



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Desarrollo y validación de un sistema para la
caracterización vehículos de movilidad personal basado en
una espira doble

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

AUTOR/A: Moyano Gómez, Carlos

Tutor/a: Martínez Millana, Antonio

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

*Una página se queda corta para agradecer el apoyo
recibido por todos vosotros en este proyecto.*

Gracias de todo corazón.



Resumen

El cambio en la forma de movernos es ya una realidad. La concienciación sobre el cambio climático, el encarecimiento de la economía, la saturación de las grandes urbes por el constante crecimiento en número de vehículos de combustión y el cambio de mentalidad, en el que se prima el espacio público para las personas y no para el tráfico rodado, ha desembocado en la proliferación de los llamados Vehículos de Movilidad Personal (VMP). Debido a que no se requiere ningún tipo de permiso para circular con ellos y sus precios son considerablemente más bajos que los vehículos de combustión, el número de usuarios de VMP ha experimentado un ascenso exponencial provocando problemas de convivencia con los demás usuarios de la vía pública. Aun con la creación de normativas para regular su uso y circulación, no existen dispositivos capaces de detectar este tipo de vehículos, por lo que no se puede garantizar el cumplimiento de éstas.

En este trabajo se diseñará un sistema de detección creado específicamente para VMP que ayudará a regular su circulación, al cumplimiento de las normativas y a mejorar la seguridad del resto de usuarios de la vía pública.

Resum

La forma de moure'ns ha canviat radicalment. Ara, la concienciació sobre el canvi climàtic, l'encariment de l'economia i la gran saturació de ciutats y arees metropolitanes ha fet que els vehicles de mobilitat personal siguen estiguen guanyant la batalla als vehicles de combustió. Degut a esta situació, l'espai public s'ha reestructurat donant prioritat a vianants i usuaris de VMP. Esta clase de vehículos, no necessiten de cap tipus de premís i tenen un preu més asequible que un vehículo de combustió clàssic, per aquest motiu, la seua adopció ha sigut quasi instantània, traduïnt-se en problemes de convivencia amb la resta d'usuaris de la via.

Malgrat la creació de noves normatives que regulen el seu ús, no hi ha cap tipus de mecanisme per fer-les complir, provocant així la nula efectivitat d'estes normes.

Així doncs, en este treball es dissenyarà un sistema de detecció creat específicament per VMP's que facilitarà la regulació del seu trànsit i el compliment de les noves lleis per millorar la seguretat de tots els usuaris de l'espai públic.

Abstract

Global warming, pandemics, traffic jams, fuel prices... All these reasons made us to rethink the cities and the way of moving inside them. Nowadays, the public space has been redistributed with the pedestrians as protagonists leaving traffic in the background. In this situation another character has appeared: the Personal Mobility Vehicles (PMV). These vehicles are cheap, environmentally friendly, rechargeable (the electric ones) and does not require any type of license for using them. With all these factors, PMV's has become the choice of most citizens for moving inside the cities, causing problems with pedestrians and conventional traffic.

Despite the fact of new traffic codes and rules, the authorities are unable to apply them correctly because the lack of tools specially made for this type of vehicles. For trying to resolve this issue, a new detection system needs to be created.

In this thesis, we have designed a new type of sensor specially made for PMV's to improve the safety of this vehicles and the rest of road users (including pedestrians).



Índice

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción..... | 4 |
| 1.1 Justificación..... | 4 |
| 1.2 Contextualización..... | 5 |
| 1.3 Motivación. Sistemas inteligentes de transporte..... | 6 |
| 1.4 Objetivos..... | 6 |
| 1.5 Planificación..... | 7 |
| 1.5.1 Fase 1. Recapitulación..... | 7 |
| 1.5.2 Fase 2. Correcciones..... | 7 |
| 1.5.3 Fase 3. Fabricación del prototipo..... | 7 |
| 1.5.4 Fase 4. Pruebas y validación..... | 7 |
| 1.5.5 Fase 5. Procesado y redacción..... | 7 |
| 1.6 Contribución a los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS)..... | 7 |
| Capítulo 2. Marco Teórico..... | 1 |
| 2.1 Sistemas de movilidad urbana..... | 1 |
| 2.2 Equipos en la vía. Sistemas de regulación..... | 4 |
| 2.2.1 Actuadores..... | 4 |
| 2.2.2 Reguladores..... | 4 |
| 2.3 Equipos en la vía. Sistemas de detección..... | 5 |
| 2.3.1 Espiras magnéticas..... | 5 |
| 2.3.2 Sensores piezoeléctricos..... | 6 |
| 2.3.3 Tubos neumáticos..... | 6 |
| 2.3.4 Fibras ópticas..... | 7 |
| 2.3.5 Comparativa..... | 8 |
| Capítulo 3. Materiales y métodos..... | 9 |
| 3.1 Sistemas de detección basados en espiras magnéticas..... | 9 |
| 3.1.1 Introducción..... | 9 |
| 3.1.2 Funcionamiento..... | 9 |
| 3.1.3 Sistemas duales. Medidas de velocidad, dirección y longitud..... | 11 |
| 3.1.4 Sistemas basados en espiras dobles..... | 12 |
| 3.2 Diferencias entre vehículos de combustión y VMP's..... | 14 |
| 3.2.1 Dimensiones de la espira..... | 14 |
| 3.2.2 Frecuencias de trabajo y electrónica..... | 16 |
| 3.3 Metodología a seguir. Planificación..... | 17 |



| | | |
|-------------|--|----|
| 3.3.1 | Fase 1. Recapitulación..... | 17 |
| 3.3.2 | Fase 2 (I). Correcciones. | 18 |
| 3.3.3 | Fase 2 (II). Mejoras. | 19 |
| 3.3.4 | Fase 3. Fabricación del prototipo. | 20 |
| 3.3.5 | Fase 4. Pruebas y validación. | 22 |
| Capítulo 4. | Desarrollo y diseño del sistema..... | 24 |
| 4.1 | Fase 1. Recapitulación..... | 24 |
| 4.1.1 | Sistema oscilador..... | 24 |
| 4.1.2 | Sistema de detección | 25 |
| 4.1.3 | Montaje del sistema..... | 28 |
| 4.2 | Fase 2. Correcciones y mejoras..... | 29 |
| 4.2.1 | Adaptación entre generador y detector..... | 30 |
| 4.2.2 | Amplificación de señal..... | 33 |
| 4.2.3 | Tratamiento y adquisición de la señal a la salida del detector | 34 |
| 4.3 | Fase 3. Fabricación..... | 35 |
| 4.4 | Fase 4. Validación y pruebas..... | 36 |
| 4.4.1 | Preparación..... | 36 |
| 4.4.2 | Pruebas en entorno de laboratorio | 37 |
| 4.4.3 | Pruebas en entorno real | 37 |
| Capítulo 5. | Resultados | 39 |
| 5.1 | Simulaciones | 39 |
| 5.2 | Resultados de las pruebas..... | 42 |
| 5.2.1 | 401 interior | 42 |
| 5.2.2 | 401 exterior | 43 |
| 5.2.3 | 406 exterior | 44 |
| 5.2.4 | 410 interior | 45 |
| 5.2.5 | 410 exterior | 46 |
| 5.2.6 | M365 interior..... | 47 |
| 5.2.7 | M365 exterior..... | 48 |
| 5.2.8 | 505 interior | 49 |
| 5.2.9 | 505 exterior | 50 |
| 5.2.10 | 516 interior | 51 |
| 5.2.11 | 516 exterior | 52 |
| 5.2.12 | 1047 exterior | 53 |
| 5.2.13 | 1072 exterior | 54 |
| Capítulo 6. | Discusión y contextualización de los resultados. | 55 |
| 6.1 | Limitaciones y problemas | 56 |



| | | |
|-------------|---|----|
| Capítulo 7. | Conclusiones | 57 |
| 7.1 | Líneas futuras | 57 |
| 7.1.1 | Rediseño. Solución de la limitación en la longitud del cable..... | 57 |
| 7.1.2 | Sistema multiespira | 58 |
| 7.1.3 | Validación comercial..... | 60 |
| Capítulo 8. | Bibliografía..... | 61 |
| 8.1 | Índice de figuras | 62 |
| Capítulo 9. | Anexos..... | 63 |

Capítulo 1. Introducción.

1.1 Justificación

Pocas cosas cambian tan radicalmente una sociedad como una pandemia. Después de casi 3 años conviviendo con el virus SARS-CoV-19, no sólo se ha modificado la forma de trabajar, si no que el concepto de ciudad ha tomado un giro completamente opuesto: el espacio debe ser para las personas y no para los vehículos [1]; un pensamiento que ya comenzó en el 2019 con la irrupción y el crecimiento exponencial de los llamados vehículos de movilidad personal (VMP).

La reorganización del espacio público en favor de los peatones [2], el fomento de medios de transporte sostenibles como el transporte público y vehículos de movilidad personal, ha llevado a la reformulación urbanística de grandes ciudades. Recientemente ha proliferado la creación de grandes paseos y bulevares y reservando una pequeña parte para el tráfico rodado y, en algunos casos, a la completa peatonalización de calles y avenidas de forma estacional (por ejemplo, en las festividades de navidad) o de forma permanente.

Para garantizar la convivencia y seguridad de los usuarios de la vía pública frente a los VMP, los principales organismos gubernamentales han actualizado la normativa vigente y han redactado rápidamente diversos reglamentos para regular su uso [3] [4]. No obstante, todavía no se ha planteado qué instrumentos pueden incorporarse a las ciudades para controlar estas nuevas formas de movilidad y para garantizar el cumplimiento de la normativa vigente.

Además, esta nueva forma de movilidad está siendo impulsada indirectamente mediante normativas contra el cambio climático (medioambientales) como las zonas de bajas emisiones, y de digitalización y modernización de las ciudades mediante la sensorización para la monitorización de parámetros tales como flujos de tráfico, calidad del aire o uso del transporte público [5].

La ejecución de las actuales y futuras ordenanzas de tráfico, junto con la redistribución del espacio público, se debe traducir en una remodelación de las infraestructuras de tráfico. Dichas infraestructuras deben evolucionar incrementalmente para adoptar los nuevos elementos. Las calzadas ocupan la mayor parte de suelo público, y es por ello por lo que se convertirán en el objetivo de tecnologías emergentes para transformarlas en una fuente de información en el entorno de las Smart Cities.

En consecuencia, en vez de limitarse a componentes físicos (paneles de mensajería, semáforos y otras señales de tráfico), estas infraestructuras deben incluir nuevos elementos como sensores y demás sistemas inteligentes. Además, esta infraestructura de control debe incluir también a un elemento cada vez más importante en las ciudades: los carriles destinados al tráfico de bicicletas y patinetes eléctricos [6].

Aun con la creación de nuevas normativas de circulación, que regulan la velocidad y marcan unos estándares de seguridad para estas nuevas formas de movilidad, la realidad es que los sistemas de sensorización actuales no están diseñados para trabajar con VMP. Existen algunos elementos que se han heredado del control de tráfico de vehículos de combustión, pero pese a ellos su instalación en los carriles bici es meramente experimental y los resultados no son fiables (por ejemplo, las instalaciones de control de bicicleta en la ciudad de Valencia). Actualmente no se dispone de ningún instrumento para verificar, gestionar y controlar el tráfico de estos vehículos en tiempo real de manera robusta y fiable.

En la actualidad, existen en el mercado sensores capaces de detectar vehículos de movilidad personal, pero la información que arrojan es muy limitada: sólo detectan el paso del vehículo y nada más.[7]Por este motivo, nos encontramos ante una situación en la que no se dispone de ninguna información de velocidad de paso o tipos de VMP's que hay en circulación).

Todo esto es de vital importancia dado que las regulaciones y ordenanzas de tráfico establecen ciertos límites de velocidad según el tipo de vehículo y, además sobre el tipo de vía por el que se circula [4], por lo cual la situación aumenta, aún más, su grado de complejidad.

Debido a que los VMP no requieren ningún tipo de permiso para circular su uso se está extendiendo en todos los segmentos de la población. Los patinetes eléctricos son versátiles ya que se pueden plegar, no contaminan y, además, su precio es asequible. En consecuencia, el número de usuarios de este medio de transporte ha sufrido un aumento exponencial y continuo en la última década. De igual manera, la creciente incidencia de siniestralidad provocada por los VMP se hace necesario diseñar sistemas que alerten a los demás usuarios de la vía (peatones, ciclomotores y vehículos) sobre la presencia de patinetes o bicicletas que realizan una conducción temeraria, o que se aproximan a alta velocidad en zonas de cruce. La proliferación de estas formas de movilidad esto ha supuesto que el número de accidentes en los que los VMP se han visto involucrados, hayan aumentado de la misma forma [8].

1.2 Contextualización

En las últimas décadas, las grandes áreas metropolitanas han visto crecer el número de vehículos a motor de manera exponencial (Figura 1). Debido a las grandes densidades de población y al hecho de que cada familia suele contar con más de un vehículo, dichas áreas han quedado saturadas de tráfico rodado [9].

Esta es una de las grandes razones por la cual los VMP han logrado una expansión muy rápida y en muy poco tiempo: se ahorra tiempo ya que no hay que sufrir atascos y se pueden plegar y llevar consigo, por lo que no es necesario una plaza de aparcamiento.

No obstante, debido a esta rápida expansión, no ha dado tiempo a adaptar infraestructuras, crear sensores para regular su tráfico y concienciar a todos los usuarios de la vía del peligro y la responsabilidad que existe agregar un nuevo tipo de transporte en el espacio público.

Buena cuenta de esta problemática viene registrada en las estadísticas anuales de la Dirección General de Tráfico [10].

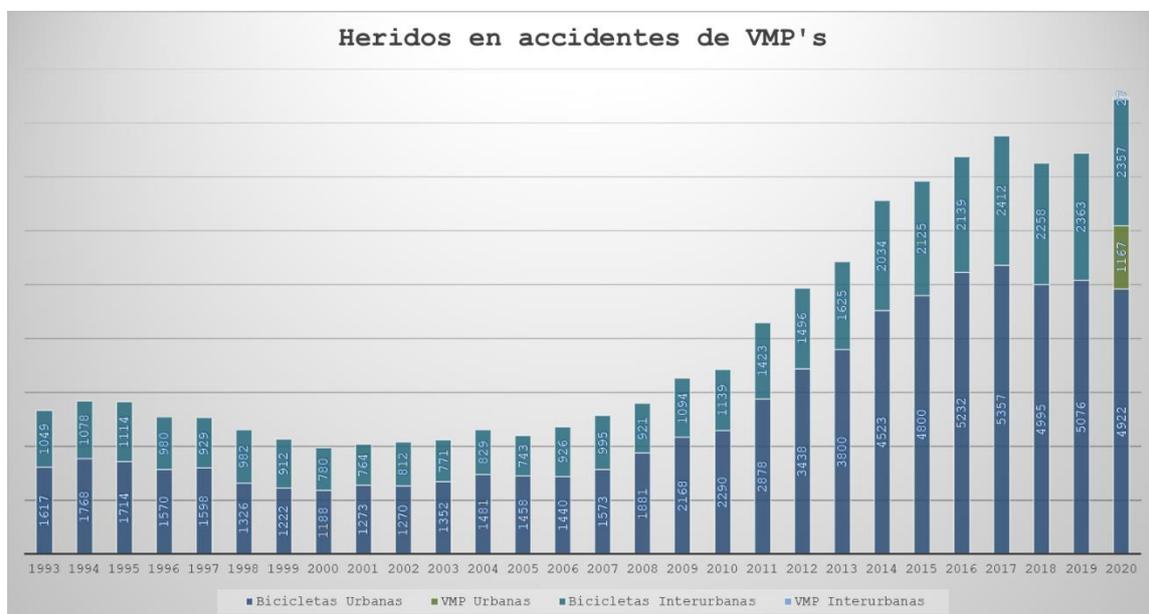


Figura 1. Número de heridos hospitalizados y no hospitalizados implicados en accidentes de VMP.

Como se puede observar en la **Figura 1**, hasta el anuario del 2020, no se ha conseguido introducir a los VMP en las estadísticas de accidentes debido a su reciente irrupción en el 2019 lo que demuestra que la problemática es muy reciente. Por otro lado, los siniestros en los que se han visto involucrados estos vehículos han experimentado una subida constante desde el año 2010.

1.3 Motivación. Sistemas inteligentes de transporte.

En la actualidad, existe una amplia variedad de sensores destinados a la detección del tráfico y a la recolección de datos, como el número o el tipo de vehículos que circulan por una vía [13]. Uno de los sensores más extendidos es el de las espiras magnéticas [14]. Esta tecnología aparece por primera vez en la década de 1970 y, aunque es aparentemente rudimentaria, se considera uno de los sistemas más fiables para la regulación y detección del tráfico rodado [15]. Otras de sus grandes ventajas que han reforzado aún más su uso son:

- Facilidad y rapidez en su instalación, sólo se requiere de una cortadora de agua para realizar incisiones en la vía, reduciendo así el tiempo que permanece cortada al tráfico una infraestructura.
- Poco o nulo mantenimiento ya que se encuentran enterradas en el asfalto.
- Resistencia ante inclemencias meteorológicas. Como se ha dicho antes, al encontrarse enterradas debajo de la vía, se aumenta su robustez frente a factores como agua o viento.
- Sistema muy versátil que se puede destinar tanto a detección de vehículos [17][19], a regulación del tráfico [15][18] e incluso a comunicaciones vehículo ↔ infraestructura [20].

Por todos estos motivos, y al hecho de los VMP también se encuentran fabricados en su mayor parte por materiales ferromagnéticos (cuerpo o llantas), es de lógica pensar en diseñar un sistema basado en espiras para la detección y regulación de este tipo de vehículos.

El presente Trabajo Fin de Máster se ha realizado en el grupo de Sistemas de Control de Tráfico (SCT) del Instituto ITACA de la Universitat Politècnica de València (UPV). La trayectoria y dilatada experiencia en Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) del grupo ha logrado avances en el campo de estudio de sensores aplicados a los VMP. En este contexto, el trabajo presentado en esta memoria representa un avance más en la creación de nuevas herramientas electrónicas que permitan ayudar a los ayuntamientos a controlar y regular el tráfico de VMP y al desarrollo de nuevo conocimiento en los sistemas ITS.

1.4 Objetivos

Para empezar, este proyecto es la continuación del Trabajo de Fin de Grado que elaboró el autor en Julio del 2020. Por ello, la idea principal de este TFM es profundizar en el trabajo realizado y pasar de los diseños a las implementaciones y experimentos en entorno de laboratorio y en entorno operativo.

Por ello, y establecidas las bases y las necesidades que han llevado a cabo la creación de este proyecto, se enuncia a continuación el objetivo principal:

Desarrollo y prototipado de un sistema de detección completamente funcional basado en la tecnología de espiras dobles que sea capaz de detectar y obtener el perfil magnético de un vehículo de movilidad personal (VMP).

Para lograr este objetivo, se han establecido unas metas secundarias con el propósito de conseguir el resultado final. Estos “puntos de control” darán pie a establecer las fases en la planificación del proyecto. Dichas metas secundarias son:

1. Recopilar y revisar la información y los logros obtenidos en el TFG de Julio del 2020.
2. Concebir y rediseñar el sistema como una estructura modular, a la que se le añadan módulos que solucionen los problemas detectados en el TFG.
3. Construir e implementar la nueva versión del prototipo para estudiar su comportamiento, identificar fallos y crear una base sobre la que avanzar en el proyecto.
4. Realizar pruebas y la validación en entorno de laboratorio. Rediseñar el sistema.
5. Realizar pruebas y validación en entornos reales con una muestra diversa de VMP's (patinetes eléctricos y bicicletas).

1.5 Planificación

Para la realización de este trabajo de fin de máster, se ha optado por dividir la estructura de desglose de trabajo en varias fases y éstas, a su vez, en subtarear. Dada esta organización, se ha utilizado un diagrama de Gantt, el cual se adjunta como anexo a esta memoria, para planificar estas tareas y así poder distribuir el trabajo de manera óptima.

A continuación, se explican las distintas fases que siguen, aproximadamente, el orden descrito en el punto anterior.

1.5.1 Fase 1. Recapitulación

En esta primera fase, se dedica el tiempo a establecer una base sólida sobre la que poder trabajar. Para ello, se vuelven a estudiar las ecuaciones, el funcionamiento de cada circuito y, además, se rechacen todos los cálculos realizados en el prototipo del TFG.

Una vez establecidas las bases para la realización del TFM, se procede al rediseño del sistema siguiendo una estructura modular y se realiza el montaje del nuevo prototipo en la placa de pruebas. Por último, se investigan y analizan los distintos problemas que el diseño presenta.

1.5.2 Fase 2. Correcciones

A continuación, y dada la nueva estructura modular del sistema, se solucionan los problemas encontrados en la fase 1 mediante el añadido de nuevos módulos de adaptación, filtrado o amplificación y demás subsistemas necesarios para la lectura de datos por parte de un ordenador.

1.5.3 Fase 3. Fabricación del prototipo

Después de realizar una primera validación del sistema en la placa de prototipado, se continúa con la introducción de los esquemáticos en una herramienta de diseño para realizar una placa de circuito impreso (PCB).

1.5.4 Fase 4. Pruebas y validación

Obtenidos los componentes y finalizado el montaje de la PCB, se valida ésta y se comienzan las pruebas en laboratorio. Después de dichas pruebas, se realizan finalmente las pruebas en un entorno real.

1.5.5 Fase 5. Procesado y redacción

Por último, se procesan los resultados obtenidos en los entornos reales y de laboratorio, y se realiza la presente memoria.

1.6 Contribución a los Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS)

La Agenda 2030 establece un acuerdo entre 193 Estados miembros de la ONU para la lucha contra la pobreza y el cambio climático [23]. Así pues, los ODS establecen los planes de acción que se deben de seguir para alcanzar dichas metas.

La filosofía de este sensor es clara: el aumento de la seguridad en la vía pública y la correcta convivencia con sus otros usuarios (vehículos de combustión, peatones, otros VMP's...). Así se logra contribuir directamente con el punto 3.6 del Objetivo 3 "Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades" que busca "reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo". [24]

Si se aumenta la fiabilidad de las infraestructuras aumentarán el número de usuarios, promoviendo este tipo de movilidad y llevando, por tanto, a la contribución de:



- Punto 3.4 que busca “promover la salud mental y el bienestar” con el indicador 3.4.1 “Tasa de mortalidad atribuida a las enfermedades cardiovasculares” que se solucionan con reducir el estilo de vida sedentaria.
- Punto 3.9 que dice “reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades” causadas por “la polución y la contaminación del aire”.

De esta forma, aumentando la seguridad, aumenta el uso de este tipo de movilidad limpia. Por lo que se cumplen también con los objetivos:

- Objetivo 7. “Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos.” – Punto 7.a
- Objetivo 8. “Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos.” – Puntos 8.4 y 8.9.
- Objetivo 9. “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.” – Punto 9.1.
- Objetivo 11. “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.” – Puntos 11.2, 11.3, 11.4, 11.6, 11.6.2, 11.7, 11.7.1 y 11.b.
- Objetivo 12. “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”. – Puntos 12.2, 12.6, 12.b, 12.b.1, 12.c y 12.c.1.
- Objetivo 13. “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.” – Puntos 13.2 y 13.2.1.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Sistemas de movilidad urbana

Debido al rápido auge de VMP's y a la nula regulación que tenían esta clase de vehículos, la Dirección General de Tráfico redactó en el 2019 la "Instrucción 16/V-124" [3] por la cual quedaban establecidas unas normas básicas de circulación y clasificación de vehículos de esta nueva forma de transporte. En el 2021, entró en vigor mediante la publicación en el BOE el Real Decreto 970/2020 [11] en donde se describían las características de los diferentes tipos de VMP, así como ciertos requerimientos de fabricación como, por ejemplo, distintos elementos de seguridad, potencia máxima o lugar para albergar una placa de identificación.

