



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Regulación del tráfico de Vehículos de Movilidad Personal  
en la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida  
de Aragón de la ciudad de Valencia.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Sistemas Inteligentes de Transporte

AUTOR/A: Carrascal Bravo, Carlos

Tutor/a: Martínez Millana, Antonio

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

---

Anteproyecto de regulación tráfico de Vehículos de Movilidad Personal en la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón de la ciudad de Valencia, haciendo uso de sistemas de adquisición de datos y respuesta para Sistemas Inteligentes de Transporte con el objetivo de reducir la siniestralidad

---

Presentado por:

**Carlos Carrascal Bravo**

---

Para la obtención del título:

**Máster Universitario en Sistemas Inteligentes de  
Transporte**

Tutor: Antonio Martínez Millana

Valencia, agosto 2023



## ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	<b>8</b>
<b>Resum</b> .....	<b>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Justificación del proyecto</b> .....	<b>18</b>
<b>3. Marco teórico</b> .....	<b>20</b>
3.1. Equipos en la vía: sensores .....	21
3.2. Equipos en la vía: actuadores .....	29
3.3. Red de comunicaciones .....	31
3.4. Sala de control .....	31
<b>4. Estado del arte Sistemas de Control de Tráfico VMP</b> .....	<b>33</b>
4.1. Sensores específicos para tráfico VMP .....	34
4.2. Actuadores específicos para tráfico VMP .....	42
4.3. Red de comunicaciones y sala de control específicos para tráfico VMP .....	45
4.4. Resumen estado del arte Sistemas de Gestión de Tráfico VMP.....	45
<b>5. Situaciones conflictivas tráfico VMP en vías urbanas</b> .....	<b>46</b>
5.1. En relación a vehículos tradicionales.....	46
5.2. En relación a peatones .....	48
<b>6 Solución gestión tráfico en las situaciones conflictivas VMP</b> .....	<b>50</b>
6.1. Giro a derecha de vehículos tradiciones que cruza un carril bici .....	50
6.1.1 Análisis de problemática.....	50
6.1.2 Propuesta de solución .....	51
6.1.3 Implementación de una solución técnica .....	51
6.2 Paso de peatones sobre vía ciclista .....	52
6.2.1 Análisis de problemática.....	52
6.2.2 Propuesta de solución .....	53
6.2.3 Implementación de una solución técnica .....	53
6.3 Vía ciclista que rodea parada de autobús.....	54
6.3.1 Análisis de problemática.....	54
6.3.2 Propuesta de solución .....	55



6.3.3 Implementación de una solución técnica .....	55
<b>7 Caso de uso en la ciudad de Valencia .....</b>	<b>57</b>
7.1. Descripción del lugar .....	59
7.2. Análisis de la problemática.....	62
7.3. Propuesta de solución .....	63
7.4. Solución técnica.....	66
7.5. Presupuesto del proyecto.....	75
<b>8 Conclusiones .....</b>	<b>76</b>
8.1. Evolución del proyecto .....	78
<b>9 Bibliografía .....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo I: Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Movilidad obligada en el área metropolitana de Madrid en 2018. (Fuente [1]) .....	11
Figura 2: Descenso de los niveles NO <sub>2</sub> y PM <sub>2.5</sub> durante la primera ola de la pandemia COVID-19. (Fuente [3]).....	12
Figura 3: Km. acumulados y Km. implantados de carril bici en valencia. (Fuente [5] y [7]) .....	14
Figura 4: Reparto modal de la ciudad de València, valores absolutos. (Fuente [6]).....	15
Figura 5: Reparto modal de la ciudad de València, valores porcentuales. (Fuente [6]) .....	15
Figura 6: Simulador de tráfico y transporte público del Ayuntamiento de Valencia. (Fuente [8]) .....	16
Figura 7: Intensidades carril bici. Días Laborables. Septiembre 2022. (Fuente [13]).....	17
Figura 8: Sistema de control de tráfico de vehículos. (Fuente [16]) .....	20
Figura 9: Espira electromagnética en la Avenida de los Naranjos de la ciudad de Valencia. (Fuente Google Maps). .....	22
Figura 10: elementos de un sensor basado en una espira electromagnética hasta la salida al regulador. (Fuente [16]) .....	22
Figura 11: Espira electromagnética doble. (Fuente [16]).....	23
Figura 12: Sensor piezoeléctrico dual. (Fuente [16]) .....	23
Figura 13: Sensor tubo neumático. (Fuente [16]) .....	24
Figura 14: Magnetómetro. (Fuente [16]) .....	24
Figura 15: Sensor de fibra óptica. (Fuente [16]) .....	25
Figura 16: Sensor ultrasónico. (Fuente [16]).....	25
Figura 17: Sensor acústico pasivo. (Fuente [16]) .....	26
Figura 18: Radar de microondas. (Fuente [16]) .....	26
Figura 19: Sensor láser. (Fuente[16]) .....	27
Figura 20: Sensor infrarrojo pasivo. (Fuente [16]) .....	27
Figura 21: Cámaras de inteligencia artificial. (Fuente [16]) .....	28
Figura 22: Semáforo, junto al regulador, en la Avenida de los Naranjos de Valencia. (Fuente Google Maps). .....	29
Figura 23: Esquema interno regulador de control tráfico. (Fuente [16]).....	30
Figura 24: Panel de Mensaje Variable en la CV-500 de Valencia. (Fuente Google Maps). .....	30
Figura 25: Organización de un Sistema de Control de Tráfico con Sala de Control. (Fuente[16]) .....	31
Figura 26: Centro de Gestión de Tráfico del Ayuntamiento de Valencia. (Fuente [17]).....	32

Figura 27: Pulsador en paso de cebra y carril bici en la calle Dr. Tolosa Latourde de Madrid. (Fuente Google Maps).....	34
Figura 28: Pulsador en paso de cebra y carril bici en Madrid. (Fuente www.naturalezasobreruedas.com).....	35
Figura 29: Diseño pulsadores ciclista según MUTCD. (Fuente [15]) .....	35
Figura 30: Espira magnética en Huntsville, AL. (Fuente [15]) .....	36
Figura 31: Espira magnética en Portland, Oregón. (Fuente [15]) .....	36
Figura 32: Espira magnética que cuenta las bicicletas y monopatines. (Fuente [22])......	37
Figura 33: Espira magnética en la Avenida Primado Reig de la ciudad de Valencia. (Fuente Google Maps).....	37
Figura 34: Espira magnética doble para la detección de VMP. (Fuente [23]).....	38
Figura 35: Sensor piezoeléctrico en la calle Xàtiva de Valencia. (Fuente Google Maps)......	39
Figura 36: Radar en pavimento en Lincoln, Nebraska. (Fuente [15]). .....	39
Figura 37: Radar de microondas en una intersección de Huntsville, AL. (Fuente [15]).....	40
Figura 38: Sistema de detección por video. (Fuente NACTO)......	40
Figura 39: sensor por infrarrojos, magnetómetro y tubos magnéticos. (Fuente [25])......	41
Figura 40: Semáforo en carril bici y paso de peatones en el Passeig de l'Albereda de Valencia. (Fuente Google Maps).....	42
Figura 41: Semáforo para carril bici. (Fuente [26]) .....	43
Figura 42: Panel de Mensaje Variable. (Fuente [27]).....	43
Figura 43: Panel de Mensaje Variable específico para usuario del carril bici en Copenhague. (Fuente [28]).....	44
Figura 44: Panel de Mensaje Variable en Barcelona. (Fuente [29]).....	44
Figura 45: Situación conflictiva entre tráfico VMP y tráfico tradicional. ....	47
Figura 46: Situación conflictiva agravada entre tráfico VMP y tráfico tradicional.....	47
Figura 47: Primera situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones.....	48
Figura 48: Segunda situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones. ....	48
Figura 49: Situación conflictiva entre tráfico VMP y tráfico tradicional (Conflict_1).....	51
Figura 50: Solución técnica propuesta para solucionar la situación conflictiva Conflict_1. ....	52
Figura 51: Situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones (Conflict_2.a). ....	53
Figura 52: Solución técnica propuesta para solucionar la situación conflictiva Conflict_2.a. ....	54
Figura 53: Situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones (Conflict_2.b). ....	55
Figura 54: Solución técnica propuesta para solucionar la situación conflictiva Conflict_2.a. ....	56

Figura 55: Siniestros VMP en los últimos años en la ciudad de Valencia. (Fuente [30]).	57
Figura 56: Modelo de bandas transversales de alerta a nivel propuesto por el DAYA. (Fuente [30]).	58
Figura 57: Tramo de la Avenida de Aragón entre la Plaza de Zaragoza y la calle Santa Rosa. (Fuente Google Maps).	59
Figura 58: Salida a la Avenida de Aragón desde la Plaza de Zaragoza. (Fuente Google Maps).	59
Figura 59: Incorporación carril bici desde cruce de la Avenida de Aragón. (Fuente Google Maps).	60
Figura 60: Situación conflictiva vía ciclista rodea parada de autobús en la Avenida de Aragón. (Fuente Google Maps).	60
Figura 61: Situación conflictiva paso de peatones sobre vía ciclista en la Avenida de Aragón. (Fuente Google Maps).	61
Figura 62: Situación conflictiva giro a derecha de vehículo tradicional en el que cruza con un carril bici paralelo. (Fuente Google Maps).	61
Figura 63: Situaciones conflictivas en la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón.	62
Figura 64: Panel de Mensaje Variable para peatones (Fuente [29]).	67
Figura 65: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 1 y 2.	68
Figura 66: Panel de Mensaje Variable con velocidad (Fuente [33]).	69
Figura 67: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 3 y 4.	69
Figura 68: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 5 y 6.	71
Figura 69: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 7 y 8.	72
Figura 70: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento al requisito 9.	72
Figura 71: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 10 y 11.	73
Figura 72: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento al requisito 12.	74
Figura 73: situación conflictiva Conflict_2.b en la ciudad de Madrid. (Fuente [34]).	79
Figura 74: situación conflictiva Conflict_2.b en la Avenida de la Reina victoria de Santander. (Fuente propia).	80



## ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Resumen funcionalidades sensores VMP.....	42
Tabla 2: situaciones más conflictivas en las que se ven involucrados los VMP. ....	49
Tabla 3: Elementos necesarios solución técnica a situación conflictiva Conflict_2.a. ....	52
Tabla 4: Elementos necesarios solución técnica a situación conflictiva Conflict_2.a. ....	54
Tabla 5: Elementos necesarios solución técnica a situación conflictiva Conflict_2.b. ....	56
Tabla 6: Requisitos solución situaciones conflictiva en la intersección Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón. ....	66
Tabla 7: situaciones más conflictivas en las que se ven involucrados los VMP. ....	78
Tabla 8: Grado de relación del sistema propuesto en este trabajo con los ODS. ....	83

## Resumen

En los últimos años la proliferación de los Vehículos de Movilidad Personal ha experimentado un crecimiento exponencial, y ello ha provocado que el número de siniestros en los que se ha implicado un Vehículo de Movilidad Personal se haya visto incrementado de manera análoga.

Los objetivos de calidad del aire fijados desde la Unión Europea, y la concienciación ciudadana del coste económico y de tiempo que supone la movilidad tradicional, está provocando que el constante crecimiento de las grandes ciudades españolas se vea modelado por las nuevas formas de movilidad que se demandan en la actualidad. Los Planes de Movilidad de las grandes ciudades españolas incluyen la construcción de un número cada vez más elevado de kilómetros de carriles bici. Este contexto es idóneo para que un número cada vez mayor de ciudadanos decida desplazarse por las ciudades en Vehículos de Movilidad Personal. Ya es un hecho que la movilidad en las ciudades está sufriendo una gran transformación, y la proyección indicada que el uso de Vehículos de Movilidad Personal en las ciudades seguirá incrementándose.

Nos encontramos, por tanto, con que la vía pública debe ser compartida por usuarios de naturaleza muy diferente: peatones, Vehículos de Movilidad Personal y vehículos a motor tradicionales. Estos tres tipos de usuarios disponen de distintitas velocidades de circulación, dispares masas de los vehículos, y niveles de protección completamente desiguales. La convivencia entre estos tres tipos de usuarios no siempre es sencilla, y por ello debe ser regulada, en beneficio de la seguridad de todos los usuarios de la vía.

Este Trabajo Fin de Máster analizará las situaciones conflictivas más comunes en las que se ven involucrados los Vehículos de Movilidad Personal, y propondrá un sistema basado en sensores y actuadores de tráfico para bajar la siniestralidad en cada una de estas situaciones, de manera que se mejore la seguridad de todos los usuarios que conviven en la vía pública. Además, se diseñará un sistema que pretende mejorar la siniestralidad en uno de los puntos más conflictivos de la ciudad de Valencia, la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón.

El alcance del trabajo se centra en las situaciones conflictivas más comunes en las que se ven involucrados los Vehículos de Movilidad Personal cuando circulan por carriles bici, queda fuera del alcance de este trabajo las situaciones conflictivas que puedan surgir de la circulación de Vehículos de Movilidad Personal compartiendo calzada con los vehículos a motor tradicionales.

El sistema propuesto está basado en sensores y actuadores de tráfico vistos en la asignatura “Sistemas de adquisición de datos y respuesta para sistemas inteligentes de transporte”.

## Resum

En els últims anys la proliferació dels Vehicles de Mobilitat Personal ha experimentat un creixement exponencial, i això ha provocat que el nombre de sinistres en els quals es veu implicat un Vehicles de Mobilitat Personal s'haja vist incrementat de manera anàloga.

Els objectius de qualitat de l'aire fixats des de la Unió Europea, i la conscienciació ciutadana del cost econòmic i de temps que suposa la mobilitat tradicional, està provocant que el constant creixement de les grans ciutats espanyoles es veja modelat per les noves formes de mobilitat que es demanden en l'actualitat. Els Plans de Mobilitat de les grans ciutats espanyoles inclouen la construcció d'un número cada vegada més elevat de quilòmetres de carrils bici. Aquest context és idoni perquè un nombre cada vegada major de ciutadans decidisca desplaçar-se per les ciutats en Vehicles de Mobilitat Personal. Ja és un fet que la mobilitat a les ciutats està patint una gran transformació, i la projecció indicada que l'ús de Vehicles de Mobilitat Personal a les ciutats continuarà incrementant-se.

Ens trobem, per tant, que la via pública ha de ser compartida per usuaris de naturalesa molt diferent: vianants, Vehicles de Mobilitat Personal i vehicles de motor tradicionals. Aquests tres tipus d'usuaris disposen de distintes velocitats de circulació, disperses masses dels vehicles, i nivells de protecció completament desiguals. La convivència entre aquests tres tipus d'usuaris no sempre és senzilla, i per això ha de ser regulada, en benefici de la seguretat de tots els usuaris de la via.

Aquest Treball Fi de Màster analitzarà les situacions conflictives més comunes en les quals es veuen involucrats els Vehicles de Mobilitat Personal, i proposarà un sistema basat en sensors i actuadors de trànsit per a baixar la sinistralitat en cadascuna d'aquestes situacions, de manera que es millore la seguretat de tots els usuaris que conviuen en la via pública. A més, es dissenyarà un sistema que pretén millorar la sinistralitat en un dels punts més conflictius de la ciutat de València, la intersecció de la Plaça de Saragossa amb l'Avinguda d'Aragó.

L'abast del treball se centra en les situacions conflictives més comunes en les quals es veuen involucrats els Vehicles de Mobilitat Personal quan circulen per carrils bici, queda fora de l'abast d'aquest treball les situacions conflictives que pugen sorgir de la circulació de Vehicles de Mobilitat Personal compartint calçada amb els vehicles de motor tradicionals.

El sistema proposat està basat en sensors i actuadors de trànsit vistos en l'assignatura "Sistemas de adquisición de datos y respuesta para sistemas inteligentes de transporte".

## Summary

In recent years, the proliferation of Personal Mobility Vehicles has experienced exponential growth, which has led to a corresponding increase in the number of accidents involving PMVs. The air quality goals set by the European Union, along with public awareness of the economic and time costs associated with traditional mobility, are causing the constant growth of major Spanish cities to be shaped by the new forms of mobility currently in demand. The Mobility Plans of these cities include the construction of an increasing number of kilometers of bike lanes. This context is perfect for an increasing number of citizens to choose to move around cities using Personal Mobility Vehicles. It is already a fact that urban mobility is undergoing a major transformation, and projections indicate that the use of Personal Mobility Vehicles in cities will continue to increase.

Therefore, we find that public roads must be shared by users of very different nature: pedestrians, Personal Mobility Vehicles, and traditional motor vehicles. These three types of users have different travel speeds, vehicle masses, and completely unequal levels of protection. Coexistence between these three types of users is not always easy, and therefore, it must be regulated for the benefit of the safety of all road users.

This thesis will analyze the most common conflict situations involving Personal Mobility Vehicles and propose a system based on traffic sensors and actuators to reduce accidents in each of these situations, thereby improving the safety of all users who share the public roads. Additionally, a system will be designed to improve safety at one of the most conflict-prone intersections in the city of Valencia, the intersection of Plaza de Zaragoza and Avenida de Aragón.

The scope of this work focuses on the most common conflict situations involving Personal Mobility Vehicles when they travel on bike lanes. Situations that may arise from the circulation of Personal Mobility Vehicles sharing the roadway with traditional motor vehicles are beyond the scope of this work.

The proposed system is based on traffic sensors and actuators seen in the subject "Sistemas de adquisición de datos y respuesta para sistemas inteligentes de transporte".

## 1. Introducción

En los últimos años la proliferación de los Vehículos de Movilidad Personal ha experimentado un crecimiento exponencial, y ello ha provocado que el número de siniestros en los que se ve implicado un Vehículos de Movilidad Personal se haya visto incrementado de manera análoga. Esta explosión en el uso de los Vehículos de Movilidad Personal ha venido motivada por dos motivos principales: un primer motivo es el bajo coste de los Vehículos de Movilidad Personal frente a los vehículos tradicionales, y un segundo motivo es la disponibilidad en las grandes ciudades de una infraestructura cada vez mayor de carriles bici segregados.

Las ciudades europeas deben cumplir con los objetivos de calidad del aire establecidos desde la Unión Europea en el marco de la Agenda 2030, concretamente mediante la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, modificada posteriormente por la Directiva (UE) 2015/1480 de la Comisión de 28 de agosto de 2015.

Esto ha provocado que los Ayuntamientos de las grandes ciudades europeas hayan desarrollado planes de mejora de la calidad del aire, en los que la movilidad urbana juega un papel decisivo.

En las grandes urbes europeas la movilidad urbana en transporte privado juega un papel relevante, un ejemplo de ello es la encuesta de movilidad que realizó el Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid durante el año 2018, en la que se obtuvo que más de la mitad de los ciudadanos del área metropolitana de Madrid se desplazaba en vehículo privado para desplazamiento de movilidad obligada<sup>1</sup>.

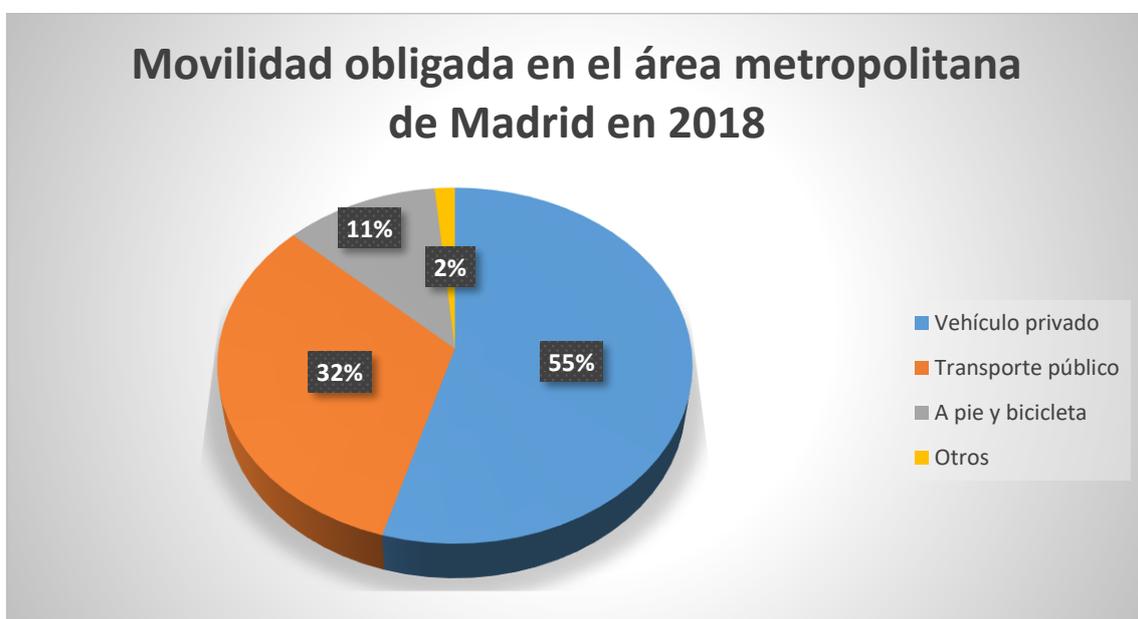


Figura 1: Movilidad obligada en el área metropolitana de Madrid en 2018. (Fuente [1])

<sup>1</sup> El término “Movilidad obligada” se define como desplazamiento que, independientemente de su origen o destino, se realiza generalmente con frecuencia diaria y trayecto fijo para desarrollar tareas o funciones laborales, educativas o de acceso a servicios básicos.

Para atajar esta situación, y cumplir con los objetivos fijados desde la Unión Europea, las grandes ciudades han tenido que definir unas zonas de bajas emisiones en el centro de las ciudades, que prohíben o limitan el acceso del vehículo privado. Un ejemplo de ello es Londres, que desde el año 2003 dispone de un sistema de peaje para acceder al centro de la ciudad [2].

Unos años después, llegó a nuestras vidas la pandemia del COVID-19, lo que provocó el confinamiento domiciliario. Dejando a un lado el drama social y económico que ha supuesto la crisis provocada por la pandemia del COVID-19, el confinamiento domiciliario supuso un descenso drástico de la movilidad en las ciudades. Esta reducción de la movilidad en las ciudades supuso una mejora sin precedentes en la calidad del aire durante esos meses. El estudio “Differential impact of government lockdown policies on reducing air pollution levels and related mortality in Europe” [3], realizado por el Servicio de Vigilancia Atmosférica de Copernicus (CAMS), perteneciente al Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (CEPM) de la Unión Europea, recoge de manera exhaustiva los datos de mejora de la calidad del aire en las 47 ciudades más importantes de la Unión Europea. Durante el periodo del estudio, del 1 de febrero al 31 de julio de 2020, los niveles de NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> se vieron reducidos de manera drástica en todas las ciudades. Se obtuvo una reducción en la media diaria de NO<sub>2</sub> del 60% y una reducción media diaria de PM<sub>2.5</sub> del 31 % (Figura 2). Poniendo el foco sobre ciudades concretas, durante la primera ola de la pandemia COVID-19, Barcelona, Londres y Madrid redujeron en casi un 40% sus niveles diarios de NO<sub>2</sub>, Paris en un 69%, y Valencia en un 8%. Mientras que los niveles diarios de PM<sub>2.5</sub> se vieron reducidos en Barcelona y Londres en torno a un 12%, en Madrid un 7%, en Paris un 23%, y en Valencia un 3,3%.

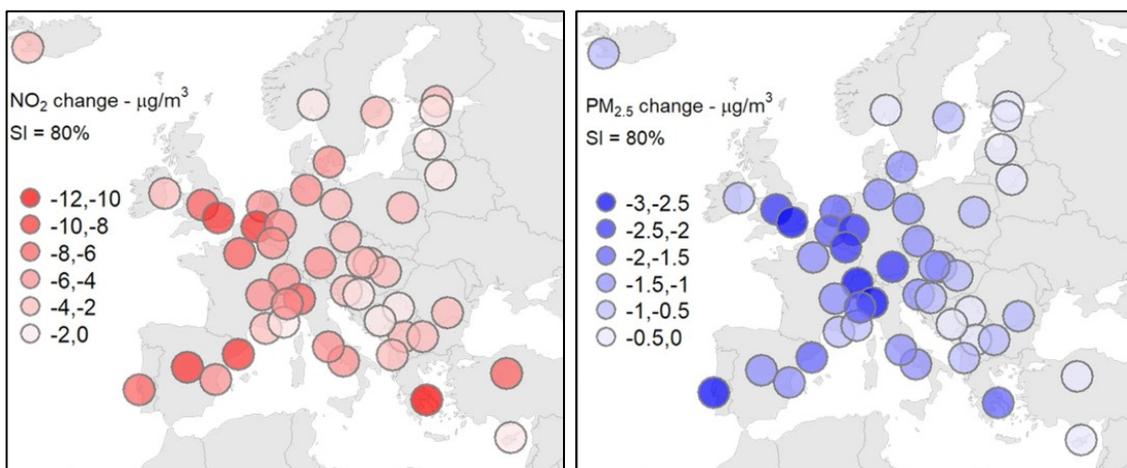


Figura 2: Descenso de los niveles NO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> durante la primera ola de la pandemia COVID-19. (Fuente [3])

Estos datos ponen de manifiesto que uno de los pilares para mejorar la calidad del aire, y cumplir con los objetivos marcados desde Unión Europea, es transformar la movilidad urbana de las ciudades, fomentando unos medios de transporte más eficientes desde el punto de vista ambiental frente a los vehículos privados tradicionales. Evidentemente, los medios de transporte más eficientes son el transporte público colectivo, la bicicleta tradicional, y los conocidos como Vehículos de Movilidad Personal; siendo estos dos últimos los que dan una mayor libertad de movilidad en rutas urbanas.

