Gatto, G., Marongiu, I., Porru, M., & Serpi, A. (2014). Vehicle-to-Grid Technology: State-of-the-Art and Future Scenarios. *Journal of Energy and Power Engineering*, 8, 152-165.
- [8] Liu, C., Chau, K. T., Wu, D., & Gao, S. (2013). Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies. *Proceedings of the IEEE*, 101(11), 2409-2425. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2271951>
- [9] Mojumder, M. R. H., Antara, F. A., Hasanuzzaman, M., Alamri, B., & Alsharif, M. (2022). Electric Vehicle-to-Grid (V2G) Technologies: Impact on the Power Grid and Battery. *Sustainability*, 14(21), 13856. <https://doi.org/10.3390/su142113856>

- [10] Shariff, S. M., Iqbal, D., Alam, M. S., & Ahmad, F. (2019). A State of the Art Review of Electric Vehicle to Grid (V2G) Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 561(1), 012103. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012103>
- [11] Sassi, H. B., Errahimi, F., & Essbai, N. (2019). V2G and Wireless V2G Concepts: State of the Art and Current Challenges. *IEEE Conference on Smart Grids and Energy Systems*.
- [12] Alsharif, A., Alarga, A. S. D., Ahmed, A. A., Jomah, O. S. M., & Khaleel, M. M. (2023). Comprehensive State-of-the-Art of Vehicle-To-Grid Technology. *IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*. <https://doi.org/10.1109/MI-STA57575.2023.10169116>
- [13] Sovacool, B. K., Noel, L., Axsen, J., & Kempton, W. (2020). *The neglected social dimensions to a vehicle-to-grid (V2G) transition: A critical and systematic review*. *Environmental Research Letters*, 15(11), 113002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9c6d>
- [14] Alghamdi, T., Mostafá, S., Abdelkader, G., & Elgazzar, K. (2021). *A Comparative Study on Traffic Modeling Techniques for Predicting and Simulating Traffic Behavior*. *Future Internet*, 14(294). <https://doi.org/10.3390/fi14100294>
- [15] Castillo, E., Grande, Z., Calviño, A., Szeto, W. Y., & Lo, H. K. (2015). *A State-of-the-Art Review of the Sensor Location, Flow Observability, Estimation, and Prediction Problems in Traffic Networks*. *Journal of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2015/903563>
- [16] Mohiuddin Qadri, S. S. S., Gökçe, M. A., & Öner, E. (2020). *State-of-Art Review of Traffic Signal Control Methods: Challenges and Opportunities*. *European Transport Research Review*, 12(55). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1>
- [17] Van Wageningen-Kessels, F., Van Lint, H., Vuik, K., & Hoogendoorn, S. (2015). *Genealogy of Traffic Flow Models*. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(445–473). <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
- [18] Li, Y., Liu, J., Wang, X., & Zhao, R. (2020). *Modern power systems: Challenges and future directions*. *Energy Reports*, 6, 1003-1018. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.015>

- [19] Moreno Escobar, J. J., Morales Matamoros, O., Tejeida Padilla, R., Lina Reyes, I., & Quintana Espinosa, H. (2021). *A comprehensive review on Smart Grids: Challenges and opportunities*. *Sensors*, 21(21), 6978. <https://doi.org/10.3390/s21216978>
- [20] Raza, M. A., Aman, M. M., Abro, A. G., Tunio, M. A., Khatri, K. L., & Shahid, M. (2022). Challenges and potentials of implementing a smart grid for Pakistan's electric network. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100941. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100941>
- [21] Butt, O. M., Zulqarnain, M., & Butt, T. M. (2021). Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 687–695. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004>
- [22] Hasan, M. K., Habib, A. A., Islam, S., Balfaqih, M., Alfawaz, K. M., & Singh, D. (2023). Smart Grid Communication Networks for Electric Vehicles Empowering Distributed Energy Generation: Constraints, Challenges, and Recommendations. *Energies*, 16(1140). <https://doi.org/10.3390/en16031140>
- [23] Boneder, S. (2023). *Evaluation and comparison of the security offerings of the big three cloud service providers Amazon Web Services, Microsoft Azure, and Google Cloud Platform*. Ingolstadt: Faculty of Computer Science
- [24] Hassan, M., Zmij, K., Azhygulov, K., & Sitaula, S. (2022). *Cloud Computing Services and Microsoft Azure: Why Microsoft Azure?* SSRN. <https://ssrn.com/abstract=4103377>
- [25] Kaushik, P., Vashisht, S., Rao, A. M., & Gupta, S. (2021). *Cloud Computing and Comparison based on Service and Performance between Amazon AWS, Microsoft Azure, and Google Cloud*. 2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI). <https://doi.org/10.1109/ICTAI53825.2021.9673425>
- [26] Mufti, T., Mittal, P., & Gupta, B. (2021). *A Review on Amazon Web Service (AWS), Microsoft Azure & Google Cloud Platform (GCP) Services*. ICIDSSD 2020, February 27-28, New Delhi, India. <https://doi.org/10.4108/eai.27-2-2020.2303255>
- [27] Peri, S. D., Ravi, A., & Supriya, M. (2024). *Design and Implementation of a Real-time IoT Solution for Smart Meter Data Analysis in Microsoft Azure*. IEEE 15th International Conference on Computing, Communication, and Networking Technologies (ICCCNT)
- [28] Parlamento Europeo y Consejo. Directiva (UE) 2019/944 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad. DOUE [Internet]. 2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>

- [29] Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (UE) 2022/869 sobre las directrices para las redes transeuropeas de energía. DOUE [Internet]. 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32022R0869>
- [30] Unión Europea. Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo, Reglamento General de Protección de Datos (RGPD). DOUE [Internet]. 2016. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0679>
- [31] Gobierno de España. Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. BOE [Internet]. 2013. <https://www.boe.es/eli/es/l/2013/12/26/24>
- [32] Gobierno de España. Real Decreto 647/2011, de 9 de mayo, por el que se regula la actividad de los servicios de gestión de la demanda. BOE [Internet]. 2011. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2011/05/09/647>
- [33] Gobierno de España. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética. BOE [Internet]. 2021. <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>
- [34] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [Internet]. 2020. <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/energia/pniec.aspx>
- [35] Gobierno de España. Ley Orgánica 3/2018, de Protección de Datos Personales y garantía de los derechos digitales. BOE [Internet]. 2018. <https://www.boe.es/eli/es/lo/2018/12/05/3>
- [36] Gobierno de España. Esquema Nacional de Seguridad y Esquema Nacional de Interoperabilidad. BOE [Internet]. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2010-1331>
- [37] Xunta de Galicia. Estratexia Enerxética de Galicia 2030 [Internet]. 2022. <https://www.inega.gal/contido.asp?ID=359&Idioma=es>
- [38] Concello de Pontevedra. Plan de Acción polo Clima e a Enerxía Sostible (PACES) [Internet]. <https://www.pontevedra.gal/medio-ambiente/paces/>
- [39] Infobae. *Cómo hizo la ciudad española de Pontevedra para reducir a cero las muertes de peatones en accidentes de tránsito* [Internet]. 2022 [citado 24 jun 2025]. <https://www.infobae.com/america/soluciones/2022/12/16/como-hizo-la-ciudad-espanola-de-pontevedra-para-reducir-a-cero-las-muertes-de-peatones-en-accidentes-de-transito/>
- [40] CityChangers. Pontevedra: The Little Utopian City That Drove Out Cars [Internet]. 2021. <https://citychangers.org/pontevedra-the-little-utopian-city-that-drove-out-cars/>