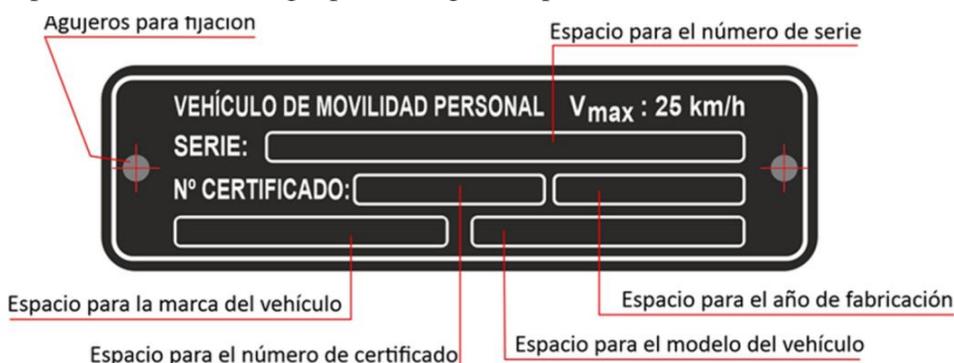


Figura 2. Marcaje de VMP según RD 970/2020.

Esta clasificación de parámetros por tipo de vehículo se puede ver en la siguiente tabla:

| Clasificación | Transporte personal | | Transporte de mercancías u otros servicios | | |
|-----------------------------------|---------------------|--------|--|---------|---------|
| | Tipo A | Tipo B | Tipo C0 | Tipo C1 | Tipo C2 |
| Velocidad máxima (km/h) | 25 | | | | |
| Potencia nominal (W) | ≤ 1000 | ≤ 2500 | ≤ 1500 | | |
| Masa máxima (kg) | ≤ 50 (vehículo) | | ≤ 400 (vehículo + carga) | | |
| Longitud máxima (mm) | 2000 | | | | |
| Altura máxima (mm) | 1400 | | 1800 | | |
| Anchura máxima (mm) | 750 | | 1000 | | |
| Capacidad máxima (personas) | 1 | | | 3 | 1 |
| Radio de giro máximo (m) | 1 | 2 | 2 | 2 | |
| Sistema de aviso (timbre) | NO | SI | | | |
| Sistema de frenada | NO | SI | | | |
| Distribución urbana de mercancías | NO | | | | SI |

Tabla 1. Clasificación de vehículos de movilidad personal según la DGT [11].

Dentro de los Vehículos de movilidad personal, se pueden categorizar tres grandes grupos que dependen de la altura o del grado de peligro del dispositivo:

- Tipo A. Estos vehículos están equipados por un único motor eléctrico, una o dos ruedas, un peso máximo de 25 kg y están limitados al transporte de una única persona. En esta categoría están los patinetes eléctricos ligeros, monociclos, plataformas y otros pequeños vehículos auto equilibrados.



Figura 3. Vehículos de movilidad personal de tipo A.

- Tipo B. En la categoría B, se encuentran los vehículos formados por dos ruedas, un único motor eléctrico y un peso máximo de 50kg. Los segways y los patinetes de mayor envergadura son los modelos más estandarizados de esta categoría.



Figura 4. Vehículo de movilidad personal de tipo B.

- Tipo C. Estos vehículos se diferencian de los vehículos de tipo B por contar con más de dos ruedas.
 - o Grupo C0. Los modelos más típicos son las bicicletas con carro para transporte de enseres personales.



Figura 5. Vehículo de movilidad personal de tipo C0.

- Grupos C1 y C2. Además del transporte de una única persona, los vehículos de esta categoría se caracterizan además por estar habilitados para el transporte de otras personas (C1) o mercancías (C2).



Figura 6. Vehículo de movilidad personal de tipo C1 (izquierda) y C2 (derecha).

Por otra parte, se encuentra la clasificación destinada a las bicicletas y bicicletas eléctricas. Para las primeras, las limitaciones son iguales que los VMP: 25 km/h de velocidad máxima y la prohibición de circular por aceras y vías interurbanas. Las bicicletas eléctricas se encuentran reguladas por la categoría L1e que consta de dos subclases:

- L1e-A. Llamados ciclos de motor, son vehículos que funcionan a pedales y están equipados con propulsión auxiliar para asistir al pedaleo. Están limitados a una velocidad de 25 km/h y una potencia no superior a los 1000 vatios.



Figura 7. Vehículos de movilidad personal de tipo L1e-A.

- L1e-B. Cualquier vehículo que exceda los parámetros de la subclase L1e-A, serán directamente clasificados como L1e-B y equipados a ciclomotor de dos ruedas.



Figura 8. Vehículos de movilidad personal de tipo L1e-B.

Paralelamente a estos reglamentos, otras administraciones (principalmente autonómicas y municipales) han publicado nuevas normativas [4] para incentivar el uso del transporte público y luchar contra el cambio climático. Para alcanzar este objetivo, se pretende reemplazar y reducir paulatinamente el parque vehicular de combustión a favor de los vehículos eléctricos y de movilidad personal (zonas de bajas emisiones). Estas normativas también pretenden reducir las emisiones de gases contaminantes mediante el cierre al tráfico de zonas muy saturadas, por tanto, las ciudades como las infraestructuras viales deben encontrarse completamente sensorizadas y conectadas a la red (IoT) [12] para poder controlar, monitorizar y gestionar el tráfico rodado.

2.2 Equipos en la vía. Sistemas de regulación.

Las infraestructuras viales disponen de diversos equipos que permiten monitorizar el tráfico que circula por ellas y controlar el flujo mediante actuadores (sistemas semafóricos, paneles de mensajería variable, etc..) su. Estos elementos se clasifican en cuatro grupos: reguladores, sensores, centrales de comunicación y actuadores. Además de regular el tráfico de los vehículos estos equipos pueden ofrecer información tanto en tiempo real como en diferido sobre el uso de la vía tanto a los usuarios de ésta, como al centro de control de tráfico.

2.2.1 Actuadores

El otro gran grupo en los que se clasifican los equipos en la vía, son los actuadores. A diferencia de los sensores, éstos se encargan de que el centro de control de tráfico informe e interactúe con los usuarios de las infraestructuras. Los actuadores más utilizados hoy en día son:

- **Semáforos**

El semáforo se considera el actuador más usado en todo el mundo al encargarse de regular tanto el tráfico rodado como el paso de peatones. El uso más común de este equipo se encuentra en las intersecciones entre dos o más vías urbanas, aunque también para regular cruces en vías interurbanas. Un semáforo está formado por tres bombillas independientes de distinto color: rojo, ámbar y verde; con su correspondiente deflector y dispuestas en vertical, para ayudar a distinguir su estado a las personas con daltonismo. Con la irrupción de la tecnología LED, los grupos semafóricos han ido sustituyendo de forma progresiva las bombillas incandescentes por bombillas LED, mucho más eficientes en consumo energético y que no precisan de deflectores.

- **Paneles de Mensajería Variable (PMV)**

Si se desea mostrar más información a los usuarios de la vía, se utilizan los paneles de mensajería variable. Estos equipos suelen informar de los flujos de tráfico (fluido o denso) en grandes avenidas y otras infraestructuras relevantes, accidentes en tramos específicos, campañas, recordatorios de normas de circulación o fenómenos meteorológicos.

2.2.2 Reguladores

Por último, se encuentran los reguladores de tráfico. Estos equipos se ocupan del control y la regulación de los semáforos, así como del envío de información de los otros sensores al centro de control de tráfico. Además de trabajar de forma autónoma, pueden ser reprogramados a distancia dependiendo de la densidad de tráfico, por ejemplo, en la ciudad de Valencia, los reguladores se encuentran conectados con el CCT mediante un bus serie 486. Como añadido, en la última década, los reguladores también controlan nuevos grupos semafóricos destinados a infraestructuras para VMP debido al gran aumento en el uso de este tipo de vehículos.

Si, por el contrario, se precisa el envío (por ejemplo, estaciones meteorológicas) y recepción (paneles de mensajería variable) de información en un entorno interurbano, se utilizan las denominadas Estaciones Remotas Universales, que hacen uso exclusivo de comunicaciones inalámbricas.



Figura 9. Armarios reguladores de tráfico y armarios controladores de espiras de tráfico (Izquierda)
Grupos semafóricos que controla (Izquierda y Derecha).

2.3 Equipos en la vía. Sistemas de detección.

De los 4 grupos mencionados anteriormente, los sensores son los únicos encargados de recoger la información de lo que está sucediendo en la vía y transformarla en señales eléctricas listas para ser interpretadas por un regulador de tráfico o una sala de control. Dependiendo del tipo de sensor instalado, se puede obtener información sobre densidades y flujos de tráfico, datos meteorológicos, tipos de vehículos que circulan por una vía e, incluso, su velocidad. Debido a la diversa naturaleza de los datos que se pueden obtener, los sensores se pueden clasificar en dos grandes grupos: los destinados a la detección y monitorización de vehículos y, por otro lado, los sensores ambientales y/o meteorológicos [21].

A su vez, los sensores de detección y monitorización pueden clasificarse por el tipo de instalación que precisan:

- Sensores no intrusivos. Estos sensores no requieren cortar el tráfico ya que se instalan de manera adyacente a la vía. Algunos ejemplos de este tipo de equipos son:
 - o Radares de microondas
 - o Detectores de infrarrojos pasivos (PIR)
 - o Detectores de infrarrojos activos
 - o Sensores/radar láser
- Sensores intrusivos. Denominados así ya que, para su instalación, se requiere cortar el tráfico en la infraestructura. En este grupo se encuentran los sensores basados en:
 - o Espiras magnéticas
 - o Piezoeléctricos
 - o Tubos neumáticos
 - o Fibra óptica

El grupo SCT tiene amplia experiencia tanto en sensores intrusivos como no intrusivos, pero, son en éstos últimos donde fijará ahora su línea de investigación.

Esto es debido a que son los sensores no intrusivos mencionados, los que pueden resultar válidos (debido a su tecnología) y viables (realizando las pertinentes modificaciones) para la detección de VMP's.

2.3.1 Espiras magnéticas

Las espiras magnéticas se componen de un cable eléctrico común enterrado en el asfalto/pavimento y un circuito controlador ubicado en un armario de protección. Se trata de una tecnología que se introdujo por primera vez en los años sesenta y que se encuentra altamente testada y validada y que, debido a sus bajos costes de instalación y mantenimiento y a su robustez

frente a interferencias e injerencias meteorológicas, sigue siendo el sensor vial más extendido y usado en todo el mundo [22].

El funcionamiento de estos sensores está basado en registrar las variaciones de inductancia de las espiras cuando un vehículo pasa por encima de ellas. Estos vehículos, al estar fabricados por materiales ferromagnéticos provocan cambios en el campo electromagnético creado por las espiras debido al principio físico de la inducción electromagnética, el mismo principio usado, por ejemplo, en las cocinas de inducción.



Figura 20. Las espiras electromagnéticas pueden tener distintas formas geométricas.

2.3.2 Sensores piezoeléctricos

Los sensores basados en materiales piezoeléctricos basan su funcionamiento en el principio físico de la piezoelectricidad. Este fenómeno consiste en que, al deformar un material de estas características, genera una diferencia de tensión. Por este motivo, si un vehículo pasa por un cable piezoeléctrico, se genera una señal eléctrica que será detectada por un sistema electrónico que detectará el paso de dicho vehículo. Debido a este método de funcionamiento, el cable piezoeléctrico debe estar semienterrado en el asfalto, con una parte de él en contacto con los vehículos, provocando un desgaste y un deterioro del sensor.

Del otro lado de la moneda, estos sistemas requieren una obra civil sencilla, por ello son una alternativa económica, fiable y rápida de instalar a las espiras electromagnéticas.

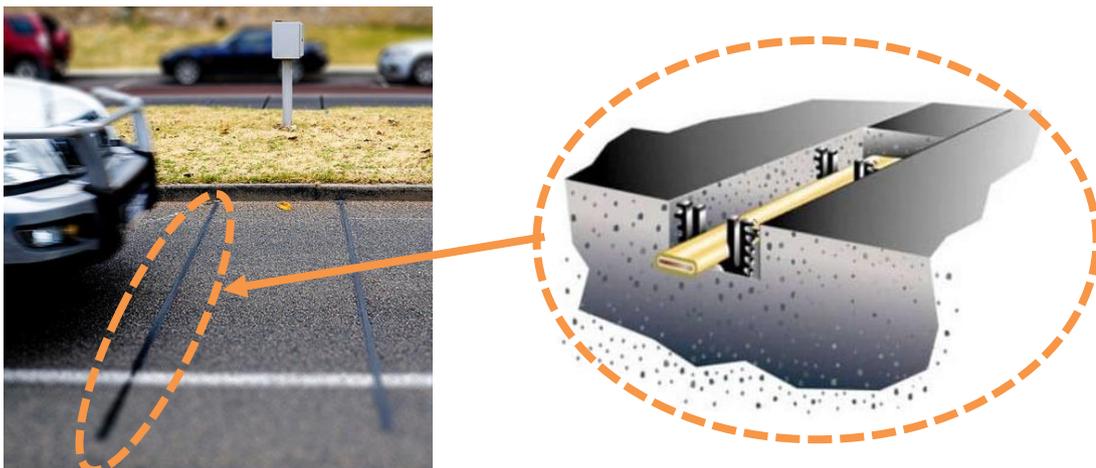


Figura 31. Instalación en la calzada de un sensor piezoeléctrico y su estructura interior.

2.3.3 Tubos neumáticos

De la misma manera que los sensores basados en piezoelectricidad, los basados en tubos neumáticos, basan su funcionamiento en la deformación del sensor al paso de un vehículo por encima de éstos.

A diferencia de los piezoeléctricos, dentro de los tubos neumáticos hay sólo aire, por lo que se producen corrientes de aire que golpean y deforman una membrana de material piezoeléctrico, provocando una señal eléctrica.

En cuanto a ventajas sobre las espiras, resultan ser las mismas que los sensores piezoeléctricos, siendo la desventaja que su degradación es mucho más rápida que éstos, debido a que se deben instalar sobre la calzada. Por estos motivos, pueden ser una buena opción para ciertos eventos que requieran una instalación temporal.



Figura 42. Despliegue en la calzada de un par de tubos neumáticos.

2.3.4 Fibras ópticas

Por último, los sensores basados en fibra óptica siguen el ejemplo de funcionamiento de sus hermanos piezoeléctricos y neumáticos: al paso de un vehículo se deforma la fibra óptica. La diferencia reside en que esta deformación, altera la transmitancia óptica de la fibra. Así pues, se introduce una fuente de luz en un extremo de la fibra, y un fotodetector en el otro. Si la luz recibida en el fotodetector varía en intensidad, significará que un vehículo ha pasado por encima del sensor.

El método de instalación es el mismo que los sensores piezoeléctricos, semienterrado con una parte descubierta en contacto con el tráfico rodado. La ventaja sobre los sistemas basados en piezoeléctricos es la inmunidad frente a interferencias y ruido.

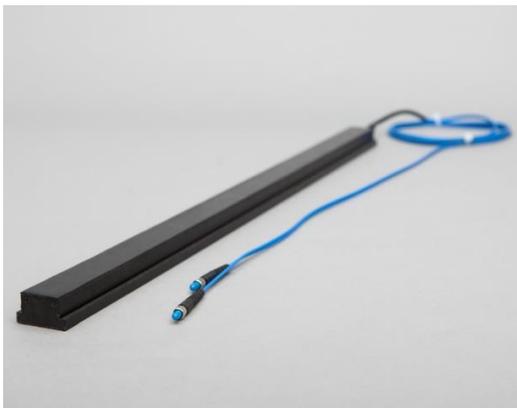


Figura 53. Sensor basado en fibra óptica y procedimiento de su instalación.

2.3.5 Comparativa

Finalmente, como recapitulación a esta sección de sistemas de detección de vehículos, se realiza una tabla comparativa para dar una visión general sobre qué sistema (o sistemas) pueden resultar una buena opción para cumplir con el objetivo de este proyecto.[25]

| | | Espira magnética | Piezoeléctrico | Tubo neumático | Fibra óptica |
|-------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------|--------------|
| Información | Conteo | Sí | Sí | Sí | Sí |
| | Peso | No | Sí | No | Sí |
| | Dirección | Sí | Sí, instalando 2 unidades | | |
| | Tipo de vehículo | Sí | No | No | No |
| | Intercambio de datos | Sí | No | No | No |
| Fiabilidad | Inclemencias meteorológicas | Excelente | Buena | Aceptable | Buena |
| | Interferencias/ruido | Muy buena | Buena | Excelente | Excelente |
| Costes | Sensor | Muy bajo | Muy alto | Bajo | Alto |
| | Instalación | Bajo | Bajo | Muy bajo | Bajo |
| | Cortes al tráfico | Sí (duración alta) | Sí | No | Sí |
| | Mantenimiento | Ninguno | Sí | Sí (altos) | Sí |
| Viabilidad | Tráfico convencional | Sí | Sí | Sí | Sí |
| | Vehículos de movilidad personal | Sí | Sí | No | Sí |

Tabla 2. Tabla comparativa entre los distintos tipos de sensores viales.

Tal y como se puede observar, el sensor por excelencia resulta ser el basado en espiras magnéticas. De modo que, gracias a sus buenos resultados, en este proyecto se adaptarán las tecnologías ya existentes (o se rediseñarán por completo), basadas en espiras electromagnéticas para conseguir la detección de vehículos de movilidad personal (VMP).

Capítulo 3. Materiales y métodos

3.1 Sistemas de detección basados en espiras magnéticas

3.1.1 Introducción

La versatilidad de los sistemas basados en espiras magnéticas ha llevado a este tipo de sensores a ser los más utilizados en todo el mundo en las infraestructuras de tráfico rodado. Este éxito reside en la simplicidad de su tecnología, su resistencia frente a inclemencias meteorológicas y sus bajos costes de instalación y mantenimiento. Todo ello ha llevado a que estos sistemas sigan siendo elegidos para la gestión y monitorización del tráfico en las grandes áreas metropolitanas [22].

Además, las espiras se consideran un sensor completamente fiable a la hora de ofrecer resultados como el conteo de vehículos, clasificación según su tipo, detectores de presencia, medidas de velocidad y sentido de la marcha e incluso comunicación vehículo-tierra [15] [16] [17] [18] [19]. Un sensor basado en espiras magnéticas cuenta con los siguientes componentes:

- Un bucle de cable eléctrico común formado por una o más vueltas soterrado en la calzada. Dicho bucle forma lo que se denomina espira.
- Un cable trenzado para interconectar la espira con la unidad de control que se encontrará en un armario.
- La unidad de control, encargada de generar la señal de excitación para la espira y de detectar los cambios producidos en ésta.

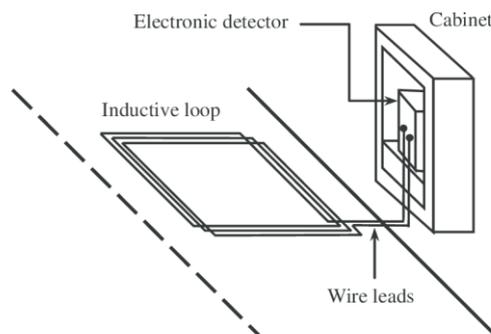


Figura 14. Esquema de un sistema basado en una espira simple.

3.1.2 Funcionamiento

La base de funcionamiento de un sistema de espiras es la detección del cambio de inductancia que experimenta una espira cuando un vehículo de combustión pasa por encima de ella. Este fenómeno es debido a que los automóviles están fabricados con material ferromagnético por lo que, si aplicamos una corriente eléctrica a la espira, generaremos un campo magnético alrededor de ella tal y como enuncia la ley de Ampere:

$$\vec{H} = \frac{N \cdot I}{l} \quad (3.1)$$

En donde N es el número de vueltas del bucle, I la corriente expresada en Amperios y l se corresponde con la longitud total del cable que forma la espira. Este campo magnético genera a su vez un flujo magnético a través de la espira que podemos calcular gracias a la ley de Gauss donde \vec{B} es la densidad del flujo magnético, \vec{S} es la superficie que encierra la espira, μ_r es la permeabilidad magnética del medio y μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío:

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \cdot \vec{S} \quad (3.2)$$

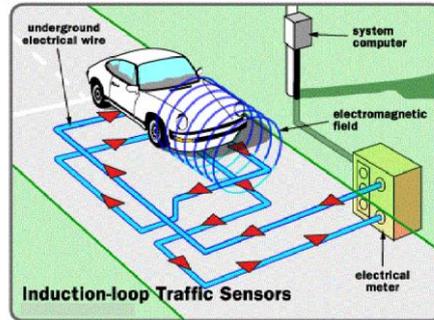


Figura 15. Ejemplo del campo magnético creado por una espira.

En la Ecuación 3.3 la inductancia de una espira, expresada en Henrios, está relacionada con la corriente que pasa por ésta, por su número de vueltas y por el flujo magnético que la envuelve:

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} \quad (3.3)$$

Sustituyendo 3.2 en 3.3, observamos que la inductancia de una espira es proporcional al campo magnético:

$$L = \frac{N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S}}{I} \quad (3.4)$$

En consecuencia, tal y como ha quedado demostrado, si se varía el campo magnético generado por la espira, su inductancia también se verá afectada.

Por otra parte, existe una relación adicional ya que el sistema se encuentra alimentado por un circuito oscilador RL. Esta relación se basa en que la inductancia de la espira L depende también de la frecuencia de oscilación del sistema f y de una constante k dependiente del sistema oscilador RL:

$$f = \frac{k}{L} \quad (3.5)$$

Por tanto, para obtener la información de este sensor, se deben observar las fluctuaciones de la frecuencia de oscilación de la espira. Si representamos estos cambios en función del tiempo, se obtiene lo que se conoce como el perfil magnético del vehículo.

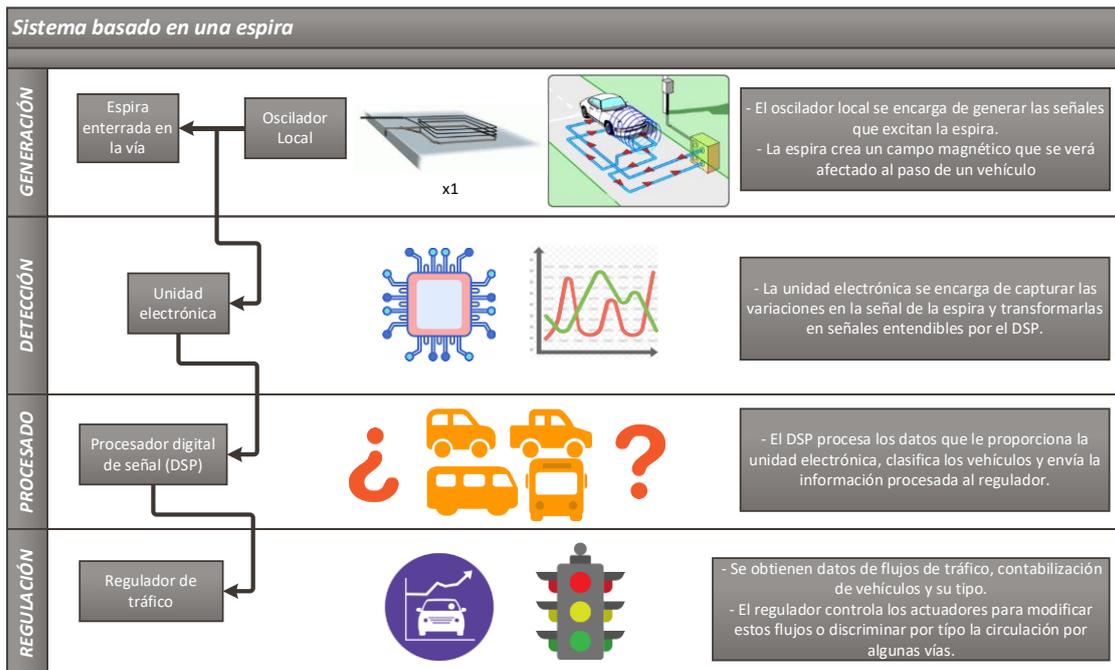


Figura 16. Metodología y flujo de datos de un sistema basado en espiras simples.

También llamada huella magnética, esta curva aporta información como: longitud, ubicación de elementos como el motor o el número de ejes. Estos parámetros varían en función del tipo de vehículo, por lo que resulta muy útil a la hora de segregar tráfico, realizar estadísticas de uso o controlar el acceso a distintos lugares. En la **figura 17** se muestran los perfiles magnéticos obtenidos mediante un sistema basado en una espira simple para los cuatro tipos principales de vehículos.