Los Vehículos de Movilidad Personal, tal y como establece el Reglamento General de Vehículos, son vehículos de una o más ruedas, dotados de una única plaza y propulsados exclusivamente por motores eléctricos que pueden proporcionar al vehículo una velocidad máxima por diseño comprendida entre 6 y 25 km/h. Solamente pueden estar equipados con un asiento, o sillín, si están dotados de sistema de autoequilibrado. Esta definición excluye a los vehículos para personas con movilidad reducida. Por lo tanto, generalizando, se trata de bicicletas o patinetes eléctricos.

Una de las llaves que tienen los ayuntamientos para fomentar el uso de bicicletas y Vehículos de Movilidad Personal es la construcción de carriles bici segregados. Existen numerosos ciudadanos que no se atreven a circular con sus vehículos unipersonales compartiendo calzada con los vehículos motorizados tradicionales, por lo que disponer de una red de carriles bici segregados provoca que un mayor número de ciudadanos se pase al uso de vehículos unipersonales para la movilidad urbana.

Es por ello que las grandes ciudades europeas están apostando por la construcción de vías ciclista que incentiven el uso de los Vehículos de Movilidad Personal. Un ejemplo claro es la ciudad de París, que ya dispone de más 1.000 km de vías ciclistas, lo que ha conllevado que actualmente el 7% de los viajes en el área metropolitana se hagan en bicicleta, frente a menos del 5% que se realizaba antes de los confinamientos por la pandemia Covid-19 [4].

Otro ejemplo es la ciudad de Valencia, cuyo tamaño, buen clima y orografía plana la hacen una ciudad ideal para realizar desplazamientos urbanos en bicicleta. La ciudad de Valencia no pasó por alto esta oportunidad y desde hace ya más de dos décadas tiene una apuesta firme por la movilidad sostenible.

En el último Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) de la ciudad de Valencia [5], realizado en el año 2013, se establecen una serie de medidas para fomentar el uso de la bicicleta. De acuerdo con el PMUS, la bicicleta, entendida como un modo de transporte diario, ha dado un salto cualitativo y cuantitativo en la ciudad de Valencia, principalmente, por dos motivos; el primer motivo es la creación y mejora continua de una red ciclista compuesta por ciclocalles (itinerarios ciclistas señalizados en calles con velocidad máxima a 30 kilómetros hora) y carriles bici segregados; y en segundo lugar, el sistema de alquiler de bicicleta pública Valenbisi (275 estaciones y un total de 2.750 bicicletas), inaugurado en julio del 2010, el cual ha hecho visible la bicicleta urbana en la ciudad y ha servido de catalizador para promover el uso de la bicicleta en general.

El Ayuntamiento de Valencia ha realizado 3 grandes Encuestas de Movilidad, cuyos resultados fueron publicados en los años 1991, 2010 y 2018. En la encuesta que se realizó a lo largo del año 2009, la cual ha sido tenida en cuenta en la definición de las líneas estratégicas incluidas en el PMUS, se preguntó por los usos y actitudes hacia la bicicleta en la ciudad de Valencia [5], y de esta encuesta cabe destacar los siguientes resultados:

- El 36,8% de la población que dispone de bicicleta la utiliza diariamente o varias veces por semana. Por lo tanto, se ha convertido en un modo de transporte cotidiano, y no solo de ocio.
- La población que no utiliza la bicicleta, y tarda entre 10 y 30 minutos en ir al trabajo, aduce como principales motivos para no usarla los siguientes: riesgo de accidentes y atropellos (24,3%), no apetece (16,2%), es más cómodo utilizar otros modos de transporte (15%) y por los robos de bicicleta (9,7%).

- Los usuarios de la bicicleta valoran su uso por ser el modo de transporte más económico, por ser saludable, ecológico y ahorrarse tiempo en el desplazamiento.
- El 83,3% de los encuestados valora muy positivamente la construcción de carriles bici (una nota media 8,8 en una escala del 0 al 10).
- La respuesta más repetida para potenciar el uso de la bicicleta es la de construir más carriles bici (68,8%), seguida de lejos por la mejora e implantación de aparcabicis (14,2%).

Queda de manifiesto por tanto, que para potenciar el uso de la bicicleta es necesario la construcción de carriles bici segregados que dan una mayor seguridad a los usuarios. Este hecho lo ha tenido en cuenta la ciudad de Valencia, y en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) de la ciudad de Valencia [5] se recoge que en el año 1995 Valencia contaba con 13.8 km de carril bici, siendo a partir de ese año cuando se comenzó la construcción continuada de más tramos, sobre todo a partir de 2008 cuando se realizaron grandes inversiones, llegando en el año 2013 a los 123 km. Actualmente, en 2023, la red ciclista de Valencia está formada por casi 170 kilómetros [7].

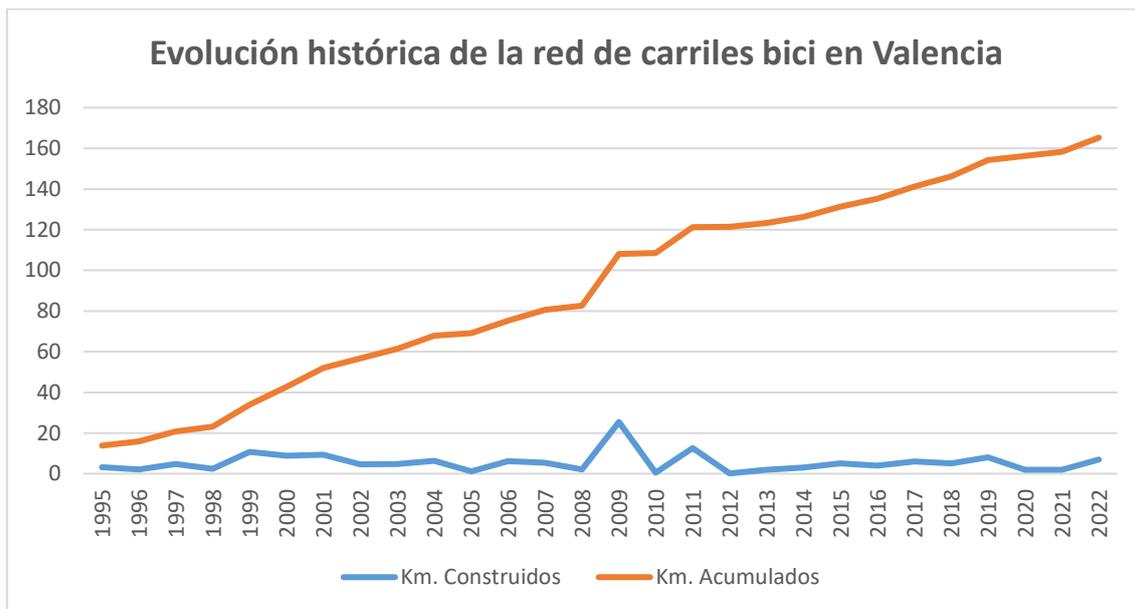


Figura 3: Km. acumulados y Km. implantados de carril bici en Valencia. (Fuente [5] y [7])

El resultado de esta planificación se pone de manifiesto en la Encuesta de Movilidad realizada en el año 2017, cuyo análisis se recoge en el Plan de Movilidad Metropolitana Sostenible del Área de Valencia (PMoMe) [6], y en el que ya se aprecia un mayor uso de la bicicleta en el reparto modal respecto al año 2009 (Figura 4 y Figura 5).

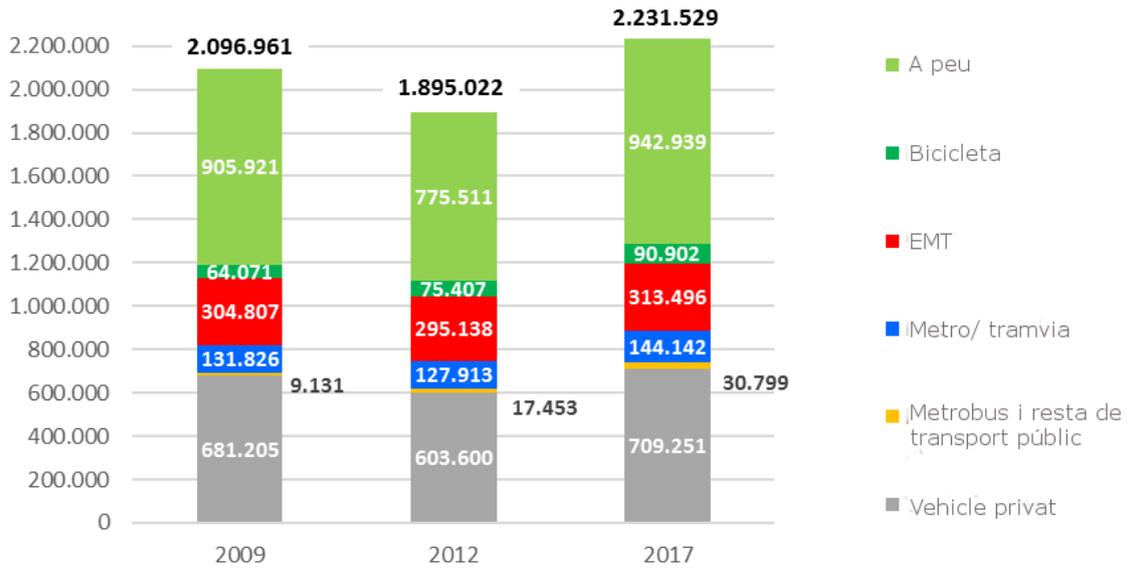


Figura 4: Reparto modal de la ciudad de València, valores absolutos. (Fuente [6])

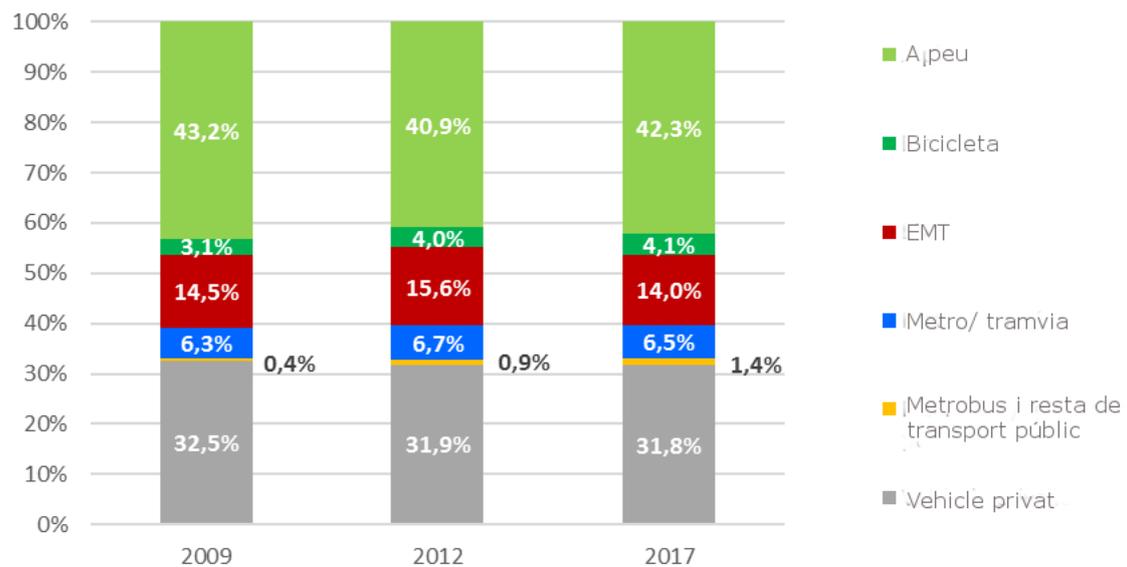


Figura 5: Reparto modal de la ciudad de València, valores porcentuales. (Fuente [6])

Además, cabe destacar que el Ayuntamiento de Valencia dispone de un simulador de tráfico y transporte público para verificar la implantación de las tareas derivadas del Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS). Este simulador permite crear modelos para analizar las pautas de movilidad de la población en los diferentes modos de transporte. Una vez calibrado correctamente, esta herramienta ayuda a la toma de decisiones en una gran variedad de ámbitos, por ejemplo, para el desarrollo de infraestructuras viarias, o el desarrollo y gestión de Valenbisi. Este simulador de tráfico también permite la modelización multimodal: transporte público, privado, desplazamientos a pie y en bicicleta. El modelo dispone de una cuadrícula de más de 30.000 celdas en las que recientemente se han introducido datos socioeconómicos, usuarios de Valenbisi, y distancia entre estaciones de Valenbisi. El modelo también suministra

distancia a estaciones de cada usuario y abonados por domicilio, lo que permite la toma de decisiones para ampliaciones futuras, de manera que se optimicen los recursos disponibles.

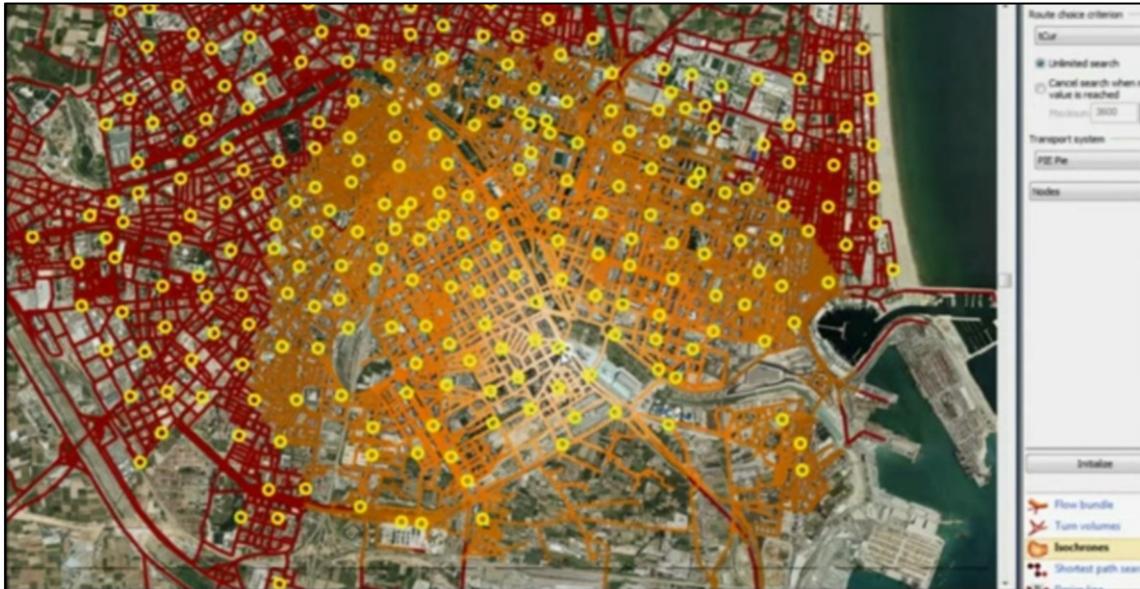


Figura 6: Simulador de tráfico y transporte público del Ayuntamiento de Valencia. (Fuente [8])

Con toda esta infraestructura creada, el uso de la bicicleta en Valencia como medio de transporte diario es un hecho. El Área de Movilidad y Urbanismo del Ayuntamiento de Valencia registra las intensidades diarias de bicicletas y/o patinetes en numerosos puntos de los carriles bici de la ciudad. En cada uno de estos puntos se afora la cantidad de ciclistas, tanto en bicicleta propia como en Valenbisi, personas en Vehículos de Movilidad Personal y otros vehículos que hacen uso de la infraestructura.

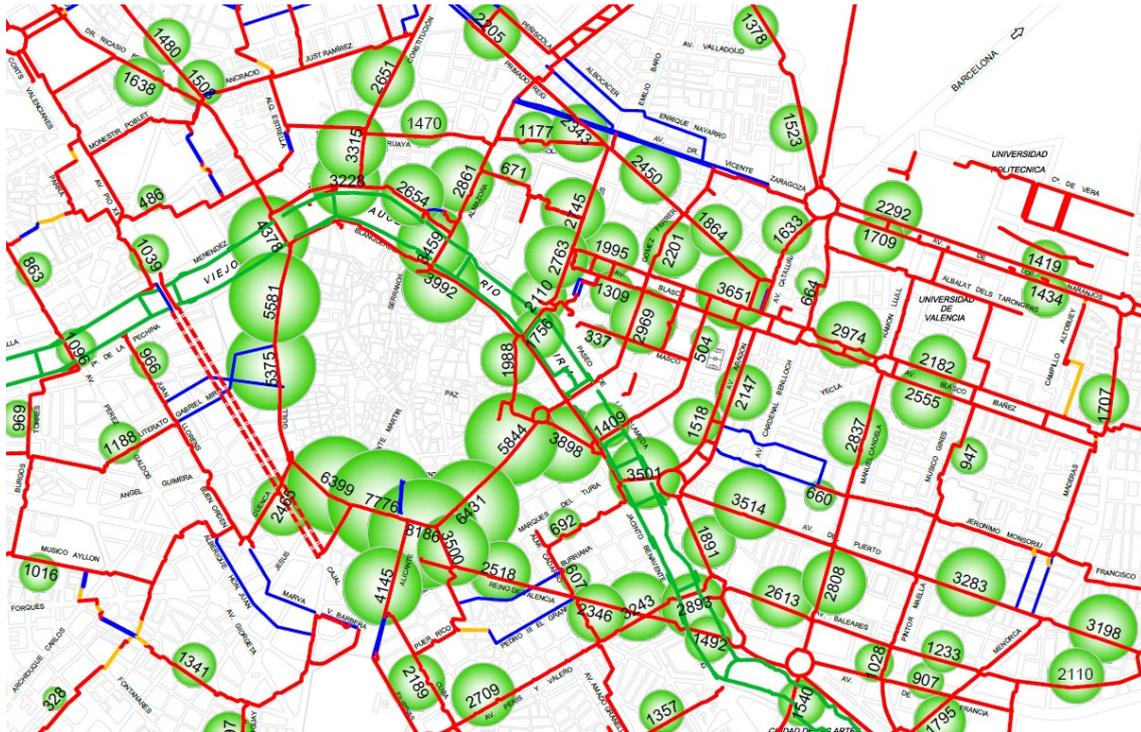


Figura 7: Intensidades carril bici. Días Laborables. Septiembre 2022. (Fuente [13])

En los meses de más uso de los carriles bici, por ejemplo, septiembre, se obtienen máximos de intensidades diarias en días laborables de más de 8.000 bicicletas y/o patinetes, lo que supone un tráfico considerable. Las previsiones indican que este tráfico continuará creciendo debido a la concienciación ciudadana de desplazarse en medios de transporte más eficientes y económicos.

El uso de los Vehículos de Movilidad Personal está en continuo crecimiento, lo que ha trasladado a las autoridades la necesidad de regular el uso de estos vehículos, tanto en las ciudades (Ordenanzas de Movilidad de los Ayuntamientos) como en espacios interurbanos (Reglamento General de Circulación de la Dirección General de Tráfico).

Por todo lo anteriormente expuesto, se hace necesario tener cada vez una mayor monitorización de los vehículos que hacen uso de los carriles bici.

## 2. Justificación del proyecto

De manera general a lo largo de este trabajo, se usará el término *Vehículo de Movilidad Personal* (en adelante VMP), para referirse a los vehículos dotados de una única plaza y propulsados exclusivamente por motores eléctricos que pueden proporcionar al vehículo una velocidad máxima por diseño comprendida entre 6 y 25 km/h, y además se incluirá en este grupo las bicicletas convencionales (sin motor eléctrico). Y se utilizará el término *Vehículo tradicional* para referirse a vehículos a motor, tanto de combustión como eléctrico, de dos o más plazas, tales como son los coches, motocicletas, furgonetas, camiones, etc.

La detección y gestión de los VMP en vías urbanas se hace cada vez más necesaria debido al incremento del número de vehículos de este tipo que ya se está produciendo, y el incremento previsto para los próximos años. El aumento del número de kilómetros de carriles bici construidos en las ciudades ha conllevado también el incremento del número de intersecciones y puntos conflictivos, en los que la convivencia entre vehículos tradicionales, VMP y peatones es compleja y debe ser regulada.

A nivel nacional existía una “Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020”, que fijaba como principal objetivo bajar la tasa de personas fallecidas por millón de habitantes a menos de 37, objetivo que debía alcanzarse al finalizar la década. Una de las herramientas para conseguir este objetivo principal, y los demás objetivos de la Estrategia, fue el Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial [9]. Si bien en los años iniciales de aplicación de la Estrategia este indicador parecía alcanzable, y las cifras de siniestralidad a finales del año 2020 consolidaban la tendencia decreciente, la realidad fue que la tasa no había llegado al objetivo fijado, y en ese momento se encontraba en 39 personas fallecidas por millón de habitantes. Para seguir intentando conseguir los objetivos propuestos en la “Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020”, a finales del año 2021 se publica la Ley 18/2021, de 20 de diciembre [10], que modifica el Real Decreto antes mencionado. Tanto en el Real Decreto, como en la Ley que posteriormente lo modifica, se fijan las competencias de cada administración pública y se establecen normas de circulación para los VMP.

Por su parte, los ayuntamientos también han adaptado sus Ordenanzas Municipales para tener en cuenta los VMP. Dos ejemplos de ello son la ciudad de Madrid [11] y la ciudad de Valencia [12], en las que sus Ordenanzas Municipales establecen las condiciones de uso y circulación de los VMP, y establecen un régimen sancionador en caso de incumplimiento.

Por lo tanto, nos encontramos con un Marco Regulatorio reciente que establece las normas de circulación que deben cumplir los VMP, y ahora se hace necesario implantar instrumentos y métodos que permitan evaluar el grado de cumplimiento del Marco Regulatorio.

En un estudio publicado por la Fundación Mapfre sobre “buenas prácticas y últimos datos de siniestralidad” [14], se recoge que en el año 2021 fallecieron en España 13 personas en siniestros de patinetes eléctricos, más del doble que en años anteriores. En este mismo estudio también se indica que el uso de este modo de transporte ha experimentado un notabilísimo incremento en los últimos años, incremento que afortunadamente no se ha trasladado de manera proporcional a la siniestralidad, por lo que muy probablemente la tasa de siniestralidad haya disminuido notablemente. Pero desafortunadamente todavía no se dispone de datos concretos,

puesto que no existen de sistemas de monitorización de VMP instalados de forma masiva en las ciudades. Cabe destacar que uno de los puntos más conflictivos son las intersecciones, en Estados Unidos hay estudios que indican que aproximadamente dos tercios de los accidentes de bicicleta registrados ocurren en las intersecciones [15].

Para mejorar la fluidez y la seguridad del tráfico VMP, y su convivencia con el tráfico de vehículos tradicionales y peatones, es primordial monitorizar la circulación del tráfico VMP. Si no se dispone de datos de intensidades de VMP en las diferentes vías, no es posible tomar decisiones posteriores de regulación del tráfico con el objetivo de buscar soluciones en puntos de conflicto en los que tengan que convivir diferentes tipos de tráfico y peatones. Esta información también puede ser tenida en cuenta a la hora de extender o ampliar los carriles bici existentes.

La traba técnica que existe actualmente viene motivada porque más allá de la detección y conteo de VMP, es escasa la oferta de sistemas de disponen de capacidad para obtener datos de caracterización del tipo vehículo, velocidad y sentido de circulación del VMP. Además, la fiabilidad de muchos de estos sensores de detección y conteo no es elevada. Por otra parte, a nivel de actuadores, son pocas las instalaciones ya disponibles de Paneles de Mensaje Variable específicos para el tráfico VMP, y por tanto no se alerta en tiempo real a los usuarios de VMP de situaciones de peligro.

Se hace necesario, por tanto, disponer de una monitorización y caracterización del tráfico VMP que circula por los carriles bici. Disponer de esta información tiene dos objetivos claros; por un lado, asegurar el cumplimiento de las normas de circulación que son de aplicación a los VMP; y en segundo lugar que no se ponga en riesgo la seguridad de todos los usuarios de la vía.

En este trabajo se analizarán las situaciones conflictivas más comunes en las que se ven involucrados los VMP, y se propondrá un sistema que detectará la presencia de un VMP mediante sensores, y mediante actuadores le solicitará al usuario que cumpla con unos criterios de seguridad para evitar poner en riesgo a ninguno de los usuarios de la vía pública, incluido el propio usuario del VMP. Además, el sistema medirá la intensidad, velocidad, sentido de circulación y tipo de VMP (bicicleta tradicional, bicicleta eléctrica, patinete...). Por lo tanto, se trata de la aplicación de Sistemas Inteligentes de Transporte para la reducción de la siniestralidad del tráfico VMP.

Además, se realizará la implantación del sistema en uno de los puntos más conflictivos de la ciudad de Valencia, la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón, de manera que se pretende mejorar la siniestralidad en este punto.

El alcance del trabajo se centra en las situaciones conflictivas más comunes en las que se ven involucrados los Vehículos de Movilidad Personal cuando circulan por carriles bici, queda fuera del alcance de este trabajo las situaciones conflictivas que puedan surgir de la circulación de Vehículos de Movilidad Personal compartiendo calzada con los vehículos a motor tradicionales.