- [41] Asociación Ciudades que Caminan. *El modelo de la ciudad de Pontevedra* [Internet]. 2022. <https://ciudadesquecaminan.org/blog/panorama/el-modelo-de-la-ciudad-de-pontevedra/>
- [42] PontevedraViva. En fase de pruebas los nuevos paneles informativos en las entradas de la ciudad [Internet]. 2023. [https://www.pontevedraviva.com/es/general/en-fase-de-pruebas-los-nuevos-paneles-informativos-en-las-entradas-de-la-ciudad\\_341473\\_102.html](https://www.pontevedraviva.com/es/general/en-fase-de-pruebas-los-nuevos-paneles-informativos-en-las-entradas-de-la-ciudad_341473_102.html)
- [43] González-Gil A, Palacios-García EJ, Alonso R, Sánchez-Miralles A. Real-time Smart Meter Data Analysis for Future Smart Grids: A Survey. *Sensors*. 2021;21(21):6978. <https://doi.org/10.3390/s21216978>
- [44] Alfieri R, Fontana F, Brambilla A, Merlo M, Monteleone S. Vehicle-to-Grid (V2G) Communication Interface and Protocols: State-of-the-Art and Future Challenges. *Energies*. 2023;16(3):1140. <https://doi.org/10.3390/en16031140>
- [45] Pérez-Ortega J, Muñoz JF, Crespo JL. Diseño de una arquitectura escalable para integración de puntos de recarga en redes urbanas inteligentes. *Revista I+D Tecnológico*. 2020;16(2):91-99. [https://revistas.utec.edu.pe/index.php/id\\_t/article/view/1039](https://revistas.utec.edu.pe/index.php/id_t/article/view/1039)
- [46] González-Gil A, Fernández-González E, Alonso R. Comparison of Open Communication Standards in Smart Grids: MQTT, OPC UA and OCPP. *Int J Distrib Sens Netw*. 2020;16(10):1550147720966902. <https://doi.org/10.1177/1550147720966902>
- [47] Khalid W, Rehman AU, Ullah I, Latif A, Ghafoor K, Khan KA, et al. Implementation of a Real-Time IoT Solution for Smart Meter Data Analysis in Microsoft Azure. In: *2022 5th International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. IEEE; 2022. <https://doi.org/10.1109/iCoMET54241.2022.9746570>
- [48] Narayanan A, Shmatikov V. Robust De-anonymization of Large Sparse Datasets. *IEEE Symp S&P*. 2008. <https://doi.org/10.1109/SP.2008.33>
- [49] Microsoft. Azure Security Documentation. Microsoft Learn; 2024. Disponible en: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/security/>
- [50] Unión Europea. Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea, L119/1, 2016.
- [51] ENISA. Cybersecurity for Smart Cities. European Union Agency for Cybersecurity; 2022. <https://www.enisa.europa.eu/publications/cybersecurity-for-smart-cities>

- [52] CCN-CERT. Guía CCN-STIC 457. Recomendaciones de seguridad para entornos Smart Cities. Centro Criptológico Nacional; 2021. <https://www.ccn-cert.cni.es/publico/series-ccn-stic/series-400.html>
- [53] NIST. Considerations for Managing Internet of Things (IoT) Cybersecurity and Privacy Risks. NIST IR 8228; 2019. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8228>
- [54] Gobierno de España. Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética. BOE 2021. <https://www.boe.es/eli/es/l/2021/05/20/7>
- [55] Ministerio para la Transición Ecológica. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021–2030. <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/energia/pniec.aspx>
- [56] NetZeroCities. Vitoria-Gasteiz: Climate City Contract. 2023. [https://netzerocities.app/\\_content/files/knowledge/4067/vitoria\\_gasteiz\\_nzc\\_ccc.pdf](https://netzerocities.app/_content/files/knowledge/4067/vitoria_gasteiz_nzc_ccc.pdf)
- [57] Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). <https://sdgs.un.org/goals>
- [58] Fernández B. *Pontevedra, laboratorio de movilidad urbana. Ciencia, Técnica y Estética de la Ciudad.* 2021;13(1):1–22. <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/download/104633/78308/421453>
- [59] Concello de Pontevedra. *Plan Xeral de Ordenación Municipal e Ordenanzas Municipais.* Pontevedra: Concello de Pontevedra; 2023. <https://pontevedra.gal/areas/urbanismo-e-territorio/planeamento-urbanistico/pxou-e-modificacions-realizadas/plan-xeral-de-ordenacion-urbana/>
- [60] Xunta de Galicia. *Estratexia Galega de Cambio Climático e Enerxía 2050 y Axenda Enerxética Galicia 2030.* Santiago: Xunta de Galicia; 2019. <https://cambioclimatico.xunta.gal/estratexia-cambio-climatico>
- [61] Gobierno de España. *Real Decreto 311/2022, de 3 de mayo, por el que se regula el Esquema Nacional de Seguridad.* BOE núm. 106, 4 may 2022. [https://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/726684-rd-311-2022-de-3-may-regula-el-esquema-nacional-de-seguridad.html](https://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/726684-rd-311-2022-de-3-may-regula-el-esquema-nacional-de-seguridad.html)
- [62] Centro Criptológico Nacional. *Serie de Guías CCN-STIC.* Madrid: CCN-CERT; 2022. <https://www.ccn-cert.cni.es/guia-ccn-stic.html>