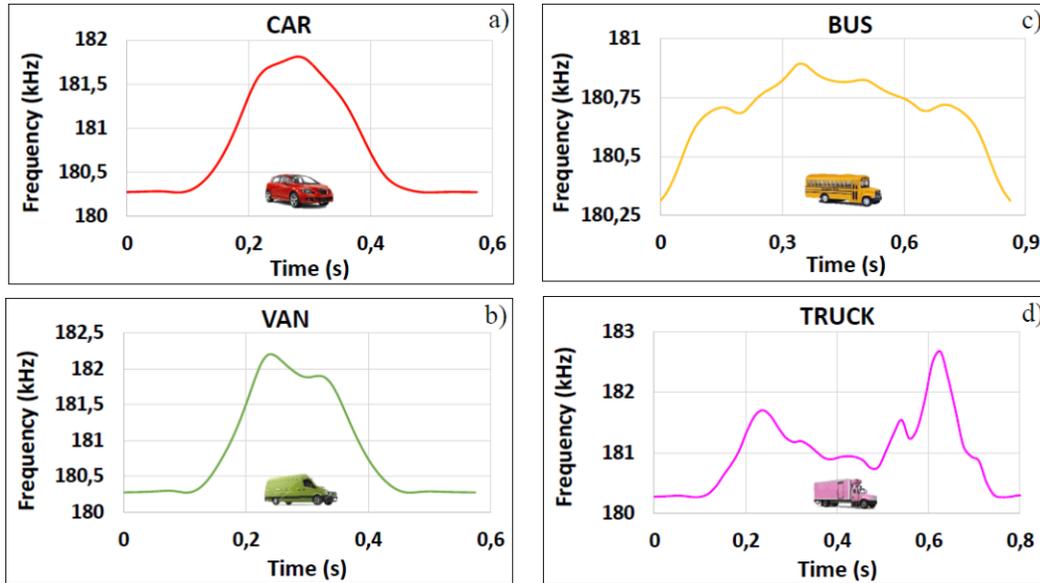


Figura 17. Perfiles magnéticos de los cuatro grupos principales de vehículos.

3.1.3 Sistemas duales. Medidas de velocidad, dirección y longitud.

Si se quiere calcular la velocidad de los vehículos, se necesitan las variables distancia y tiempo. Estas dos incógnitas son imposibles de calcular con una sola espira, por lo que se precisa de otra colocada a una distancia conocida de la anterior. En la **figura 18** se muestra un ejemplo de colocación de la segunda espira respecto a la primera.

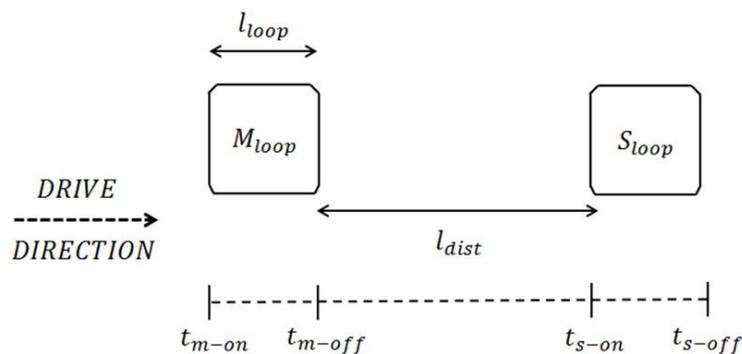


Figura 18. Diagrama de un sistema dual.

También conocidos como trampas de velocidad, estos sistemas están formados por dos espiras, una maestra y otra esclava (configuración Master-Slave). Así pues, la primera espira inicia un temporizador cuando un vehículo pasa por encima de ella y lo detiene cuando pasa por la segunda espira.

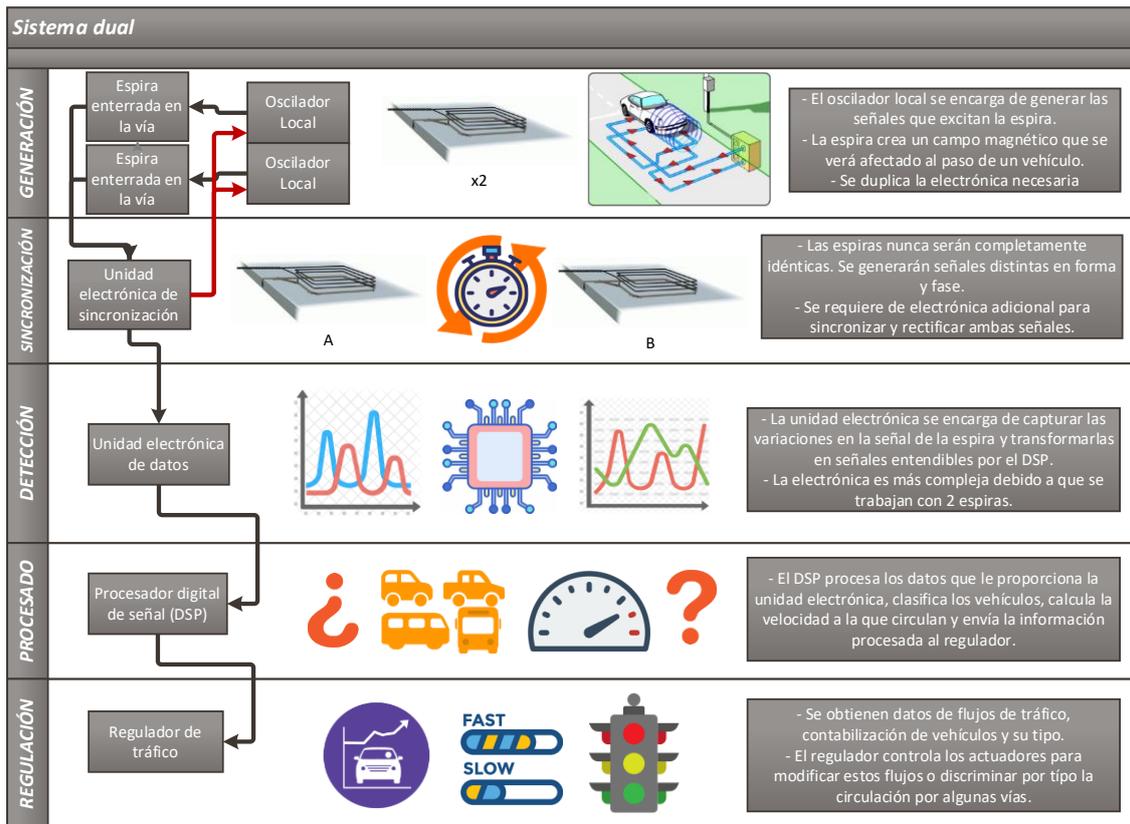


Figura 19. Metodología y flujo de datos de un sistema dual.

Para conocer la velocidad del vehículo, se registra el tiempo que tarda en atravesar las dos espiras y, como se conoce la distancia entre ellas, se calcula la velocidad mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{l_{dist} + l_{loop}}{(t_{s\ on} - t_{m\ on})} \quad (3.2)$$

Para poder calcular la velocidad, primero se obtienen los tiempos de detección en cada una de las espiras. Las ecuaciones (siguiendo la nomenclatura del diagrama de la **figura 18**) quedarían de la siguiente manera:

$$ON_{time\ s} = t_{s\ off} - t_{s\ on} \quad (3.3)$$

$$ON_{time\ m} = t_{m\ off} - t_{m\ on} \quad (3.4)$$

Obtenidos los tiempos de detección, la longitud del vehículo vendrá dada por:

$$L_{vehículo} = \left[v \frac{(ON_{time\ m} + ON_{time\ s})}{2} \right] - l_{loop} \quad (3.5)$$

3.1.4 Sistemas basados en espiras dobles

Los sistemas basados en dos espiras como los mencionados anteriormente realizan ciertas estimaciones en los cálculos a la hora de obtener parámetros como la velocidad. Esto da lugar a problemas de fiabilidad cuando la situación requiere de información precisa. Además, la dificultad de instalación de los sistemas duales es mucho más engorrosa debido a que las 2 espiras

deben de ser lo más parecidas posible, el mínimo cambio en su geometría provoca que se generen señales distintas entre ambas, dificultando así la obtención de los parámetros.

Además, aunque las espiras sean completamente iguales, hay que sincronizar perfectamente sus señales para poder ofrecer una estimación lo más cercana a la realidad posible.

Para solucionar estos problemas, se ha rediseñado la espira magnética. Para solucionar estos problemas, se ha rediseñado la espira magnética de geometría “clásica” para poder modificar sus características electromagnéticas y, mediante una nueva electrónica de obtención de datos, crear un sistema con nuevas funcionalidades que se detallarán más adelante. De este modo, el diseño reduce la complejidad y elimina los problemas del sistema dual (basado en dos espiras) al estar basado en un único bucle.

Así pues, la nueva geometría se basa en la unión de dos espiras de forma rectangular y que pueden coincidir, o no, en su número de vueltas (N). Estos bucles se colocan uno encima del otro y, uno de ellos, se caracteriza por tener la mitad de ancho que el otro. En la **figura 20** se muestra la geometría de este nuevo diseño.

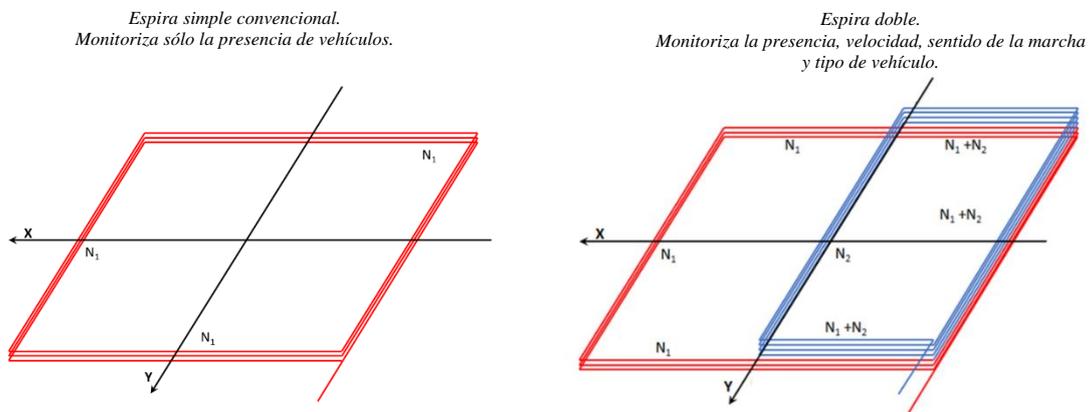


Figura 20. Comparativa entre una espira simple y el nuevo diseño de espira doble.

Como se puede observar, la novedad reside en su nuevo diseño de forma. Al tratarse de una espira magnética doble, su precisión a la hora de medir la velocidad y el flujo de vehículos aumenta considerablemente respecto a un sistema dual. Pero, al tratarse de un diseño en el que sólo se usa una espira simple, se elimina el error producido en los sistemas basados en dos espiras aumentando, aún más, su fiabilidad en los datos obtenidos.

Otra de las grandes novedades en este diseño es su impacto en las huellas magnéticas del vehículo. En un sistema basado en una espira simple, esta huella sólo ofrece 4 puntos de información: vehículo entrando en la espira, vehículo encima de la espira, vehículo saliendo de la espira, sin vehículo en la espira. También, al tratarse de una espira simétrica, la huella magnética también lo es, por lo que no se puede caracterizar el sentido de la circulación, longitud y velocidad del vehículo.

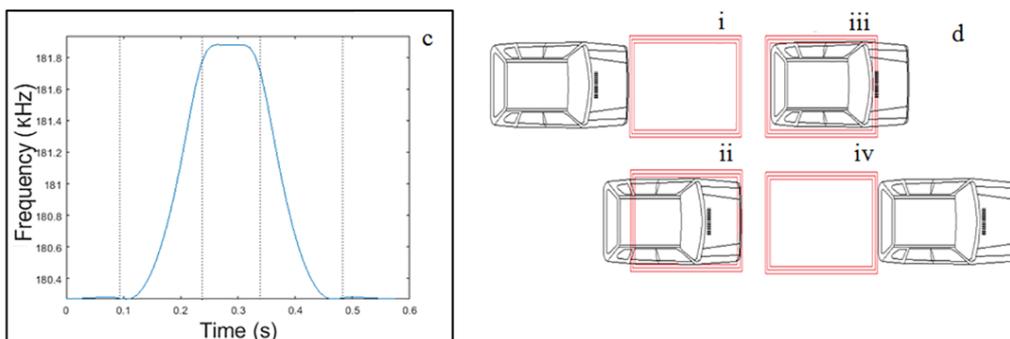


Figura 21. Perfil magnético generado por una espira simple.

Ahora bien, con la espira doble, se obtienen dos nuevos puntos de referencia nuevos sobre los ya existentes [30]. Además, debido a que en ciertas partes de la espira se combinan el número de vueltas (N) de las dos “sub-espiras”, se obtiene una huella magnética asimétrica que alberga la suficiente información no sólo para poder calcular la velocidad, longitud y sentido del vehículo, sino que también se puede realizar una discriminación mucho más exacta del tipo de automóvil que circula por la espira.

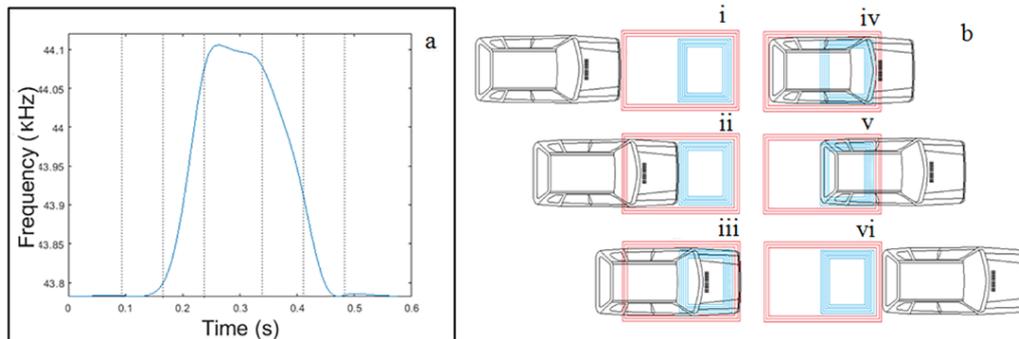


Figura 22. Perfil magnético generado por una espira doble.

3.2 Diferencias entre vehículos de combustión y VMP's

Como cualquier otro sensor vial, las espiras están diseñadas para detectar vehículos de combustión. Este diseño estandarizado a nivel mundial tiene unas medidas 2x2 metros y se emplea cable eléctrico AWG de 14mm de diámetro [18].

Al igual que los vehículos tradicionales de combustión, los VMP también se fabrican utilizando materiales ferromagnéticos, por lo que lógicamente cabe esperar que puedan ser detectados mediante espiras. No obstante, este tipo de material se encuentra en menor cantidad en un VMP ya que, como es obvio, se trata de un vehículo mucho más pequeño y de mucha menor masa. Aun así, los VMP cuentan con la ventaja de encontrarse mucho más cerca de la calzada y sus ruedas suelen albergar el motor eléctrico (masa ferromagnética y además generan campo electromagnético). Por todos estos motivos, un sistema que detecte VMP basado en espiras magnéticas es perfectamente viable y tiene sentido.

3.2.1 Dimensiones de la espira

Como se ha dicho anteriormente, el diseño estandarizado de una espira tiene unas dimensiones de 2x2 metros. Estas medidas son perfectamente compatibles con la anchura de un carril de tráfico estándar, pero no con uno de una infraestructura de carril bici. Por lo tanto, en primer lugar, se debe redimensionar la espira. Según la DGT, una infraestructura destinada a VMP debe tener una anchura de 2 metros con un resguardo de 0,25 metros a cada lado [29]. Estas medidas se encuentran representadas en la *figura 23*.

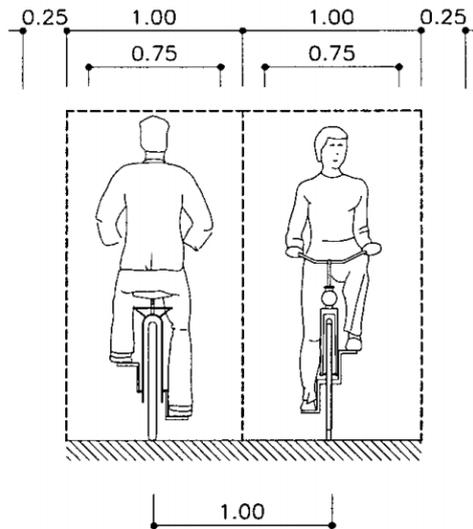


Figura 23. Estándares de una infraestructura de carril bici.

Como se puede observar en la imagen, en el manual de infraestructuras de la DGT se establece un metro de ancho para cada sentido del carril junto con una holgura de 0,125 metros para permitir al conductor a corregir las inestabilidades en la trayectoria de los vehículos de dos ruedas [29]. Por consiguiente, resulta forzosamente necesario reducir las medidas de una espira tradicional por un factor de 4 para adecuar el sensor y así poder instalarlo en un sentido del carril bici.



Figura 24. Ejemplo de instalación del sistema en un carril bici.

Así pues, partiendo de la base de una espira doble de 2x2 metros, se ha llegado a reducir hasta los 0,48 metros de largo por 0,32 metros de ancho. De este modo, se puede realizar una instalación de una espira por sentido más una espira adicional en el centro del carril ya que, a diferencia del tráfico tradicional, los VMP suelen invadir el sentido contrario o circular por el medio de ambos.

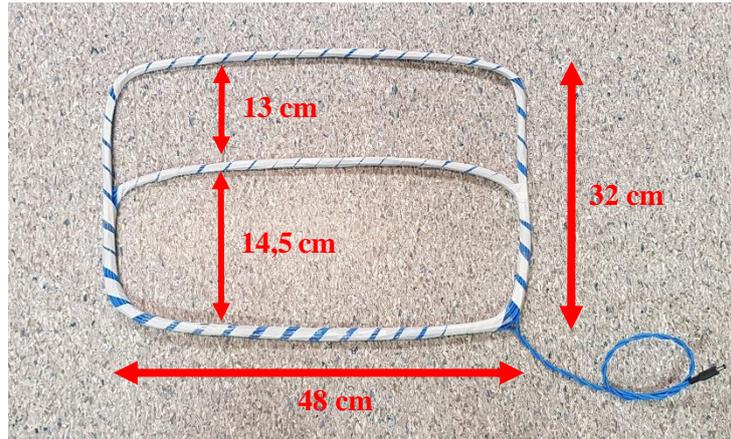


Figura 25. Prototipo de la espira doble que se utilizará para las pruebas.

3.2.2 Frecuencias de trabajo y electrónica

Como se ha visto en el punto 3.1.2, la frecuencia a la que oscila la espira es inversamente proporcional a su tamaño. De este modo, y dado que hemos reducido el tamaño unas cuatro veces, la frecuencia de oscilación se ha visto aumentada por un factor de 4. Así pues, en vez de trabajar a unas frecuencias en torno a los 100 kHz, ahora el sistema se encuentra produciendo señales de unos 400 kHz.

Ahora bien, si se quiere capturar dicha señal, el teorema de Nyquist señala que se debe muestrear al doble de la frecuencia de esta señal siendo f_s la frecuencia de muestreo necesaria obtener un perfil magnético y f_0 la frecuencia a la que oscila la espira:

$$f_s \geq 2 \cdot f_0 \quad (4.1)$$

Para los sistemas que monitorizan vehículos de combustión no suponía una electrónica compleja ya que se muestreaba a unos 200 kHz. Dicha electrónica se basa principalmente en un circuito oscilador LC que excita la espira con una señal senoidal y los datos son capturados mediante un procesador digital de señal.

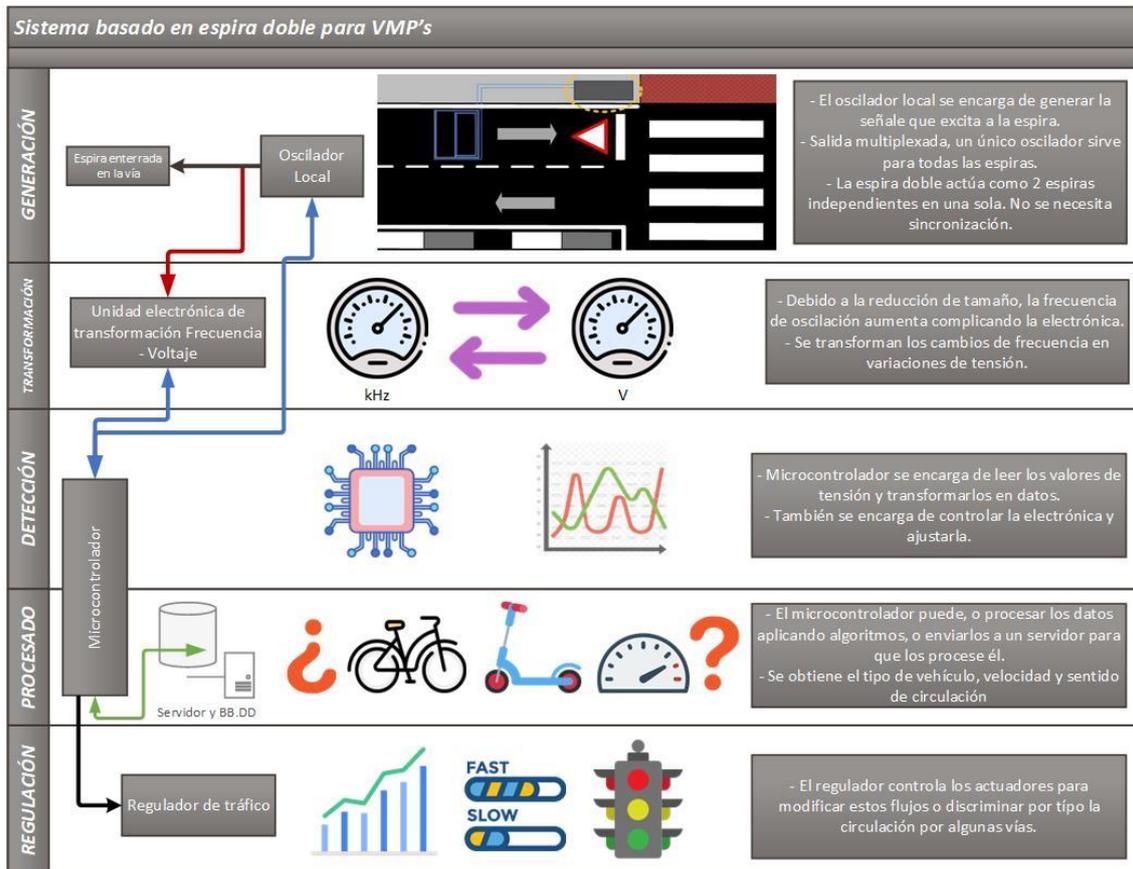


Figura 26. Metodología y flujo de datos de un sistema basado en espiras dobles (elaboración propia).

Sin embargo, ahora para muestrear la señal procedente del sistema para VMP, ya se requieren frecuencias próximas al MHz. Es por esta razón por la que no es posible adaptar la electrónica que ya existe, si no que se requiere rehacerla completamente desde cero. Para ello, primero se parte de un oscilador RL que excitará la espira con una señal cuadrada, ya que son mucho más sencillas tanto para su generación como para el tratamiento y robustez frente a posibles interferencias.

Como se ha explicado, la principal fuente de información reside en la variación de la frecuencia de oscilación. Si bien muestrear una señal a frecuencias cercanas al MHz es posible, no resulta sencillo debido a la complejidad que requiere la electrónica. Por esta razón, este nuevo sistema emplea un lazo de seguimiento de fase (PLL por sus siglas en inglés) para conseguir una transformación que traduce los cambios en frecuencia a variaciones de tensión, mucho más sencillos de muestrear ya que la electrónica requerida resulta ser mucho más simple.

3.3 Metodología a seguir. Planificación

3.3.1 Fase 1. Recapitulación

En el TFG “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN ESPIRAS MAGNÉTICAS PARA LA DETECCIÓN DE VEHÍCULOS DE MOVILIDAD PERSONAL” se consiguieron establecer las bases de la electrónica básica que compone el producto final que se desea desarrollar ahora con el TFM. Para ello, ahora, se explica qué partes forman el sensor y cuál es su papel dentro del sistema.