### 3. Marco teórico

En la actualidad los sistemas de monitorización y control del tráfico VMP son muy rudimentarios, y se utilizan para funcionalidades muy específicas, las cuales se presentarán a lo largo del capítulo 4. Por ello, se partirá de un sistema de control de tráfico de vehículos tradicionales para conocer el marco teórico en el que se posiciona este trabajo. A lo largo del presente capítulo se presentará la tecnología actualmente disponible para el control de tráfico de vehículos tradicionales, a modo de fundamentación teórica del desarrollo posterior.

De manera general, un sistema de control de tráfico de vehículos tradicionales esta compuesto por los elementos que aparecen en la Figura 8, obtenida de los apuntes de la asignatura “Sistemas de adquisición de datos y respuesta para sistemas inteligentes de transporte” del “Máster en Sistemas Inteligentes de Transporte” de la UPV (curso 2021/2022).

Tal y como se ha dicho anteriormente, estos sistemas de control de tráfico están diseñados para vehículos tradicionales, que sirven para la movilidad de varios ocupantes o de mercancías; por ejemplo: coches, furgonetas, camiones, autobuses o motocicletas.



Figura 8: Sistema de control de tráfico de vehículos. (Fuente [16])

En esta figura se pueden identificar los siguientes elementos:

- **Sala de control:** se trata de un centro de gestión del tráfico, cuya responsabilidad es el control y la supervisión de la circulación. En el caso de España, esta responsabilidad recae sobre la Administración Pública responsable de la vía o sobre la Dirección General de Tráfico. Para realizar esta tarea, recibe datos generados en la vía por los sensores, y en función del estado de la vía, implanta un plan de tráfico a través de los actuadores y sistemas de señalización.
- **Red de comunicaciones:** es el conjunto de medios, tecnologías, protocolos y facilidades en general, necesarios para el intercambio de información entre la sala de control y los equipos en la vía.
- **Equipos en la vía:** se trata de los distintos elementos instalados en la vía que sirven para proporcionar información a la sala de control y a los usuarios de la vía. Podemos distinguir entre los siguientes tipos de equipos: detectores, sensores y actuadores.

Se define detector como el equipo responsable de recoger información de lo que ocurre en la vía, mediante la percepción de fenómenos físicos. Posteriormente es necesario transformar esta información en señales eléctricas entendibles por los reguladores control de tráfico. Mientras que los sensores son equipos que realizan ambas tareas, detectan fenómenos físicos y los transforman en señales eléctricas entendibles por los reguladores. De manera general, se habla de sensores, pues abarcan hasta los reguladores de control de tráfico. Los sensores proporcionan información sobre cantidad y tipología de vehículos que circulan por una vía, sentido de circulación y velocidad. Además de los sensores de tráfico, existen sensores climatológicos y medioambientales, cuya información será principalmente meteorológica y de calidad del aire.

Los actuadores son elementos que permiten a la sala de control de tráfico interactuar con los usuarios de la vía, principalmente se trata de semáforos y de Paneles de Mensaje Variable.

### 3.1. Equipos en la vía: sensores

Centrándonos en sensores instalados en la vía, se pueden hacer varias clasificaciones. Una primera clasificación corresponde a si se trata de equipos intrusivos o no intrusivos. El primero de ellos requiere la interrupción del tráfico para su instalación y mantenimiento, mientras que los sensores no intrusivos no requieren de dicha interrupción. Una segunda clasificación que puede realizarse de los equipos detectores y sensores es si están enfocados al tráfico urbano o al tráfico interurbano. Todos lo que sensores pueden ser instalados tanto para tráfico urbano como interurbano, y su instalación en cada entorno depende de los parámetros que se quieran obtener.

A continuación, se describen brevemente los sensores viarios existentes:

1. **Espiras magnéticas:** Se trata de un sensor intrusivo, cuyo uso sirve para tráfico urbano e interurbano, consistente en un lazo inductivo formado por un cable con un número determinado de vueltas. Cuando un vehículo, o cualquier material ferromagnético, entra en contacto con el campo magnético creado por la espira, se inducen en éste corrientes parásitas que hacen disminuir el campo magnético global, provocando así una pequeña variación de la inductancia de la espira, lo que se traduce en un aumento de la frecuencia de oscilación del circuito. Dependiendo del vehículo que circule por encima de la espira, se

genera una variación distinta de la inductancia, el análisis de esta variación de la frecuencia permite crear una clasificación de tipos de vehículos.



Figura 9: Espira electromagnética en la Avenida de los Naranjos de la ciudad de Valencia. (Fuente Google Maps).

Además de la espira magnética, es necesaria una Unidad Electrónica, formada por un circuito oscilador capaz de convertir la tensión/corriente continua en una tensión/corriente alterna, que varía de forma periódica en el tiempo. La mayoría de los reguladores de tráfico no pueden interpretar los perfiles magnéticos generados por cada tipo de vehículos, es por ello que es necesario un controlador que convierta las huellas magnéticas de cada vehículo en pulsos de tiempo de ocupación.

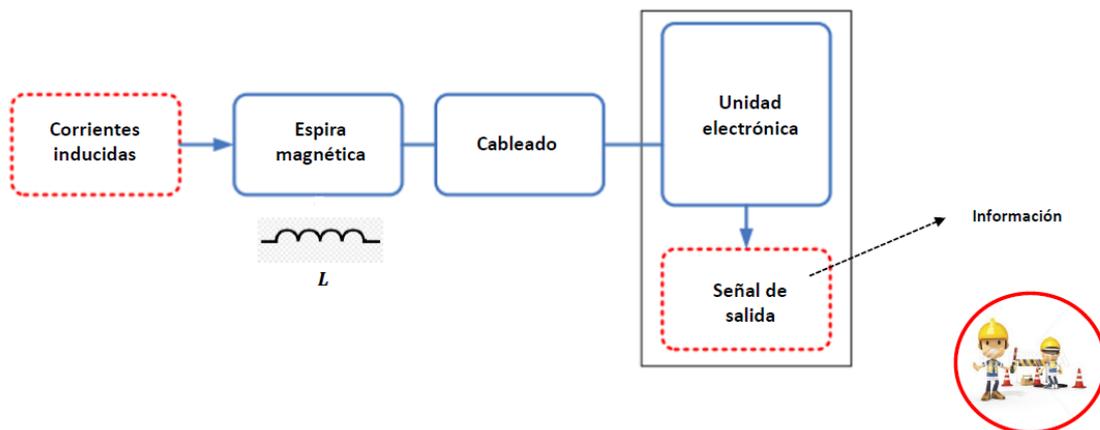


Figura 10: elementos de un sensor basado en una espira electromagnética hasta la salida al regulador. (Fuente [16])

La espira magnética simple permite el conteo de vehículos, pero existe también una espira magnética doble, que además del conteo de vehículos es capaz de medir la velocidad y sentido en el que circula el vehículo, y realizar una clasificación del mismo en función de su longitud.

La espira magnética es el sensor más utilizado en las vías, tanto urbanas como interurbanas, debido a que se trata de una tecnología ampliamente extendida y testada, es inmune a cambios climáticos, y el coste del sensor es bajo.

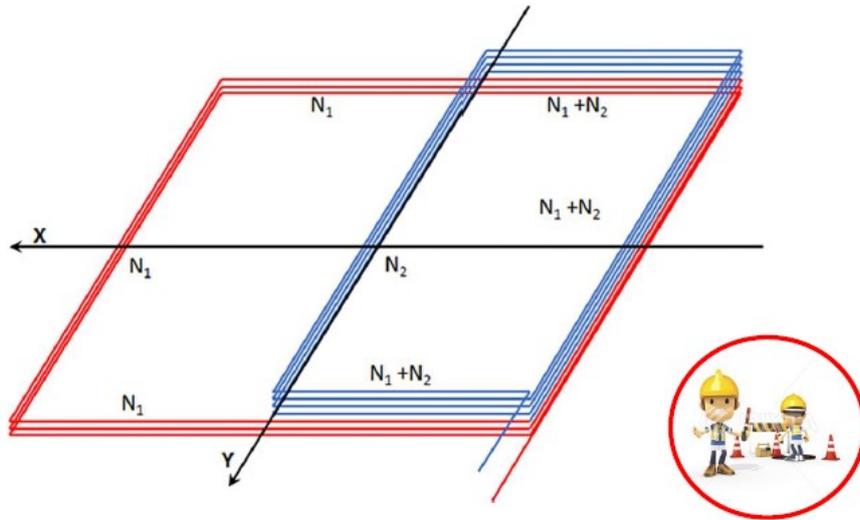


Figura 11: Espira electromagnética doble. (Fuente [16])

2. **Sensores piezoeléctricos:** se trata de sensores que generan una señal eléctrica si son deformados. Se colocan habitualmente sobre la calzada, y generan una señal eléctrica al paso del vehículo. Suelen utilizarse para eventos temporales debido al gran desgaste que sufren por el paso de vehículos. Son sensores intrusivos de uso urbano e interurbano. Si solo se dispone de un sensor piezoeléctrico, permite contar vehículos, cálculo de peso, y clasificación de vehículos por distancia entre ejes. Lo habitual es colocar dos sensores, sensor piezoeléctrico dual, tal y como se muestra en la Figura 10, de manera que también se mida la velocidad y sentido de la circulación.



Figura 12: Sensor piezoeléctrico dual. (Fuente [16])

3. **Tubos neumáticos:** consiste en un sensor muy similar a los sensores piezoeléctricos, se genera un pulso de presión a lo largo del tubo cuando los neumáticos del vehículo pasan por encima. Se trata de un sensor para la recolección rápida de datos, ya que su instalación es muy sencilla. Por contra, está muy expuesto a actos de vandalismo. Lo habitual es colocar dos sensores de manera que mide el conteo de vehículos, clasificación de vehículos según la distancia de sus ejes y cálculo de la velocidad y sentido de la circulación. Estos tubos neumáticos no proporcionan información sobre el peso de los vehículos.



Figura 13: Sensor tubo neumático. (Fuente [16])

4. **Magnetómetros:** se trata de un sensor que cuantifica en fuerza y/o dirección un campo electromagnético. Detecta cambios electromagnéticos generados por un vehículo, envía la información de forma inalámbrica al sistema de control, y el sistema de control integra la información y extrae los siguientes parámetros del tráfico: conteo de vehículos y tipología de vehículo. En el caso de contar con dos magnetómetros también mide la velocidad y sentido de la circulación. Se trata de un sistema patentado.



Figura 14: Magnetómetro. (Fuente [16])

5. **Sensores de fibra óptica:** se trata de un cable de fibra óptica en el que se transmiten pulsos en su interior mediante un diodo láser. El paso del vehículo sobre el sensor, lo deforma y disminuye la transmitancia óptica del mismo. Dispone de fotodetectores que detectan el cambio de transmitancia y el sistema transforma estas señales en información de tráfico. Un sensor aislado permite medir conteo de vehículos y clasificación de vehículos según sus ejes, y si se dispone de sensores duales también se puede calcular de velocidad, longitud y sentido de circulación.



Figura 15: Sensor de fibra óptica. (Fuente [16])

6. **Sensores ultrasónicos:** se trata de sensores que emiten cíclicamente un impulso acústico, y el pulso reflejado vuelve como un eco al sensor ultrasónico. El sensor calcula la distancia hacia el objeto. Permite el conteo de vehículos y medir la velocidad a la que circulan. Se trata de un sensor no intrusivo que, aunque a veces se utiliza en vías de circulación, normalmente se utiliza como detector de presencia en aparcamientos, o en los sensores de aparcamiento instalados en los propios vehículos.



Figura 16: Sensor ultrasónico. (Fuente [16])

7. **Sensores acústicos pasivos:** es un sensor que detecta la energía acústica y sonidos producidos por el tráfico, básicamente se trata de un micrófono. Requiere de una unidad electrónica/software que sea capaz de procesar e interpretar el sonido detectado por el sensor. Permite detectar vehículos en varios carriles y realizar una clasificación del vehículo. Se trata de un sensor no intrusivo con una baja robustez y fiabilidad.



Figura 17: Sensor acústico pasivo. (Fuente [16])

8. **Radar de microondas:** se trata de un sensor que emite un haz de microondas y recibe el haz de vuelta después de reflejarse en el vehículo. Es un sensor no intrusivo que permite realizar el conteo de vehículos, y medir la velocidad a la que circulan. El cálculo de la velocidad se realiza mediante efecto Doppler. El uso que normalmente se hace de estos sensores es como radar de velocidad, ya sea en ámbito urbano o interurbano.



Figura 18: Radar de microondas. (Fuente [16])

9. **Sensor láser:** se trata de un sensor que emite múltiples pulsos de luz infrarroja y recibe la luz de infrarrojos después de reflejarse en el vehículo. Es un sensor no intrusivo que permite reconstruir perfiles 3D de los vehículos, además de medir la velocidad del vehículo, aunque en este caso con una menor precisión que los radares de microondas. Se trata de una tecnología con amplias posibilidades de desarrollo.

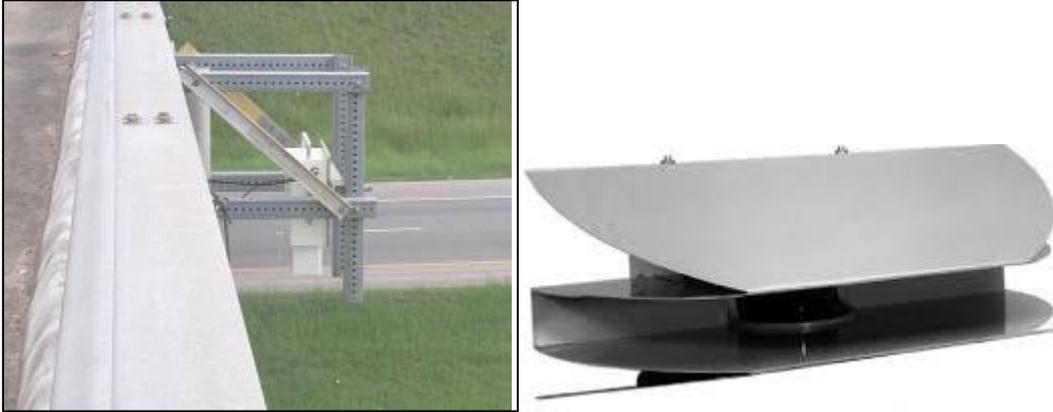


Figura 19: Sensor láser. (Fuente[16])

10. **Sensor infrarrojo pasivo:** se trata de un sensor electrónico que mide la luz infrarroja radiada de los objetos. Es un sensor no intrusivo, muy económico, y en cuanto a la circulación solo permite el conteo de vehículos. Se está explorando su uso para la visualización y control de semáforos, y detección de personas y bicicletas en vías urbanas.



Figura 20: Sensor infrarrojo pasivo. (Fuente [16])

**11. Sensor de inteligencia artificial:** se trata de una cámara, o varias cámaras, con información



en tiempo real que es procesada e interpretada por un software. Mediante el análisis de estas imágenes, la aplicación es capaz de realizar multitud de funciones; desde conteo de vehículos hasta detección de accidentes, clasificación de objetos, y un largo etcétera tanto en ámbito de vehículos como de las propias infraestructuras en general. Se trata de un sensor no intrusivo que permite la obtención de innumerables parámetros, aunque la programación del software es bastante compleja. Por otra parte, las inclemencias meteorológicas y medioambientales pueden afectar al normal funcionamiento del sensor. Se trata de una tecnología, la inteligencia artificial, con mucha capacidad de evolución.

*Figura 21: Cámaras de inteligencia artificial. (Fuente [16])*

**12. Sensores climatológicos y medioambientales:** además de los sensores específicos de tráfico, en la vía pública existe una serie de sensores que miden parámetros climatológicos y medioambientales.

Como resumen de los sensores disponibles, podemos decir que se dispone de una amplia gama de tipos de sensores y, en función de los parámetros y el entorno en el que queramos realizar las mediciones, utilizaremos unos u otros. Existen también unos sensores basados en tecnologías cuya capacidad de evolución en los próximos años es muy amplia, se trata de los sensores láser o los sensores basados en inteligencia artificial. Lo que es indudable es que la espira magnética es el sensor más utilizado en las vías, tanto urbanas como interurbanas, debido a que se trata de una tecnología ampliamente extendida y testada, es inmune a cambios climáticos, y el coste del sensor es bajo.

### 3.2. Equipos en la vía: actuadores

Son equipos que permiten a la sala de control interactuar con los usuarios, de manera que se pueda realizar una gestión del tráfico en tiempo real. Existen dos tipos de actuadores: los semáforos y los Paneles de Mensaje Variable (PMV).

1. **Semáforos:** sirven para regular el paso de vehículos, y peatones, en una intersección. Es necesario disponer de un regulador de control de tráfico que establezca los planes de tráfico de los grupos semafóricos de una intersección.



Figura 22: Semáforo, junto al regulador, en la Avenida de los Naranjos de Valencia. (Fuente Google Maps).

Existen numerosos fabricantes de reguladores de control de tráfico, que disponen de sistemas con mayor o menor capacidad, pero básicamente con la misma funcionalidad. Además de los grupos semafóricos, los reguladores también pueden gestionar el uso de detectores, de manera que éstos procesan la información y la envían al centro de gestión de tráfico correspondiente. Los reguladores son un elemento importantísimo, en el que se encuentra la lógica para garantizar la seguridad de todos los usuarios de la vía y proporcionar el mejor nivel de servicio posible. El esquema interno de regulador de control tráfico se presenta en la siguiente figura:

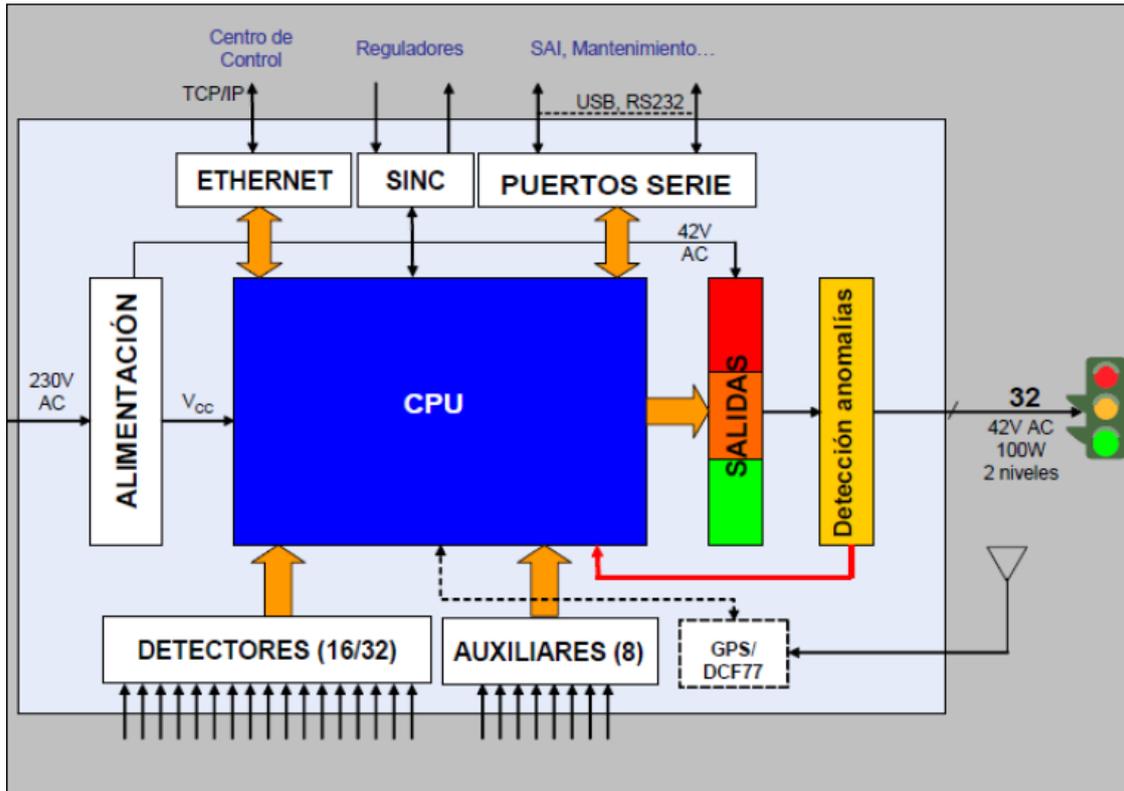


Figura 23: Esquema interno regulador de control tráfico. (Fuente [16])

2. **Paneles de Mensaje Variable (PMV):** estos actuadores son paneles de señalización destinados a alertar o informar a los usuarios de la vía sobre el estado de la misma. Estos paneles pueden mostrar mensajes escritos o iconos, que pueden aparecer de manera fija o intermitente, según la situación lo requiera. Constituyen un canal de comunicación muy importante entre el centro de gestión de tráfico y los usuarios.



Figura 24: Panel de Mensaje Variable en la CV-500 de Valencia. (Fuente Google Maps).

### 3.3. Red de comunicaciones

Se trata de toda la infraestructura necesaria para poder interconectar la sala de control con todos los equipos de tráfico existentes en las vías, normalmente hasta los reguladores, que son los sistemas que permiten disponer de un interfaz armonizado frente a todos los equipos disponibles en la vía, descritos en el apartado anterior.

La red de comunicaciones de tráfico, que tradicionalmente estaba compuesta de cable de cobre, ha ido evolucionando a redes de fibra óptica y comunicaciones inalámbricas en función de las necesidades de cada lugar.

Se utilizan redes de fibra óptica debido a su gran capacidad de ancho de banda y poca atenuación en distancias elevadas, inmunidad al ruido e interferencias de origen electromagnético, y resistencia a los agentes ambientales. La topología más utilizada es un sistema centralizado, con anillos de fibra óptica, que permiten disponer de redes más seguras y robustas, pues permiten llegar a cada elemento de la vía por dos caminos distintos. El protocolo de comunicaciones TCP/IP ha permitido la normalización entre las comunicaciones de equipos de distintas tecnologías.

Actualmente, algunas ciudades ya disponen de redes wifi en sus municipios. El uso de estas redes para interconectar elementos de tráfico depende de la criticidad de los mismos. En zonas más aisladas la conexión a la red de comunicaciones suele realizarse mediante telefonía móvil.

### 3.4. Sala de control

Es el emplazamiento en el que se ubican las personas, sistemas y procedimientos encargados de supervisar, regular y controlar el tráfico rodado en el área bajo su responsabilidad. La sala de control procesa toda la información proveniente de los sensores instalados en ella, y se comunica con los usuarios a través de los actuadores. También ofrece asistencia a los usuarios que circulan en la vía.

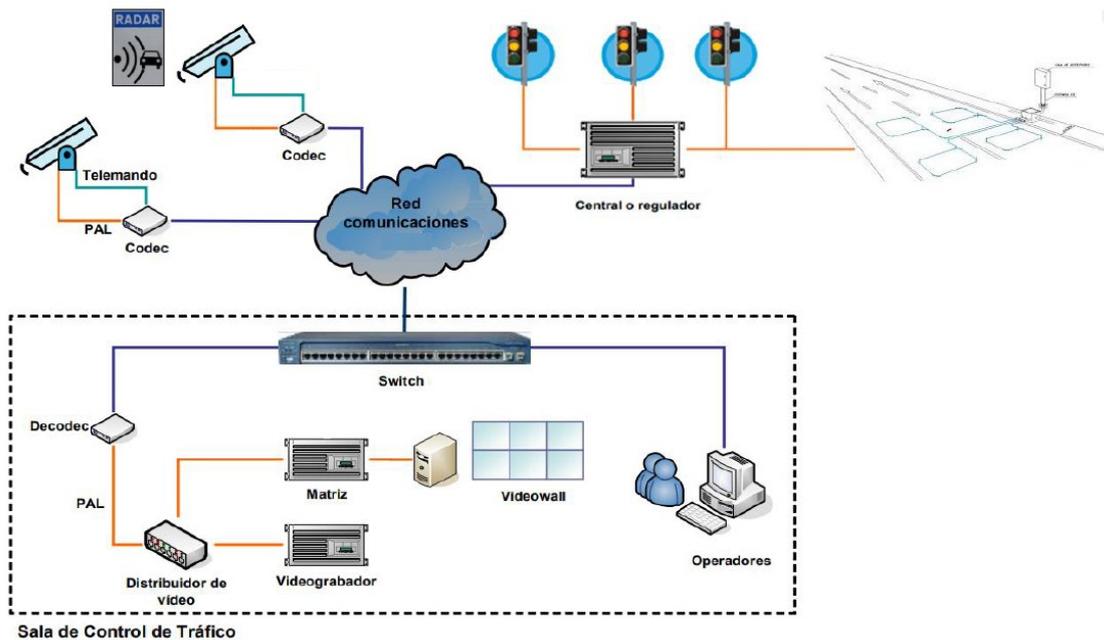


Figura 25: Organización de un Sistema de Control de Tráfico con Sala de Control. (Fuente[16])

En el caso de la ciudad de Valencia, el Ayuntamiento dispone de un Centro de Gestión de Tráfico (Figura 26) que pretende ser el punto de unión entre todos los agentes implicados en el tráfico urbano de la ciudad: peatones, vehículos privados, transporte colectivo, Policía Local, medios de comunicación, etc. Desde el Centro de Gestión de Tráfico se realiza la gestión integral del tráfico con el objetivo de optimizar las condiciones generales de la circulación para todos los usuarios de la vía pública. Recordemos que la ciudad de Valencia, con más de 800.000 habitantes, cuenta en la actualidad con un parque automovilístico de aproximadamente 498.000 vehículos tradicionales y una red viaria principal de 300 kilómetros de longitud.