- 
- [63] Asociación Española de Normalización (UNE). *UNE 178104 y UNE 178108 sobre ciudades inteligentes*. UNE; 2017. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059471>
- [64] Gobierno de España. Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, por la que se transponen al ordenamiento jurídico español las Directivas del Parlamento Europeo y del Consejo 2014/23/UE y 2014/24/UE. BOE núm. 272, 9 de noviembre de 2017. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-12902>
- [65] Tecnoempleo. *Informe Empleo Informática Agosto 2025 – salarios medios por función en TIC (DevOps, ciberseguridad, jefes de proyecto)*. <https://www.tecnoempleo.com/informe-empleo-informatica.php>
- [66] HuffPost España. *Cuánto gana un desarrollador full-stack en España en 2025*. Enero 2025. <https://www.huffingtonpost.es/sociedad/cuanto-gana-desarrollar-fullstack-espana-2025-hpe1.html>
- [67] HuffPost España. *Cuánto gana un técnico de soporte en España en 2025*. Abril 2025. <https://www.huffingtonpost.es/sociedad/cuanto-gana-tecnico-soporte-espana-2025-hpe1.html>
- [68] Concello de Pontevedra. *Plan Xeral de Ordenación Municipal e Ordenanzas Municipais*. Pontevedra: Concello de Pontevedra; 2023. <https://pontevedra.gal/areas/urbanismo-e-territorio/planeamento-urbanistico/pxou-e-modificacions-realizadas/plan-xeral-de-ordenacion-urbana/>
- [69] Gobierno de España. *Ley 39/2015, de 1 de octubre, del Procedimiento Administrativo Común de las Administraciones Públicas*. BOE núm. 236, 2 de octubre de 2015. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-10565>

# **ANEXO I – VISUALIZACIÓN DE LA CONGESTIÓN**

## **URBANA TÍPICA EN PONTEVEDRA (GOOGLE MAPS)**

Este anexo tiene como objetivo ofrecer una evidencia visual de la congestión estructural que afecta a las principales vías de acceso al centro urbano de Pontevedra. Para ello, se incluyen capturas del estado del tráfico habitual obtenidas a través de Google Maps. Las imágenes fueron tomadas en diferentes días laborables y durante franjas horarias representativas, con el fin de reflejar cómo varía la situación a lo largo del día.

Cada captura utiliza el sistema de colores que Google emplea para indicar el nivel de fluidez del tráfico:

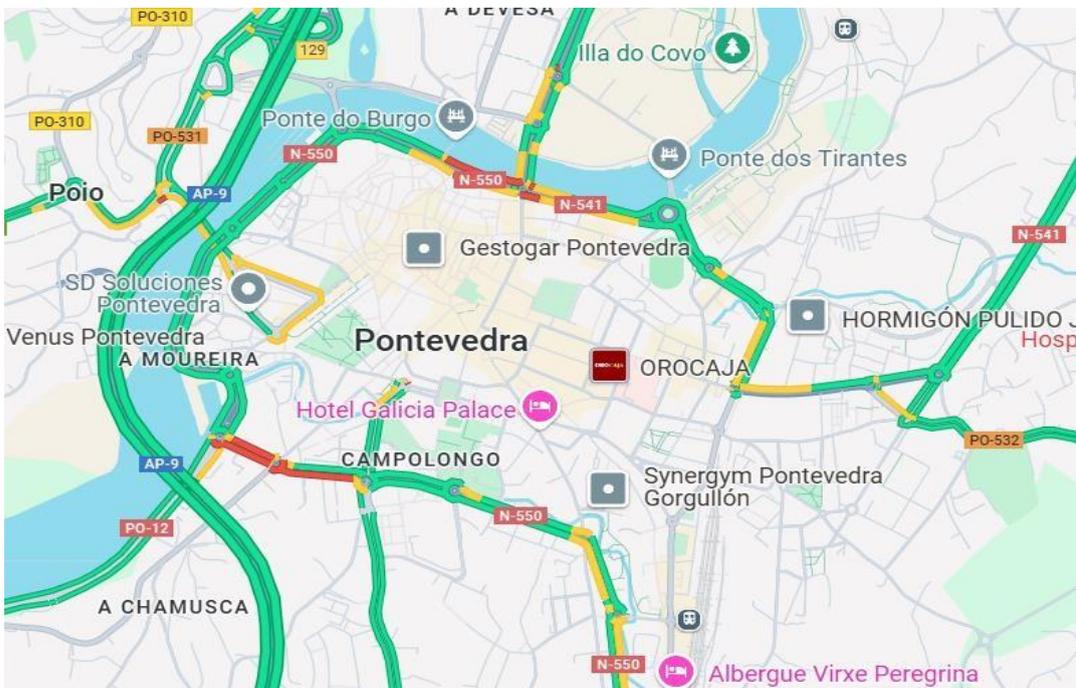
- Verde: circulación fluida
- Amarillo: tráfico denso, con posibles ralentizaciones
- Rojo: circulación lenta
- Burdeos: tráfico muy lento o prácticamente detenido

Estas visualizaciones permiten observar de forma clara y directa la extensión y persistencia de los problemas de movilidad en estas arterias clave. Como se puede ver en las imágenes que se muestran a continuación, los patrones de congestión detectados se manifiestan con mayor intensidad en los principales ejes de entrada y borde del centro urbano. Áreas como la Avenida Manuel del Palacio, la Avenida de Uruguay o el paso por el Puente de la Barca muestran de forma recurrente niveles elevados de tráfico, reflejados en los colores rojo y burdeos, especialmente durante las horas punta. Esta situación evidencia la aparición de cuellos de botella provocados, en parte, por la peatonalización de arterias estratégicas como la Avenida Reina Victoria, lo que ha desplazado el flujo vehicular hacia calles perimetrales que ya operaban al límite de su capacidad.