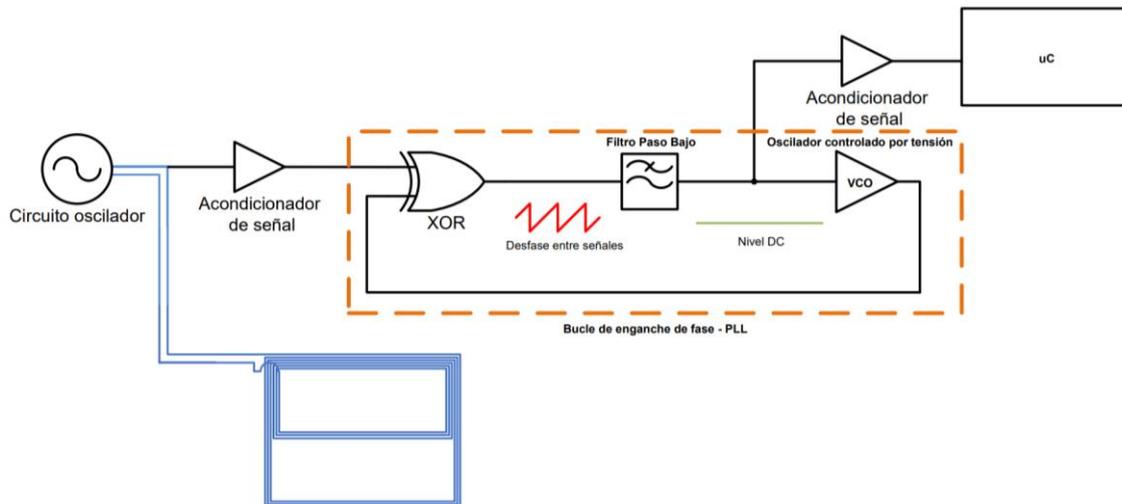


Figura 27. Diagrama y componentes de un sistema basado en espiras dobles.

Como se puede ver en la figura anterior, el diseño parte de tres componentes principales:

- Sistema generador basado en un circuito oscilador RC que se encarga de generar la señal para excitar a la espira.
- Sistema detector compuesto por un bucle de enganche de fase (PLL por sus siglas en inglés) encargado de detectar y procesar los cambios en frecuencia de la espira.
- Sistema de adquisición basado en un microcontrolador de tipo Arduino para capturar las señales procesadas por el PLL.

Esta fase también contempla la simulación de las características del campo magnético en función de las especificaciones de la espira. Se empleará un programa especial desarrollado en el Grupo de Investigación de Sistemas de Control de Tráfico.

3.3.2 Fase 2 (I). Correcciones.

Ahora bien, como se ha mencionado en el capítulo 3, el objetivo de este TFM es el desarrollo de un producto final capaz de ser comercializado. Para lograr este objetivo es necesario corregir primero las fallas del diseño original. Luego, una vez superadas será posible avanzar hacia la comercialización.

El primer tema por tratar es la inestabilidad del diseño. Cualquier cambio producido en cualquier parte del circuito, provoca la pérdida de sincronización entre el circuito generador de la espira y el circuito de detección. Este problema puede deberse a acoples o ruidos indeseados ya los dos sistemas se encuentran conectados entre sí directamente, sin ningún tipo de adaptación ni aislamiento.

El segundo tema es el tratamiento de la señal a la salida y la fiabilidad. El sistema de detección se encuentra conectado directamente al microcontrolador sin ningún tipo de adecuación ni aislamiento entre ambos. Cuesta mucho trabajo estabilizar el sistema y, cuando se comienza a medir, más del 50% de las veces los datos son erróneos. El otro 50% de las ocasiones, los datos requieren de un fuerte postprocesado en MATLAB para atenuar el ruido.

Así pues, para corregir estos fallos, se diseñarán e implementarán elementos u otros módulos para el desacoplo entre las distintas partes del sistema para la reducción del ruido, la mejora de la estabilidad/fiabilidad y la amplificación de la señal.

3.3.3 Fase 2 (II). Mejoras.

Como se ha mencionado en el Capítulo 2, los VMP son una gran alternativa a la movilidad en las grandes ciudades, ya que se encuentran saturadas de vehículos. En dichas ciudades, para controlar los flujos de circulación, se emplean reguladores de tráfico. Estos reguladores, se hallan en armarios a pie de calle y cerca de los cruces entre peatones, automóviles y, ahora, también VMP's. Por ello, el producto final, se debe diseñar para que pueda ser integrado en dichos armarios, ya que es, el lugar idóneo donde ya existe suministro eléctrico y también líneas de comunicaciones con el centro de control de tráfico.

Por otro lado, son muy pocas ciudades las que cuentan con un sistema de reguladores de tráfico. Por ejemplo, en el área metropolitana de Valencia, residen más habitantes que en la propia ciudad, y tienen también infraestructuras para VMP que conectan con las infraestructuras de la capital. Por esta razón, también es necesario diseñar un sistema que pueda funcionar por el mismo sin depender de un armario de regulación de tráfico.

Para lograr este objetivo, el sistema se ha concebido como una estructura modular, en la que, dependiendo de las necesidades del emplazamiento, se pueda realizar una instalación u otra.

3.3.3.1 Sistema integrado en regulador

En primer lugar, tenemos la situación de poder integrar el sistema en un armario regulador de tráfico. Las ventajas de trabajar en este entorno es que ya disponemos de una fuente de alimentación regulada para proveer de tensión a la electrónica. Por otra parte, el regulador ya se encuentra preparado para recibir datos de detectores de tráfico mediante una entrada serie 486.

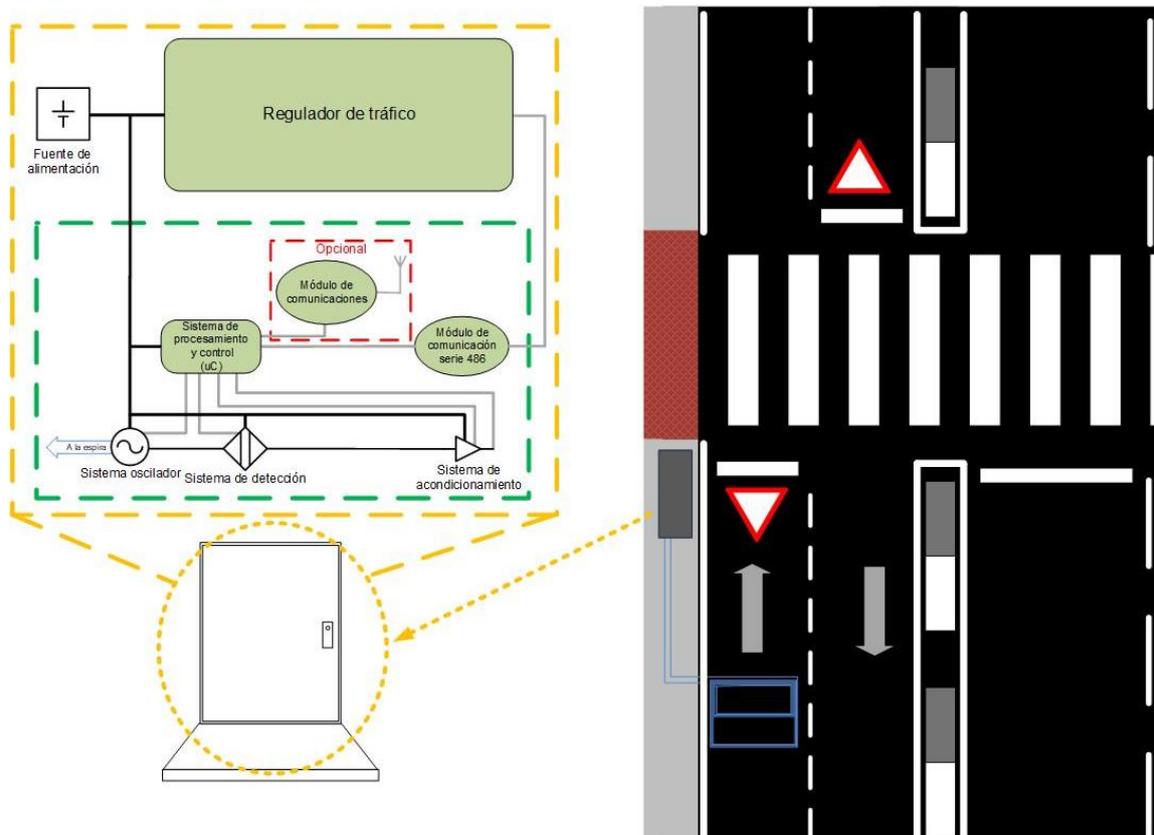


Figura 28. Sistema modular propuesto integrado en un armario regulador de tráfico.

En la imagen anterior podemos ver en verde la electrónica que debemos diseñar, la fuente de alimentación ya existe dentro del armario. Por este motivo, nuestro sistema no requerirá el diseño

de dicho componente, pero deberemos añadir un módulo de comunicaciones 486 y reprogramar el microcontrolador para transformar los datos en pulsos monoestables, interpretables por el regulador.

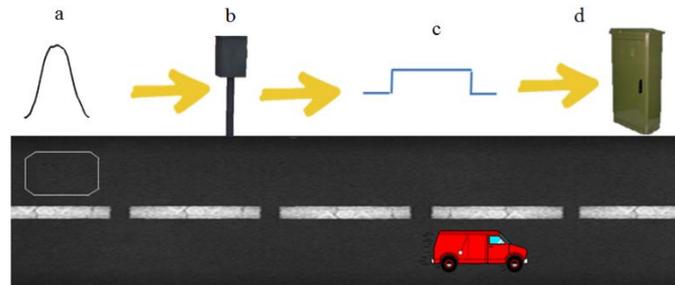


Figura 29. Conversión de un perfil magnético a un pulso monoestable.

3.3.3.2 Sistema independiente

Si, por el contrario, el sistema se desea instalar en una ciudad que no dispone de un centro de control de tráfico o, no hay un armario regulador próximo, se ha diseñado también un sistema completamente independiente. Ahora bien, en esta situación, se añade el diseño de una fuente de alimentación y, además, añadir un módulo de comunicaciones inalámbricas capaz de enviar datos al centro de control de tráfico.

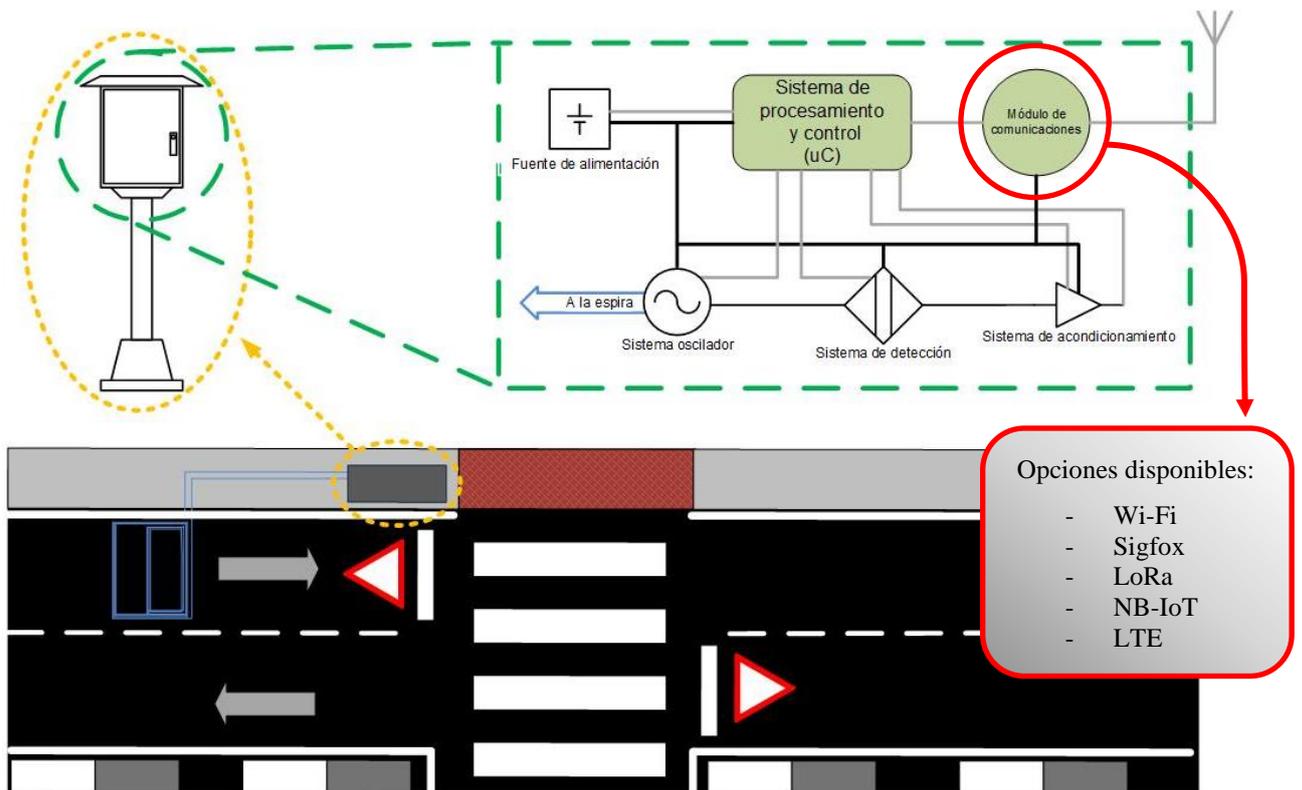


Figura 30. Sistema modular propuesto para una instalación en entornos sin infraestructura de reguladores de tráfico.

3.3.4 Fase 3. Fabricación del prototipo.

En el mercado, existen varias herramientas como OrCAD o Altium para el diseño, prototipado y verificación de esquemáticos y para fabricación de placas de circuito impreso (PCB).

Debido al ambicioso objetivo de no sólo fabricar un prototipo de un producto comercial, sino que también validar dicho producto en un periodo de 6 meses, no resultaba viable utilizar estas herramientas.

Para atajar esta situación, cada vez más común por ingenieros que necesitan un prototipo fabricado en el menor tiempo posible, existen plataformas denominadas de “prototipado rápido”. Una de estas plataformas es EasyEDA, creada por la empresa JLCPCB, fabricante de PCB’s y distribuidor de componentes electrónicos.

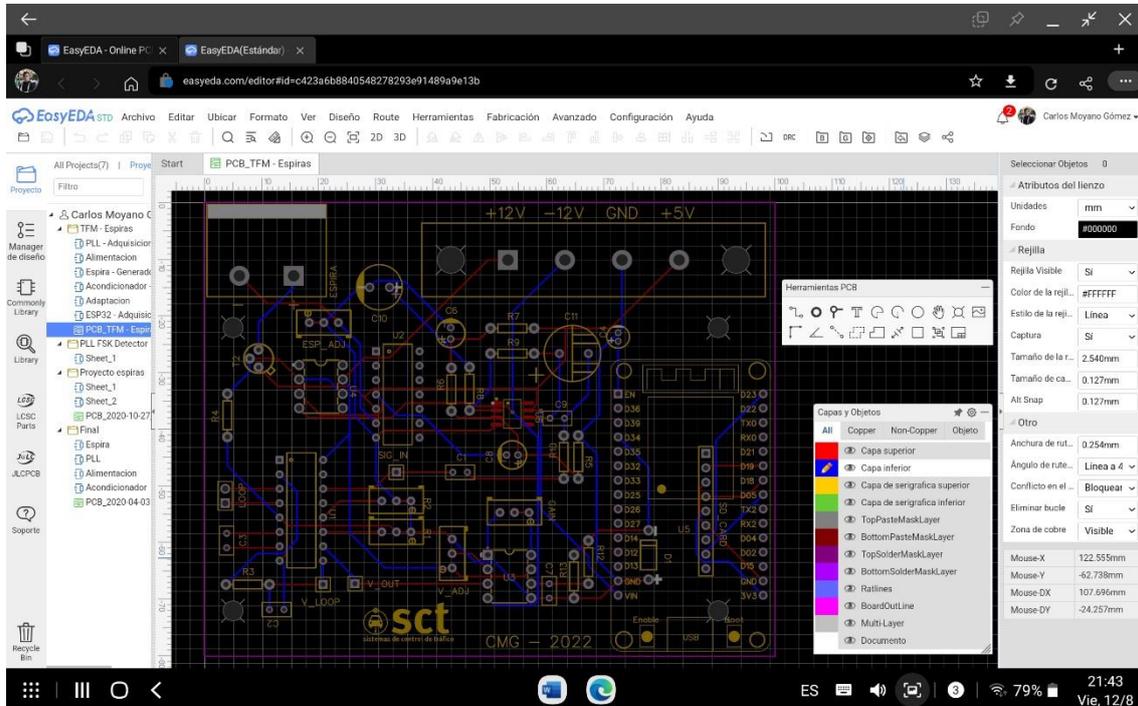


Figura 31. Interfaz de EasyEDA.

La plataforma EasyEDA se compone por un editor completo de esquemáticos con simulador y una herramienta de layout para generar, diseñar y rutar la PCB asociada. Además de su sencillez de uso, esta herramienta cuenta otros puntos fuertes:

1. Se ejecuta desde un navegador de internet y los proyectos se almacenan en la plataforma, por lo que se pueden acceder a ellos desde cualquier ordenador.
2. Los proyectos pueden ser accesibles por otros usuarios (previa invitación del creador) y así colaborar en el desarrollo del sistema.
3. La base de datos de componentes se encuentra siempre actualizada con fotografías del componente real y su huella para la PCB (footprint). Además, se puede acceder desde las propiedades del componente a la web de JLCPCB para consultar su hoja de datos, disponibilidad y precios.
4. Una vez finalizado el diseño de la PCB se puede enviar directamente el diseño para su fabricación, eliminando la necesidad de generar ficheros y de buscar un proveedor que fabrique las placas.
5. Del mismo modo, se puede realizar el pedido de los componentes usados en el diseño directamente desde la herramienta. No hay necesidad de agregarlos de uno en uno en la cesta, ni da cabida a cometer ningún fallo a la hora de realizar el pedido.
6. Si fuese necesario, se puede especificar que las PCB sean enviadas ya con los componentes montados y soldados.



Figura 32. Pedido de las PCB realizado a JLCPCB.

Todos y cada uno de los puntos anteriores conllevan una reducción sustancial de tiempo que se puede dedicar a la validación del sistema y, si fuese necesario, a volver a rediseñar y fabricar las PCB en un corto periodo de tiempo si se requieren cambios en la electrónica.

3.3.5 Fase 4. Pruebas y validación.

En el Capítulo 2, se habló de los distintos tipos de sistemas de movilidad urbana, dado que en el laboratorio sólo se disponía de un VMP, surgió la necesidad de obtener, al menos, cierta variedad de estos vehículos, incluyendo distintos modelos de patinete de tipología A y B, versiones modificadas, bicicletas convencionales y bicicletas eléctricas.

Por ello, se debió recurrir a una empresa de alquiler de bicicletas y otros VMP's para proveer al grupo de distintos vehículos y así poder realizar las pruebas.

La validación consistió en circular a distintas velocidades por encima de la espira doble y capturar los datos de salida del sensor para su posterior etiquetado y análisis. Para el análisis se empleó el entorno de MATLAB con la licencia académica de la Universitat Politècnica de València.

Los modelos probados fueron los siguientes:

- Bicicletas:
 - o Tipo trekking con matrícula 1047.
 - o Tipo paseo con matrícula 1072.



Figura 33. Bicicletas 1047 y 1072 respectivamente.

- Bicicletas asistidas/eléctricas (e-Bike):
 - o Discovery DA89 con matrícula 406.
 - o Legnano Anise con matrícula 401.
 - o Genérica de paseo + kit e-Bike con matrícula 410.



Figura 34. Bicicletas eléctricas 406, 401 y 410 respectivamente.

- Patinetes (scooters):
 - Xiaomi M365 sin matrícula (personal).
 - Xiaomi M365 + battery pack con matrícula 505.
 - Genérico con matrícula 516.



Figura 35. Patinetes M365, 505 y 516 respectivamente.



Capítulo 4. Desarrollo y diseño del sistema.

4.1 Fase 1. Recapitulación.

4.1.1 Sistema oscilador

En primer lugar, se revisa la electrónica necesaria para la generación de señales de la espira. Para este fin, se ha optado por diseñar un oscilador RL para construir una forma de onda cuadrada. El hecho de elegir una onda cuadrada es por su facilidad a la hora de trabajar luego con ellas. Además, el usar un diseño de un oscilador RL conlleva ciertas ventajas:

- Este tipo de osciladores son muy sencillos de implementar.
- Ajustando el valor de R, podemos variar la frecuencia a la que oscilará la espira.
- Es un diseño escalable, es decir, se pueden controlar múltiples espiras multiplexando la salida del oscilador.

El principio de funcionamiento del sistema reside en una puerta NAND Trigger-Schmitt. Esta puerta lógica tiene el siguiente comportamiento:

| A | B | OUT |
|---|---|-----|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

Tabla 3. Tabla de verdad de una puerta NAND.

Para generar la señal cuadrada, una de las entradas (**A**, por ejemplo) se conecta directamente al puerto de alimentación (en este caso 5V) con el objetivo de obtener siempre un nivel alto de señal. A continuación, la otra entrada (**B**) se destina a variar los niveles de tensión para así generar una onda cuadrada a la salida de la puerta.

Dado que la tensión depende de la inductancia, cuando un vehículo pasa por la espira, no sólo provoca un cambio en ésta, sino que también varía la tensión a la que se encuentre. Es en esta entrada donde se conecta la espira (inductancia L) en serie a un potenciómetro de valor R . Así pues, el valor que obtiene **B** estará condicionado a la tensión que circula por la espira y, por lo tanto, a su inductancia.

Para la implementación este oscilador RL, se utiliza el circuito integrado CD4093BE, que dispone de 4 puertas lógicas de tipo Trigger-Schmitt. El diseño sólo requiere el uso de una de ellas, dejando las otras 3 para, por ejemplo, poder escalar el sistema mono-espira a uno multi-espira. El resto de los componentes utilizados son los siguientes:

- Fuente DC de 5V.
- Potenciómetro de 1000 Ohmios como ajuste de la frecuencia.
- Una bobina de 120 μ H de inductancia que modeliza la espira.
- Transistor NPN BC107A como amplificador.

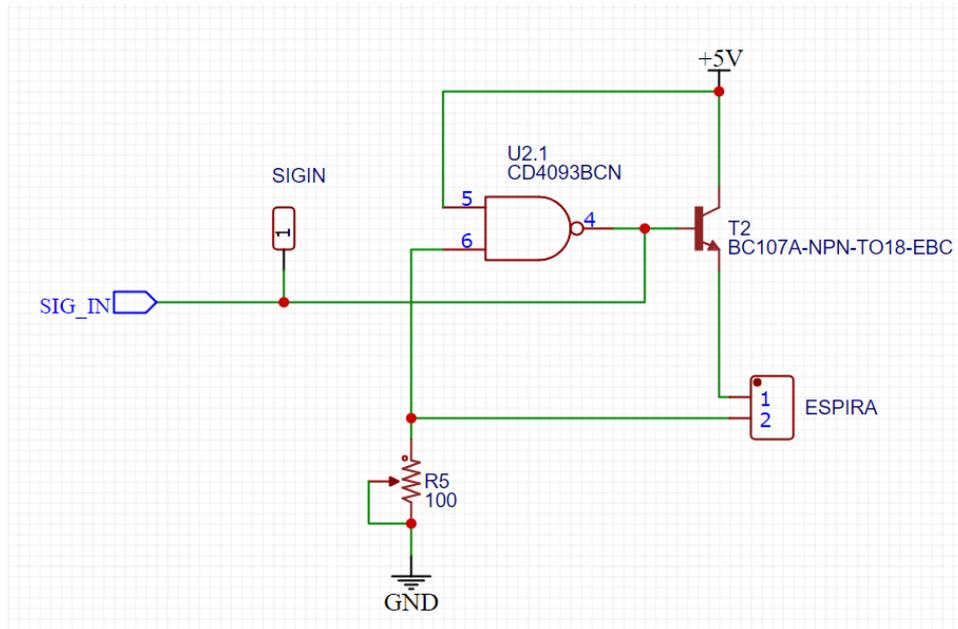


Figura 36. Implementación del oscilador RL.

Una vez realizado el montaje de la **figura 36**, se comprueba con el osciloscopio la señal en la base del transistor, que es la que provee al resto del sistema la información que se debe recopilar. De esta forma, y ajustando el valor de **R**, se genera una señal de 400 kHz en reposo, que se incrementa hasta los 410 kHz, cuando un VMP se sitúa encima de la espira.