Valencia dispone de un sistema centralizado de Control del Tráfico que permite regular en tiempo real los semáforos para adecuarlos a las condiciones del tráfico. Mediante dicho sistema es posible modificar el tiempo de verde de cada acceso, el ciclo semafórico y la sincronización entre diferentes cruces para evitar que se generen colas en unas vías mientras sobra tiempo de paso en otras, consiguiendo con ello reducir la demora y aumentar la velocidad de circulación. Se dispone de un sistema de emergencia de tiempos fijos que funcionaría automáticamente en caso de fallo del sistema centralizado.

Cabe recordar que en la ciudad existen más de 1.000 intersecciones reguladas por semáforos. El sistema centralizado permite conocer inmediatamente cualquier avería de los reguladores, incluyendo las lámparas fundidas. El estado del tráfico en la red viaria de la ciudad es conocido en tiempo real en el Centro de Gestión de Tráfico a través de dos fuentes de información: los sensores instalados en los carriles de circulación y las imágenes del circuito cerrado de televisión.

Para garantizar la comunicación segura entre todos los equipos que configuran el sistema de gestión de tráfico y movilidad, se ha desarrollado una red de comunicaciones TCP/IP de fibra óptica con anillos redundantes gigabit ethernet.

Para poder dar este servicio, el sistema cuenta con 1.100 reguladores de tráfico, 752 cámaras de vídeo, 3.500 espiras magnéticas, 114 paneles de mensaje variable y 25 paneles de parking.



Figura 26: Centro de Gestión de Tráfico del Ayuntamiento de Valencia. (Fuente [17]).

## 4. Estado del arte Sistemas de Control de Tráfico VMP

Una vez presentado un sistema de control de tráfico de vehículos tradicionales, se analiza a continuación las posibilidades de adaptación de este tipo de sistemas, a un control de tráfico de Vehículos de Movilidad Personal (VMP) en vías urbanas.

Se comenzará realizando un análisis de los sensores presentados en el apartado anterior, para ver cuales se adaptan mejor al objetivo que persigue el trabajo. Después de analizar los sensores específicos para el tráfico VMP, se analizarán las posibilidades disponibles de actuadores para tráfico VMP, y por último se estudiará la viabilidad de su integración en una sala de control de tráfico. Durante este análisis se expondrán las iniciativas existentes.

A nivel europeo no existe una Reglamentación que regule los sistemas para la detección de tráfico VMP. También es difícil encontrar algún tipo de estándar o guía que haya definido la industria para el desarrollo de estos sistemas. Se debe cruzar el océano Atlántico, y desplazarnos hasta Estados Unidos para encontrar Normativa en un estado de madurez avanzada, y estudios realizados por la industria.

En el año 2006, la *Federal Highway Administration (FHWA)* de Estados Unidos publicó la tercera edición del *Traffic Detector Handbook* [18], que en su capítulo 4 describe en profundidad las distintas configuraciones de espiras electromagnéticas y qué diseños son más apropiados para la detección y operación de vehículos pequeños como pueden ser automóviles compactos hasta 100 cc, motocicletas, ciclomotores y bicicletas ligeras. La edición vigente del *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways (MUTCD)* [19], publicada en el año 2009 por la *FHWA*, tiene algunas pautas sobre señalización y marcas en el pavimento asociadas con la detección de bicicletas.

Por otra parte, en el año 2012, la *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* publicó la cuarta edición de la *Guide for the Development of Bicycle Facilities* [20]. Esta guía cubre una gran variedad de temas, desde la planificación y el diseño, hasta el mantenimiento y las operaciones de las instalaciones para bicicletas. En concreto, en la sección 4.12.5 describe detalladamente diferentes métodos para detección de bicicletas, incluyendo espiras magnéticas, sistemas de video, radar, magnetómetros y pulsadores.

Existe otra asociación compuesta por las 93 ciudades y agencias de tránsito más importantes de América del Norte, *National Association of City Transportation Officials (NACTO)*, cuyo objetivo es el intercambio de ideas de manera colaborativa sobre los problemas de transporte nacional. En el año 2012 publicó la segunda edición de la *Urban Bikeway Design Guide* [21]. Esta guía define pautas de diseño de diferentes tipos de vías ciclistas, y en su apartado sobre la detección y activación de señales para bicicletas describe diferentes métodos de detección de ciclistas en las intersecciones, principalmente espiras electromagnéticas, y el lugar donde colocarlas estableciendo marcas en el pavimento para indicar a los ciclistas dónde deben detenerse para activar las señales.

Por último, existe un estudio muy interesante realizado por la industria, concretamente por la empresa estadounidense *Alta Planning + Design*, que resume muy claramente las posibilidades actuales de detección de ciclistas. Concretamente, el estudio se llama *Bicycle Detection* [15], y en él se realiza una revisión de las tecnologías disponibles y experiencias puestas en práctica

para lograr intersecciones más inteligentes y seguras en las que circulan varios tipos de vehículos y peatones.

A continuación, se exponen las posibilidades existentes de elementos adaptados al tráfico VMP que componen un sistema de control de tráfico.

#### 4.1. Sensores específicos para tráfico VMP

Existen diferentes iniciativas a nivel mundial cuyo objetivo es la detección de VMP en las vías urbanas. Son numerosos los proyectos para la detección de bicicletas, que van desde sistemas básicos como puede ser un sistema de conteo de bicicletas o pulsadores que presiona el ciclista para que el sistema detecte su presencia, hasta sistemas más complejos que intentan detectar de manera automática al ciclista antes de que se aproxime a una intersección, y le da paso en el cruce de manera que minimiza la espera del ciclista y no provoca demoras innecesarias al resto de usuarios de la intersección.

A continuación, se repasan los sensores existentes para la detección de VMP, en la mayor parte de los casos se centran en bicicletas convencionales, pues dentro de los vehículos unipersonales son los vehículos más extendidos:

1. **Pulsador:** se trata del elemento más básicos (Figura 27 y Figura 28). Al llegar a la intersección, el usuario del VMP pulsa el botón para que el sistema detecte su presencia y le de paso, del mismo modo que hacen los peatones en este tipo de cruces.



Figura 27: Pulsador en paso de cebra y carril bici en la calle Dr. Tolosa Latourde de Madrid. (Fuente Google Maps).

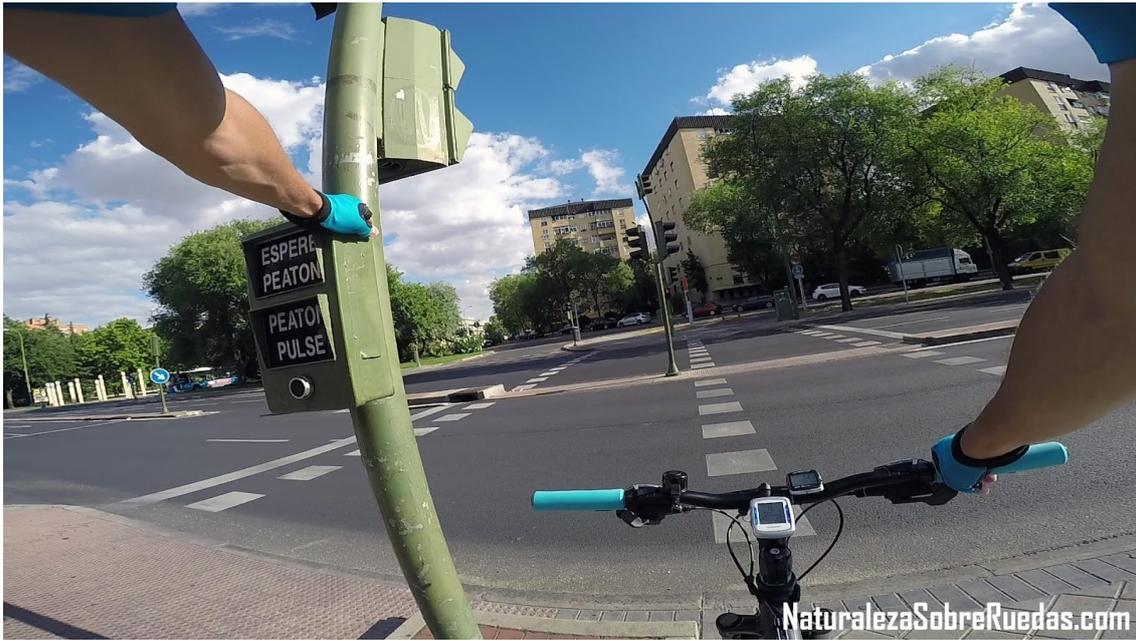


Figura 28: Pulsador en paso de cebra y carril bici en Madrid. (Fuente [www.naturalezasobreruedas.com](http://www.naturalezasobreruedas.com)).

En España no existe una Regulación que especifique el diseño que deben cumplir estos pulsadores, ni las señales que los identifican. El *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways (MUTCD)*, antes introducido, ofrece una orientación sobre la señalización complementaria que debe acompañar a un pulsador ciclista. Especificando las diferentes señales que pueden colocarse en función de la intersección; y especificando también el lugar donde deben colocarse, concretamente encima del pulsador.



Figura 29: Diseño pulsadores ciclista según MUTCD. (Fuente [15])

2. **Espira magnética:** se basan en el mismo concepto físico que las espiras magnéticas de vehículos de tradicionales. Pero al tener la bicicleta una masa ferromagnética mucho menor que un vehículo tradicional, tiene un número mayor de inconvenientes. Por un lado, es necesario instalar la espira en un lugar de espera de los ciclistas, que esté bastante separado del tráfico convencional, sino no será fiable debido a la interferencia que producen los vehículos tradicionales con mucha más masa ferromagnética. Por otro lado, es necesario que el ciclista se posicione correctamente sobre la espira para que esta lo detecte, para ello, suele pintarse encima de la espira una imagen (Figura 30).

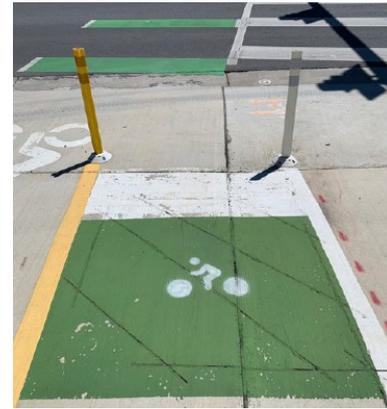


Figura 30: Espira magnética en Huntsville, AL. (Fuente [15])

Otro de los problemas que tienen las espiras magnéticas se produce cuando un pelotón de ciclistas circula por encima de la espira. En estos casos es difícil calibrarla para saber si son bicicletas que están pasando por encima de la espira o es otro tipo de vehículo. Y un último inconveniente es que las bicicletas más modernas están fabricadas con fibra de carbono, por lo que la cantidad de masa ferromagnética disminuye considerablemente frente a las bicicletas convencionales. En estos casos, las espiras magnéticas tienen más dificultad en detectar estas bicicletas.



Figura 31: Espira magnética en Portland, Oregón. (Fuente [15])

Debido a estos problemas de sensibilidad de las espiras magnéticas en la detección de ciclistas, la ciudad de Portland dispone de un proceso para la calibración continua de estas espiras. Con este proceso se persigue que la funcionalidad de la espira, la detección de los ciclistas para darles paso semafórico en la siguiente intersección, pueda estar operativa el mayor tiempo posible.

La mayor parte de las espiras magnéticas desarrolladas por la industria no es capaz de identificar el tipo de vehículo, solamente realiza el conteo de vehículos con las limitaciones antes descritas. Algunas empresas han desarrollado espiras que en el conteo también se tiene en cuenta los monopatines (Figura 32).



Figura 32: Espira magnética que cuenta las bicicletas y monopatines. (Fuente [22]).

En la ciudad de Valencia la mayor parte de los aforamientos se mide con este tipo de sensores. En la siguiente figura (Figura 33), puede observarse una espira magnética para el conteo de bicicletas en la Avenida Primado Reig. La espira se conecta a la Unidad Electrónica que se aprecia entre el árbol y la farola, y esta al Regulador de Tráfico que se ve en el extremo superior derecho de la imagen.



Figura 33: Espira magnética en la Avenida Primado Reig de la ciudad de Valencia. (Fuente Google Maps).

Aunque existen numerosos avances y mejoras en el diseño de espiras magnéticas, nos encontramos ante un sensor que debe ser colocado de una manera muy concreta para que sea fiable en la detección de ciclistas. Se hace necesaria también una mejora que permita la detección de pelotones ciclistas. Pero al mismo tiempo, del mismo modo que las espiras magnéticas tradicionales, las espiras magnéticas ciclistas están destinadas a ser el sensor más utilizado.

3. **Espira magnética doble para la detección de VMP:** en el marco de esta evolución de las espiras magnéticas tradicionales, el grupo de Sistemas de Control de Tráfico del Instituto ITACA de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) ha desarrollado una espira magnética doble que es capaz de detectar y obtener el perfil magnético de un Vehículo de Movilidad Personal (VMP).



Figura 34: Espira magnética doble para la detección de VMP. (Fuente [23]).

Además de permitir detectar el paso de VMP y calcular la velocidad a la que circula el vehículo, esta espira doble permite generar perfiles magnéticos distintivos de diversos tipos de VMP, como son bicicletas convencionales de trekking y de paseo, bicicletas asistidas/eléctricas y los modelos de monopatines más vendidos del mercado. Se trata de una evolución muy importante sobre las espiras magnéticas simples presentadas en el punto anterior.

Numerosos organismos y administraciones se han mostrado interesados en el proyecto, siendo el Ayuntamiento de Valencia el que más ha apostado por el mismo. A principios del año 2023, la cooperación entre el Área de Movilidad Sostenible del Ayuntamiento de Valencia y el grupo de Sistemas de Control de Tráfico del Instituto ITACA de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) ha permitido instalar una espira magnética doble para la detección de VMP en uno de los carriles bici con una mayor afluencia de tráfico de VMP de toda la ciudad de Valencia, la calle Xàtiva. Además de proveer los parámetros antes descritos, esta instalación recopilará una gran cantidad de datos de multitud de VMP, lo que permitirá evolucionar la funcionalidad de la espira.

4. **Sensores piezoeléctricos:** se trata de un sensor similar al visto en el apartado anterior, al paso del VMP el sensor es deformado y genera una señal eléctrica. En la ciudad de Valencia, en concreto en la calle Xàtiva, se instaló hace unos años un sensor piezoeléctrico para realizar el conteo de VMP (Figura 35). Desde el Área de Movilidad del Ayuntamiento de Valencia explican que se han requerido de diferentes pruebas a criterio del fabricante y los técnicos para poder configurarla, hasta que se ha obtenido un margen de error en el conteo inferior al 5%, margen suficientemente efectivo a niveles estadísticos [24].



Figura 35: Sensor piezoeléctrico en la calle Xàtiva de Valencia. (Fuente Google Maps).

5. **Radar en pavimento:** se trata de un radar instalado en el pavimento que mediante el envío y recepción de pulsos de alta frecuencia detecta el paso de ciclistas. Detecta si el ciclista está en movimiento o se ha detenido, lo que permite la sincronización de los semáforos. El mayor problema que tiene es que puede confundir las bicicletas con otros elementos que circulan por encima del carril, o tener activaciones falsas por vehículos tradicionales que circulan cerca del carril bici.



Figura 36: Radar en pavimento en Lincoln, Nebraska. (Fuente [15]).

6. **Radar de microondas:** es un sensor muy similar al radar en pavimento, pero en este caso se instala sobre un mástil. El radar se puede configurar para que solo detecte por encima



Figura 37: Radar de microondas en una intersección de Huntsville, AL. (Fuente [15])

de una cierta velocidad de aproximación que podría usarse para distinguir entre ciclistas y peatones. En este caso es importante que el radar esté bien calibrado para que no confunda las bicicletas circulando a alta velocidad con coches, o incluso que confunda coches con un pelotón de ciclistas. La detección por radar de microondas es una buena opción para intersecciones señalizadas en las que la instalación de espiras magnéticas no sería posible, y en las que se determina que la instalación de otras formas comunes de detección, como video, es problemática debido a la climatología, disponibilidad de poca luz, objetos que impiden la visión, u otros factores.

7. **Video:** Se trata de un sistema similar al presentado en el apartado anterior. Un sistema de detección de video generalmente consta de una o más cámaras, un microprocesador para procesar las imágenes y un software que mediante inteligencia artificial interpreta los datos del flujo de tráfico, en este caso los ciclistas.

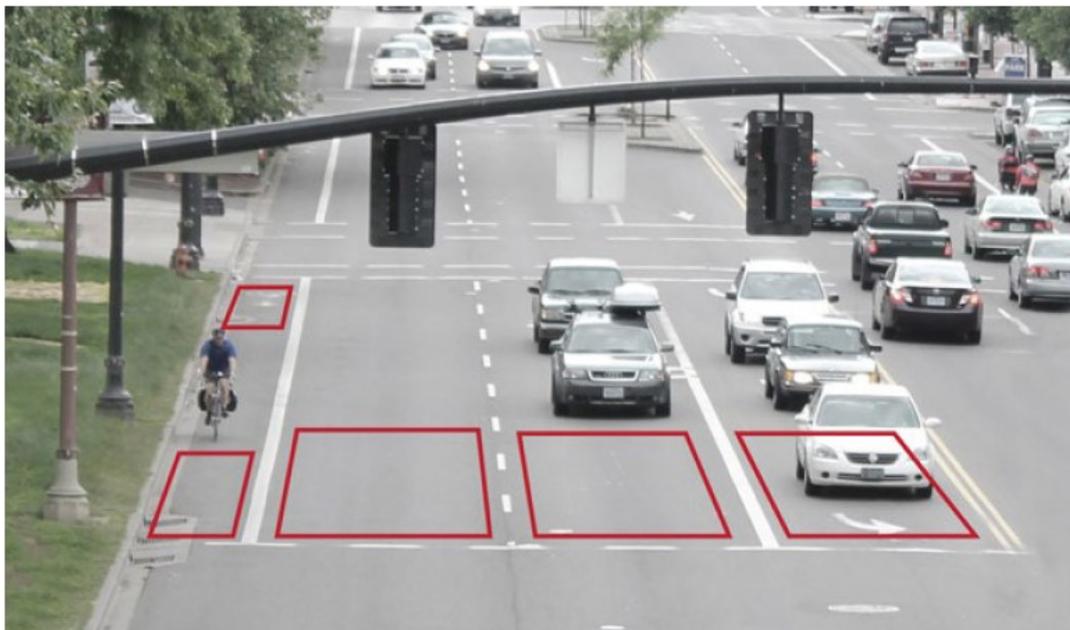


Figura 38: Sistema de detección por video. (Fuente NACTO).

8. **Sensores de fibra óptica:** son sensores similares a los vistos en el apartado anterior, pero calibrados para la detección de VMP, puesto que la presión que realiza un VMP sobre la fibra óptica es mucho menor que la de un vehículo tradicional.
9. **Sensor por infrarrojos:** Los sistemas de detección de infrarrojos se instalan normalmente en intersecciones en las que los sistemas de video han demostrado ser problemáticos debido al clima, o la salida y puesta del sol.
10. **Aplicaciones móviles:** Se trata de una tecnología que se considera prometedora de cara a las futuras *Smart Cities*, pero que en la actualidad no existe una aplicación práctica. Para que un ciclista sea detectado, debe acordarse de encender la aplicación de su móvil, y el hecho de llevar una aplicación ejecutándose en el móvil durante un largo tiempo, conlleva un consumo de batería inasumible actualmente.
11. **Otros sensores:** además de estos sensores, existen iniciativas para la adaptación de magnetómetros y tubos magnéticos para vías ciclistas.



Figura 39: sensor por infrarrojos, magnetómetro y tubos magnéticos. (Fuente [25]).

Cabe destacar que no se han desarrollado sensores acústicos pasivos porque los VMP no emiten sonidos característicos que pueden ser identificados de manera unívoca por el sensor, ni tampoco se han desarrollado sensores láser ni ultrasónicos específicos para ciclistas.

Como recapitulación de los sensores específicos de VMP, se presenta de manera gráfica en la siguiente tabla un resumen de los sensores vistos en este apartado y las funcionalidades que ofrecen:

	Pulsador	Espira magnética simple	Espira magnética doble VMP	Piezoeléctrico	Radar en pavimento	Radar en mástil	Video	Fibra óptica	Infarrojos	Aplicaciones móviles	Tubo neumático
Conteo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Pelotón ciclista	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	Depende del contexto	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	Óptimo	No apto / Coste Elevado			
Dirección	No apto / Coste Elevado	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto
Velocidad	No apto / Coste Elevado	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto
Tipo de Vehículo	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	Óptimo	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	Óptimo	No apto / Coste Elevado			
Fiabilidad	Óptimo	Depende del contexto	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto
Coste	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	No apto / Coste Elevado	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto
Madurez	Óptimo	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto	Depende del contexto

Óptimo
Depende del contexto
No apto / Coste Elevado

Tabla 1: Resumen funcionalidades sensores VMP.

#### 4.2. Actuadores específicos para tráfico VMP

Los actuadores para tráfico tradicional, semáforos y Paneles de Mensaje Variable, descritos en el apartado anterior, son fácilmente adaptables para la gestión de tráfico VMP.

Los semáforos que regulan el tráfico han sido adaptados para regular también el tráfico que circula por los carriles bici. En muchos casos el carril bici cruza la calzada en paralelo al paso de peatones, por lo que se aprovecha el ciclo semafórico definido para regular simultáneamente a los peatones y a los usuarios del carril bici.



Figura 40: Semáforo en carril bici y paso de peatones en el Passeig de l'Albereda de Valencia. (Fuente Google Maps).



Figura 41: Semáforo para carril bici. (Fuente [26])

La mayor parte de los fabricantes de semáforos disponen de modelos adaptados al tráfico que circula por el carril bici, ya sean semáforos compartidos para el tráfico del carril bici y del paso de peatones, como hemos visto en la Figura 40, o semáforos específicos para el carril bici compartiendo, Figura 41.

Del mismo modo que todos los semáforos, los semáforos que regulan el tráfico que circula por los carriles bici deben cumplir con la normativa española y europea aplicable.

Los Paneles de Mensaje Variable para los usuarios de los carriles bici también tienen el mismo funcionamiento que los usados para informar a los usuarios de vehículos tradicionales y a los peatones.



Figura 42: Panel de Mensaje Variable. (Fuente [27])

Se trata de paneles adaptados en tamaño a los usuarios de los carriles bici, y a través de ellos se alerta o se informa a los usuarios de situaciones concretas. Estos paneles pueden mostrar mensajes escritos (Figura 44), iconos (Figura 43), o incluso caracteres numéricos como podría ser la velocidad a la que circula el usuario (Figura 42). Los mensajes mostrados pueden ser fijos o intermitentes según se considere necesario en cada emplazamiento concreto.

Estos Paneles de Mensaje Variable se conectan al Regular de Tráfico, de manera que sean accesibles de manera remota desde el Centro de Gestión de Tráfico.



Figura 43: Panel de Mensaje Variable específico para usuario del carril bici en Copenhague. (Fuente [28]).



Figura 44: Panel de Mensaje Variable en Barcelona. (Fuente [29]).

#### 4.3. Red de comunicaciones y sala de control específicos para tráfico VMP

Repasando el resto de los elementos que componen un sistema de gestión de tráfico, podemos decir que tanto la red de comunicaciones, como la sala de control de un sistema de gestión de tráfico tradicional (descrito en los apartados 3.3 y 3.4), son igualmente válidos en un sistema de gestión de tráfico VMP. Es difícil encontrar Centros de Gestión de Tráfico específicos para gestionar el tráfico VMP, normalmente están integrados como parte de los Centros de Gestión de Tráfico tradicionales.

#### 4.4. Resumen estado del arte Sistemas de Gestión de Tráfico VMP

A nivel de sensorización existen numerosos proyectos en curso e iniciativas muy prometedoras. A lo largo de este apartado se han expuestos los sensores disponibles en el mercado, siendo la mayoría de ellos adaptaciones de los sensores disponibles para tráfico tradicional. La limitación que existe actualmente es que más allá de la detección y conteo de VMP, no se obtienen datos de caracterización del tipo vehículo, ni de la velocidad y sentido de circulación del VMP. Además, tal y como se ha mostrado, la fiabilidad de muchos de estos sensores no es elevada.

Tal y como se ha expuesto, existe una iniciativa muy prometedora que es la espira magnética doble para la detección de VMP desarrollada por el grupo de Sistemas de Control de Tráfico del Instituto ITACA de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Desde el punto de vista de los actuadores, existen ya multitud de semáforos en intersecciones que regulan el paso de los VMP. Estos semáforos suelen estar integrados con el semáforo de los peatones, por lo que la programación es común. Y desde el punto de vista de los Paneles de Mensaje Variable, son pocas las instalaciones de paneles específicos para el tráfico VMP.