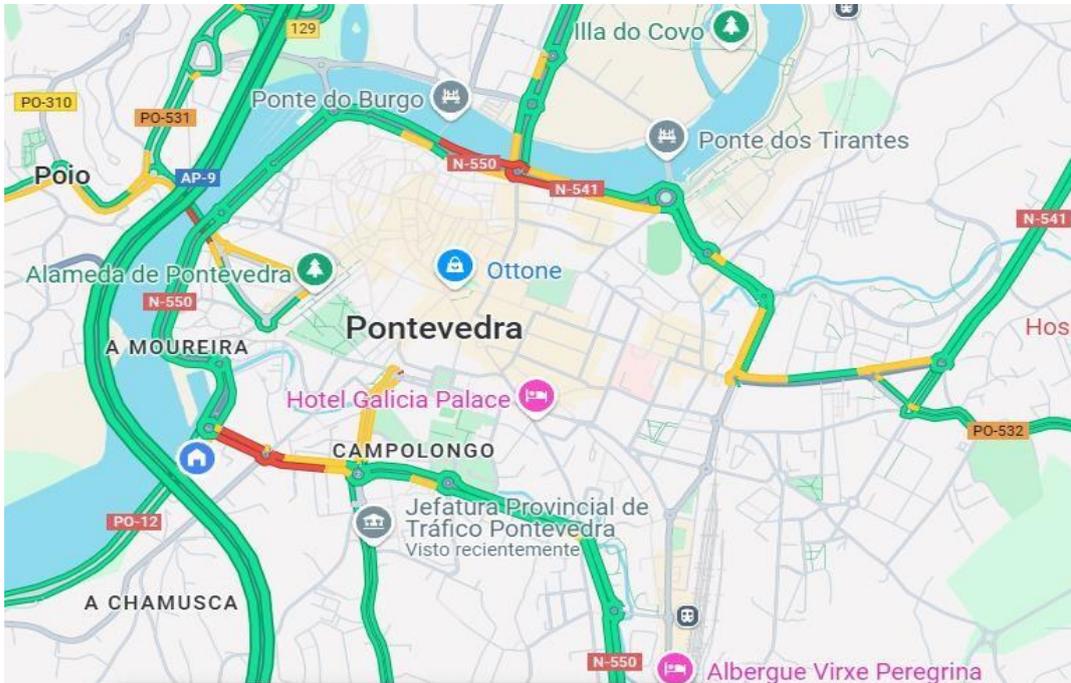
**CONGESTIÓN USUAL LAS 09:00 EN DIFERENTES DÍAS LABORABLES:**



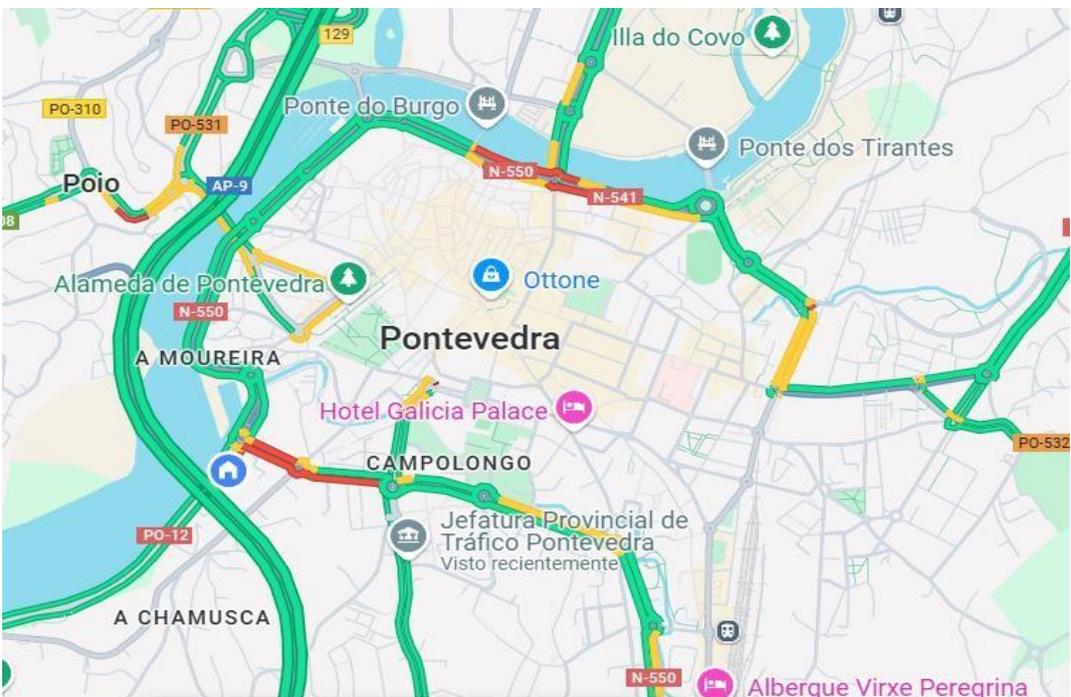
*Ilustración 13. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un lunes a las 09:00*



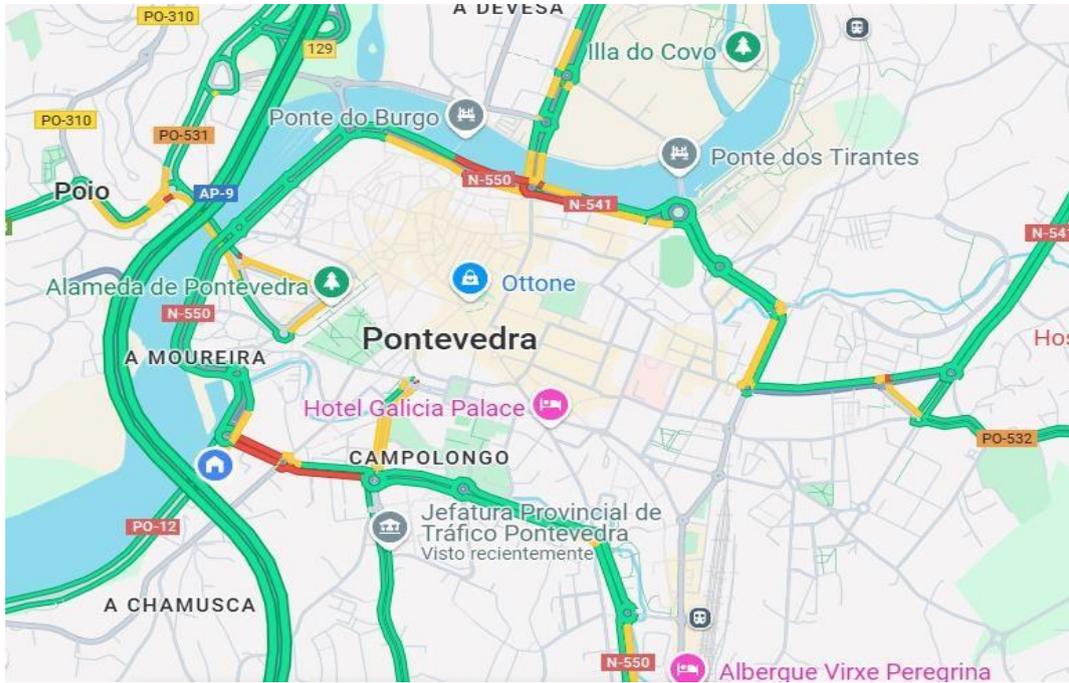
*Ilustración 14. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un martes a las 09:00*



*Ilustración 15. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un miércoles a las 09:00*