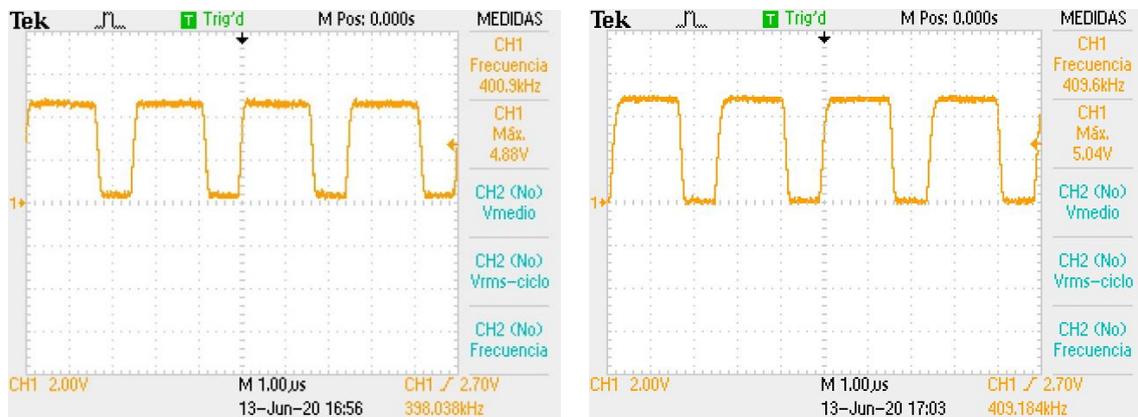


Figura 37. Valores de frecuencia de la espira sin VMP (izquierda) y con VMP (derecha).

4.1.2 Sistema de detección

El sistema de detección está basado en un bucle de enganche de fase (Phase-Locked Loop, PLL). El interior de este sistema alberga un oscilador controlado por tensión (Voltage Controlled Oscillator, VCO) y un detector de fase (Phase Detector, PD). Para diseñar este sistema, se siguen los pasos indicados por el fabricante en la hoja de datos del circuito integrado.

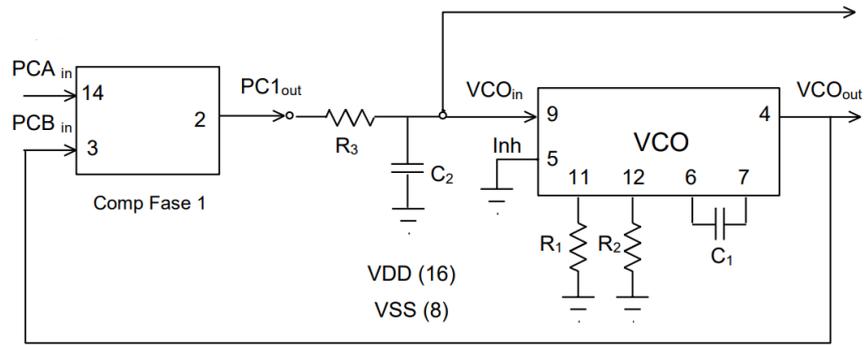


Figura 38. Diagrama del sistema de detección basado en un PLL.

4.1.2.1 Diseño del VCO

En el apartado anterior se establece una frecuencia base de 400 kHz que se incrementa hasta 410 kHz cuando un VMP pasa por encima de la espira. De modo que:

$$f_{\min} = 400 \text{ kHz} \quad f_{\text{M}\acute{\text{A}}\text{X}} = 410 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

Para asegurar que el PLL continúe funcionando aún si la frecuencia de la espira cae por debajo de los 400 kHz, se establece un margen inferior de 10 kHz. No es necesario establecer un margen superior ya que el sistema en reposo debe regresar siempre al intervalo establecido en la ecuación 5.2. Así pues, las frecuencias de diseño son las siguientes:

$$f_{\min} = 390 \text{ kHz} \quad f_{\text{M}\acute{\text{A}}\text{X}} = 410 \text{ kHz} \quad (5.2)$$

Además, se establece una tensión de alimentación de un valor estándar:

$$V_{DD} = 12V \quad (5.3)$$

En la hoja de datos del fabricante, se extraen las siguientes fórmulas para diseñar el VCO:

$$f_{\min} = \frac{1}{R_2(C_1+32pF)}; \quad f_{\text{M}\acute{\text{A}}\text{X}} = \frac{1}{R_1(C_1+32pF)} + f_{\min}; \quad (5.4)$$

Y, además, las condiciones que tienen que cumplir los valores de C_1 , R_1 y R_2 :

$$10 \text{ k}\Omega \leq R_1 \leq 1 \text{ M}\Omega; \quad 10 \text{ k}\Omega \leq R_2 \leq 1 \text{ M}\Omega; \quad 100 \text{ pF} \leq C_1 \leq 10 \text{ nF}; \quad (5.5)$$

Ahora, estableciendo valores para el condensador C_1 , se calculan distintos valores para las resistencias R_1 y R_2 .

Cálculo de Frecuencia del VCO

| f_{\min} | $f_{\text{M}\acute{\text{A}}\text{X}}$ | C_1 (pF) | R_1 (k Ω) | R_2 (k Ω) |
|------------|--|------------|---------------------|---------------------|
| 390 | 410 | 100 | 378,78 | 19,43 |
| 390 | 410 | 0,47 | 99,6 | 5,11 |
| 390 | 410 | 1000 | 48,44 | 2,48 |
| 390 | 410 | 220 | 22,40 | 1,15 |
| 390 | 410 | 470 | 10,56 | 541,86 |

Tabla 4. Valores teóricos obtenidos para el VCO.

En la tabla anterior, la fila sombreada en verde se corresponde con los valores que cumplen todas las condiciones de la hoja de datos para el diseño del VCO. No obstante, el fabricante informa que estas cifras son sólo de referencia, y que, en pruebas de laboratorio, los valores pueden incrementarse o reducirse por un factor de 4.

Efectivamente, después de montar el circuito con los valores teóricos, el VCO se encuentra oscilando a una frecuencia muy inferior a la prevista. Después de variar el valor de las resistencias y el condensador, se obtienen los siguientes resultados para el sistema diseñado.

CÁLCULO DE FRECUENCIA DEL VCO

| | f_{\min} | f_{\max} | C_1 (pF) | R1 (k Ω) | R2 (k Ω) |
|-------------------|------------|------------|------------|------------------|------------------|
| TEÓRICO | 390 | 410 | 100 | 378,78 | 19,43 |
| REAL | 390 | 410 | 22 | 443 | 198 |
| DESVIACIÓN | | | 2,2 | 1,17 | 10,19 |

Tabla 5. Comparativa entre los valores teóricos y los experimentales

4.1.2.2 Diseño del filtro paso bajo

El lazo de realimentación se considera una de las partes clave dentro de los bucles de enganche de fase ya que define el comportamiento que tendrá el sistema. Por este motivo, es crucial elegir un filtro que responda adecuadamente ante las variaciones de la señal a sincronizar. Un filtro con una frecuencia de corte distinta o que amortigüe fuertemente los cambios de frecuencia, provocará una respuesta indeseada y/o la pérdida de detecciones de VMP. Por estas razones es necesario diseñar correctamente la etapa de filtrado.

En primer lugar, se opta por usar un filtro paso bajo ya que es el más sencillo de todos y, debido a los resultados obtenidos, ofrece una buena respuesta para el sistema de detección.

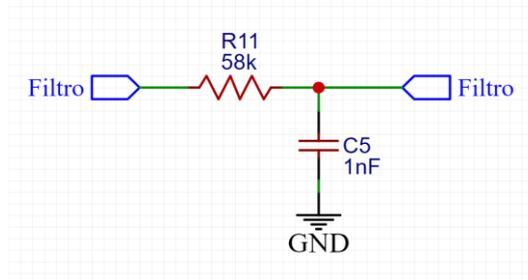


Figura 39. Esquemático del filtro paso bajo.

A continuación, para el diseño de los valores del condensador y de la resistencia, se toman los valores de las frecuencias a las que oscila la espira en reposo y cuando un VMP para por encima. Así, se obtiene el ancho de banda del filtro:

$$\Delta f_L = f_{M\acute{A}X} - f_{\min} = 410 \text{ kHz} - 400 \text{ kHz} = 10 \text{ kHz} \quad (5.6)$$

En la hoja de datos del CD4046, se recomienda un factor óptimo de amortiguamiento del filtro de $\xi = 0,707$. Con este valor, se calcula la frecuencia natural, que es la frecuencia donde acaba el rizado del filtro:

$$\Delta f_L = \pi \cdot \xi \cdot f_n \rightarrow f_n = 4,502 \text{ kHz} \quad (5.7)$$

Y, de ahí, se calcula la pulsación natural, necesaria para seguir con el diseño:

$$\Delta \omega_n = 2\pi \cdot f_n = 28286,9 \text{ rad/s} \quad (5.8)$$

La constante K_{VCO} da la relación entre el voltaje de entrada y la frecuencia de oscilación del módulo oscilador del PLL. Si se añade la constante K_ϕ del detector de fase, se obtiene la **relación entre la frecuencia de la espira y el voltaje a la salida del sistema de detección.**

$$K = K_{\varphi} \cdot K_{VCO} = \frac{V_{DD}}{\pi} \cdot \frac{2\pi \Delta f_L}{V_{DD}-2} = 24000 \quad (5.9)$$

La constante temporal del filtro paso bajo, se define como:

$$\tau = R_3 \cdot C_2 \quad (5.11)$$

Donde C_2 y R_3 son los valores de la resistencia y el condensador que son necesarios calcular. Fijando dicho valor a, por ejemplo, $C_2 = 1 \text{ nF}$, se calcula el valor de R_3 . Para ello, es necesario conocer el valor de τ . Para ello, usando las siguientes relaciones:

$$\xi = \frac{\omega_n}{2 \cdot K} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau}} \quad (5.12)$$

Finalmente, los valores del filtro son:

$$R_3 = 20.84 \text{ k}\Omega \quad C_2 = 1 \text{ nF} \quad (5.14)$$

Una vez diseñado la etapa de filtrado y el oscilador VCO, se procede al montaje del sistema PLL. Así pues, las señales de salida de la espira y del VCO se introducen a los pines 14 y 2 respectivamente. El CD4046 cuenta con dos detectores de fase basados en puertas XOR con distintas respuestas dentro del mismo integrado. Para este diseño se utiliza la primera de ellas, por lo que la señal de salida de la puerta XOR es por el pin 2.

Finalmente, queda por conectar el filtro, siguiendo el diagrama de la figura 41, la salida de la puerta XOR debe conectarse al filtro y, por último, a la entrada del oscilador VCO (pin 9).

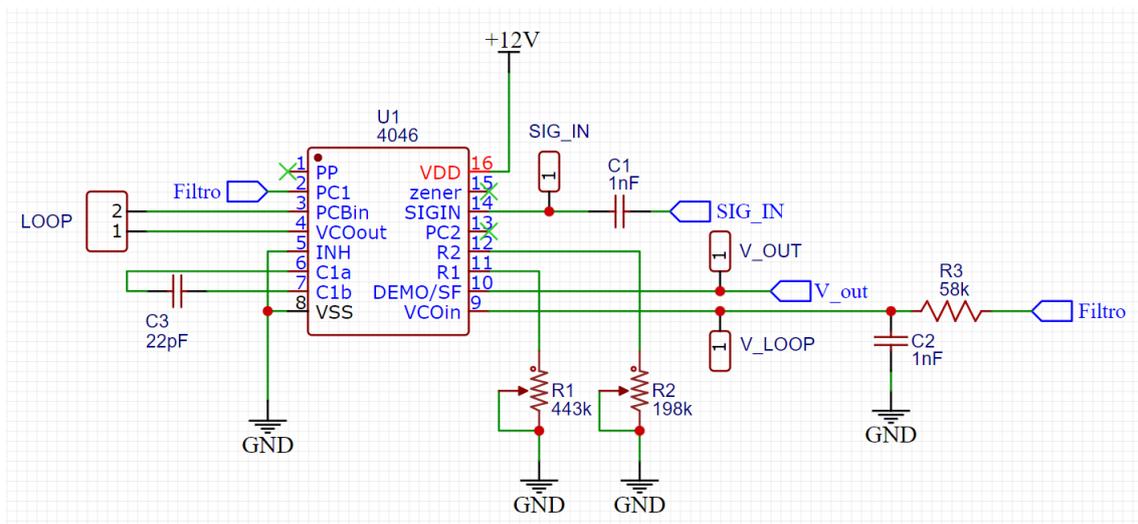


Figura 40. Diseño final del sistema de detección.

4.1.3 Montaje del sistema

Diseñados los sistemas de oscilación y detección, se puede ahora montar el circuito completo. La salida del módulo oscilador de la espira se corresponde con la salida de la puerta lógica, justo antes de entrar en la base del transistor. De esta forma se obtiene una señal libre de ruido y se desacopla el PLL de la salida de la espira.

Esta señal se inyecta al pin 14 del PLL usando, además, un condensador de desacoplo de 1nF entre ambos sistemas. Así pues, el diseño queda como se muestra en la **figura 41**.

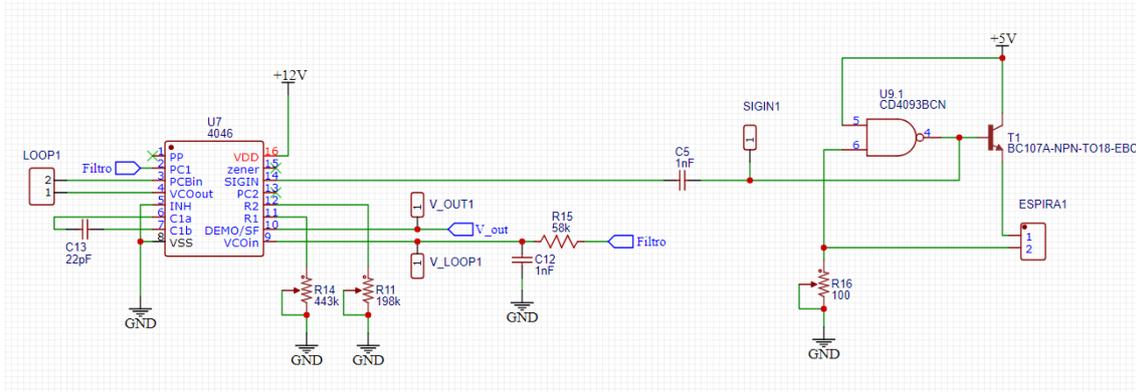


Figura 41. Diseño completo del sistema.

Finalmente, se comprueba con el osciloscopio que el sistema de detección se sincroniza con el sistema de oscilación. En la **figura 42** se ve cómo, en efecto, la señal del canal 2 correspondiente al PLL, se encuentra sincronizada (con un desfase de 90° tal como explica en la hoja de datos del CD4046) con la señal del canal 1, correspondiente a la señal de la espira.

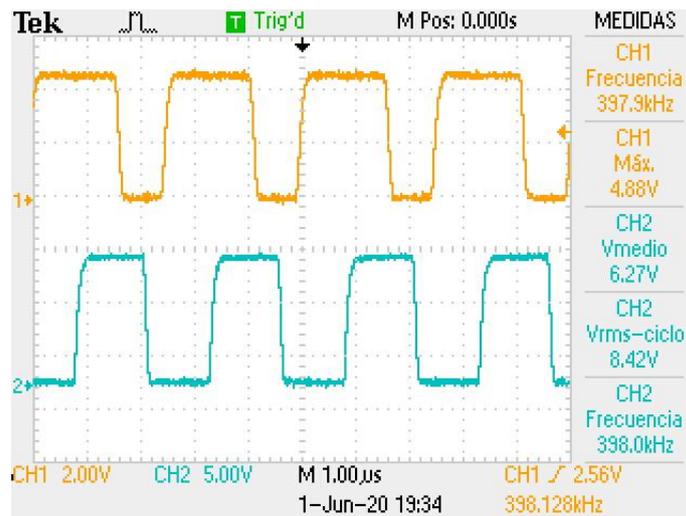


Figura 42. Sincronización de señales de la espira (en naranja) y del PLL (en azul).

4.2 Fase 2. Correcciones y mejoras.

El diseño anterior fue concebido como una prueba de concepto, es decir, una implementación sencilla y en un entorno muy controlado y óptimo (laboratorio) de la viabilidad de las ideas y conceptos desarrollados teóricamente.

Ahora bien, este sistema se caracteriza por:

- Su inestabilidad a la hora de introducir cambios o mejoras en el circuito. El sistema PLL pierde su sincronización ante el más mínimo cambio en cualquier elemento del circuito.
- Su poca fiabilidad en el funcionamiento. Cuando se consigue estabilizar y sincronizar el circuito y se toman lecturas de un VMP, existe una probabilidad de un 50% o más, de que estas medidas sean erróneas. En otras palabras, el circuito se encuentra sincronizado, pero no reacciona ante los cambios de frecuencia.

- Su nula inmunidad al ruido. Las señales obtenidas por el ADC (cuando las medidas son las correctas) se encuentran saturadas de ruido. Este problema se encuentra altamente relacionado con el anterior.
- Su baja amplificación de la señal de la espira. Ahora mismo el bucle se encuentra a poca distancia de la electrónica, pero, en una instalación real, puede haber hasta 5 metros o más de distancia entre el sensor y la calzada. El oscilador genera una corriente muy baja por lo que, la señal, ante una tirada larga de cable, se distorsiona o no alcanza los 400 kHz.

Así pues, y siguiendo la filosofía modular del sistema, se diseñarán o mejorarán los módulos correspondientes para:

- Adaptar los sistemas de generación (espira) y detección (PLL).
- Amplificar la señal del sistema de generación.
- Adecuar y tratar la señal de salida del sistema de detección para que sea correctamente adquirida por el ADC.

4.2.1 Adaptación entre generador y detector

El primer problema para resolver es el conexionado entre los módulos de generación y adaptación. Las características deseadas de este sistema son:

- Alta impedancia de entrada para no interferir con el sistema de generación.
- Baja impedancia de salida para entregar una señal fuerte y estable al sistema de detección.
- Bajo ruido a la salida. La espira puede recibir interferencias de canalizaciones de energía, telecomunicaciones u otros factores. Por este motivo, es necesario filtrar la señal antes de que entre al sistema de detección.
- Proporcionar ganancia. En el caso de que la señal recibida sea débil o esté distorsionada, este módulo deberá ser capaz de regenerar la señal.

Para obtener estos resultados, se parte del clásico diseño de un transistor BJT y 4 resistencias y una configuración de colector común. Esta topología se caracteriza por cumplir con los requisitos deseados que se han descrito anteriormente, pero proporcionando una ganancia de señal de 1. En la **figura 43** se puede ver el diseño que se realizó.

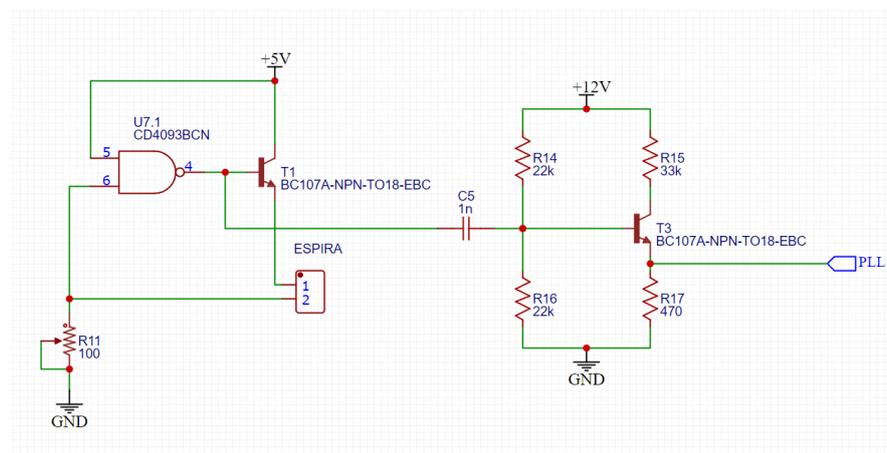


Figura 43. Sincronización de señales de la espira (en naranja) y del PLL (en azul).

Tal y como se puede observar, el módulo se emplaza ente los sistemas de generación y adquisición, inyectando la señal de la espira por la base del BJT y conectando el emisor a la entrada del PLL.

Aunque teóricamente, el diseño debería funcionar, no fue así. El “4 resistencias” resultó interactuar con el BJT del circuito de generación provocando una distorsión tanto en la señal que se envía a la espira, como en la que se envía al sistema de detección. Esto provocaba que el PLL no lograra sincronizarse con el sistema de generación.

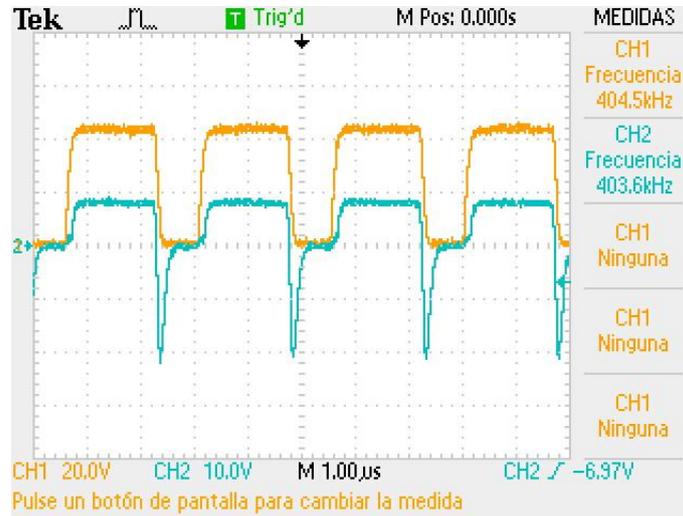


Figura 44. Distorsiones provocadas por la configuración “4 resistencias” (azul).

Por este motivo, se opta por reemplazar el “4 resistencias” por un seguidor de tensión basado en un operacional. Esta configuración ofrece todas las características que se desean obtener con el BJT pero, esta vez, con un mejor diseño y funcionamiento. Esta vez, se opta por usar el clásico UA741 para el montaje del módulo de adaptación.

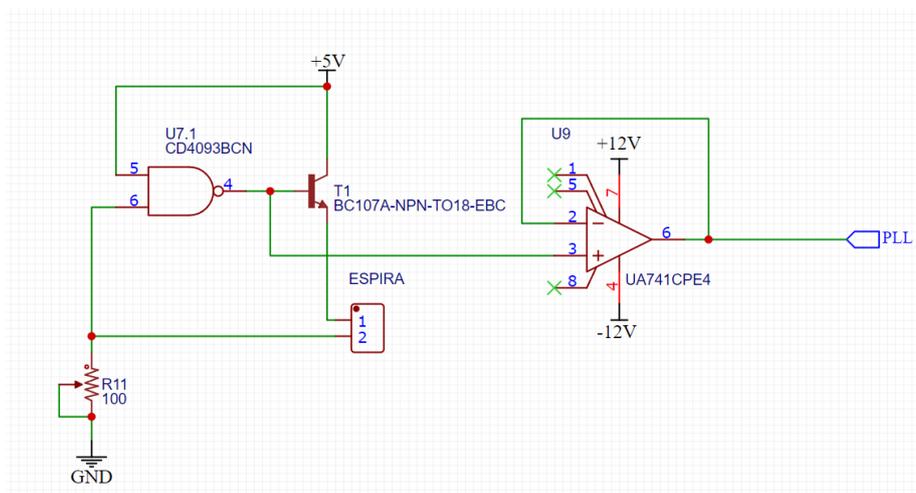


Figura 45. Sincronización de señales de la espira (en naranja) y del PLL (en azul).

Aun así, no se obtuvieron los resultados esperados. Se consigue extraer la señal del circuito generador sin afectar a su funcionamiento, pero, debido a limitaciones del CI usado, la señal de salida de la etapa de amplificación sale distorsionada.

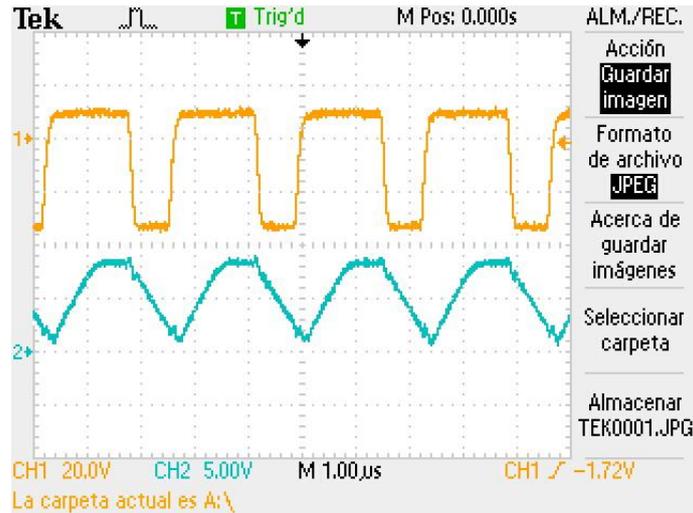


Figura 46. En naranja, señal a la entrada del AO. En azul, señal deformada a la salida del AO.