Debido a la diferencia de intensidades entre el tráfico VMP y el tráfico tradicional, parece pronto para integrar en el Centro de Gestión de Tráfico información en tiempo real del tráfico VMP, pues no es necesario tomar decisiones en tiempo real sobre el tráfico VMP, de la misma manera que se realiza para el tráfico tradicional. Es por ello que los datos de tráfico VMP suelen ser procesados de manera offline y se generan informes de uso de estos vehículos de manera más o menos rudimentaria, no suele existir un sistema de explotación de datos de tráfico VMP.

Por ejemplo, el Ayuntamiento de Valencia elabora, y publica en su web, informes mensuales de intensidades en días laborables en numerosos puntos de los carriles bici de la ciudad. Y tal y como se ha mencionado en este capítulo, los sensores más utilizados por el Ayuntamiento de Valencia para medir aforamientos de VMP son las espiras magnéticas simples.

Por lo tanto, queda mucho camino por recorrer, tanto en la evolución de los sensores para que sean capaces de detectar el paso de un VMP de manera más fiable, y permitan medir su velocidad, sentido de circulación e identificación del tipo de vehículo; como la integración de esta información en tiempo real en un sistema de gestión de tráfico que permita mejorar la calidad percibida por los usuarios de los carriles bici y sobre todo mejorar su seguridad.

## 5. Situaciones conflictivas tráfico VMP en vías urbanas

En este apartado se exponen las situaciones más conflictivas en las que se ve involucrado el usuario VMP frente a los vehículos tradicionales y frente a los peatones, en las vías públicas de las ciudades.

Tal y como se ha expuesto en los apartados anteriores, cada vez se están construyendo más carriles bici segregados en las ciudades, pero debido a la naturaleza de las propias ciudades, no siempre es sencillo construir carriles bici segregados, y existen zonas de la vía pública en las que es necesario buscar una convivencia entre los vehículos tradicionales, los VMP y los peatones. Esto supone un problema debido a las diferentes características de estos tres tipos de usuarios: distintas velocidades de circulación, dispares masas de los vehículos, y niveles de protección completamente desiguales. Por un lado, nos encontramos con que el usuario VMP es un usuario muy vulnerable frente al vehículo tradicional, y por otra parte, el peatón es muy vulnerable frente al VMP.

### 5.1. En relación a vehículos tradicionales

Las situaciones más conflictivas en la interacción de tráfico VMP con tráfico de vehículos tradicionales son los giros a derecha de vehículos tradicionales, en el que cruza con un carril bici paralelo (Figura 45). La peligrosidad se ve muy agravada en las siguientes situaciones (Figura 46):

- el tráfico VMP avanza en la misma dirección y sentido que el vehículo tradicional.
- la velocidad del tráfico tradicional es elevada. En este caso se requiere una mayor reducción de velocidad, con el consiguiente riesgo de impacto con el vehículo que le sigue.
- hay mucho tráfico en la vía principal. Esta situación provocará un aumento de la demora producida por la maniobra.
- acceso a parkings, sobre todo en los públicos, donde los usuarios no suelen conocer la vía de acceso al parking.
- hay obstáculos que ocluyen la visual del vehículo tradicional: vehículos aparcados, obstáculos fijos como pueden ser árboles, farolas, papeleras, vallas publicitarias...
- aunque no haya obstáculos, si la carga visual para el conductor es muy elevada, también la peligrosidad se ve agravada.

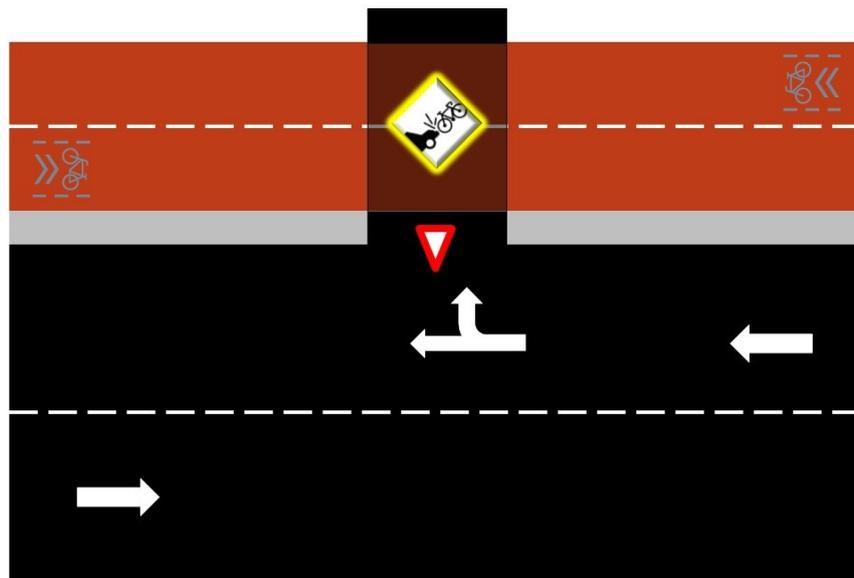


Figura 45: Situación conflictiva entre tráfico VMP y tráfico tradicional.

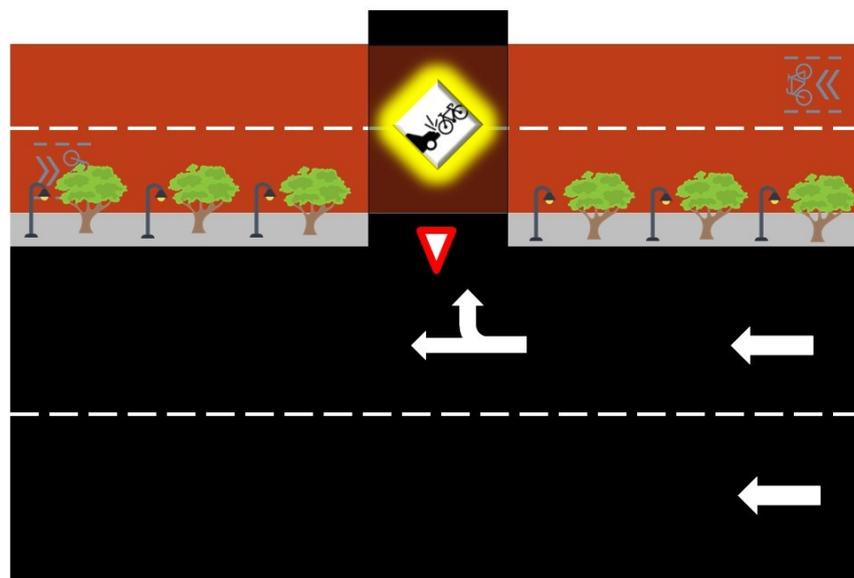


Figura 46: Situación conflictiva agravada entre tráfico VMP y tráfico tradicional.

Esta situación conflictiva consiste en que el vehículo tradicional no percibe la presencia del VMP circulando por el carril bici, y no llega a reducir su velocidad hasta detenerse y ceder el paso al VMP, el cual tiene prioridad. La consecuencia de esta situación es que el vehículo tradicional puede llegar a colisionar con el VMP, llegando a provocar lesiones al usuario del VMP. Del mismo modo, también puede ocurrir que el usuario del VMP no se percatara de la presencia del vehículo tradicional, por lo que no haría nada por evitar la colisión.

### 5.2. En relación a peatones

Las situaciones más conflictivas en la interacción de tráfico VMP con peatones son las siguientes:

- a) Paso de peatones sobre vía ciclista: en el que la prioridad la tiene el peatón (Figura 47).

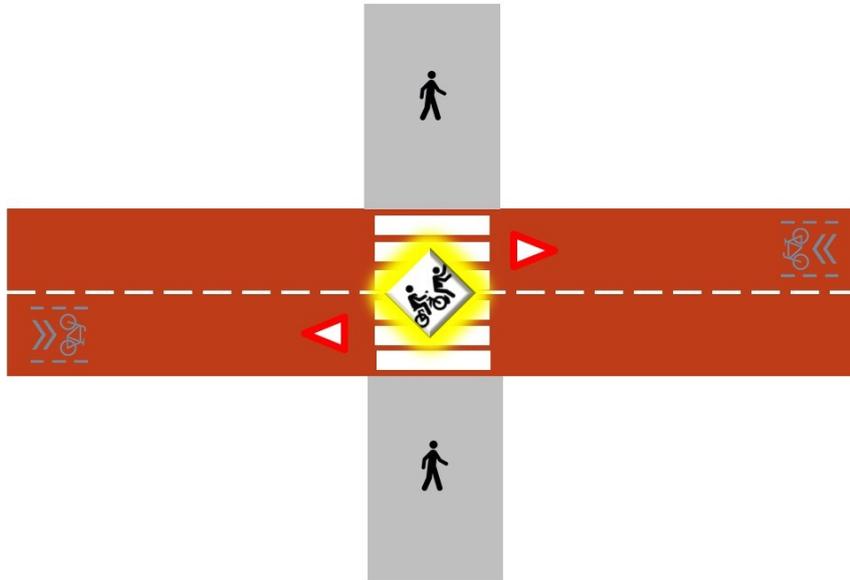


Figura 47: Primera situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones.

La problemática de esta situación consiste en que el vehículo VMP no percibe la presencia de peatones circulando por la acera, o no llega a percibir la existencia del paso de peatones, y por lo tanto no reduce su velocidad hasta detenerse y ceder el paso al peatón. La consecuencia de esta situación es que el peatón puede llegar a ser atropellado por el VMP, llegando a provocar lesiones al peatón.

- b) Vía ciclista rodea la parada de autobús (Figura 48).

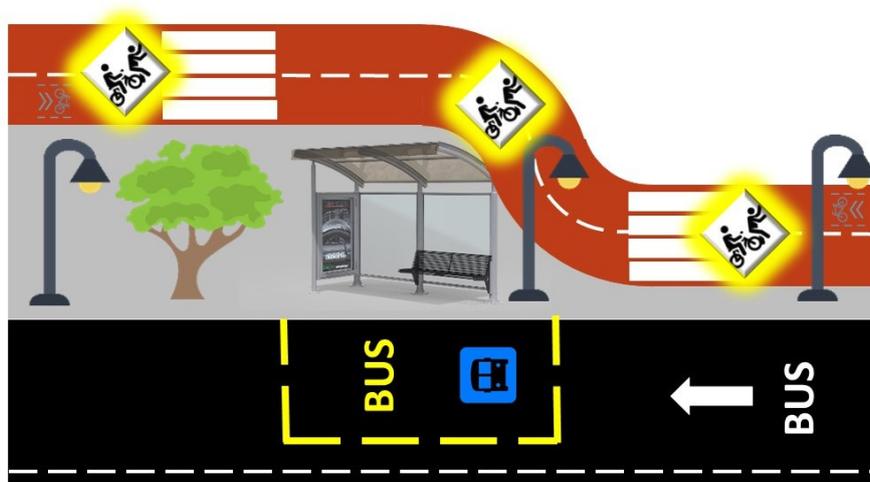


Figura 48: Segunda situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones.

Esta situación se produce cuando conviven en una misma acera la circulación de peatones y ciclistas (acera-bici). Se trata de una situación similar a la anterior, pero con el agravante de que la parada del autobús obstaculiza la visión del usuario del VMP y del peatón. El vehículo VMP no percibe la presencia de peatones circulando por la acera, bajando del autobús, o no llega a percibir la existencia del paso de peatones, y por lo tanto no reduce su velocidad hasta detenerse y ceder el paso al peatón. La consecuencia de esta situación es que el peatón puede llegar a ser atropellado por el VMP, pudiendo llegar a provocarle lesiones.

A modo de resumen, se recoge en la siguiente tabla las situaciones más conflictivas en las que se ven involucrados los VMP:

Identificador	Descripción	Riesgo/efecto
Conflict_1	Giro a derecha de vehículo tradicional, en el que cruza con un carril bici paralelo.	Vehículo tradicional atropella a VMP.
Conflict_2.a	Paso de peatones sobre vía ciclista	VMP atropella a peatón.
Conflict_2.b	Vía ciclista rodea la parada de autobús.	VMP atropella a peatón.

Tabla 2: situaciones más conflictivas en las que se ven involucrados los VMP.

## 6 Solución gestión tráfico en las situaciones conflictivas VMP

El objetivo de este TFM es proponer una solución técnica para mejorar las tres situaciones conflictivas más comunes en las que ve involucrado el tráfico VMP. En la primera de las situaciones, giro a derecha de vehículos a motor tradicionales que cruza un carril bici (Conflict\_1), se pone en riesgo la integridad del usuario VMP; mientras que en las otras dos situaciones, paso de peatones sobre vía ciclista (Conflict\_2.a) y vía ciclista que rodea parada de autobús (Conflict\_2.b), son los peatones lo que están expuestos al riesgo.

De manera general, la solución pasa por la identificación de los flujos de tráfico: vehículos tradicionales, VMP y peatones. Una vez identificado cada flujo debemos analizar su comportamiento, para a continuación controlar cada uno de los flujos de manera que no ponga en riesgo al resto de flujos.

Para llevar a cabo estas tareas, se propondrá el uso de los sensores y actuadores más adecuados para cada situación, de los expuestos en el apartado “4. Estado del arte Sistemas de Control de Tráfico VMP”.

De cara a encontrar una solución técnica útil para cada una de las tres situaciones planteadas, se recorrerán tres fases: análisis de problemática, propuesta de solución e implementación de una solución técnica.

### 6.1. Giro a derecha de vehículos tradicionales que cruza un carril bici

#### 6.1.1 Análisis de problemática

La situación de riesgo se produce cuando un vehículo tradicional realiza un giro a derecha y tiene que cruzar un carril bici dispuesto en paralelo a la vía por la que circula el vehículo tradicional (Figura 49). La prioridad la tiene el VMP, por lo que el vehículo tradicional debe reducir su velocidad hasta detenerse y ceder el paso al VMP.

La maniobra que realiza el vehículo tradicional dificulta que pueda ver si viene circulando un VMP, sobre todo si viene circulando en el mismo sentido. A esto se une la elevada velocidad a la que circula el VMP, hasta 25Km/h, que hace que se aproxime rápidamente a la intersección de ambas vías.

Además, existen una serie de condicionantes que agravan esta situación. Si la velocidad del tráfico tradicional es elevada, el conductor que va a efectuar el giro debe reducir de manera importante la velocidad a la que circula, con el consiguiente riesgo de impacto del vehículo que le sigue. Del mismo modo, si hay mucha intensidad de tráfico en la vía tradicional, el conductor que va a efectuar el giro provocará demoras en el carril en el que circula, lo que puede llegar a provocar una cierta incomodidad en el conductor. Y por último, si existen obstáculos que ocuyen la visual del vehículo tradicional, como pueden ser vehículos aparcados, u obstáculos fijos como árboles, farolas, papeleras o vallas publicitarias; o la carga visual para el conductor es muy elevada, también puede provocar un cierto estrés en el conductor. Estos condicionantes pueden provocar que la maniobra realizada por el conductor no se lleve a cabo de manera correcta, y ello agravará la peligrosidad de la situación.

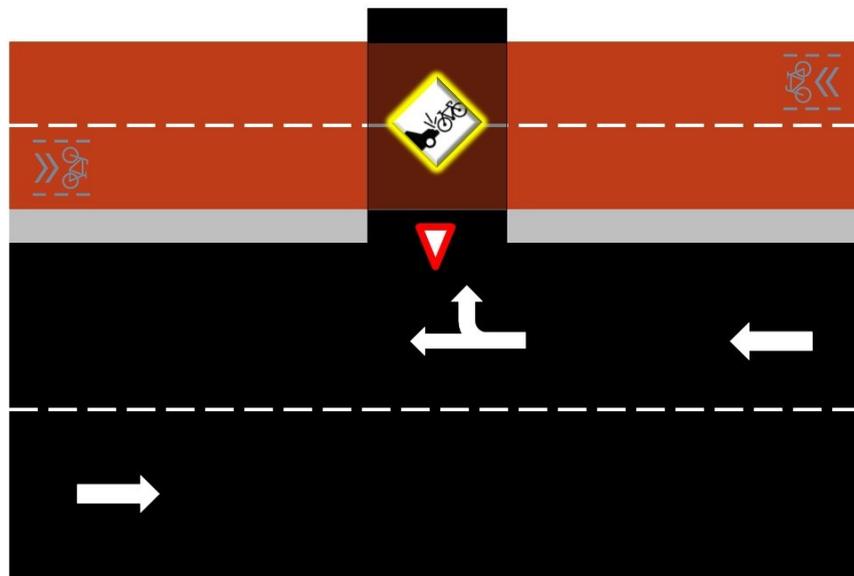


Figura 49: Situación conflictiva entre tráfico VMP y tráfico tradicional (Conflict\_1).

### 6.1.2 Propuesta de solución

Por un lado, se debe identificar el tráfico VMP, de manera que se le pueda advertir que se aproxima a una zona conflictiva, y se le obligue a aminorar la velocidad antes de llegar a intersección de ambas vías.

Por otro lado, detectar la presencia de un vehículo tradicional en el carril desde el que se realiza el giro a la derecha es sencillo, pero no se puede predecir qué vehículos van a girar a la derecha y qué vehículos van a continuar recto. Por lo tanto, se debe realizar un aviso fijo a todos los vehículos tradicionales, indicándoles que en caso de realizar el giro a la derecha, no tienen la prioridad de paso.

### 6.1.3 Implementación de una solución técnica

Para poder identificar el tráfico VMP y la velocidad a la que circula, el sensor más adecuado es la espira magnética doble VMP. Se colocará una espira en el carril bici de circulación en el mismo sentido que el carril de tráfico tradicional desde el que se va a realizar el giro a la derecha, a unos 40-50 metros antes de la intersección. La espira magnética VMP se conectará a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico.

También se instalará un Panel de Mensaje Variable a unos 30-40 metros de la intersección, que recordará a los usuarios del VMP que circulan a alta velocidad, que deben moderar la velocidad porque se acercan a una zona conflictiva. El Panel de Mensaje Variable se encenderá si el VMP circula a más de 10 km/h.

Respecto al tráfico tradicional es suficiente con la colocación de una señal indicándoles que no tienen la prioridad en caso de que giren a la derecha.

La lógica del sistema propuesto para esta solución reside a nivel local en el sistema. Aunque de manera general, todos los sistemas de regulación de tráfico suelen estar conectados con la sala

de control, lo que permite que se monitorice su estado de manera remota, y se recojan estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de vehículo VMP.

La siguiente figura muestra una representación gráfica del sistema propuesto:

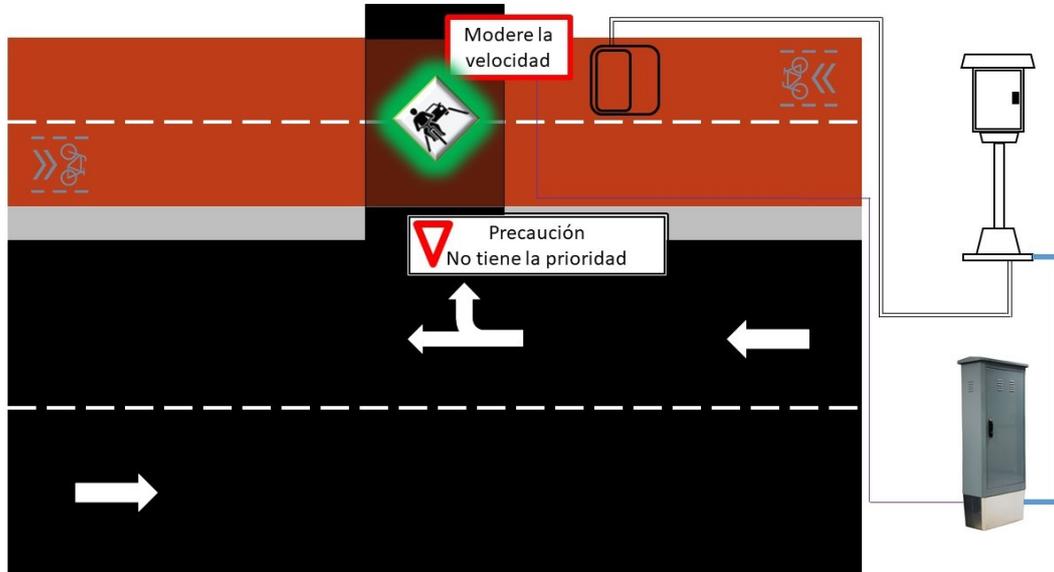


Figura 50: Solución técnica propuesta para solucionar la situación conflictiva Conflict\_1.

La siguiente tabla resume los elementos necesarios para poder implementar la solución técnica:

Id. situación conflictiva	Sensores necesarios	Actuadores necesarios	Local/Interconectado
Conflict_1	Espira magnética VMP	Panel de Mensaje Variable	Local

Tabla 3: Elementos necesarios solución técnica a situación conflictiva Conflict\_2.a.

## 6.2 Paso de peatones sobre vía ciclista

### 6.2.1 Análisis de problemática

La situación de riesgo se produce cuando un peatón cruza por un paso de peatones, a la vez que un VMP está circulando por el carril bici (Figura 51). La prioridad la tiene el peatón por lo que el VMP debe cederle el paso.

De manera general, los peatones cruzan las vías ciclistas por cualquier punto en el camino que están realizando, y son los propios peatones los que se percatan que no vienen ciclistas antes de cruzar la vía ciclista. Por ello, los usuarios de VMP están acostumbrados a tener prioridad sobre los peatones cuando circulan por una vía ciclista. Esto no es así en los pasos de peatones, en el que la prioridad la tiene el peatón, y el VMP debe ceder el paso al peatón, e incluso detenerse si es necesario.

Un ejemplo a destacar son las aceras-bici, en el que en la acera se pinta una acera-bici por donde debe circular el VMP. En este caso, los VMP y peatones comparten la acera, y circulan a muy

poca distancia entre ellos, esto provoca que no se distingan claramente los pasos de peatones, y se pierda la consciencia de quién tiene prioridad en cada tramo de la acera-bici.

A esto se une la velocidad muy distinta a la que circulan ambos flujos, un peatón suele caminar entre 4 y 6 km/h, mientras que un VMP puede circular hasta 25km/h.

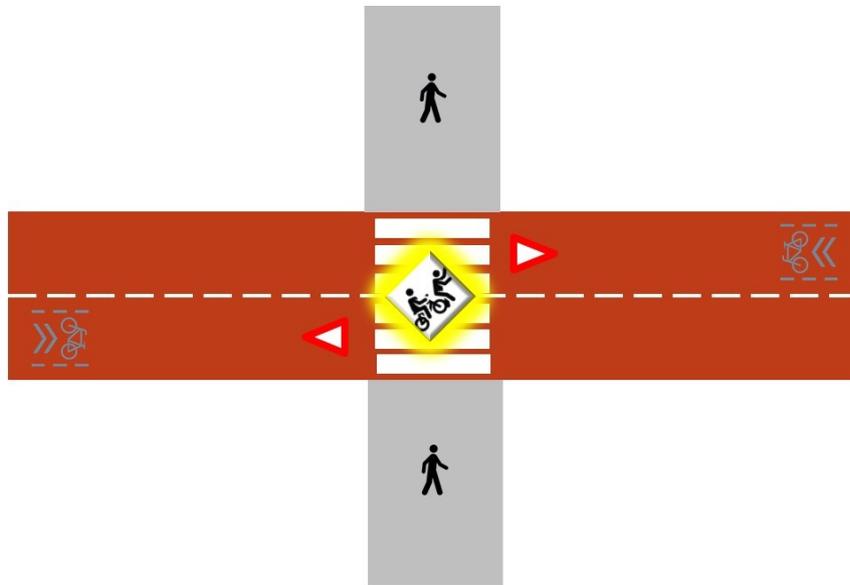


Figura 51: Situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones (Conflict\_2.a).

### 6.2.2 Propuesta de solución

Desde el punto de vista del flujo de tráfico de los peatones, poco se puede hacer. Aunque existen sistemas para la identificación de peatones es difícil predecir el itinerario que van a seguir. Sobre el flujo de tráfico de los VMP, sí que existe una mayor capacidad de identificación y actuación.

La solución pasa por identificar el tráfico VMP y obligarlo a aminorar la velocidad antes de llegar a los pasos de peatones, de manera que circulen a una velocidad más cercana a la que circulan los peatones, y de manera que puedan realizar una frenada de emergencia en el caso de que se cruce un peatón que no haya sido visto con anterioridad.

### 6.2.3 Implementación de una solución técnica

Para poder identificar el tráfico VMP y la velocidad a la que circula, el sensor más adecuado es la espira magnética doble VMP. Debemos colocar una en cada sentido de circulación del carril bici para identificar los VMP que vienen por cada sentido. Colocaremos las espiras a unos 40-50 metros antes del paso de cebra. Ambas espiras se conectarán a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico.

También instalaremos un Panel de Mensaje Variable en cada sentido del carril bici, a unos 30-40 metros antes del paso de cebra, que recordará que debe cruzarse el paso de peatones a una velocidad máxima de 10 Km/h. Una vez identificado el tráfico VMP y la velocidad a la que circula, el Panel de Mensaje Variable se encenderá si el VMP circula a más de 10 km/h.

La lógica del sistema propuesto para esta solución reside a nivel local en el sistema. Aunque de manera general, todos los sistemas de regulación de tráfico suelen estar conectados con la sala de control, lo que permite que se monitorice su estado de manera remota, y se recojan estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de vehículo VMP.