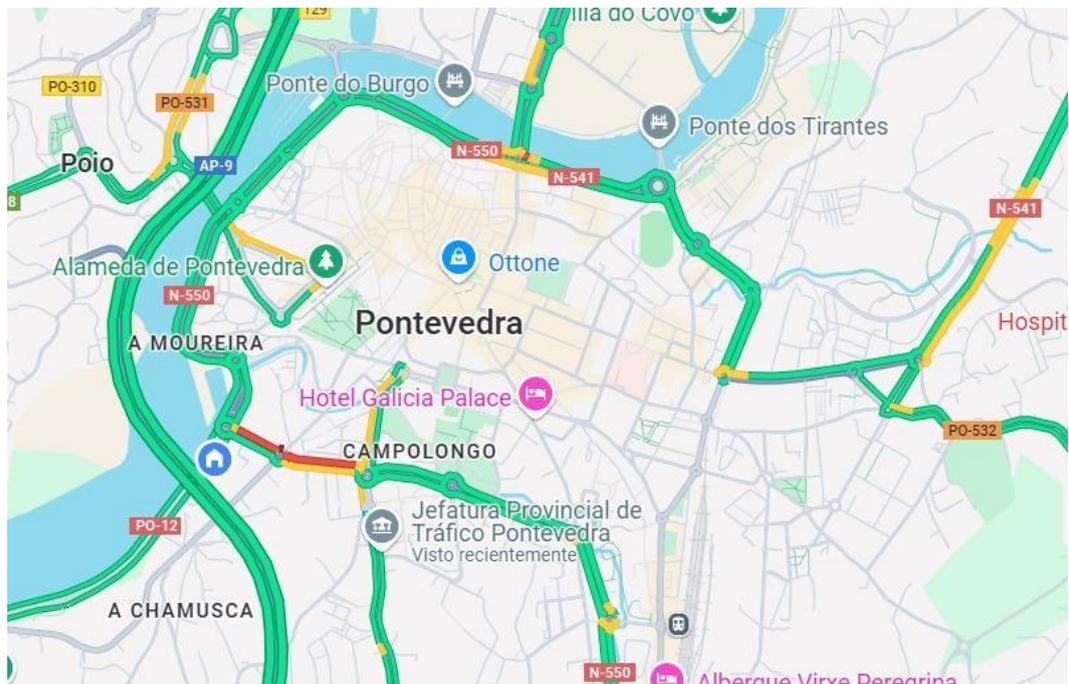


*Ilustración 16. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un jueves a las 09:00*

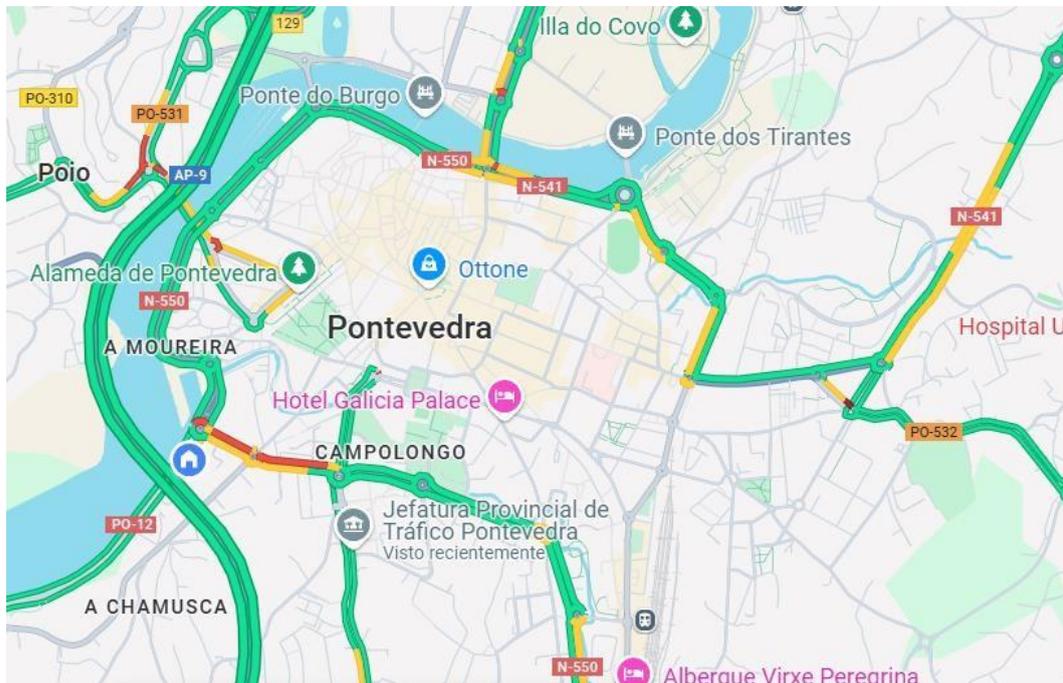


*Ilustración 17. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un viernes a las 09:00*