Esto es debido a que el UA741 no cumple las especificaciones de Slew-Rate para las frecuencias que maneja el sistema, provocando una señal “trapezoidal” a su salida en lugar de una señal cuadrada similar a la entrada.

Por este motivo, se decide buscar un operacional con unas características mejoradas respecto al CI utilizado anteriormente ya que se había logrado extraer la señal sin afectar a la espira. Por ello, se prueba esta vez con el AD8051, un amplificador operacional de alta velocidad y se configura también como seguidor de tensión.

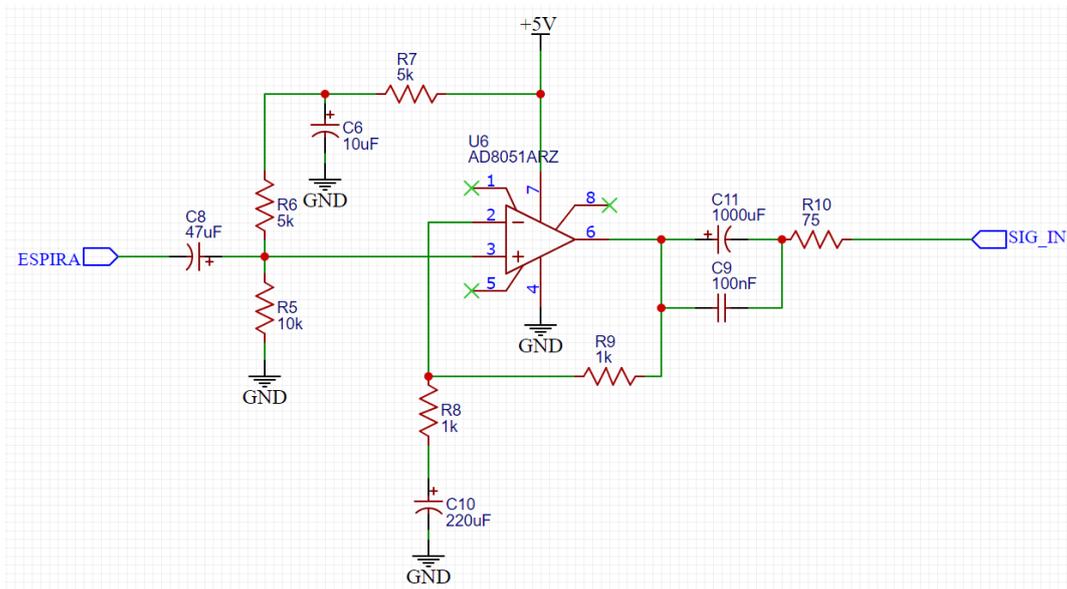


Figura 47. Módulo de adaptación basado en el AD8051.

Una vez montado el circuito, y conectadas las entradas y salidas, y se comprobó que, efectivamente, las señales de entrada y salida eran idénticas. Esto supuso que el sistema de detección consiguiese, por fin, sincronizarse con la señal proveniente del sistema de generación.

4.2.2 Amplificación de señal

En este punto, en el que se han mejorado considerablemente la robustez y estabilidad del sistema, se decide montar un nuevo entorno de pruebas en laboratorio para asemejarse lo más posible a una instalación real. Anteriormente se había usado un cable trenzado de 1,5 metros para el conexionado entre la espira y la electrónica. Esto no es realista ya que, en una instalación real, el sensor puede distar varios metros del armario del regulador.

Por esta razón, se sustituye este cable por uno idéntico, pero de unos 5 metros de longitud. Realizada la modificación, se vuelven a realizar pruebas, obteniendo la siguiente señal en la espira:

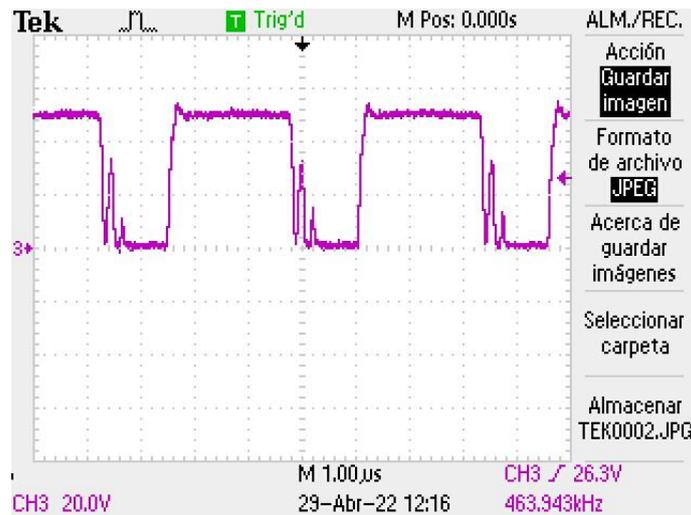


Figura 48. Espurios obtenidos en la señal de excitación de la espira.

Como podemos observar, la señal se distorsiona de tal manera al acercarse a los 400 kHz, que el osciloscopio da un valor erróneo de 468 kHz y resultándole imposible establecer un nivel disparo para ver la señal estable. Gracias a la función de imprimir pantalla, se pudo obtener una imagen estática (*figura 48*) para ver qué tipo de distorsión sufría la señal.

En el punto 4.1.1 se explica que el valor del potenciómetro **R** que controla la frecuencia de oscilación y ésta son directamente proporcionales, es decir, a mayores valores de **R**, se obtienen mayores frecuencias de oscilación.

Esto genera un problema ya que, si **R** es modificada, el punto Q del transistor es modificado también. Entonces, al aumentar la longitud del cable, aumenta la resistencia equivalente que ofrece la espira que, añadido al potenciómetro, hace que el transistor salga de la zona lineal de trabajo (punto Q) para pasar a un estado de saturación, en donde no funciona correctamente.

Para solucionar el problema, se decide aumentar la corriente en la base del transistor, desplazando la zona lineal para así conseguir alcanzar los 400 kHz con valores más altos de **R**.

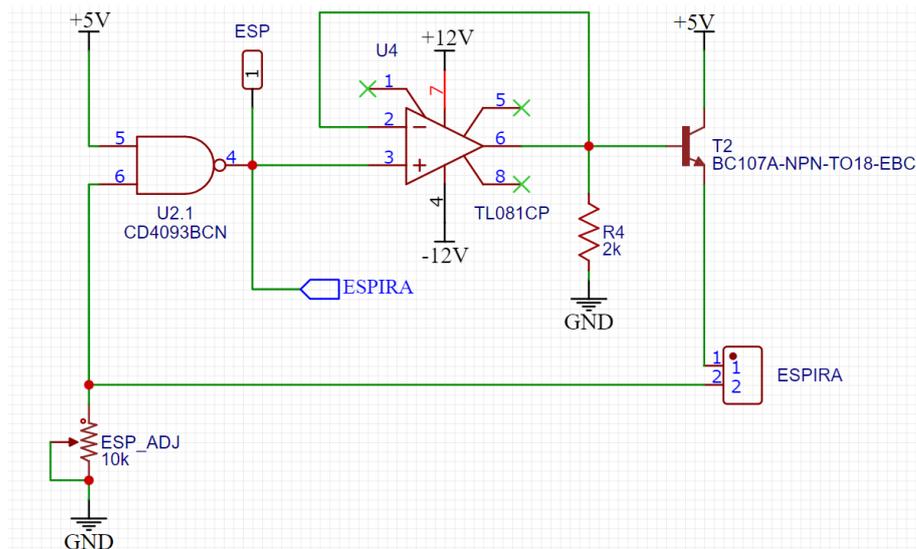


Figura 49. Búfer de corriente entre la puerta lógica y el transistor.

En la **figura 49**, para aumentar la corriente en la base del transistor, se opta por un amplificador operacional en modo seguidor de tensión (búfer de corriente). De esta manera, conseguimos no desestabilizar el sistema (impedancia de entrada elevada) y obtener una corriente más alta a la salida (impedancia de salida baja).

4.2.3 Tratamiento y adquisición de la señal a la salida del detector

4.2.3.1 Sistema de adquisición

En el mercado actual se pueden elegir entre una gran variedad de sistemas de adquisición como, convertidores Analógico-Digitales o plataformas basadas en microcontroladores o microprocesadores. En este último campo, está claro que el rey indiscutible sigue siendo la plataforma Arduino. Gracias a su versatilidad, su amplia comunidad e incluso el soporte de grandes fabricantes electrónicos, ha conseguido convertirse en todo un estándar industrial. Por estas razones, utilizaremos para este prototipo una plataforma basada en Arduino, más concretamente el MCU ESP32.

4.2.3.2 Tratamiento de la señal

Si se miden los niveles de tensión a la salida del detector, se obtienen con valores que oscilan entre los 5,8 y 6 Voltios aproximadamente cuando la espira está en reposo (400 kHz). Esto tiene sentido ya que, si el PLL está correctamente diseñado, la hoja de datos anuncia que a la salida obtendremos la mitad del valor de alimentación del CI ($V_{dd}/2$ siendo $V_{dd} = 12V$).

En el punto anterior se menciona que el ADC del ESP32 muestrea valores entre 0 y 3.3V, por lo que, los niveles del sistema en reposo ya saturan el ADC. Por otra parte, después de realizar varias pruebas con un VMP, las variaciones de tensión a la salida resultan ser del orden de milivoltios. En concreto, al paso de un patinete, los niveles de tensión resultaron aumentar apenas 10 mV, lo que lleva a la necesidad de amplificar estas variaciones para mejorar la calidad de las medidas.

Así que se necesitará:

- Restar un valor constante de tensión para estar dentro de los límites del ADC.
- Amplificar las variaciones de 10 mV para poder usar, a ser posible, todo el rango de medida que nos proporciona el ADC.
- Reducir ruidos y acoples si fuese necesario.

Para conseguir estos objetivos, se decide usar un amplificador de instrumentación. Estos circuitos integrados disponen de 3 amplificadores operacionales y son muy útiles cuando se requiere una ganancia elevada y una gran inmunidad al ruido.

Por ello, se utiliza el CI AD620 de la empresa Analog Devices, un amplificador de instrumentación integrado del que sólo requiere diseñar la resistencia R_g para establecer el valor de ganancia del sistema. El montaje realizado es el siguiente:

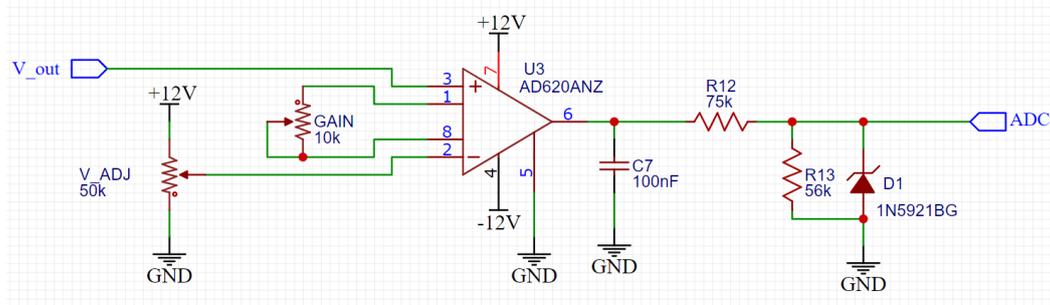


Figura 50. Módulo de tratamiento de la señal basado en el AD620.

Como se observa en la **figura 50**, la señal que proviene del sistema de detección se conecta a la entrada positiva del AI (pin 3). A continuación, para conseguir que los niveles de voltaje entren dentro del rango del ADC, se conecta a la entrada inversora (pin 2), un divisor de tensión. Dicho divisor se consigue con un potenciómetro de 3 pines, para conseguir un nivel de tensión nulo a la salida del sistema.

Por último, se conectan los pines que establecen la ganancia (1 y 8) a otro potenciómetro, con el objetivo de variar ésta según las condiciones lo requieran.

Como añadido, a la salida del AI, se coloca un pequeño filtro con el objetivo de estabilizar la salida y un sistema de protección basado en un diodo Zener para proteger al ADC de posibles sobretensiones.

4.3 Fase 3. Fabricación

Llegado el proyecto a este punto, no resulta fiable realizar pruebas con el prototipo montado en la placa de prototipado. Esto es debido a que las conexiones se realizan con cables y son propensas a soltarse, provocando malfuncionamientos e incluso cortocircuitos. Además, de que la placa de prototipado introduce ruidos no deseados.

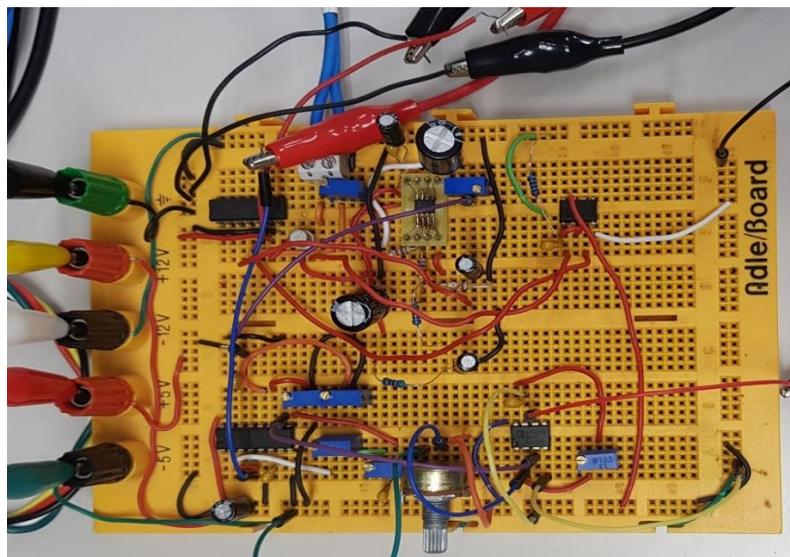
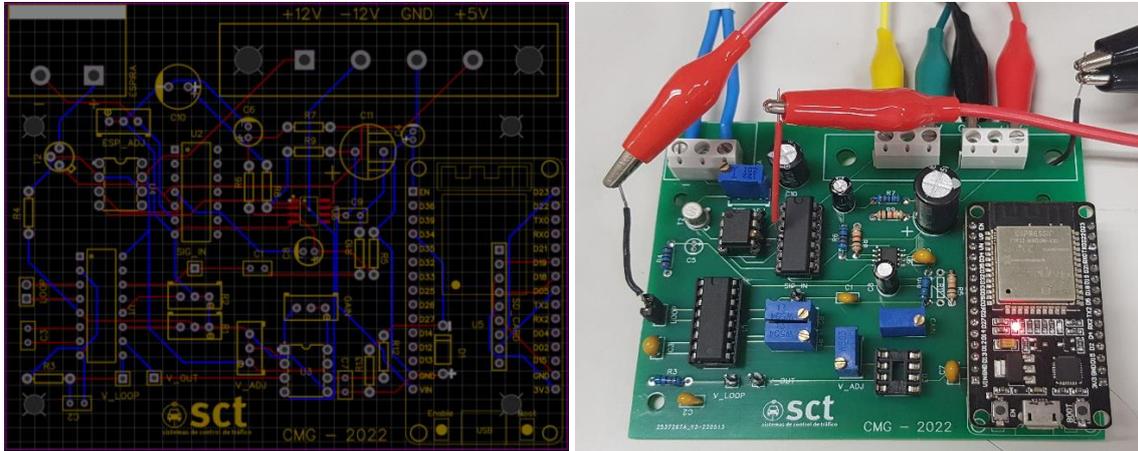


Figura 51. Sistema final montado en placa de prototipado.

Expuesto a estos motivos y, una vez probado el correcto funcionamiento de todos los módulos, se pueden empezar a introducir los esquemáticos en una de las varias herramientas de diseño que existen en el mercado para poder fabricar una placa de circuito impreso.

Una vez introducidos los esquemáticos que se han mostrado en las fases 1 y 2, se procede a realizar el layout y diseño de la PCB.



**Figura 52. (Izquierda) Layout de la PCB
(Derecha) PCB fabricada y con componentes instalados**

4.4 Fase 4. Validación y pruebas.

4.4.1 Preparación

En el punto 3.2.1 se muestra por primera vez en el documento la espira diseñada y fabricada para la detección de VMP's. Dado que este sensor irá enterrado en la calzada y que los cambios en su geometría pueden afectar seriamente a la detección, surgió la necesidad de crear una estructura que asegurase:

1. Simular lo máximo posible las condiciones de una instalación real.
2. Mantener la geometría rectangular de la espira, evitando deformaciones al paso de VMP's.
3. Facilitar la fabricación de más espiras.

Además, para la conexión entre la espira y la electrónica, se ha utilizado un cable trenzado de unos 15 metros aproximadamente para simular, todavía más, el entorno de una instalación real.

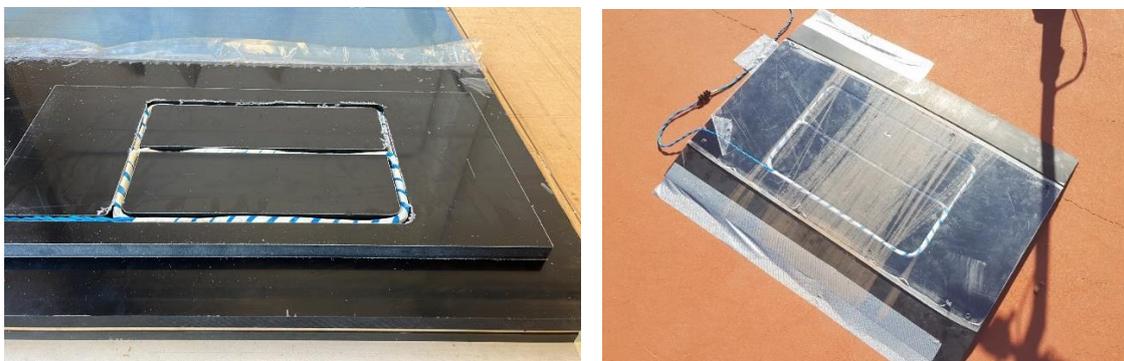


Figura 53. Estructura de metacrilato para el montaje de la espira.

4.4.2 Pruebas en entorno de laboratorio

Junto a la parte de pruebas en entorno de laboratorio, se valida al mismo tiempo la PCB fabricada. Para ello, se debe comprobar que cada módulo y sección de la placa, funciona según lo obtenido en el sistema montado en la placa de prototipado.

Para ello, y habiéndolo tenido en cuenta previamente, se diseñó la PCB con pines de prueba en puntos cruciales del sistema con el objetivo de poder conectar cables y sondas para testear el funcionamiento de la placa. En la **figura 54** se puede observar la PCB con los elementos de prueba conectados a ella.

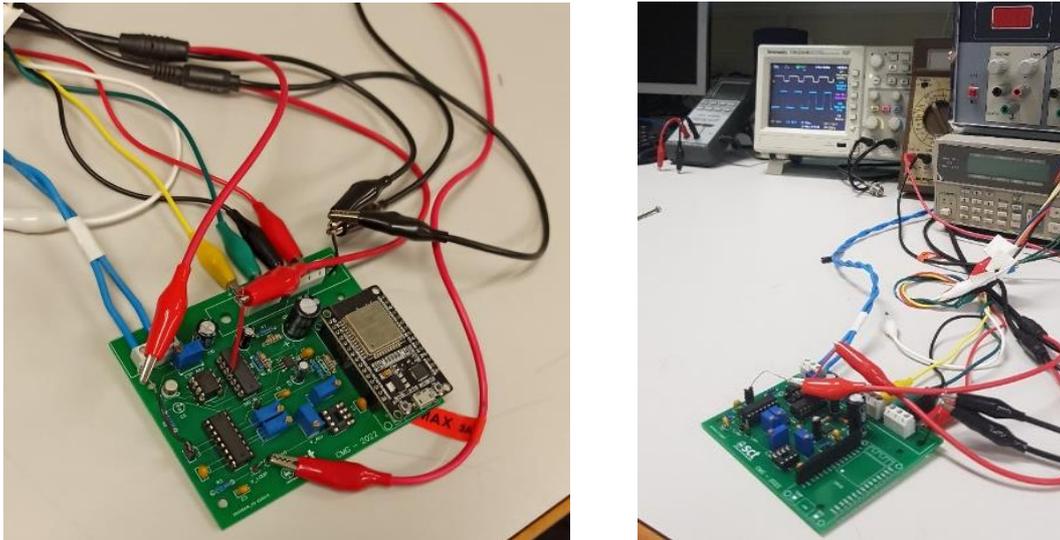


Figura 43. Comprobación, mediante puntos de prueba, del funcionamiento de la PCB.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del sistema en reposo, las pruebas consisten en lo siguiente:

1. Medir el nivel de tensión obtenido por el sistema sin ningún VMP circulando por encima.
2. Identificar qué parte o partes de cada VMP devuelven el valor de tensión más alto a la salida del sistema, situando el vehículo encima de la espira.
3. De los modelos enumerados en la introducción del punto 4.4, se han seleccionado un modelo de cada familia de VMP según su estructura o que puedan generar un perfil magnético distinto.
4. Realizar varias pasadas a distintas velocidades de la misma selección de VMP mencionada anteriormente. Gracias a la asimetría en dimensiones y en número de vueltas, se puede diferenciar el sentido de circulación, para ello, para cada pasada de velocidad, se realizará otra más en sentido contrario. Así pues, se obtienen 2 pasadas para cada velocidad.
5. Debido al poco espacio disponible en el laboratorio, las velocidades probadas serán bajas, dejando las altas (y repitiendo las bajas) para las pruebas en entorno real.

4.4.3 Pruebas en entorno real

Conforme a los resultados obtenidos en el entorno controlado de laboratorio, se procede a las pruebas en un entorno real. Dentro de las instalaciones de la UPV, se usará una calle con poco tráfico para instalar el sistema. En la **figura 44** se puede ver el entorno de pruebas listo para realizar las pasadas.



Figura 44. Montaje del sistema en entorno real.

Al igual que en el entorno de laboratorio, se planificaron las pruebas a realizar. Aun así, se redujeron a simplemente realizar la misma metodología de pasadas por encima de la espira a diferentes velocidades, tanto bajas como altas.

Por otra parte, resulta inviable cargar con la fuente de alimentación regulada del laboratorio, la cual es pesada y no asegura unas conexiones fiables. Por este motivo se decide sustituirla por una fuente ATX de PC común que entrega los voltajes necesarios para el sistema y resulta más pequeña debido a que es una fuente de alimentación conmutada y no regulada.

El inconveniente de estas fuentes es que pueden introducir señales (armónicos) y ruidos de alta frecuencia debido a su naturaleza, por ello, se decide separar el sistema de adquisición (Arduino) e instalar un nuevo filtro paso bajo para obtener unas lecturas limpias. En la **figura 46** se puede ver el sistema con la nueva fuente y las modificaciones realizadas.



Figura 45. Montaje del sistema en entorno real.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Simulaciones

En primer lugar, se realizan una serie de simulaciones y modelizaciones para establecer una base sobre qué clase de perfiles magnéticos se esperan conseguir con el sistema de detección. Para ello, primero se ha seleccionado para realizar las pruebas el scooter de Xiaomi, concretamente el modelo M365.

Gracias al trabajo previo que realizó el grupo de Sistemas de Control de Tráfico del Instituto ITACA, es posible realizar una modelización y simulación del VMP en el entorno de MATLAB. Para ello, primero se deben introducir gálibos, secciones a dividir y velocidad de paso del VMP, así como las dimensiones, número de vueltas y alimentación de la espira.