La siguiente figura muestra una representación gráfica del sistema propuesto:

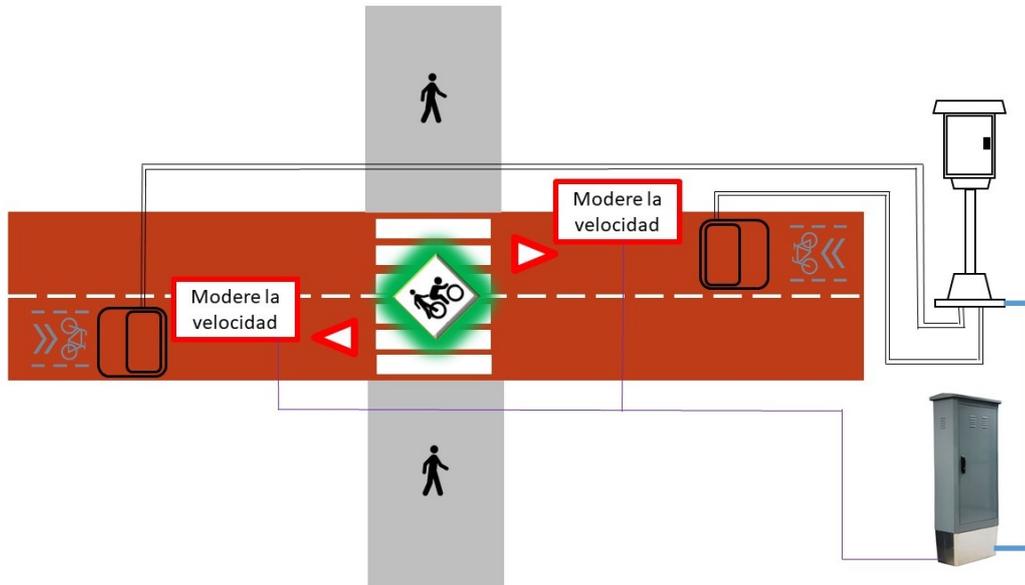


Figura 52: Solución técnica propuesta para solucionar la situación conflictiva Conflict\_2.a.

La siguiente tabla resume los elementos necesarios para poder implementar la solución técnica:

Id. situación conflictiva	Sensores necesarios	Actuadores necesarios	Local/Interconectado
Conflict_2.a	Espira magnética VMP	Panel de Mensaje Variable	Local

Tabla 4: Elementos necesarios solución técnica a situación conflictiva Conflict\_2.a.

### 6.3 Vía ciclista que rodea parada de autobús

#### 6.3.1 Análisis de problemática

Se trata de una situación similar a la anterior, pero con el agravante de que la parada del autobús obstaculiza la visión del usuario del VMP y del peatón (Figura 53). El vehículo VMP no percibe la presencia de peatones circulando por la acera, bajando del autobús, o no llega a percibir la existencia del paso de peatones, y por lo tanto no reduce su velocidad hasta detenerse y ceder el paso al peatón.

Desde el punto de vista del peatón, únicamente tiene prioridad para cruzar el carril bici en los pasos de cebra habilitados para tal hecho. Pero suele ocurrir que bajan del autobús varios pasajeros a la vez, y no tienen la precaución de cruzar por el paso de cebra, sino que se dirigen directamente a su destino y cruzan el carril bici por cualquier sitio.

A este se le une, como ocurre en el caso anterior, que la velocidad a la que circulan ambos flujos es muy distinta, un peatón suele caminar entre 4 y 6 km/h, mientras que un VMP puede circular hasta 25km/h.

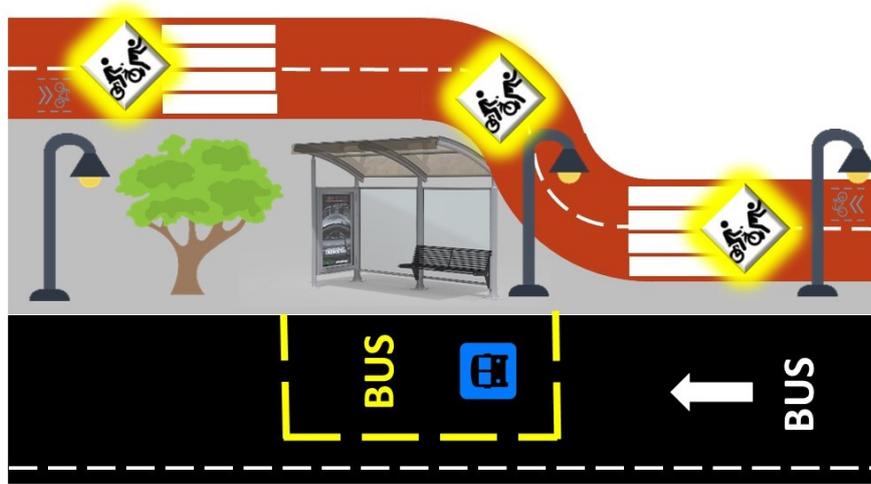


Figura 53: Situación conflictiva entre tráfico VMP y peatones (Conflict\_2.b).

### 6.3.2 Propuesta de solución

Es difícil disponer de una monitorización de los peatones que circulan por la acera, y más difícil aún es predecir los movimientos que van a realizar. Del mismo modo, tampoco se pueden predecir los peatones que van a bajar del autobús, pero lo que sí es posible es conocer cuando un autobús se para en la parada, y por lo tanto es posible que se bajen viajeros, y estos viajeros que se bajan del autobús probablemente crucen el carril bici. En ese momento, se puede advertir a los peatones que existe un carril bici y deben cruzarlo por el paso de peatones.

Desde el punto de vista de los VMP, es clave el control de la velocidad del VMP cuando circula cerca de la parada del autobús, y más cuando la visibilidad es mala y pueden aparecer peatones en el carril bici de manera súbita, por ejemplo por detrás de una marquesina. Por lo tanto, se debe advertir a los VMP que reduzcan la velocidad porque se aproximan a una zona de presencia de peatones.

La solución pasa por identificar cuando un autobús se para en la parada, de manera que se puede alertar a los peatones de la situación de riesgo, e identificar a los VMP que se aproximan a la parada del autobús y advertirles que deben reducir la velocidad a la que pasan por la parada del autobús.

### 6.3.3 Implementación de una solución técnica

Para poder identificar cuando un autobús se detiene en la parada del autobús el sensor más adecuado es una espira magnética tradicional. Esta espira se conectará a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico. También instalaremos un Panel de Mensaje Variable visible desde la puerta de salida del autobús, que se iluminará cuando la espira detecte que un autobús se ha parado en la parada.

Por otra parte, para poder identificar el tráfico VMP y la velocidad a la que circula el sensor más adecuado es la espira magnética doble VMP. Debemos colocar una en cada sentido de circulación del carril bici para identificar los VMP que vienen por cada sentido. Colocaremos las espiras a unos 40-50 metros antes de la zona conflictiva. Ambas espiras se conectarán a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico.

También instalaremos un Panel de Mensaje Variable, en cada sentido del carril bici, a unos 30-40 metros antes de la zona conflictiva, que recordará que debe cruzarse el paso de peatones a una velocidad máxima de 10 Km/h. Una vez identificado el tráfico VMP y la velocidad a la que circula, el Panel de Mensaje Variable se encenderá si el VMP circula a más de 10 km/h.

La lógica del sistema propuesto para esta solución reside a nivel local en el sistema. Aunque de manera general, todos los sistemas de regulación de tráfico suelen estar conectados con la sala de control, lo que permite que se monitorice su estado de manera remota, y se recojan estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de vehículo VMP.

La siguiente figura muestra una representación gráfica del sistema propuesto:

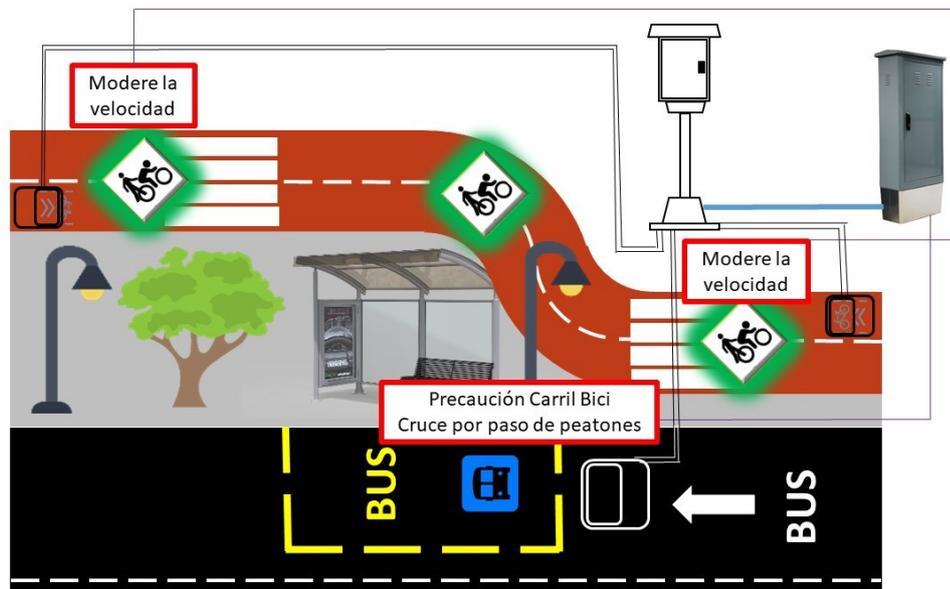


Figura 54: Solución técnica propuesta para solucionar la situación conflictiva Conflict\_2.a.

La siguiente tabla resume los elementos necesarios para poder implementar la solución técnica:

Id. situación conflictiva	Sensores necesarios	Actuadores necesarios	Local/Interconectado
Conflict_2.b	Espira magnética VMP	3 Paneles de Mensaje Variable	Local
	Espira magnética tradicional		

Tabla 5: Elementos necesarios solución técnica a situación conflictiva Conflict\_2.b.

## 7 Caso de uso en la ciudad de Valencia

Tal y como se ha expuesto anteriormente, la ciudad de Valencia dispone actualmente de una red ciclista formada por casi 170 kilómetros, con puntos en los que se registra una intensidad diaria que llega a superar las 8.000 bicicletas, y las previsiones indican que este tráfico continuará creciendo. El aumento del tráfico de VMP conlleva de manera inevitable el aumento de los accidentes en los que se ven involucrados los VMP.

En el Informe “Balance Siniestralidad Vial Ciudad de Valencia 2022” [30], realizado en febrero de 2023 por el Departamento de Atención a las Víctimas y Análisis de la Siniestralidad (DAYA) de la Policía Local de Valencia, puede observarse que la evolución al alza del número de VMP ha conllevado el aumento de la siniestralidad directamente relacionada con esta nueva forma de movilidad, forma de movilidad que incluso está incidiendo directamente en un menor uso del transporte público y un mayor uso de los carriles-bici de la ciudad.



Figura 55: Siniestros VMP en los últimos años en la ciudad de Valencia. (Fuente [30]).

En este mismo informe se determina que, después de una campaña de análisis realizada en 2021, existen cuatro puntos donde se produce una mayor siniestralidad de VMP:

- Calle de Guillem de Castro.
- Intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón.
- Paseo de la Alameda.
- Avenida Blasco Ibáñez.

Como plan de mejora general, respecto a los accidentes en los que ven involucrados VMP, el DAYA propone una serie de medidas para reducir la siniestralidad. La primera de ellas, por su coste mínimo, consiste analizar la viabilidad en cada cruce concreto de sustituir la fase ámbar intermitente por la fase roja, de tal manera que siempre que los VMP que circulan por el carril

bici tengan su semáforo en fase verde, los vehículos tradicionales que circulan por la vía principal tengan su semáforo en fase roja. También propone contemplar la posibilidad de instalar señalización informativa advirtiendo a los conductores de vehículos tradicionales de la existencia de un carril bici junto al paso de peatones, de manera que se le dé una mayor visualización al carril bici.

Otra de las medidas propuestas, la que tendría un mayor beneficio en la reducción de la siniestralidad a criterio del DAYA, es el estudio de medias tendentes a aminorar la velocidad de los vehículos que circulan por el carril bici, especialmente los VMP, que por su construcción y motor eléctrico, disponen de un gran poder de aceleración y velocidad hasta 25 km/H. Esta medida va encaminada a advertir que siempre que se rebasa una intersección, los vehículos que circulen por el carril bici *"DEBERAN HACERLO A PASO HUMANO"*, para ello se plantea el diseño de señalización vertical instalada previamente a la intersección en el carril bici, que advierta de este extremo, señalización que vendría auxiliada por marcar viales, pictograma o leyenda *"ATENCIÓN INTERSECCIÓN, REBASAR A PASO HUMANO"*. En esta medida el DAYA también considera que podría ser muy útil colocar sobre el carril bici "bandas transversales de alerta a nivel" (Figura 56), realizadas únicamente con pintura vial, lo que sin duda fijaría la atención de los ciclistas y VMP antes de llegar a la intersección, reduciendo su velocidad.

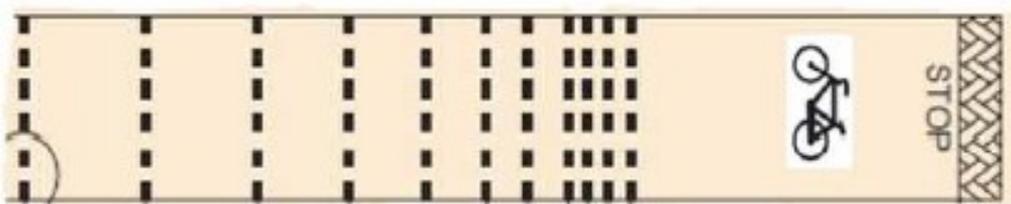


Figura 56: Modelo de bandas transversales de alerta a nivel propuesto por el DAYA. (Fuente [30]).

Por último, como propuesta más ambiciosa y complicada, El DAYA considera que sería muy interesante incorporar esta obligación en las futuras modificaciones de la ordenanza de movilidad, con un texto que podría quedar redactado de la siguiente forma: *"los usuarios del Carril Bici (Bicicletas y V.M.P.), cuando se aproximen a una intersección (regulada a no por semáforos), deberán en todo caso, aminorar la velocidad y rebasar la misma a paso humano"*.

De los 4 puntos identificados por el DAYA donde se produce una mayor siniestralidad en la que se ve involucrados VMP, voy a seleccionar la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón. Los motivos de esta elección, es que se trata de un punto concreto, mientras que los otros tres puntos son calles en las que el informe no concreta el punto exacto en el que se producen más accidentes. Además, la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón se trata de un punto en el que confluyen las tres situaciones más conflictivas que han sido analizadas en los apartados 5 y 6: giro a derecha de vehículo tradicional en el que cruza con un carril bici paralelo, paso de peatones sobre vía ciclista, y vía ciclista rodea la parada de autobús. Además, este punto cuenta con una serie de circunstancias, que veremos a continuación, las cuales agravan la situación de riesgo.

### 7.1. Descripción del lugar

El punto concreto de análisis es el tramo de la Avenida de Aragón que va desde la Plaza de Zaragoza hasta la calle Santa Rosa (Figura 57).



Figura 57: Tramo de la Avenida de Aragón entre la Plaza de Zaragoza y la calle Santa Rosa. (Fuente Google Maps).

En las siguientes figuras, se muestran fotos del tramo objeto del trabajo:

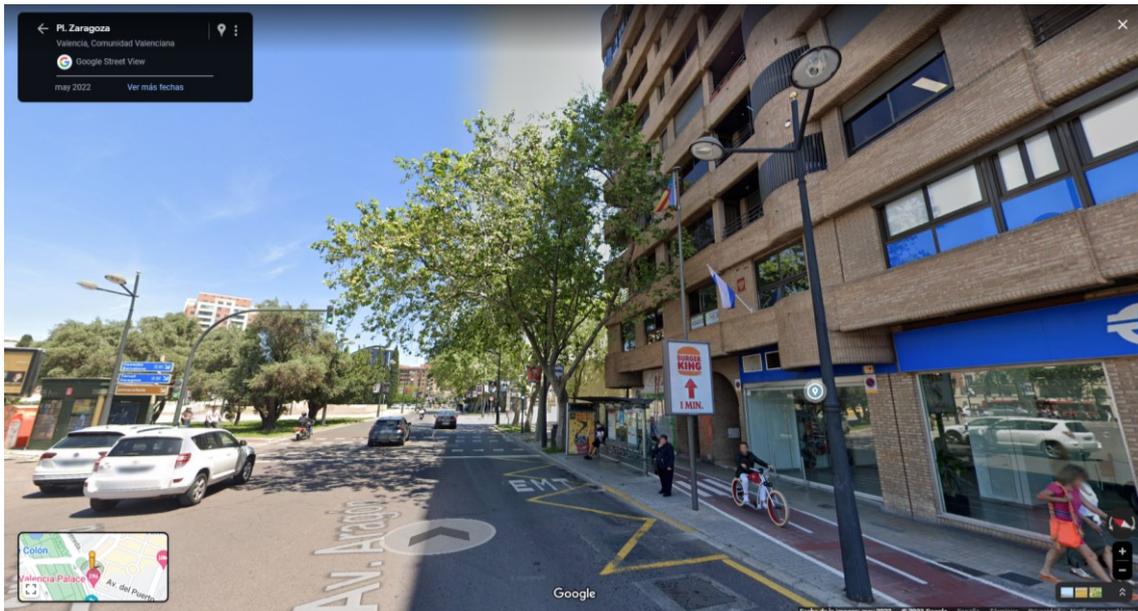


Figura 58: Salida a la Avenida de Aragón desde la Plaza de Zaragoza. (Fuente Google Maps).



Figura 59: Incorporación carril bici desde cruce de la Avenida de Aragón. (Fuente Google Maps).



Figura 60: Situación conflictiva vía ciclista rodea parada de autobús en la Avenida de Aragón. (Fuente Google Maps).

Existe una vía ciclista bidireccional pintada sobre la propia acera, por consiguiente se trata de una acera-bici. La acera, y por lo tanto la acera-bici, está construida a base de baldosas de cemento, lo que conlleva que tenga relieve, y esto provoca que en caso de condiciones climatológicas adversas el pavimento sea resbaladizo y la distancia de frenado del VMP sea mayor que si la vía ciclista estuviera construida con materiales con mayor adherencia. Como se aprecia en la Figura 60, la acera que queda disponible para los peatones es muy estrecha.

De acuerdo con la información disponible del Ayuntamiento de Valencia, este punto ha registrado durante el mes de enero de 2023 una Intensidad Media Diaria en día laborable de alrededor de 2.600 bicicletas [31], llegando a 3.700 bicicletas en los meses más intensidad. Se trata, por tanto, de uno de los tramos de la ciudad cuyo uso de la vía ciclista es bastante elevado.

Partiendo desde la Plaza de Zaragoza, en el margen derecho de este tramo de la acera-bici se encuentra un concesionario de coches y una vivienda (Avenida de Aragón 4) cuyas entradas/salidas están a 2 metros escasos de la acera-bici (Figura 60); a continuación, también muy cercano a la acera-bici, existe una terraza de un bar (Figura 61), desde donde la visibilidad es mínima; y unos metros más adelante, la acera-bici es cruzada por una entrada a una gasolinera (Figura 62). Y en el margen izquierdo, justo delante de la vivienda, se encuentra una parada de autobús pegada a la acera-bici (Figura 60); a continuación, entre dos árboles existen un paso de peatones y un cruce con otra vía ciclista (Figura 61).



Figura 61: Situación conflictiva paso de peatones sobre vía ciclista en la Avenida de Aragón. (Fuente Google Maps).

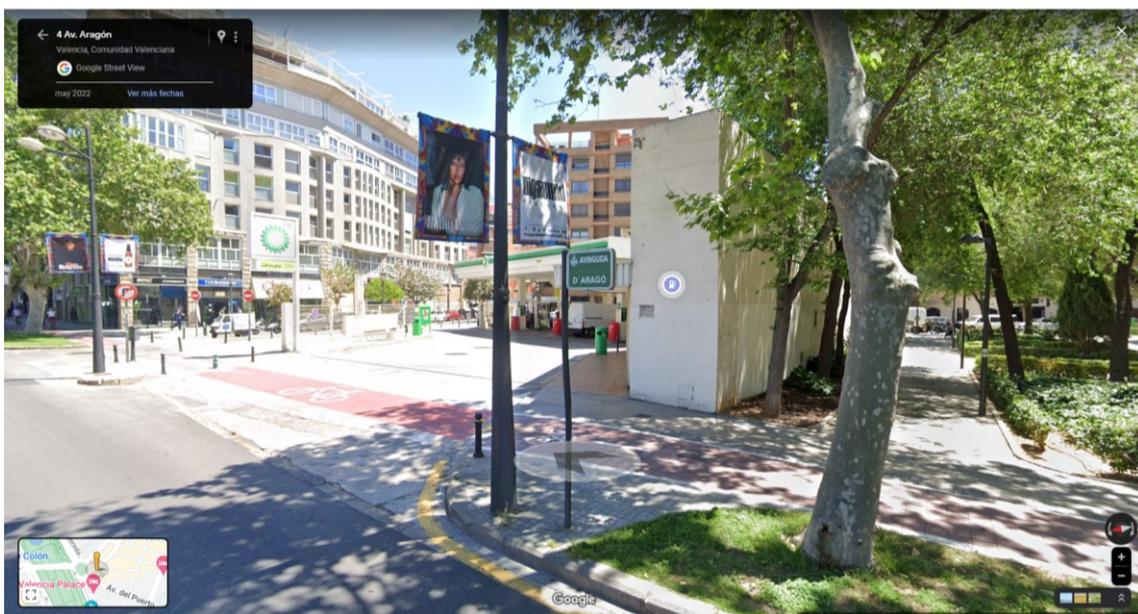


Figura 62: Situación conflictiva giro a derecha de vehículo tradicional en el que cruza con un carril bici paralelo. (Fuente Google Maps).

La parada del autobús pertenece a 4 líneas de la EMT: 10, 12, 93 y C2. Estas líneas tienen una frecuencia elevada, lo que provoca que sea una parada con mucho tránsito de viajeros.

Una nota positiva en el análisis de esta zona, es que no se trata de una de las zonas de la ciudad de Valencia que tenga una afluencia de peatones muy elevada.

Desde el punto de vista de los vehículos tradicionales, se trata de la salida de una rotonda semaforizada, que dispone de 3 carriles, y en la que nada más salir te encuentras con un semáforo que regula el paso de peatones (Figura 58 y Figura 59). Una vez sobrepasas el semáforo tienes la opción de entrar en una gasolinera girando a la derecha y cruzando la acera-bici. La Intensidad Media Diaria en día laborable es de 49.610 vehículos motorizados, en el periodo enero-febrero de 2023 [31], siendo esta intensidad una de las mayores de la ciudad de Valencia.

### 7.2. Análisis de la problemática

Tal y como recoge en el informe de la Policía Local, se trata de uno de los puntos más conflictivos de la ciudad de Valencia. Esto es debido a que en este punto confluyen la mayoría de las situaciones más conflictivas en la interacción entre peatones, VMP y vehículos tradicionales.

A continuación, se realiza una representación gráfica del punto conflictivo analizado:

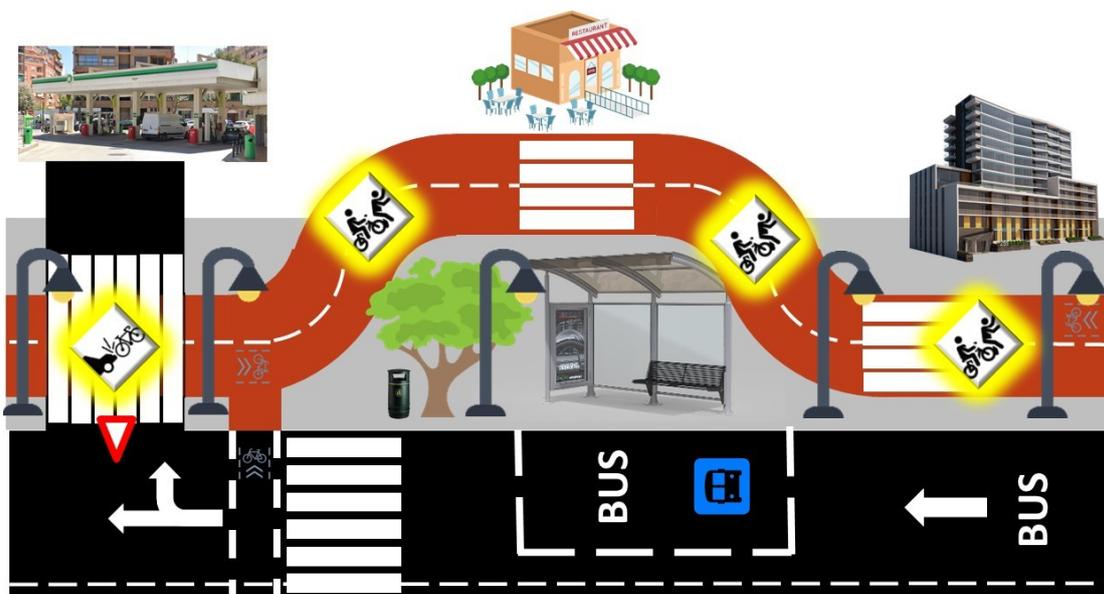


Figura 63: Situaciones conflictivas en la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón.