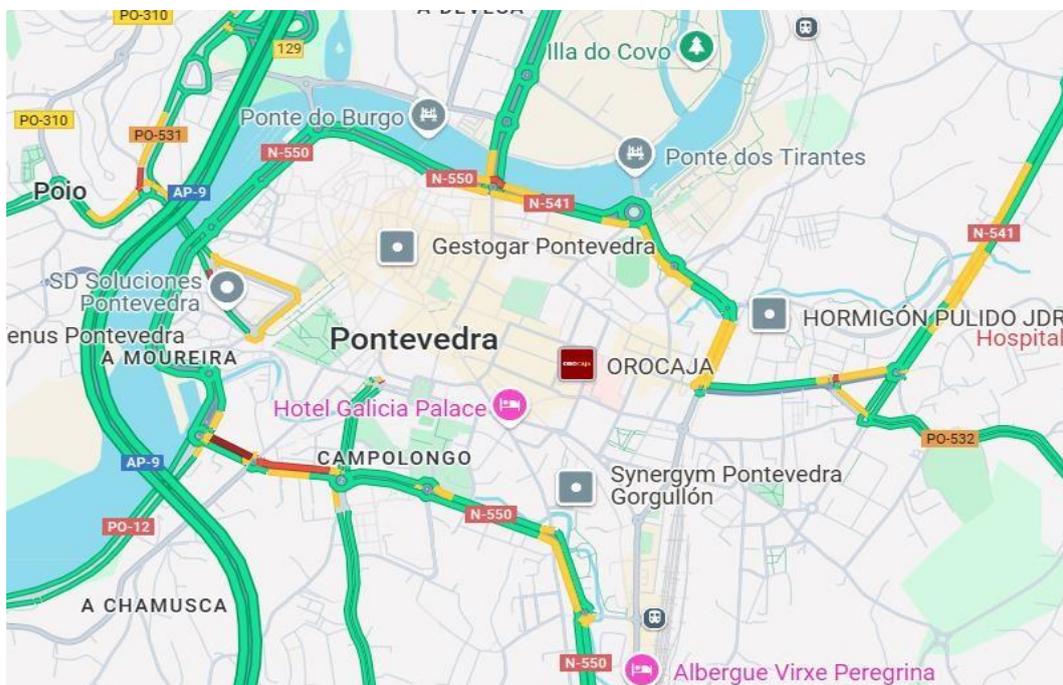
**CONGESTIÓN USUAL LAS 14:30 EN DIFERENTES DÍAS LABORABLES:**



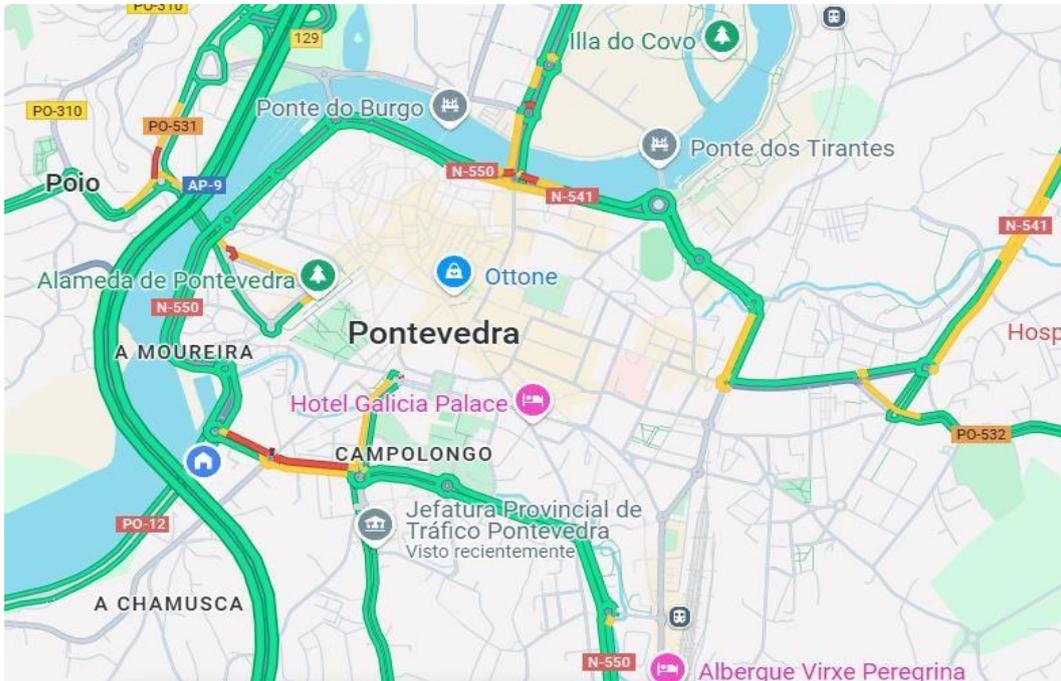
*Ilustración 18. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un lunes a las 14:30*



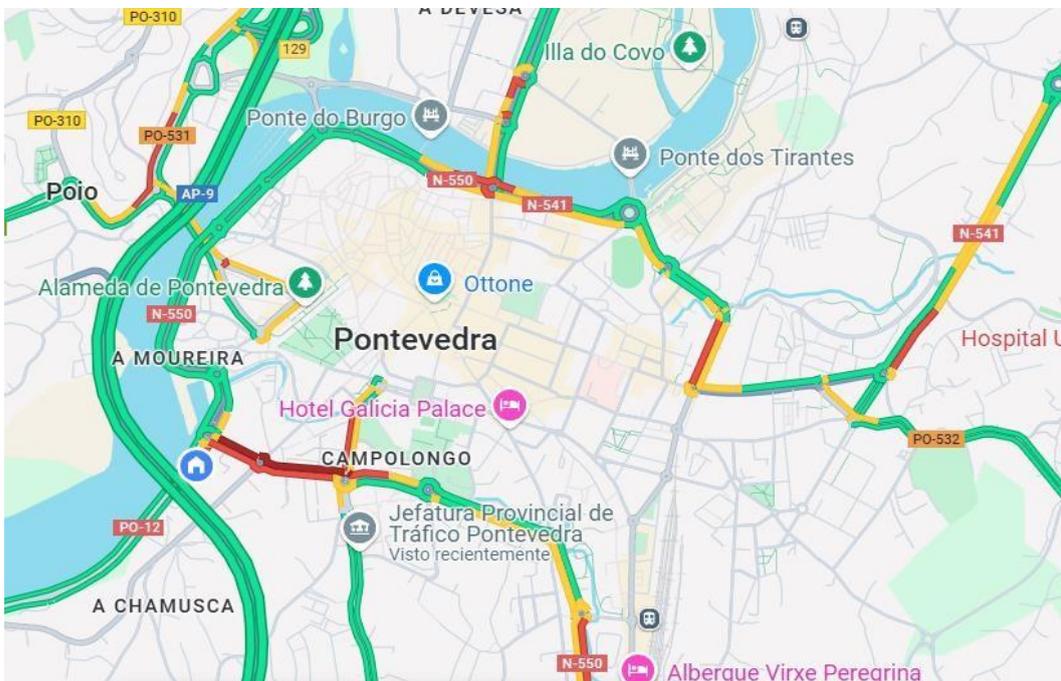
*Ilustración 19. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un martes a las 14:30*



*Ilustración 20. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un miércoles a las 14:30*