The screenshot shows a MATLAB/Simulink interface window titled "Interfaz". It is divided into several sections for configuring simulation parameters:

- Características de la espira:** Includes input fields for "Lado negativo X: a (m)" (0.14), "Lado positivo X: d (m)" (0.18), "Semilado eje Y: b (m)" (0.24), "Radio del cable (m)" (0.00075), "Separación entre vueltas (m)" (0.0019), "Intensidad (A)" (0.1), "Número de vueltas (N1)" (8), "Número de vueltas (N2)" (8), " μr " (1), "Número de puntos para el cálculo numérico de L (X)" (401), "Número de puntos para el cálculo numérico de L (Y)" (401), and a radio button for "¿Campo magnético en fase?" (selected "Sí").
- Opciones:** A grid of buttons for "Valores predefinidos", "Valores anteriores", "Guardar resultados", "Vista vehiculo 2D", "Eliminar vehiculos", "Campo en 3D", "Vista vehiculo 3D", and "Vista de espira y 3D".
- Características del oscilador:** Includes input fields for "Vcc (V)" (4.4), "VTH (V)" (1.8), "VTL (V)" (0.95), and "R (Ω)" (15).
- Características del vehículo:** Includes input fields for "Coordenadas iniciales del vehículo (X0, Y0, Z0)" (1, 0, 0.015), "Coordenadas finales del vehículo (Xf, Yf, Zf)" (-1, 0, 0.015), "Velocidad del vehículo (Km/h)" (15), "Puntos para el cálculo" (101), and "Extraespira representada (%)" (0). It also features a "Caracterizar vehículo" button, a checked "Vehículo caracterizado" checkbox, and a "Se está simulando con el vehículo:" dropdown menu set to "Patinete_M365".
- Buttons:** A large blue "Comenzar simulación" button, an "Estado de cálculo" dropdown menu set to "Finalizado", and a red "Salir" button.

Figura 46. Parámetros de simulación.

A continuación, se deben especificar los límites de movimiento del vehículo y la posición donde empieza y acaba la geometría de la espira. El resto de los parámetros pueden dejarse con los valores recomendados. Una vez introducidos todos los datos requeridos, se lanza la simulación.

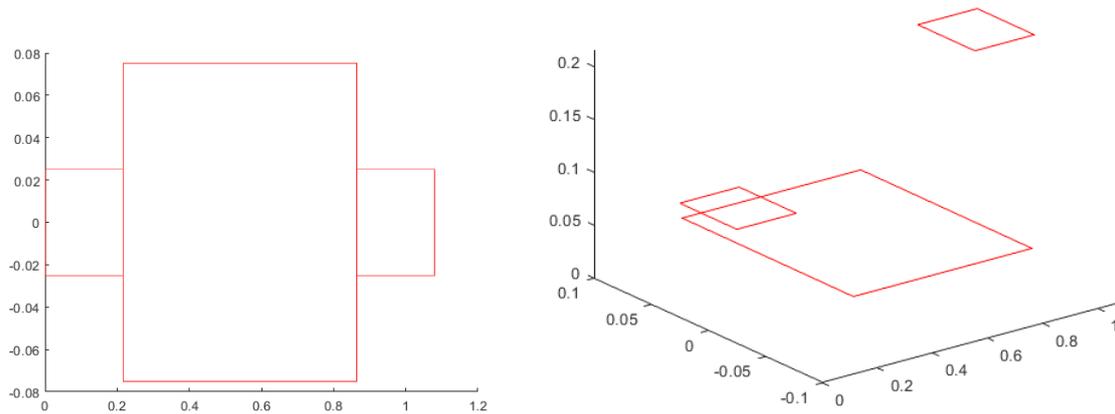


Figura 47. Modelización del Xiaomi M365 en 2D y 3D.

En la **figura 47**, se observa primero la modelización realizada por MATLAB del VMP. Esta representación se basa simplemente en planos metálicos de distintas dimensiones y colocados en diferentes distancias (altura) de la espira, que se encuentra en el plano XY.

El número de planos depende de las secciones en las que hayamos dividido el VMP para modelizarlo y, la distancia al plano XY representa la distancia de estas secciones a la espira: una distancia pequeña provocará una mayor perturbación en el campo magnético y, por lo tanto, una curva con pendiente más pronunciada.

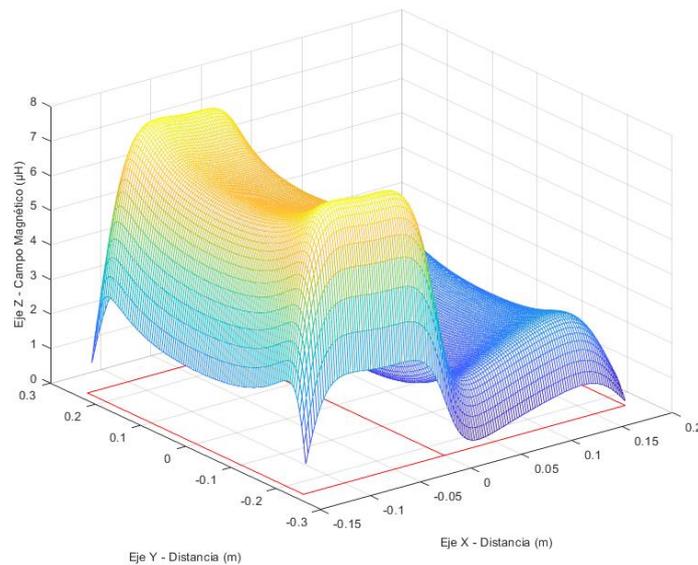


Figura 48. Modelización del Xiaomi M365 en 2D y 3D.

Por otro lado, en la **figura 48** se observa el campo generado por la espira doble. En ella, se aprecia como tenemos un campo magnético mucho más intenso en las zonas donde las vueltas de las 2 sub-espiras coinciden, proporcionado así 16 vueltas en total. En la zona donde sólo se tienen 8 vueltas, el campo generado es menor. Esta distribución desigual es la clave para obtener el sentido de circulación del tráfico.

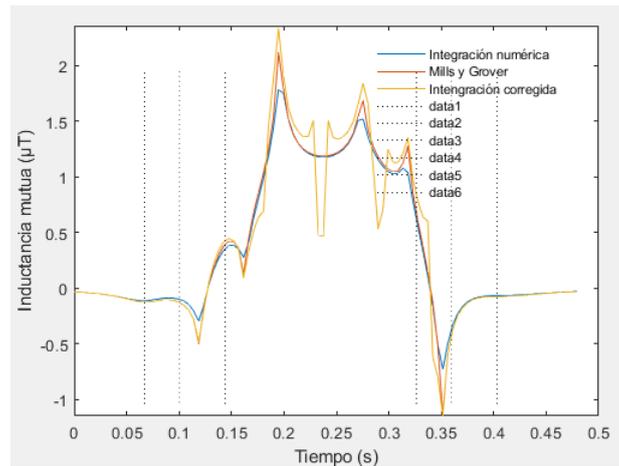


Figura 49. Perfil magnético obtenido por la simulación.

Finalmente, en la **figura 49**, se realiza también el cálculo del perfil magnético que obtiene el VMP modelizado al circular por encima de la espira. En ella, se observa cómo se tiene un primer “lóbulo” que se corresponde a la primera parte del VMP donde se encuentran el motor y la estructura del manillar y, luego, una “meseta” correspondiente a la base del vehículo.

Con esta simulación, se obtiene una base aproximada de lo que se espera obtener en las pruebas en entorno real. Dado que se ha obtenido este perfil modelizando ciertas partes de un patinete, es de esperar que estas partes se puedan ver reflejadas en los perfiles magnéticos.

Por ello, en los resultados en entorno real, se explicarán las afecciones provocadas al campo electromagnético de la espira, provocadas por las partes que tienen alta probabilidad de ofrecer resultados significativos: llantas de las ruedas, cuerpos metálicos, compartimentos de baterías...

Por otra parte, y como aclaración, los gráficos presentados en las siguientes páginas muestran dos curvas distintas:

- Curvas azules. Se corresponden con los datos en crudo, es decir, los datos que entrega el sistema a su salida y que son captados con el ordenador.
- Curvas naranjas. Representan los datos procesados en MATLAB. Para “limpiar” las muestras obtenidas, se ha utilizado un filtro de media móvil de 3 muestras que reduce el ruido y suaviza las curvas.

5.2 Resultados de las pruebas

5.2.1 401 interior

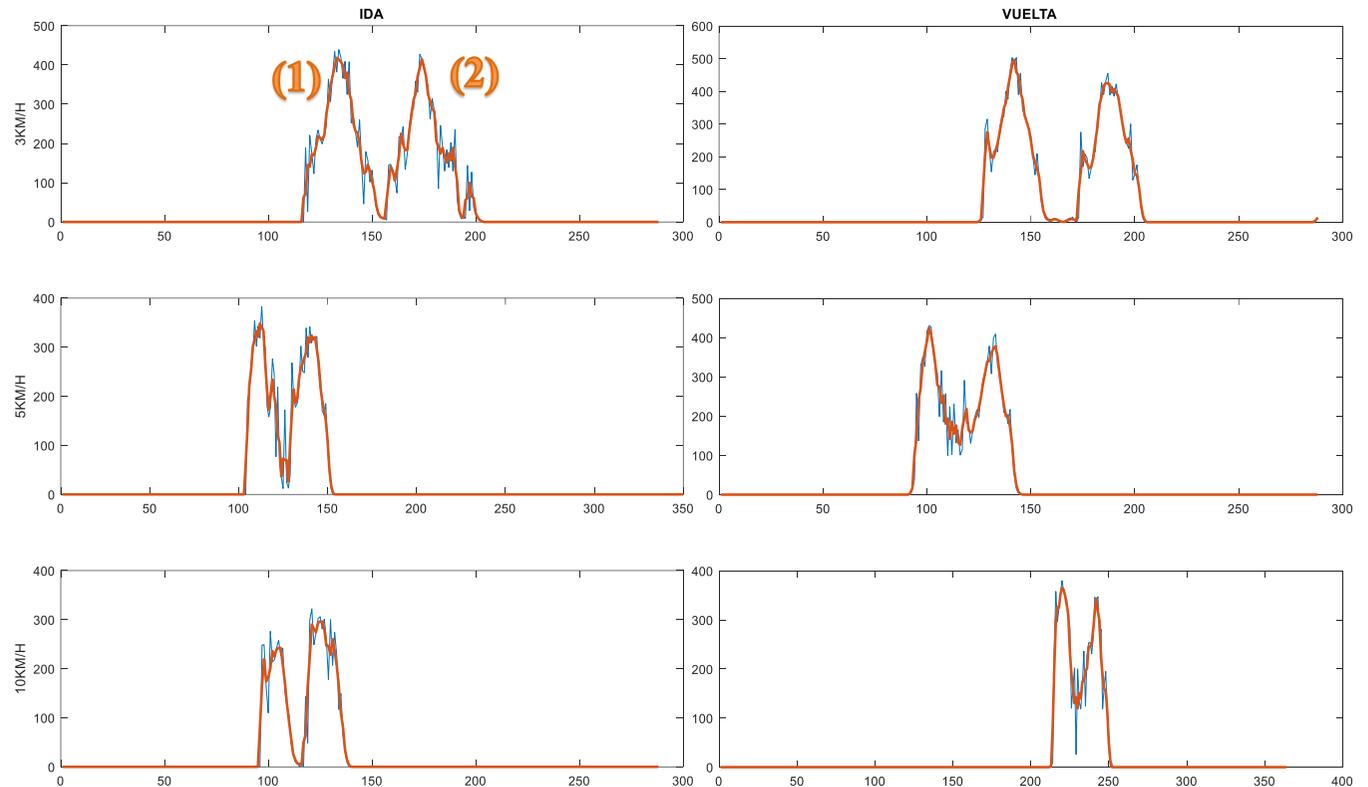


Figura 50. Bicicleta 401 y perfiles magnéticos obtenidos.

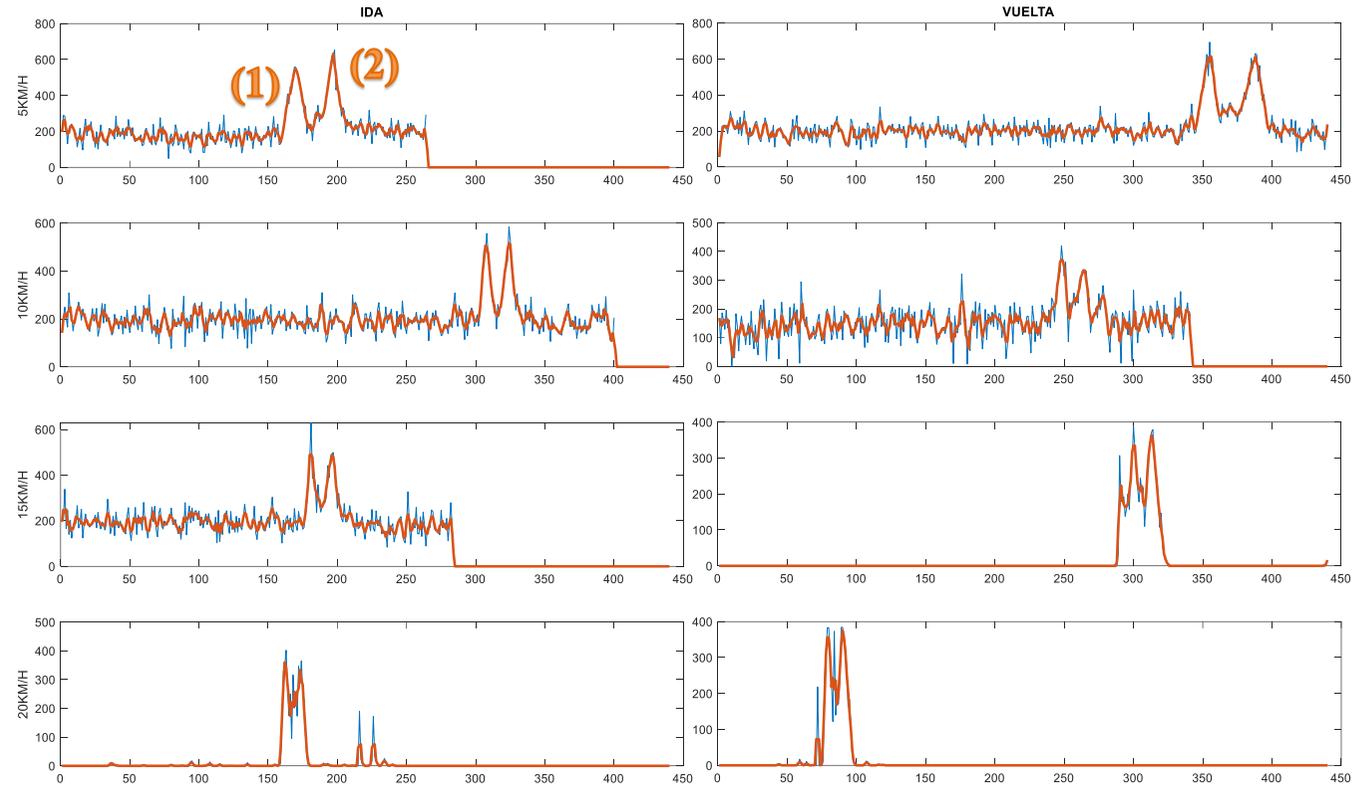
Se puede observar claramente que la identificación de una bicicleta viene dada por dos picos de tensión (1) y (2), correspondientes al paso de las llantas del vehículo por cada uno de los lazos que componen la espira doble. Las otras partes ferromagnéticas que componen la estructura del chasis, no son detectadas debido a la lejanía de éstas a la espira (calzada).

También se observa que el ancho del pulso es proporcional a la velocidad de paso. Además, se corrobora el funcionamiento del circuito, el cual proporciona una salida estable de 0 V cuando no hay ningún elemento sobre la espira, y responde de manera nítida cuando circula la bicicleta.

5.2.2 401 exterior



Figura 51. Bicicleta 401 y perfiles magnéticos obtenidos.



En este caso se pueden apreciar similitudes con la prueba de laboratorio (interior), pero se introduce el elemento de ruido. En la configuración exterior el cable que alimenta la espira tiene una longitud de 15 metros, y esta longitud hace que actúe como una inductancia más y la señal no sea tan nítida como en las pruebas de laboratorio. Por lo demás, se observan los dos picos característicos correspondientes a las dos llantas y se mantiene la relación entre el ancho del pulso y la velocidad de circulación.

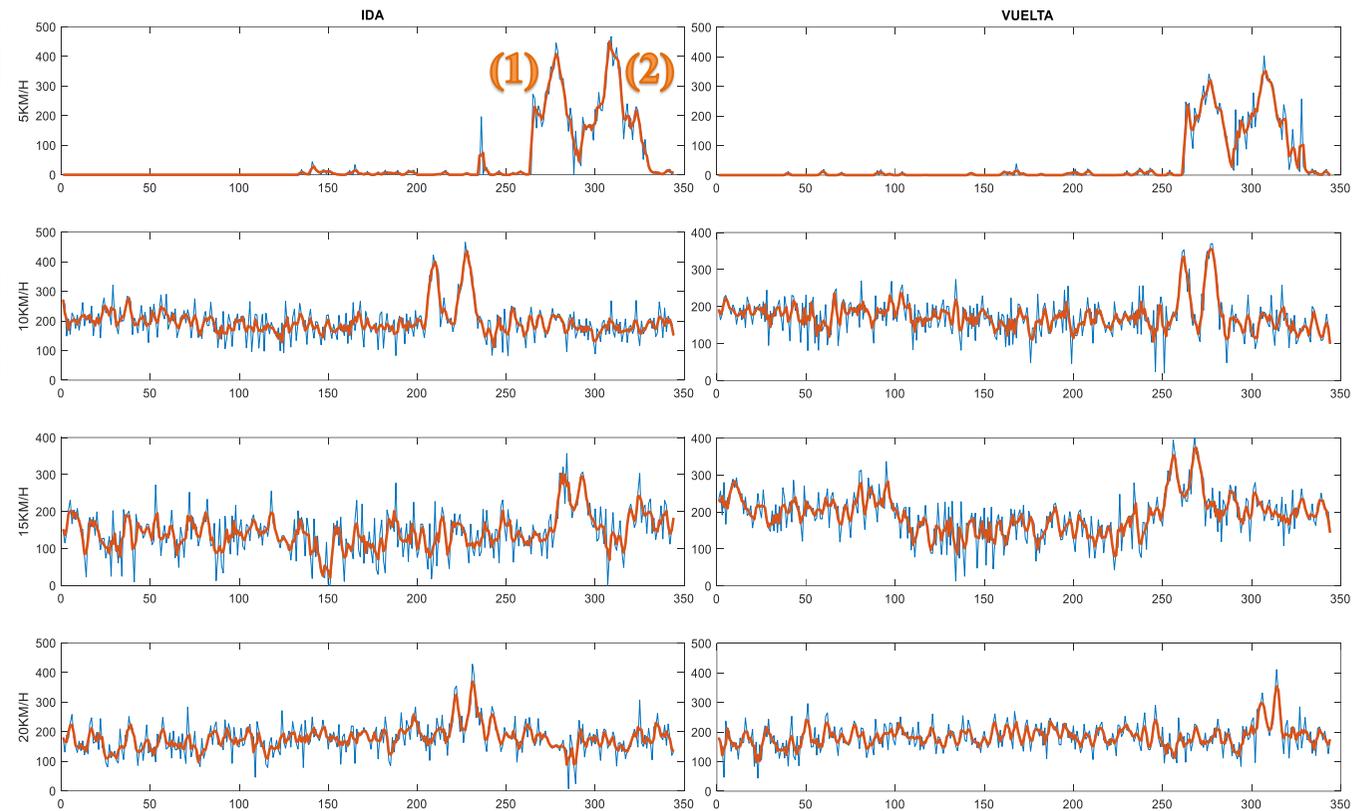
5.2.3 406 exterior



Figura 52. E-Bike 406 y perfiles magnéticos obtenidos.

Por parte de la bicicleta eléctrica 406, se puede observar un comportamiento similar a la 401. Las dos llantas representadas por los picos (1) y (2) dan fe de que el vehículo ha sido detectado.

Por su parte, la mochila donde van alojadas las baterías y otros elementos susceptibles de ser detectados, no se muestran debido a la lejanía de éstos a la espira (calzada).



Por lo demás, se puede ver como se sigue la tendencia de reducirse la anchura del pulso, a medida que la velocidad de paso aumenta. También se mantiene el ruido introducido por la sección de 15 metros extra entre la espira y la electrónica.

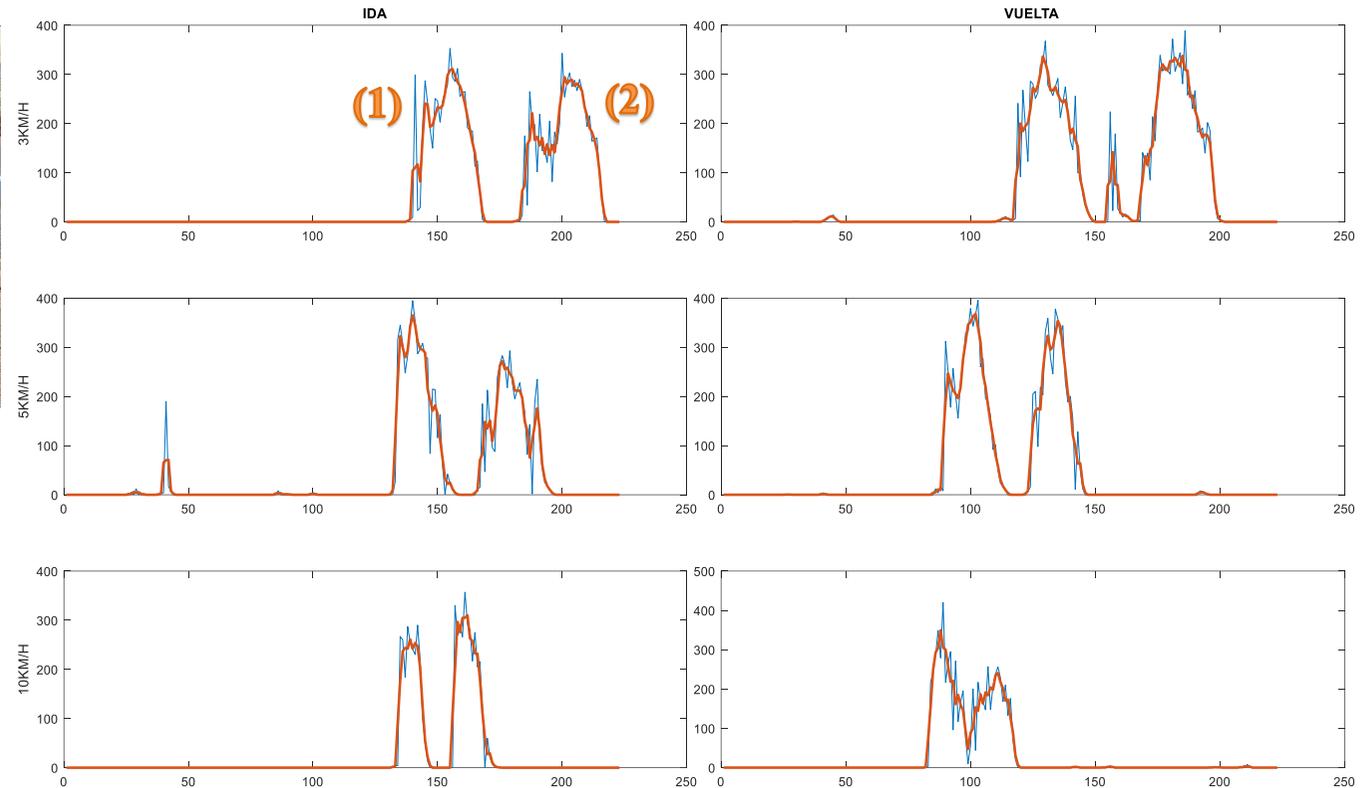
5.2.4 410 interior



Figura 53. E-Bike 410 y perfiles magnéticos obtenidos.

La bicicleta eléctrica 410 difiere de las dos anteriores en que el compartimento de las baterías se encuentra en el portamaletas.

Aun así, se puede observar que sólo se han registrado los 2 picos característicos (1) y (2) propios de una bicicleta.



Además, se aprecia que la tendencia de anchura del pulso en función de la velocidad de paso del vehículo se mantiene aquí también. Por otro lado, y debido a que las pruebas se realizaron en el interior, la señal se encuentra limpia de ruido y oscilaciones.