Empezando el análisis desde el usuario más vulnerable, el peatón, existen varias circunstancias en las que se encuentra la acera-bici de golpe: a la salida del concesionario de coches, a la salida del portal, a la salida de la terraza del bar y viniendo por el paso de peatones que cruza la Avenida de Aragón; y especialmente problemática por disponer de mucha menor visibilidad es la salida desde la parada del autobús. El peatón únicamente tiene prioridad para cruzar la acera-bici en los pasos de cebra habilitados para tal hecho, uno al lado de la parada del autobús, y otro como continuación del paso de peatones que cruza la Avenida de Aragón.

Continuando con el análisis desde el punto de vista de los usuarios VMP, nos encontramos con que puede venir circulando con una velocidad de hasta 25 km/h, y encontrarse de repente con peatones que pueden circular muy cerca, o incluso querer atravesar la acera-bici desde los lugares antes mencionados: concesionario de coches, portal, terraza del bar, paso de peatones que cruza la Avenida de Aragón y parada del autobús.

Y desde el punto de vista del vehículo tradicional, se trata de una zona con una alta carga visual, pues hay muchos elementos a los que tiene que prestar atención: alta intensidad de vehículos, semáforo a la salida de la rotonda, autobús estacionado, y si accede a la gasolinera no tiene la prioridad para cruzar la vía ciclista y debe ceder el paso.

Por lo tanto, nos encontramos con las dos situaciones más peligrosas para los peatones: acera-bici con una alta intensidad de VMP, en la que los peatones circulan muy cerca de los VMP, pudiendo llegar a cruzar los peatones la acera-bici por un paso de peatones (la prioridad la tiene el peatón) o por medio de la acera-bici (la prioridad la tiene el VMP) (Conflict\_2.a); y vía ciclista que rodea una parada de autobús (Conflict\_2.b).

Por otra parte, para que un vehículo tradicional acceda a la gasolinera debe realizar un giro a derecha en el que la vía ciclista está en paralelo (Conflict\_1), y es VMP el que tiene la prioridad. Esta es la situación más peligrosa para los VMP, agravada por las 5 peores circunstancias:

- La vía ciclista es bidireccional, por lo tanto existe un flujo de tráfico VMP que circula en el mismo sentido que el vehículo tradicional. En este caso, la visibilidad del vehículo tradicional es mala para ver el VMP.
- La velocidad de circulación de los vehículos tradicionales en la Avenida de Aragón puede llegar a ser elevada. Se trata de una vía de 3 carriles y si el semáforo antes mencionado lo cogen el verde los vehículos elevan su velocidad.
- La Avenida de Aragón tiene una intensidad de tráfico muy alta.
- Hay obstáculos que ocuyen la visual del vehículo tradicional, concretamente, los árboles, una farola, una marquesita o incluso un autobús en el caso que haya alguno estacionado en la parada.
- Y la carga visual del conductor es muy elevada, debido a los aspectos expuestos en las viñetas anteriores, y que los conductores se encuentran con un semáforo justo a la salida de la rotonda.

### 7.3. Propuesta de solución

El objetivo de la solución es la reducción de la siniestralidad en el tramo de la Avenida de Aragón que va desde la Plaza de Zaragoza hasta la calle Santa Rosa.

Para conseguir este objetivo es necesario disponer de una monitorización en tiempo real de los flujos de peatones, VMP y vehículos tradicionales. Una vez monitorizados los flujos, deberemos reducir los riesgos que provoca cada flujo, y realizar una advertencia de los peligros que puede sufrir cada flujo.

#### Desde el punto de vista de los peatones

Es difícil disponer de una monitorización de los peatones que circulan por la acera, y más difícil aún es predecir los movimientos que van a realizar. Del mismo modo, tampoco se pueden predecir los peatones que van a salir del portal, del concesionario, o de la terraza del bar. Pero lo que sí se puede conocer es cuando un autobús se detiene en la parada, y por lo tanto es posible que se bajen viajeros, y estos viajeros que se bajan del autobús no tienen más opción que cruzar la acera-bici.

*Requisito.1: detectar cuando un autobús se para en la parada.*

*Requisito.2: alertar a los viajeros de que van a cruzar la acera-bici, y encauzarles a realizarlo por el paso de peatones, que es dónde tienen prioridad sobre los VMP.*

### **Desde el punto de vista de los VMP**

Se debe distinguir entre dos interacciones, por un lado, la interacción VMP con el peatón y por otro lado la interacción VMP con el vehículo tradicional. Respecto a la primera, es clave el control de la velocidad del VMP cuando circula cercano a los peatones, y más cuando la visibilidad es mala y pueden aparecer peatones en la acera-bici de manera súbita. Por lo tanto, se debe advertir a los VMP que reduzcan la velocidad porque se aproximan a un cruce con peatones.

Los VMP que vienen circulando desde la Plaza de Zaragoza y la Calle Santa Rosa, pueden venir a alta velocidad por lo que se hará un aviso doble, un primer aviso en torno a 30-40 metros antes de llegar a la zona conflictiva, y un segundo aviso al llegar a la zona conflictiva. Para los VMP que vienen circulando desde el cruce de la Avenida de Aragón se pondrá un único aviso en torno a 30-40 metros antes de llegar a la zona conflictiva. Al entrar en la zona conflictiva tienen que realizar un giro de 90º a derecha o izquierda, por lo que la velocidad que lleven no será elevada.

*Requisito.3: detectar la presencia, y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la Plaza de Zaragoza. Una primera vez 40-50 metros antes de la parada del autobús, y una segunda vez en la proximidad de la parada del autobús.*

*Requisito.4: alertar a los VMP que se aproximan desde la Plaza de Zaragoza de que deben reducir su velocidad a 10 km/h. Una primera vez 30-40 metros antes de la parada del autobús, y una segunda vez en la proximidad de la parada del autobús.*

*Requisito.5: detectar la presencia, y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la Calle Santa Rosa. Una primera vez 30-40 metros antes de la intersección con la gasolinera, y una segunda vez en la proximidad de la intersección con la gasolinera.*

*Requisito.6: alertar a los VMP que se aproximan desde la Calle Santa Rosa de que deben reducir su velocidad a 10 km/h. Una primera vez 40-50 metros antes de la intersección con la gasolinera, y una segunda vez en la proximidad de la intersección con la gasolinera.*

*Requisito.7: detectar, 40-50 metros antes de la intersección con la acera-bici de la Avenida de Aragón, la presencia y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde el cruce de la Avenida Aragón.*

*Requisito.8: alertar, 30-40 metros antes de la intersección con la acera-bici de la Avenida de Aragón, a los VMP que se aproximan desde el cruce de la Avenida Aragón que deben reducir su velocidad a 10 km/h.*

El punto más conflictivo en la interacción VMP con el vehículo tradicional es la entrada a la gasolinera, en el que el vehículo tradicional tiene poca visibilidad de los VMP que circulan por la acera-bici en su mismo sentido. Detectar la presencia de un vehículo tradicional en el carril derecho de la Avenida de Aragón es sencillo, pero no se puede predecir qué vehículos van a girar a la derecha para acceder a la gasolinera y qué vehículos van a continuar recto, por lo tanto el aviso será fijo y pensando en que pueden leerlo todos los vehículos tradicionales. Sobre los VMP sí que se tiene una mayor capacidad de actuación, se detectarán los VMP que vienen desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón, y se les advertirá que deben reducir la velocidad por cruce peligroso. Esto mismo es necesario realizarlo para los VMP que circulen desde la Calle Santa Rosa, aunque en este caso la situación sea menos peligrosa. Los requisitos 5 y 6 ya contemplan esta necesidad, por lo que no es necesario definir nuevos requisitos para los VMP que circulan desde la Calle Santa Rosa.

*Requisito.9: avisar a los vehículos a motor tradicionales de que no tienen la prioridad en caso de que giren a la derecha para acceder a la gasolinera.*

*Requisito.10: detectar, en la proximidad de la gasolinera, la presencia y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón.*

*Requisito.11: alertar, en la proximidad de la gasolinera, a los VMP que se aproximan desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón que deben reducir su velocidad a 10 km/h.*

### **Desde el punto de vista de los vehículos tradicionales**

En este caso es el vehículo tradicional el que supone un riesgo para el resto de los flujos: VMP y peatones. Existen dos puntos conflictivos, uno es la entrada a la gasolinera, que ya se ha tratado en el punto anterior. Y el segundo punto conflictivo es el semáforo que se encuentra el conductor a la salida de la rotonda, situación poco habitual. En este punto es necesario alertar al conductor de la presencia del semáforo y el estado en el que se encuentra.

*Requisito.12: alertar a los vehículos tradicionales de la presencia del semáforo.*

A modo de resumen, se recoge en la siguiente tabla los requisitos definidos en la propuesta de solución:

Id. Requisito	Descripción
Requisito.1	Detectar cuando un autobús se para en la parada.

Id. Requisito	Descripción
Requisito.2	Alertar a los viajeros de que van a cruzar la acera-bici, y encauzarles a realizarlo por el paso de peatones, que es dónde tienen prioridad sobre los VMP.
Requisito.3	Detectar la presencia, y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la Plaza de Zaragoza. Una primera vez 40-50 metros antes de la parada del autobús, y una segunda vez en la proximidad de la parada del autobús.
Requisito.4	Alertar a los VMP que se aproximan desde la Plaza de Zaragoza de que deben reducir su velocidad a 10 km/h. Una primera vez 30-40 metros antes de la parada del autobús, y una segunda vez en la proximidad de la parada del autobús.
Requisito.5	Detectar la presencia, y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la Calle Santa Rosa. Una primera vez 40-50 metros antes de la intersección con la gasolinera, y una segunda vez en la proximidad de la intersección con la gasolinera.
Requisito.6	Alertar a los VMP que se aproximan desde la Calle Santa Rosa de que deben reducir su velocidad a 10 km/h. Una primera vez 30-40 metros antes de la intersección con la gasolinera, y una segunda vez en la proximidad de la intersección con la gasolinera.
Requisito.7	Detectar, 40-50 metros antes de la intersección con la acera-bici de la Avenida de Aragón, la presencia y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde el cruce de la Avenida Aragón.
Requisito.8	Alertar, 30-40 metros antes de la intersección con la acera-bici de la Avenida de Aragón, a los VMP que se aproximan desde el cruce de la Avenida Aragón que deben reducir su velocidad a 10 km/h.
Requisito.9	Avisar a los vehículos a motor tradicionales de que no tienen la prioridad en caso de que giren a la derecha para acceder a la gasolinera.
Requisito.10	Detectar, en la proximidad de la gasolinera, la presencia y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón.
Requisito.11	Alertar, en la proximidad de la gasolinera, a los VMP que se aproximan desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón que deben reducir su velocidad a 10 km/h.
Requisito.12	Alertar a los vehículos tradicionales de la presencia del semáforo.

Tabla 6: Requisitos solución situaciones conflictiva en la intersección Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón.

#### 7.4. Solución técnica

Partiendo del listado de requisitos, se expone a continuación una solución técnica para cada requisito.

Requisito.1: detectar los autobuses que se paran en la parada.

El sensor más adecuado para detectar la presencia de autobuses en la parada es la espira magnética tradicional. La espira magnética se conectará a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico más cercano.

Requisito.2: alertar a los viajeros de que van a cruzar la acera-bici, y encauzarles a realizarlo por el paso de peatones, que es dónde tienen prioridad sobre los VMP.

Para dar cumplimiento a este requisito se pondrá un Panel de Mensaje Variable, similar al de la Figura 64, en el que cuando se detecte la presencia de un autobús, se encienda un mensaje que alerte a los viajeros que bajan del autobús de la existencia de la acera-bici, y que deben cruzar por el paso de peatones. Este PMV peatonal se colocará de manera que interfiera lo menos posible, en una zona en sí ya sobrecargada de elementos. Se propone colocarlo pegado a la marquesina, o incluso como parte de la marquesina, de manera que sea seguro para los peatones.

Este Panel de Mensaje variable estará conectado al mismo Regulador de Tráfico que la espira magnética que detectará el autobús, de manera que el sensor y el actuador estén conectados entre sí.



Figura 64: Panel de Mensaje Variable para peatones (Fuente [29]).

La lógica del sistema propuesto para esta solución reside a nivel local en el sistema, pero también estará conectado con la sala de control, lo que permite que se monitorice su estado de manera remota, y se recojan estadísticas de intensidades de autobuses a través de la espira y estadísticas de encendido del PMV. A continuación, se muestra gráficamente la solución técnica completa para dar cumplimiento a los requisitos 1 y 2.

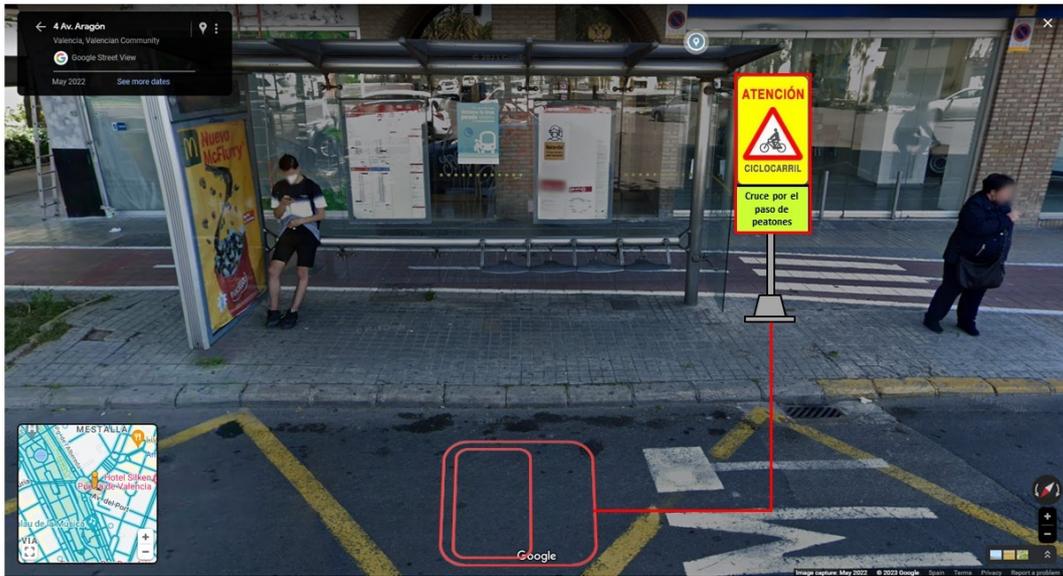


Figura 65: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 1 y 2.

Requisito.3: detectar la presencia, y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la Plaza de Zaragoza. Una primera vez 40-50 metros antes de la parada del autobús, y una segunda vez en la proximidad de la parada del autobús.

El sensor más adecuado para detectar tráfico VMP es la espira magnética doble VMP. Se colocarán dos espiras, una en la Plaza de Zaragoza cerca de la curva con la Avenida del Port, y una segunda delante de la puerta del concesionario.

Ambas espiras magnéticas VMP se conectarán a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico más cercano.

Requisito.4: alertar a los VMP que se aproximan desde la Plaza de Zaragoza de que deben reducir su velocidad a 10 km/h. Una primera vez 30-40 metros antes de la parada del autobús, y una segunda vez en la proximidad de la parada del autobús.

Para dar cumplimiento a este requisito se pondrán dos Paneles de Mensaje Variable en los que se muestre la velocidad a la que circula el VMP, similar al de la Figura 66. El primer PMV, situado pocos metros después de la espira colocada en la curva con la Avenida del Port, irá complementado con una señalización que indique “Tramo concentración accidentes”. Mientras que el segundo PMV se situará a la altura de la segunda espira.

Ambos PMV se colarán en la zona de la acera que queda entre la acera-bici y la calzada, de manera que no interfiera con el paso de los peatones.

Los PMV estarán conectados al mismo Regulador de Tráfico que las espiras magnéticas VMP, y cada PMV estará sincronizado con la espira que lo activa.

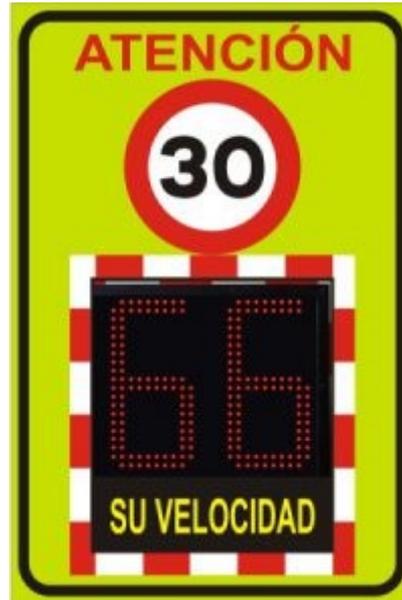


Figura 66: Panel de Mensaje Variable con velocidad (Fuente [33]).

La lógica de ambos sistemas espira/PMV reside a nivel local, pero también estarán conectados con la sala de control, de manera que podrán monitorizar su estado de manera remota, y recoger estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de VMP que han pasado por cada espira, además de estadísticas de encendido de los PMV. A continuación, se muestra gráficamente la solución técnica completa para dar cumplimiento a los requisitos 3 y 4.

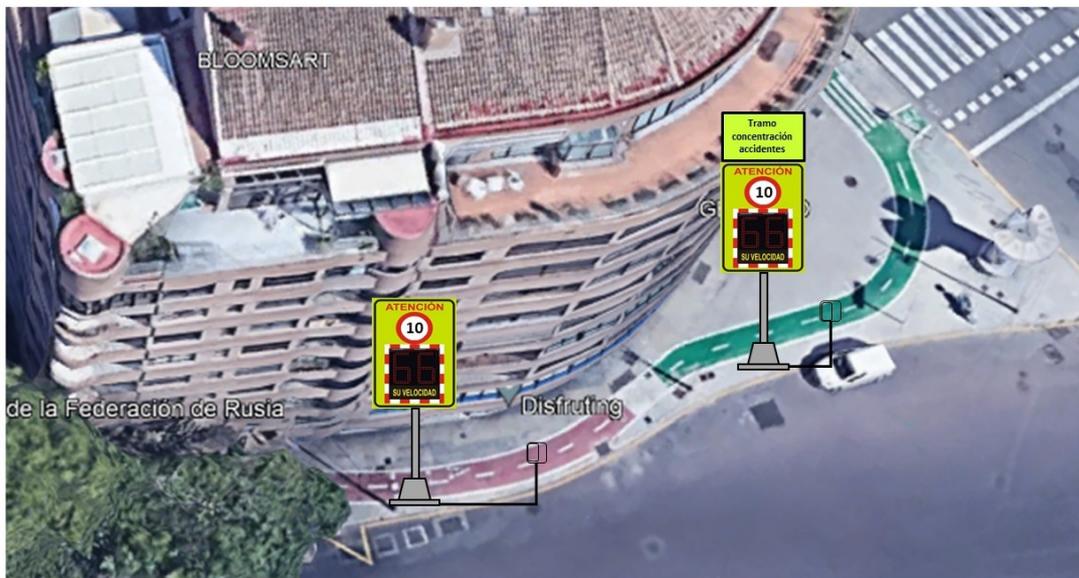


Figura 67: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 3 y 4.

Requisito.5: detectar la presencia, y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la Calle Santa Rosa. Una primera vez 40-50 metros antes de la intersección con la gasolinera, y una segunda vez en la proximidad de la intersección con la gasolinera.

Desde el punto de vista técnico, este requisito es similar al requisito 3. Por lo tanto, se colocarán dos espiras magnéticas doble VMP, una antes del cruce con la Calle Santa Rosa, y la segunda justo después del paso de peatones de la gasolinera.

Ambas espiras magnéticas VMP se conectarán a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico más cercano.

Requisito.6: alertar a los VMP que se aproximan desde la Calle Santa Rosa de que deben reducir su velocidad a 10 km/h. Una primera vez 30-40 metros antes de la intersección con la gasolinera, y una segunda vez en la proximidad de la intersección con la gasolinera.

Del mismo modo, desde el punto de vista técnico, este requisito es similar al requisito 4. Se instalarán dos Paneles de Mensaje Variable en los que se muestre la velocidad a la que circula el VMP (Figura 66), cada uno de ellos sincronizado con una espira. El primer PMV, se situará antes del cruce con la Calle Santa Rosa, y el segundo unos metros antes de llegar a la parada del autobús. El primer PMV irá complementado con una señalización que indique “Tramo concentración accidentes”.

El primer PMV se colocará en la zona ajardinada que se encuentra entre la acera-bici y la calzada, y el segundo PMV se colocará en la farola que hay después del cruce con la gasolinera. Ambos PMV quedan a la derecha del carril bici y no entorpece el paso de peatones. El segundo PMV debe estar colocado a una altura suficiente para que no entorpezca más la visibilidad de los vehículos tradicionales que se dirigen a la gasolinera.

Los PMV estarán conectados al mismo Regulador de Tráfico que las espiras magnéticas VMP, y cada PMV estará sincronizado con la espira que lo activa.

La lógica de ambos sistemas espira/PMV reside a nivel local, pero también estarán conectados con la sala de control, de manera que podrán monitorizar su estado de manera remota, y recoger estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de VMP que han pasado por cada espira, además de estadísticas de encendido de los PMV. A continuación, se muestra gráficamente la solución técnica completa para dar cumplimiento a los requisitos 5 y 6.

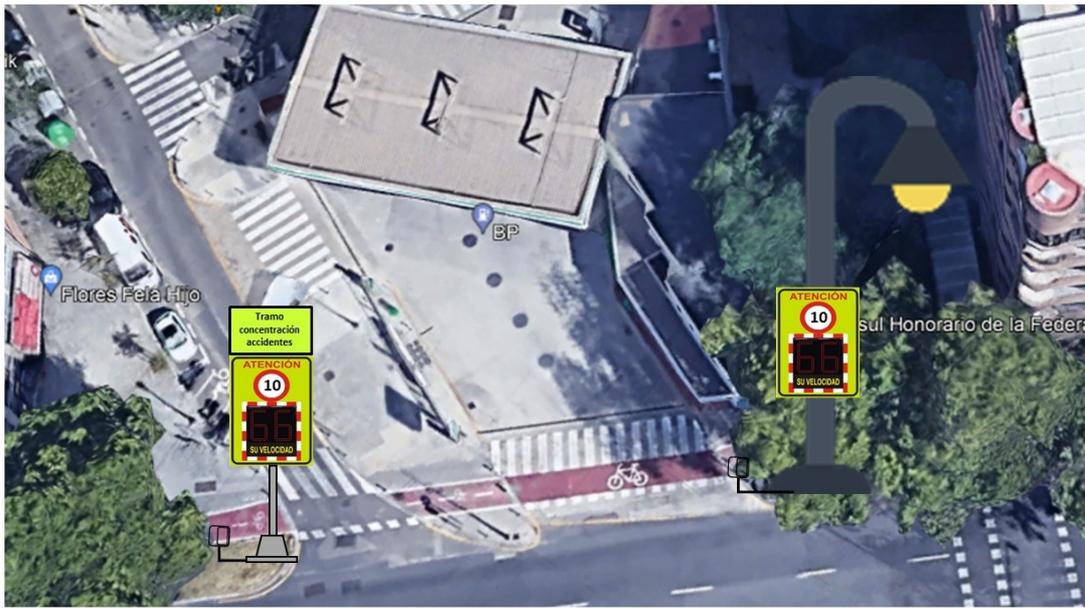


Figura 68: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 5 y 6.

Requisito.7: detectar, 40-50 metros antes de la intersección con la acera-bici de la Avenida de Aragón, la presencia y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde el cruce de la Avenida Aragón.

El sensor más adecuado para detectar tráfico VMP es la espira magnética doble VMP. Se colocará una espira antes del cruce con la Avenida de Aragón. Esta espira magnética VMP se conectará a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico más cercano.

Requisito.8: alertar, 30-40 metros antes de la intersección con la acera-bici de la Avenida de Aragón, a los VMP que se aproximan desde el cruce de la Avenida Aragón que deben reducir su velocidad a 10 km/h.

Del mismo modo que en las parejas de requisitos anteriores, se instalarán un Panel de Mensaje Variable, sincronizado con la espira, en el que se muestre la velocidad a la que circula el VMP (Figura 66).

El PMV irá complementado con una señalización que indique “Tramo concentración accidentes”, y se instalará en el margen izquierdo del carril bici, en la zona ajardinada. De esta manera no afecta a la circulación de peatones.

La lógica del sistema espira/PMV reside a nivel local, pero también estará conectado con la sala de control, de manera que podrán monitorizar su estado de manera remota, y recoger estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de VMP, además de estadísticas de encendido del PMV. A continuación, se muestra gráficamente la solución técnica completa para dar cumplimiento a los requisitos 7 y 8.