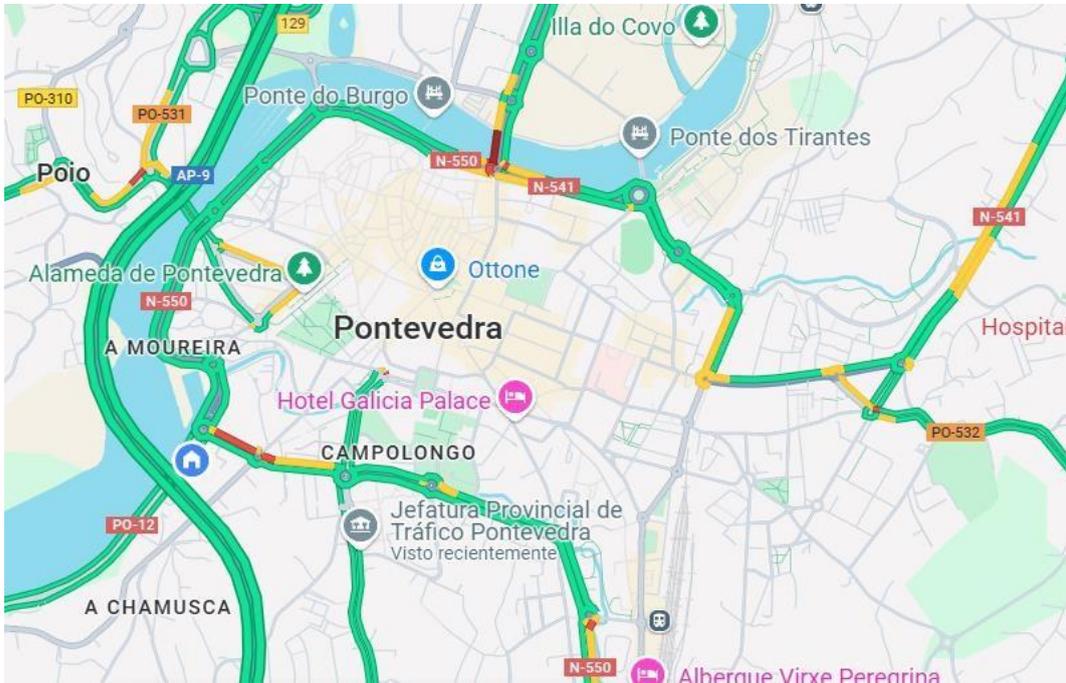


*Ilustración 21. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un jueves a las 14:30*

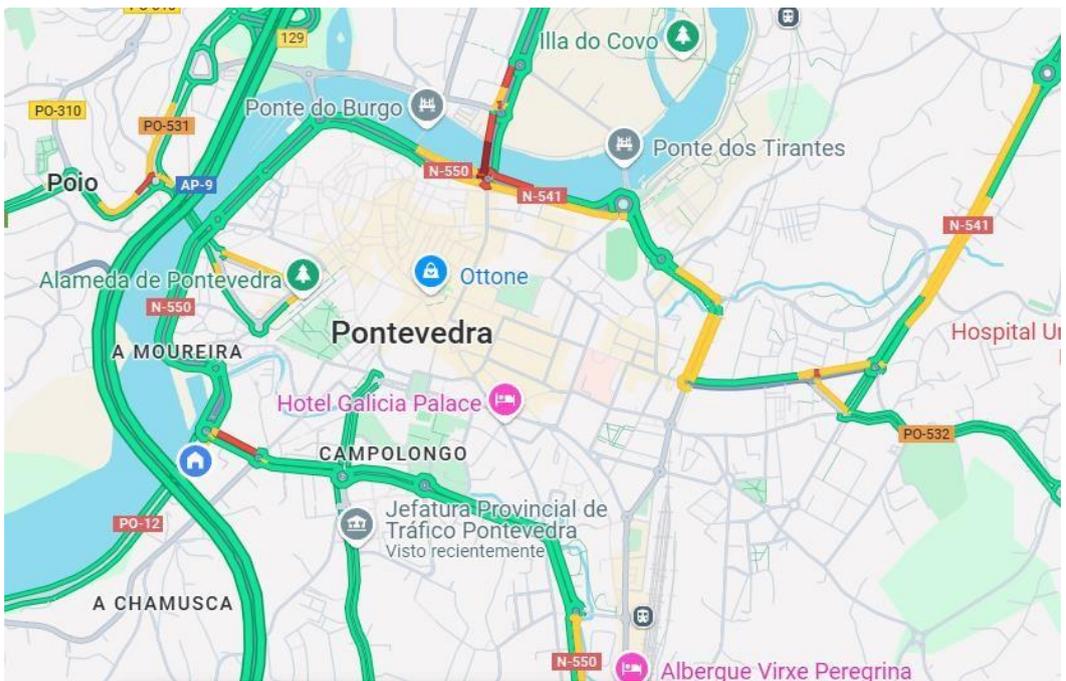


*Ilustración 22. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un viernes a las 14:30*

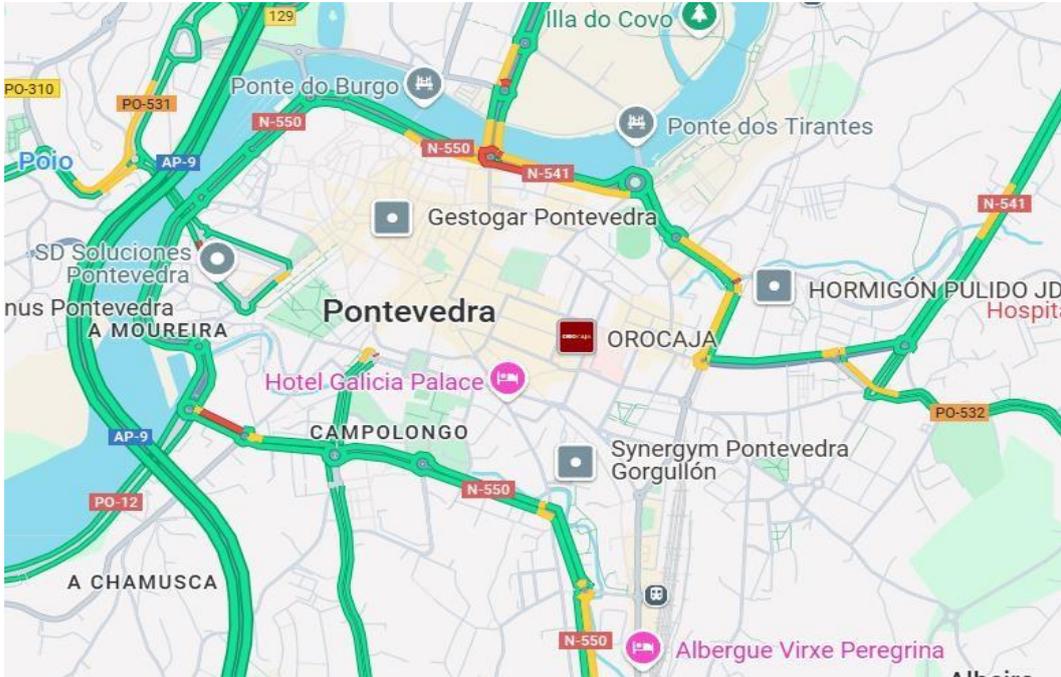
**CONGESTIÓN USUAL LAS 19:10 EN DIFERENTES DÍAS LABORABLES:**



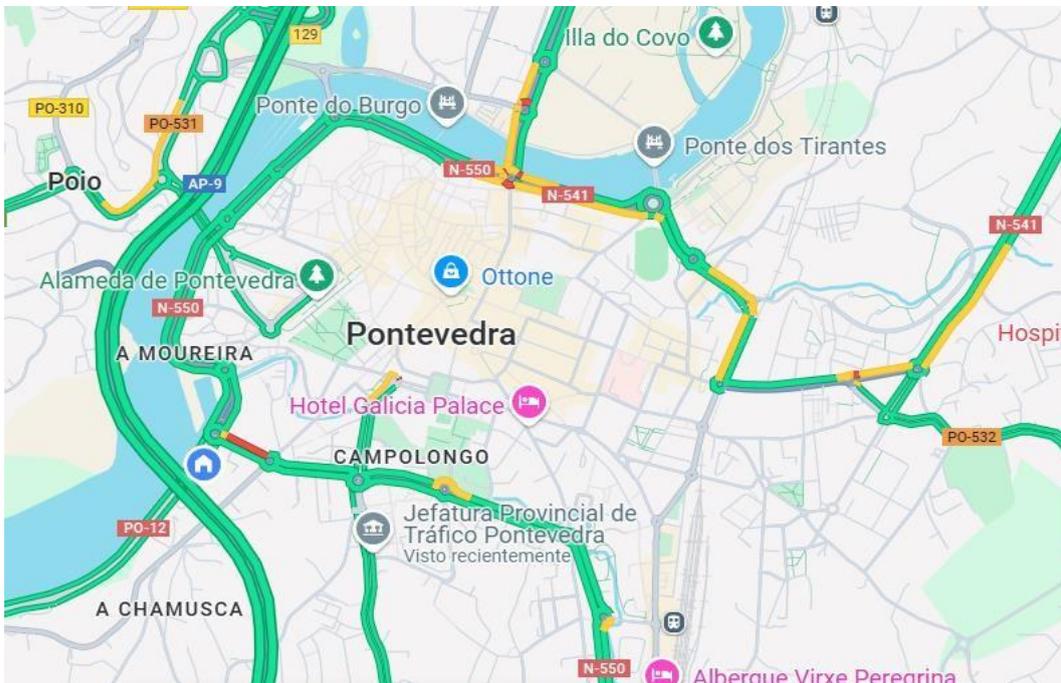
*Ilustración 23. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un lunes a las 19:10*



*Ilustración 24. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un martes a las 19:10*



*Ilustración 25. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un miércoles a las 19:10*



*Ilustración 26. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un jueves a las 19:10*



*Ilustración 27. Congestión típica del tráfico en Pontevedra un viernes a las 19:10*

## ANEXO II – PROYECCIÓN ECONÓMICO-FINANCIERA

### ANUAL DEL PROYECTO SEGÚN ESCENARIOS

En este anexo se presenta la proyección exhaustiva del flujo de caja anual del proyecto durante su horizonte temporal de 10 años, considerando tres escenarios diferenciados: estimado, optimista y pesimista. Estas proyecciones económicas permiten evaluar cómo fluctúan los resultados financieros del proyecto bajo diferentes hipótesis y constituyen la base para el cálculo de indicadores financieros esenciales tales como el VAN, TIR y PRI, examinados detalladamente en el apartado 3.2.3 del informe.

#### ESCENARIO ESTIMADO

En este escenario se contempla una inversión inicial (CAPEX) de 509.123 €, seguida de costes operativos (OPEX) anuales uniformes de 63.640 €. Los ingresos o ahorros previstos ascienden a 177.309 € anuales, generando un cash-flow neto anual favorable de aproximadamente 113.669 €. A lo largo de los años, el cash-flow acumulado aumenta progresivamente hasta superar el millón de euros en el décimo año.

Tabla 13. Proyección económico-financiera anual del escenario base

Año	Inversión (CAPEX)	Costes (OPEX)	Ingresos/Ahorros	Cash-flow neto	Cash-flow acumulado
0	-509.123,00 €	- €	- €	- €	- €
1	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	113.669,00 €
2	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	227.338,00 €
3	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	341.007,00 €
4	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	454.676,00 €
5	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	568.345,00 €
6	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	682.014,00 €

7	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	795.683,00 €
8	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	909.352,00 €
9	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	1.023.021,00 €
10	- €	-63.640,00 €	177.309,00 €	113.669,00 €	1.136.690,00 €

## ESCENARIO OPTIMISTA

En el escenario optimista, se mantiene constante la inversión inicial de 509.123 €, mientras que se prevén costes operativos anuales reducidos a 50.912 €, junto con ingresos o ahorros potenciados a 212.771 € anuales. Esto implica un cash-flow neto anual superior, aproximadamente 161.859 €, alcanzando un cash-flow acumulado que excede los 1,6 millones de euros al concluir el período evaluado.

Tabla 14. Proyección económico-financiera anual del escenario optimista

Año	Inversión (CAPEX)	Costes (OPEX)	Ingresos/Ahorros	Cash-flow neto	Cash-flow acumulado
0	-509.123,00 €	- €	- €	- €	- €
1	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	161.858,80 €
2	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	323.717,60 €
3	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	485.576,40 €
4	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	647.435,20 €
5	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	809.294,00 €
6	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	971.152,80 €
7	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	1.133.011,60 €
8	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	1.294.870,40 €
9	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	1.456.729,20 €
10	- €	-50.912,00 €	212.770,80 €	161.858,80 €	1.618.588,00 €

## ESCENARIO PESIMISTA

En el escenario pesimista, la inversión inicial permanece inalterada, aunque los costes operativos anuales aumentan a 76.368 €, mientras que los ingresos o ahorros anuales se reducen a 141.847 €. Bajo estos supuestos, el cash-flow neto anual es más limitado, alrededor de 65.479 €, registrando un cash-flow acumulado que supera ligeramente los 650.000 € al término del proyecto.

*Tabla 15. Proyección económico-financiera anual del escenario pesimista*

<i>Año</i>	<i>Inversión (CAPEX)</i>	<i>Costes (OPEX)</i>	<i>Ingresos/Ahorros</i>	<i>Cash-flow neto</i>	<i>Cash-flow acumulado</i>
<i>0</i>	<i>-509.123,00 €</i>	<i>- €</i>	<i>- €</i>	<i>- €</i>	<i>- €</i>
<i>1</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>
<i>2</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>130.958,40 €</i>
<i>3</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>196.437,60 €</i>
<i>4</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>261.916,80 €</i>
<i>5</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>327.396,00 €</i>
<i>6</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>392.875,20 €</i>
<i>7</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>458.354,40 €</i>
<i>8</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>523.833,60 €</i>
<i>9</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>589.312,80 €</i>
<i>10</i>	<i>- €</i>	<i>-76.368,00 €</i>	<i>141.847,20 €</i>	<i>65.479,20 €</i>	<i>654.792,00 €</i>