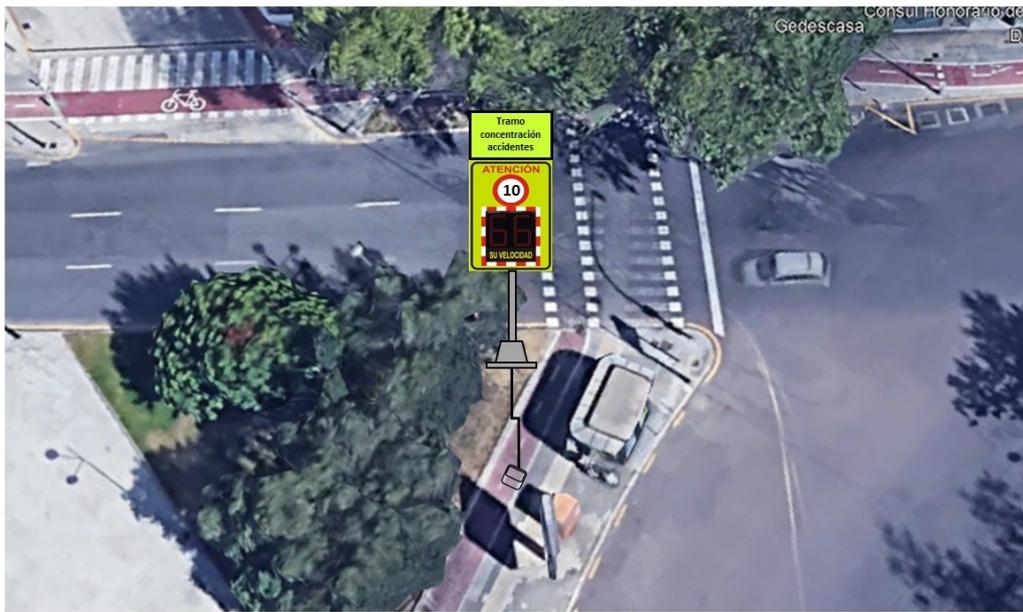


Figura 69: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 7 y 8.

Requisito.9: avisar a los vehículos a motor tradicionales de que no tienen la prioridad en caso de que giren a la derecha para acceder a la gasolinera.

Para dar cumplimiento a este requisito no es necesario la instalación de ningún sensor o actuador de los descritos en los apartados anteriores, basta con la instalación de unas señales que avisen a los conductores de los vehículos tradicionales de la presencia de una vía ciclista, y que deben cederles el paso.



Figura 70: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento al requisito 9.

Requisito.10: detectar, en la proximidad de la gasolinera, la presencia y conocer su velocidad, de VMP que se aproximan desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón.

El sensor más adecuado para detectar tráfico VMP es la espira magnética doble VMP. Se colocará una espira justo después del paso por la terraza de la cafetería. Esta espira magnética VMP se conectará a la Unidad Electrónica, y esta al Regulador de Tráfico más cercano.

Requisito.11: alertar, en la proximidad de la gasolinera, a los VMP que se aproximan desde la parada del autobús y desde el cruce de la Avenida de Aragón que deben reducir su velocidad a 10 km/h.

Del mismo modo que en las parejas de requisitos anteriores, se instalarán un Panel de Mensaje Variable, sincronizado con la espira, en el que se muestre la velocidad a la que circula el VMP (Figura 66).

El PMV se instalará en el margen derecho pegado al muro de la gasolinera, de esta manera no afecte a la circulación de peatones, y no sobrecargue con otro elemento, una zona ya demasiado sobrecargada.

La lógica del sistema espira/PMV reside a nivel local, pero también estará conectado con la sala de control, de manera que podrán monitorizar su estado de manera remota, y recoger estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de VMP, además de estadísticas de encendido del PMV. A continuación, se muestra gráficamente la solución técnica completa para dar cumplimiento a los requisitos 10 y 11.

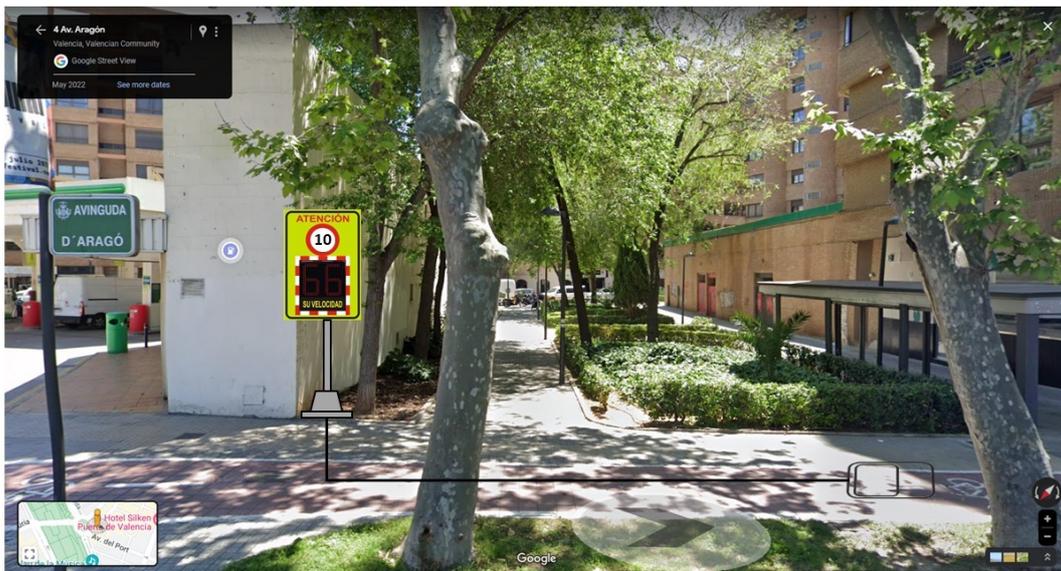


Figura 71: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento a los requisitos 10 y 11.

Requisito.12: alertar a los vehículos a motor tradicionales de la presencia del semáforo.

Del mismo modo que el requisito 9, para dar cumplimiento a este requisito no es necesario la instalación de ningún sensor o actuador de los descritos en los apartados anteriores, basta con la instalación de una señal que avisen a los conductores de la presencia del semáforo.



Figura 72: Solución técnica propuesta para dar cumplimiento al requisito 12.

## 7.5. Presupuesto del proyecto.

A continuación, se presenta una estimación de presupuesto para llevar a cabo el proyecto con la solución técnica propuesta en el apartado 7.4 para reducir la siniestralidad en la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón.

Capítulo	Descripción	Unidades	Precio unitario	Importe
<b>1. Capítulo I: TRABAJOS PREVIOS</b>				
1.1 Anteproyecto				
	Ingeniero de Sistemas Senior (horas)	350	50 €	17.500 €

<b>2. Capítulo II: PROVISIÓN DE MATERIAL</b>				
	Espira magnética tradicional (Detector, cable, elementos urbanos y poliuretano.)	1	500 €	500 €
	Espira magnética doble VMP (Detector, cable, elementos urbanos y poliuretano.)	6	600 €	3.600 €
	Panel de Mensajería Variable (Fixalia) autobús	1	1.200 €	1.200 €
	Panel de Mensajería Variable (Fixalia) VMP	6	600 €	3.600 €
	Señalización entrada gasolinera	3	200 €	600 €
	Señalización semáforo	1	200 €	200 €

<b>3. Capítulo III: OBRA CIVIL</b>				
	Instalación espira magnética asfalto (autobús)	1	1.000 €	1.000 €
	Instalación espiras magnéticas acera (VMP)	6	500 €	3.000 €
	Instalación Panel de Mensajería Variable autobús	1	1.000 €	1.000 €
	Instalación Panel de Mensajería Variable VMP	6	1.000 €	6.000 €
	Instalación señalización entrada gasolinera	1	500 €	500 €
	Instalación señalización semáforo	1	1.000 €	1.000 €

<b>4. Capítulo IV: INSTALACIÓN Y PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA</b>				
	Integración en la sala de control de tráfico	1	3.000 €	3.000 €
	Instalación y pruebas (horas de Ingeniero de Sistemas Senior)	20	50 €	1.000 €

Subtotal	43.700 €
Impuesto (I.V.A. 21%)	9.177 €
<b>TOTAL</b>	<b>52.877 €</b>

El presupuesto de ejecución del sistema expuesto en el apartado 7.4 asciende a la expresada cantidad de **CINCUENTA Y DOS MIL OCHOCIENTOS SETENTA Y SIETE EUROS**.

## 8 Conclusiones

El aumento de los Vehículos de Movilidad Personal (VMP) está propiciando una transformación en la movilidad en las ciudades. Debido a la naturaleza de las propias ciudades, no siempre es sencillo construir carriles bici segregados, y existen zonas de la vía pública en las que es necesario buscar una convivencia entre los vehículos tradicionales, los VMP y los peatones. Esto supone un problema debido a las diferentes características de estos tres tipos de usuarios: distintas velocidades de circulación, dispares masas de los vehículos, y niveles de protección completamente desiguales. Por un lado, nos encontramos con que el usuario VMP es un usuario muy vulnerable frente al vehículo tradicional, y por otra parte, el peatón es muy vulnerable frente al VMP.

En este trabajo se han analizado las tres situaciones conflictivas más comunes en las que ve involucrado el tráfico VMP:

- giro a derecha de vehículos a motor tradicionales que cruza un carril bici,
- paso de peatones sobre vía ciclista,
- y vía ciclista que rodea parada de autobús.

Y se han propuesto soluciones técnicas utilizando sistemas de adquisición de datos y respuesta para Sistemas Inteligentes de Transporte con el objetivo de reducir la siniestralidad en estas situaciones.

Para ello, en la primera parte del trabajo se ha expuesto un sistema de gestión de tráfico, detallando los sensores utilizados para la gestión del tráfico tradicional; presentando a continuación el estado del arte de los sensores utilizados para la detección del tráfico VMP. En este ámbito nos encontramos con que actualmente la mayoría de los sensores para detectar VMP son adaptaciones de los existentes para tráfico tradicional, y se encuentran con limitaciones en la obtención de parámetros específicos de los VMP. La limitación que existe actualmente es que más allá de la detección y conteo de VMP, no se obtienen datos de caracterización del tipo vehículo, ni de la velocidad y sentido de circulación del VMP. Además, la fiabilidad de muchos de estos sensores no es elevada, ya que no han sido diseñados específicamente para las características de los VMPs.

Por lo tanto, nos encontramos ante una industria en pleno desarrollo, donde una de las iniciativas más prometedoras es la espira doble para la detección de VMP que permite tanto su detección, como la identificación del tipo de VMP, su velocidad y sentido de circulación.

Las soluciones técnicas propuestas para reducir la siniestralidad en las tres situaciones conflictivas más comunes en las que ve involucrado el tráfico VMP, se basan en los sensores y actuadores disponibles actualmente en el mercado. Como consecuencia de la reducción de esta siniestralidad, el sistema propuesto permite mejorar la movilidad y la comodidad de los sistemas de transporte en las ciudades, incrementar la eficiencia y capacidad de las vías públicas, y lo es aún más importante, mejorar la seguridad de los sistemas de transporte de las ciudades.

En la segunda parte de trabajo se ha realizado un caso de uso en uno de los puntos más conflictivos de la ciudad de Valencia en los que se ve involucrado tráfico VMP. Se trata de la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón. Es un punto en el que por sus características se dan las tres situaciones conflictivas genéricas analizadas en el trabajo. Se ha

diseñado un sistema que realiza la identificación de todos los flujos de tráfico involucrados: vehículos tradicionales, VMP y peatones; y una vez identificado cada flujo se controla de manera que no ponga en riesgo al resto de flujos.

Existen diversos sensores en el mercado que permiten la detección de la VMP, y la velocidad a la que circulan (apartado 4.1), de todos ellos, el sistema propuesto opta por la utilización de espiras dobles para la detección de VMP. Esto es debido a que la espira doble VMP ofrece las funcionalidades (Tabla 1) de detección de VMP y de la velocidad a la que circula, y por tanto cumple con los requisitos de detección de VMP definidos para el sistema (Tabla 6). Además, de los posibles sensores que cumplen con estos requisitos, la espira doble VMP los cumple de manera más eficiente y económica que el resto. Otro sensor que podría haberse utilizado es la espira magnética simple VMP, pero no nos permitiría identificar el tipo de vehículo, y su fiabilidad es menor que la espira magnética doble VMP. Un radar en mástil, o incluso el procesamiento de video obtenidos por cámaras, serían sensores que también darían cumplimiento a los requisitos definidos para el sistema, pero en el primero de los casos la fiabilidad es baja, y en el segundo de los casos, la velocidad no puede obtenerse en todos los contextos. Además, ambos sensores tienen un coste económico mucho mayor que la espira doble VMP.

En cuanto a la espira magnética tradicional para detectar la llegada de un autobús, los actuadores y la señalización fija incluidos en el sistema propuesto, existen en el mercado diferentes modelos de varios fabricantes que dan cumplimiento a los requisitos definidos para el sistema. El sistema propuesto no propone ningún modelo en concreto, pues la funcionalidad y el coste en muy similar en todas las opciones del mercado.

El sistema propuesto trabaja de modo autónomo, no necesita de la operación en tiempo real de ninguna persona. El mantenimiento que requiere el sistema propuesto es muy similar al de otros sistemas de tráfico que tiene el Ayuntamiento de Valencia, pues se basa en equipos ampliamente instalados en la ciudad, aunque en este caso están adaptados a los VMP. Las tareas de mantenimiento de los sistemas de detección y control de vehículos incluyen inspecciones y recalibrado de manera periódica, de acuerdo al plan establecido por el Ayuntamiento de Valencia. Por lo tanto, la puesta en servicio del sistema propuesto, conllevará un sobrecoste al Ayuntamiento de Valencia en las tareas de mantenimiento de los sistemas de gestión del tráfico. Debe tenerse en cuenta que este sobrecoste será mínimo respecto al total del coste de mantenimiento de todos los sistemas de detección y control de vehículos que tiene operativos el Ayuntamiento de Valencia. Si la solución del sistema propuesto para la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón, se extendiera a otros puntos conflictivos de la ciudad, los sobrecostes de mantenimiento de los nuevos sistemas sería una cuestión a tener en cuenta antes de lanzar el proyecto.

Actualmente, las espiras magnéticas dobles VMP permiten identificar varias marcas/modelos concretos de VMP, el resto de marcas/modelos las registra como VMP genéricos. La UPV está trabajando en aumentar esta funcionalidad e identificar un número mayor de marcas/modelos de VMP. En el futuro podría valorarse una actualización del sistema.

El objetivo concreto del sistema propuesto es reducir la siniestralidad en las 3 situaciones conflictivas más comunes en las que se ve involucrado tráfico VMP, y su implantación en la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón, de la ciudad de Valencia. Saber si este objetivo se está consiguiendo no es inmediato, pues es necesario recopilar datos a

medio/largo plazo de siniestros por parte del Ayuntamiento de Valencia, y más concretamente por el Departamento de Atención a las Víctimas y Análisis de la Siniestralidad (DAYA) de la Policía Local de Valencia. Pero los datos obtenidos por el sistema sí que permiten sacar conclusiones a corto plazo. Por ejemplo, el sistema permite conocer el número de VMP que se acercan al punto conflictivo y la velocidad a la que lo hacen, también permite conocer si los VMP han reducido su velocidad al acercarse al punto conflictivo. Esto permite sacar conclusiones sobre el comportamiento de los VMP una vez instalado el sistema y los mensajes de alerta. Si se consigue que los VMP tengan un comportamiento adecuado antes de acercarse al punto conflictivo, probablemente se reducirá el número de siniestros.

Pero además, los datos obtenidos por el sistema y almacenados en el Centro de Gestión de Tráfico (CGT) del Ayuntamiento de Valencia permitirán sacar más conclusiones, y establecer líneas de trabajo. Algunos de los análisis que se pueden realizar de los datos obtenidos por el sistema son los siguientes:

- Análisis de cómo los VMP modifican su comportamiento antes de llegar al punto conflictivo. Observar si reducen la velocidad a la que se le indica, o pasan por el punto conflictivo a una velocidad superior, permite considerar la necesidad de alertar de una manera más intensa a los VMP para que reduzcan la velocidad.
- Otro análisis que se puede realizar es el propio de la evolución del conteo/identificación de vehículos. Si aumenta en gran medida en número de VMP que hacen uso de esta vía, se puede valorar la necesidad de realizar obra en la infraestructura para eliminar el punto conflictivo, o realizar carriles bici segregados alternativos. Este análisis puede justificar realizar la gran inversión que suele suponer este tipo de obras.
- Además, la Ordenanza Municipal del Ayuntamiento de Valencia es clara en cuanto a las condiciones de uso y circulación de los VMP. El análisis de los datos proporcionados por el sistema permite conocer si los VMP están cumpliendo esta normativa, y en caso de incumplirse, en qué grado no se está cumpliendo. Si se aprecia que hay numerosos VMP que circulan a velocidades elevadas, se puede desplazar personal del Ayuntamiento al punto conflictivo y sancionar a los conductores de los VMP que no cumplan la normativa, de acuerdo con el régimen sancionador de la Ordenanza Municipal.

### 8.1. Evolución del proyecto

La solución técnica propuesta en este trabajo para reducir la siniestralidad en las situaciones más conflictivas en las que se ve involucrado tráfico VMP, es extrapolable a cualquier lugar en el que se de alguna de estas situaciones:

Identificador	Descripción
Conflict_1	Giro a derecha de vehículo tradicional, en el que cruza con un carril bici paralelo.
Conflict_2.a	Paso de peatones sobre vía ciclista
Conflict_2.b	Vía ciclista rodea la parada de autobús.

Tabla 7: situaciones más conflictivas en las que se ven involucrados los VMP.

Por ejemplo, el resto de los puntos de mayor siniestralidad considerados en el Informe “Balance Siniestralidad Vial Ciudad de Valencia 2022” [30], realizado el Departamento de Atención a las Víctimas y Análisis de la Siniestralidad (DAYA) de la Policía Local de Valencia:

- Calle de Guillem de Castro,
- Paseo de la Alameda,
- Avenida Blasco Ibáñez,

serían candidatos para aplicar esta solución. Para ello, es necesario analizar los puntos concretos donde se producen más siniestros, y aplicar la solución técnica necesaria.

Siguiendo con la ciudad de Valencia, mientras las intensidades de tráfico VMP se mantengan en los niveles actuales parece prematura la integración en tiempo real del sistema propuesto en el CGT del Ayuntamiento de Valencia. Este momento llegará cuando el tráfico VMP crezca de manera elevada y sea necesario la toma de decisiones en tiempo real. De momento se considera suficiente con que desde el CGT del Ayuntamiento de Valencia se monitorice el estado de los sistemas implantados y recoja estadísticas de intensidades, velocidades, sentido de circulación y tipo de vehículo VMP.

Por otro lado, esta solución puede llevarse a otras ciudades. Por ejemplo, recientemente, en un estudio llevado a cabo por Modelo Madrid [34], se han identificado 159 paradas de autobús con carril bici en su ámbito peatonal:



Figura 73: situación conflictiva Conflict\_2.b en la ciudad de Madrid. (Fuente [34]).

Otro ejemplo es la ciudad de Santander, en el que recientemente se están implantando carriles bici entre las paradas de autobús y la calzada (Figura 74).



Figura 74: situación conflictiva Conflict\_2.b en la Avenida de la Reina Victoria de Santander. (Fuente propia).

En estos casos sería necesario analizar cada uno de estos lugares e implementar la solución técnica propuesta para cada caso de la manera más eficiente posible, del mismo modo que se ha propuesto para la intersección de la Plaza de Zaragoza con la Avenida de Aragón de Valencia.

## 9 Bibliografía

1. Datos proporcionados como material de asignatura Transporte y Movilidad. Tema 5: Mobility as a service (Maas). Datos de 2018.
2. <https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone>
3. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-04277-6>
4. <https://www.paris.fr/pages/les-pistes-cyclables-provisoires-vont-devenir-perennes-18264>
5. <https://www.valencia.es/es/cas/movilidad/inicio/-/content/inicio-3?uid=13E8AC560711B1ADC1257C5B0041648A>
6. [https://www.pmomevalencia.com/\\_files/ugd/e0f03f\\_8e66466799ba4db9a2ea31b92c7349e3.pdf](https://www.pmomevalencia.com/_files/ugd/e0f03f_8e66466799ba4db9a2ea31b92c7349e3.pdf)
7. <http://www.valencia.es/agenciabici/es/noticias/el-uso-de-la-bicicleta-en-valencia-continua-en-aumento-con-un-crecimiento-del-21-de-la-red>
8. [https://www.valencia.es/documents/20142//232631//valenbisi\\_modelizaci%C3%B3n%282%29.avi/24a598e3-21c1-1598-ff13-b1973c5fb52b](https://www.valencia.es/documents/20142//232631//valenbisi_modelizaci%C3%B3n%282%29.avi/24a598e3-21c1-1598-ff13-b1973c5fb52b)
9. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2015-11722>
10. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-21006>
11. <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Movilidad-y-transportes/Ordenanza-de-Movilidad-Sostenible/?vgnextfmt=default&vgnextoid=d73fff17a1151610VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnnextchannel=220e31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&idCapitulo=10614244>
12. <https://www.valencia.es/es/cas/movilidad/normativa>
13. <https://www.valencia.es/cas/movilidad/otras-descargas>
14. <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/media/group/1116513.do>
15. <https://altago.com/wp-content/uploads/Alta-Bike-Detection-White-Paper-July-2021-1.pdf>
16. Apuntes de la asignatura “Sistemas de adquisición de datos y respuesta para sistemas inteligentes de transporte” del “Máster en Sistemas Inteligentes de Transporte” de la UPV. Curso 2021/2022.
17. <https://www.valencia.es/cas/movilidad/centro-de-gestion-de-trafico/-/content/centro-gesti%C3%B3n-trafico?uid=E68FB30A984E4D4BC125751C003DD7CB>
18. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/06108.pdf>
19. <https://mutcd.fhwa.dot.gov/>
20. <https://njdotlocalaidrc.com/perch/resources/aashto-gbf-4-2012-bicycle.pdf>
21. <https://nacto.org/publication/urban-bikeway-design-guide/>
22. <https://es.eco-counter.com/blog/contar-y-clasificar-bicicletas-y-patinetes-con-el-nuevo-contador-zelt-evo/>
23. Trabajo Fin de Máster “Desarrollo y validación de un sistema para la caracterización vehículos de movilidad personal basado en una espira doble”. AUTOR/A: Carlos Moyano Gómez. Universitat Politècnica de València
24. <https://www.20minutos.es/noticia/3713327/0/comienza-funcionar-contador-bicicletas-anillo-ciclista-calle-xativa-valencia/>
25. <https://altago.com/wp-content/uploads/Innovative-Ped-and-Bike-Counts-White-Paper-Alta.pdf>
26. <https://inkalux.pe/product/semaforo-de-ciclovia-de-300-mm/>



27. <https://www.quadrex.es/productos/personalizacion-senales-carteleria/>
28. [https://www.google.es/maps/@55.6878975,12.5606413,3a,49.6y,182.03h,88.03t/data=!3m6!1e1!3m4!1slnIT\\_z9I5gNI3mophw3eIQ!2e0!7i16384!8i8192?hl=es&authuser=0](https://www.google.es/maps/@55.6878975,12.5606413,3a,49.6y,182.03h,88.03t/data=!3m6!1e1!3m4!1slnIT_z9I5gNI3mophw3eIQ!2e0!7i16384!8i8192?hl=es&authuser=0)
29. <https://www.quadrex.es/productos/matriz-led-vms-para-traffic/>
30. Informe “Balance Siniestralidad Vial Ciudad de Valencia 2022”, febrero de 2023, Departamento de Atención a las Víctimas y Análisis de la Siniestralidad (DAYA) de la Policía Local de Valencia.
31. <https://www.valencia.es/es/cas/movilidad/otras-descargas>
32. <https://www.quadrex.es/productos/matriz-led-vms-para-traffic/>
33. <https://www.quadrex.es/productos/personalizacion-senales-carteleria/>
34. <https://modelomadrid.org/madrid-tiene-159-paradas-de-autobus-con-carril-bici-en-su-ambito-peatonal/>

## Anexo I: Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030

En la siguiente tabla se presenta el grado de relación del sistema propuesto en este trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.				X
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.		X		
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.			X	
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Tabla 8: Grado de relación del sistema propuesto en este trabajo con los ODS.

El sistema propuesto en este trabajo tiene como objetivo la reducción de la siniestralidad en las situaciones conflictivas más comunes en las que se ven involucrados los Vehículos de Movilidad Personal, tanto en su interacción con vehículos a motor tradicionales, como en su interacción con peatones.

Por lo tanto, este sistema contribuye a la consecución del objetivo ODS 3: *Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades*. Concretamente a la meta 3.6 que persigue una reducción del número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico. También puede considerarse que el sistema está alineado con la meta 3.9 que persigue la reducción de muertes por contaminación química y polución. El hecho de que el sistema propuesto reduzca la siniestralidad en el uso de los Vehículos de Movilidad Personal, fomentará el uso de los mismos, reduciendo así el uso de otros medios de transporte menos eficientes desde el punto de vista medioambiental, y en consecuencia mejorará la calidad del aire que respiramos.



El sistema propuesto también contribuye a la consecución del objetivo ODS 11: *Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. Concretamente a la meta 11.6 que persigue la reducción del impacto ambiental en ciudades. Tal y como se ha expuesto para la meta 3.9, el sistema propuesto fomentará el uso de los Vehículos de Movilidad Personal, lo que reducirá el uso de otros medios de transporte menos eficientes desde el punto de vista medioambiental, mejorando así la calidad del aire de las ciudades.

Por último, también puede considerarse que el sistema propuesto tiene relación con el objetivo ODS 13: *Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*, pues fomentar el uso de medios de transporte eficientes como son los Vehículos de Movilidad Personal contribuye a combatir el cambio climático.