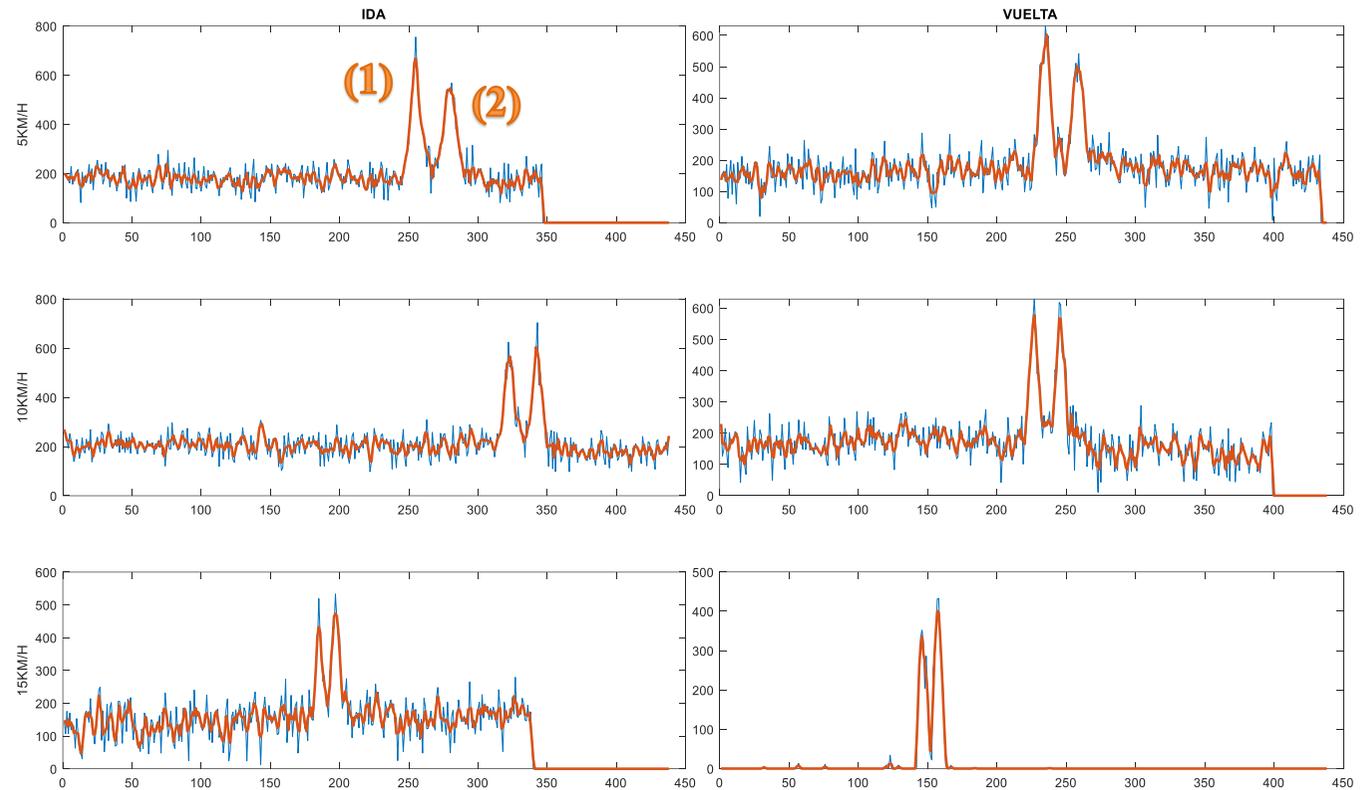
5.2.5 410 exterior



Figura 54. E-Bike 410 y perfiles magnéticos obtenidos.

Repetidas las pruebas de la bicicleta eléctrica 410 en el exterior, se puede observar una detección clara del vehículo.

Una vez más, no se aprecia ninguna otra parte ferromagnética de la bicicleta pero, se muestran los dos picos (1) y (2) característicos de una bicicleta.



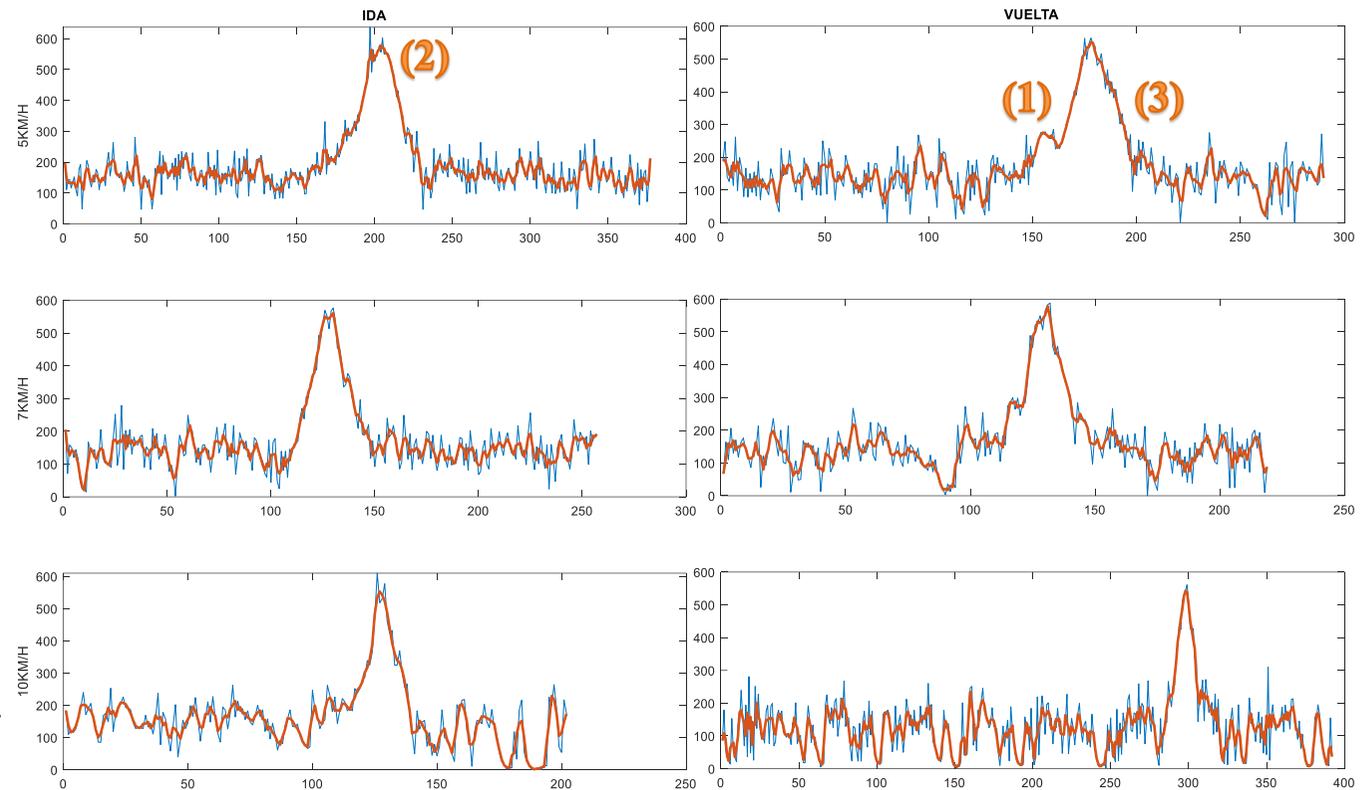
Además, la relación entre la anchura del pulso y la velocidad se mantiene, reforzando aun más, la idea de que se podrá medir la velocidad de paso del vehículo.

En el lado negativo, se puede apreciar, una vez más, el ruido que introduce la tirada de 15 metros de cable, con la excepción del último gráfico. Esto indica que el sistema, con algunas mejoras, podría eliminar el ruido por si solo, es decir, sin necesidad de postprocesado.

5.2.6 M365 interior



Figura 55. Patinete M365 y perfiles magnéticos obtenidos.



El Xiaomi M365 es el modelo más vendido desde el inicio del auge de VMP y, su diseño, es usado por una gran cantidad de marcas.

Por este motivo, es de especial interés el estudio de su perfil magnético y, así establecer una base sólida para el estudio de otros VMP. También es el modelo introducido en el entorno de simulación de MATLAB lo que, si los resultados muestran coherencia entre si, demostraría la validez del sistema.

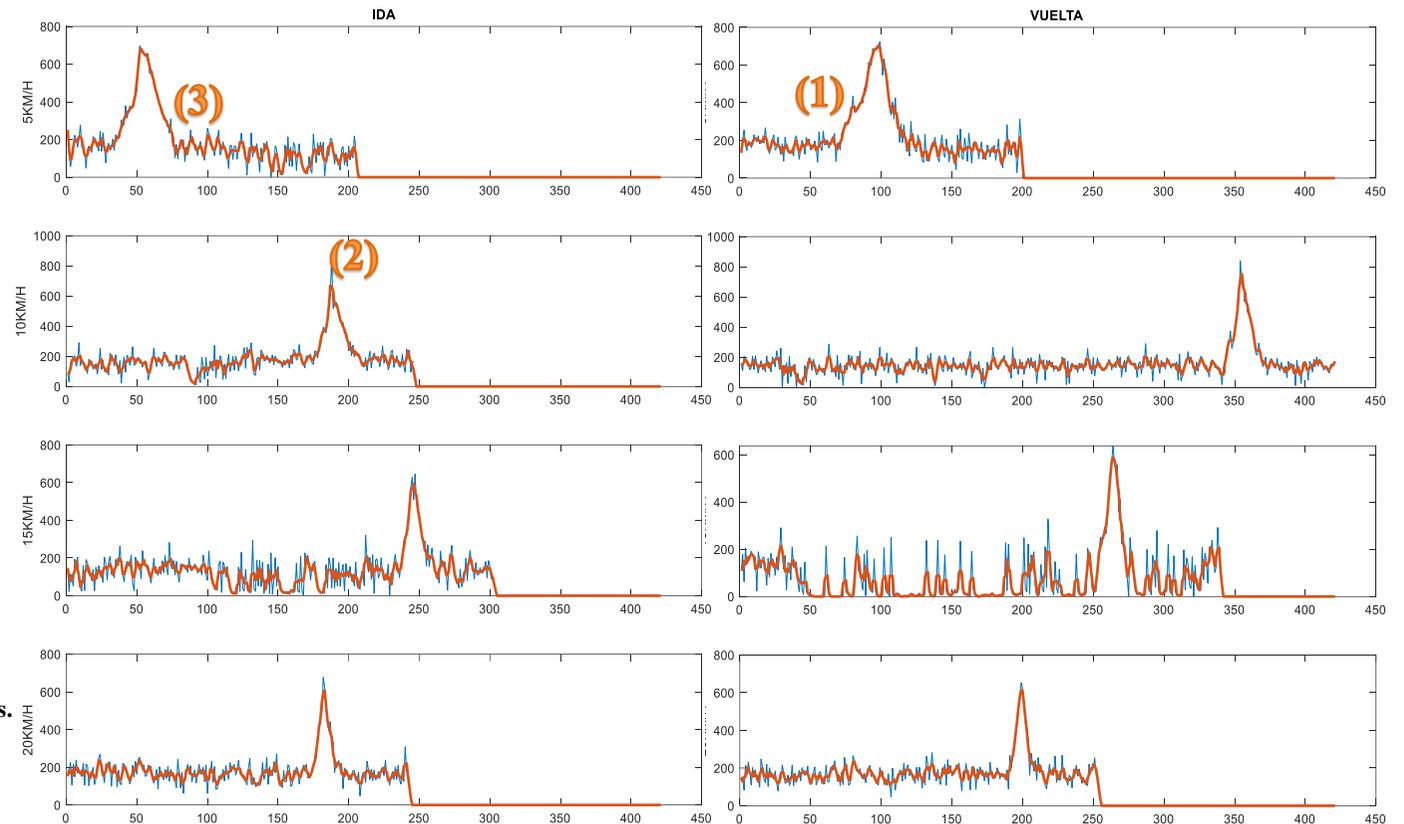
La distribución de material ferromagnético se realiza de la siguiente forma: (1) rueda delantera + motor, (2) piso central y (3) rueda trasera.

Así pues, se puede observar cómo (1) genera un primer escalón en el perfil, que luego aumenta hasta el pico principal, significando que la mayor parte del patinete se encuentra dentro de la espira. Una vez (1) comienza a abandonar la espira, se obtiene una caída abrupta, que se suaviza cuando (3) entra en la espira.

5.2.7 M365 exterior



Figura 56. Patinete M365 y perfiles magnéticos obtenidos.



En las pruebas en entorno real queda demostrado que el patinete es detectado en todas las pasadas y con el mismo patrón en todas ellas. Además, la relación entre el ancho de pulso y la velocidad de circulación se mantiene como en los demás vehículos.

En este caso, se demuestra que el ruido introducido en las lecturas no sólo aparece en las pruebas en entorno real, si no también en las de laboratorio. Aun así, las curvas muestran similitudes en cuanto al comportamiento, igual que en las simulaciones, por lo que el sistema muestra resultados coherentes y ajustados a la realidad.

5.2.8 505 interior

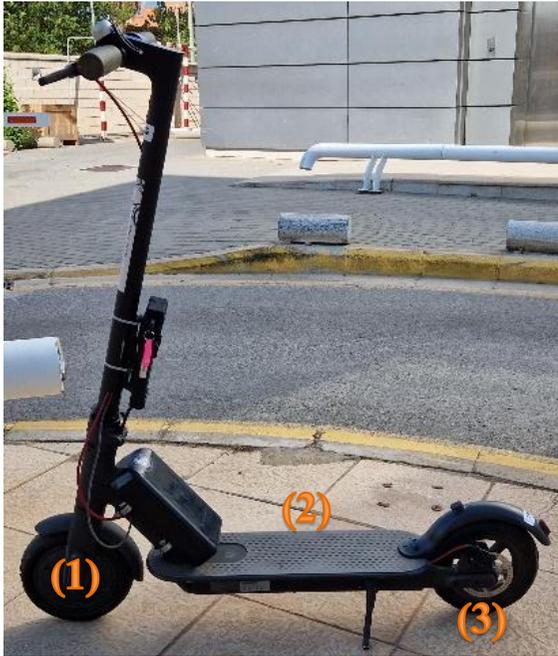
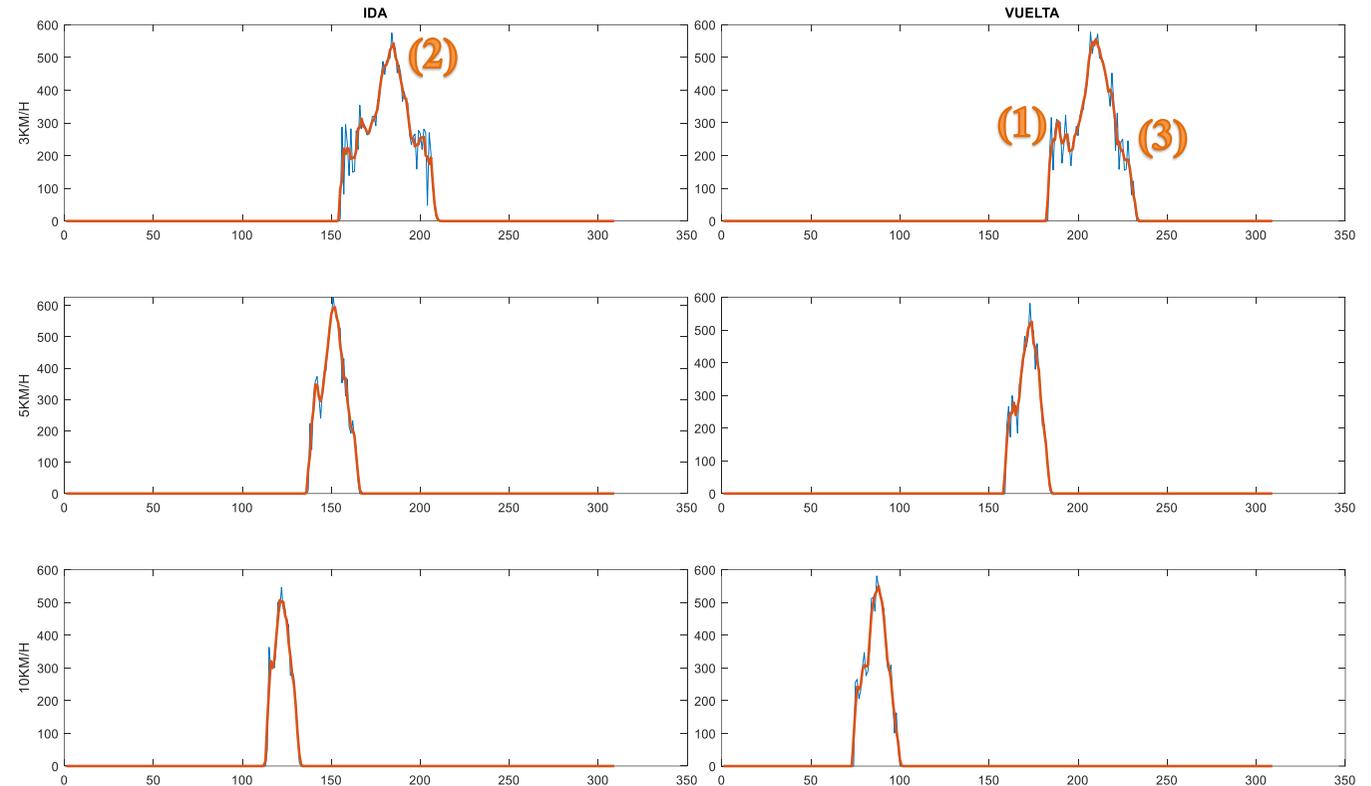


Figura 57. Patinete 505 y perfiles magnéticos obtenidos.



El patinete 505 es esencialmente igual que el M365. La única diferencia reside en que se le ha agregado un paquete extra de baterías para extender su autonomía. Aun así, este cambio no viene reflejado en los perfiles magnéticos obtenidos, ya que, al igual que con las bicicletas 401, 406 y 410, el compartimento se encuentra alejado de la espira.

Por lo demás, se pueden observar las mismas partes ya identificadas en el M365 (tiene sentido ya que es el mismo modelo), lo que demuestra que este patinete dará siempre esta forma de perfil magnético.

5.2.9 505 exterior

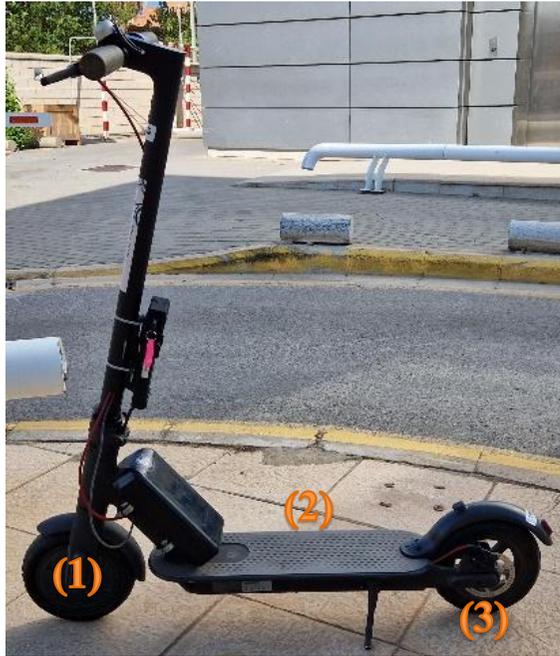
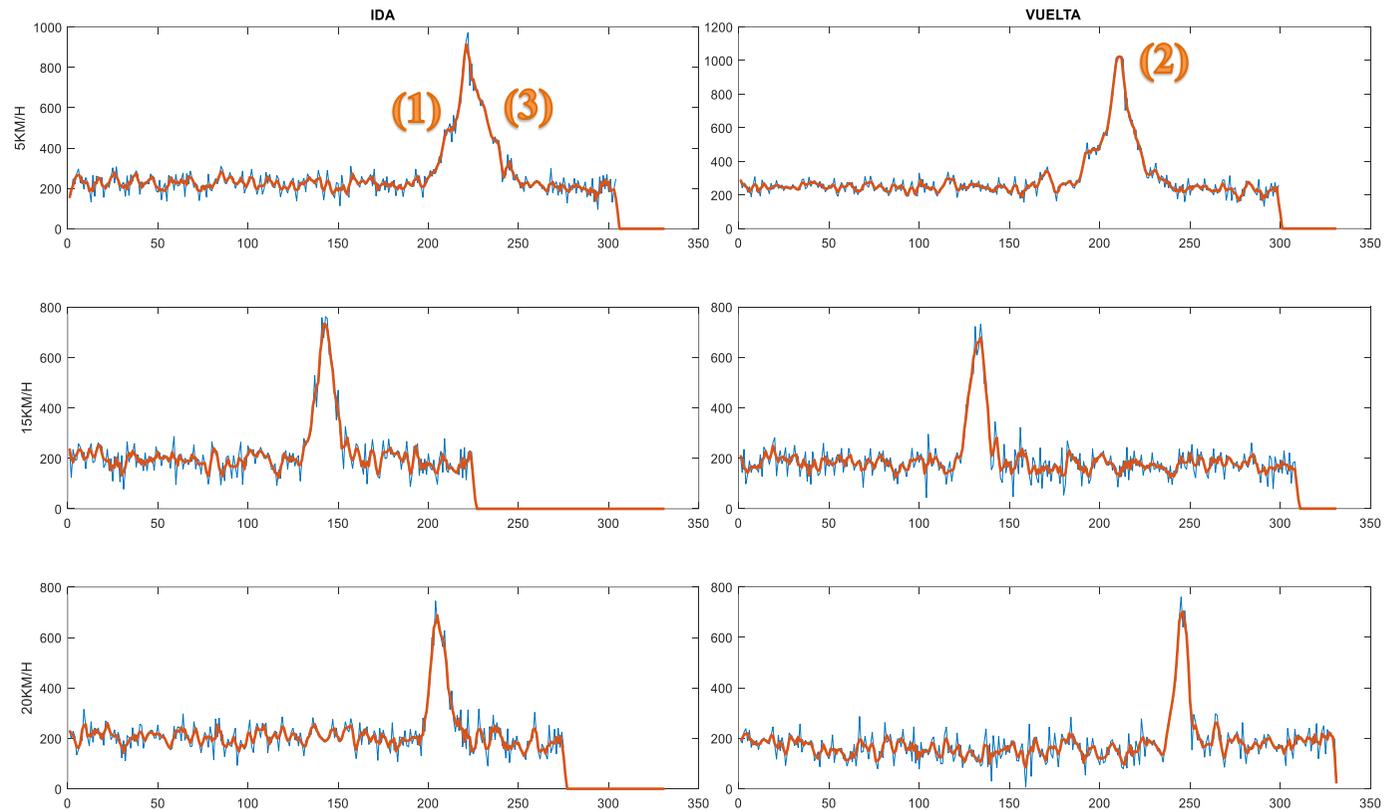


Figura 58. Patinete 505 y perfiles magnéticos obtenidos.



Por otra parte, en las pruebas en entorno real, se puede observar el mismo comportamiento que el M365 y en las pruebas de interior:

- La relación del ancho de pulso con la velocidad se mantiene.
- Las partes (1), (2) y (3) son detectadas, al igual que en las pruebas anteriores.
- El patrón que siguen los perfiles magnéticos se mantiene.
- El ruido provocado por la tirada de 15 metros aparece.

5.2.10 516 interior

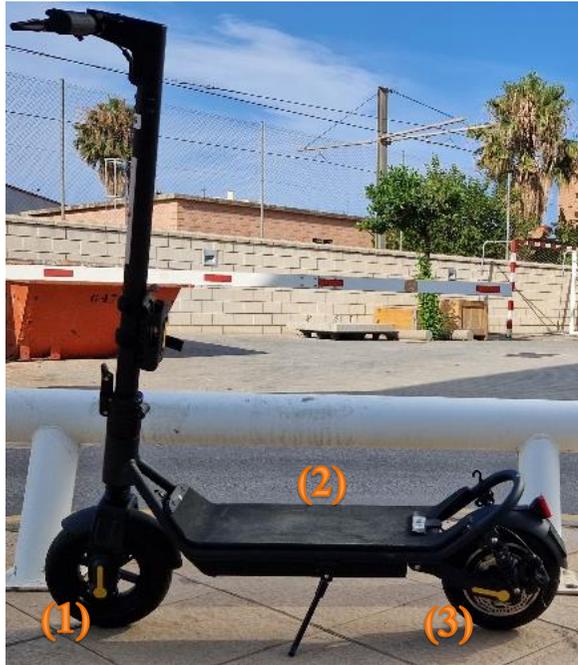
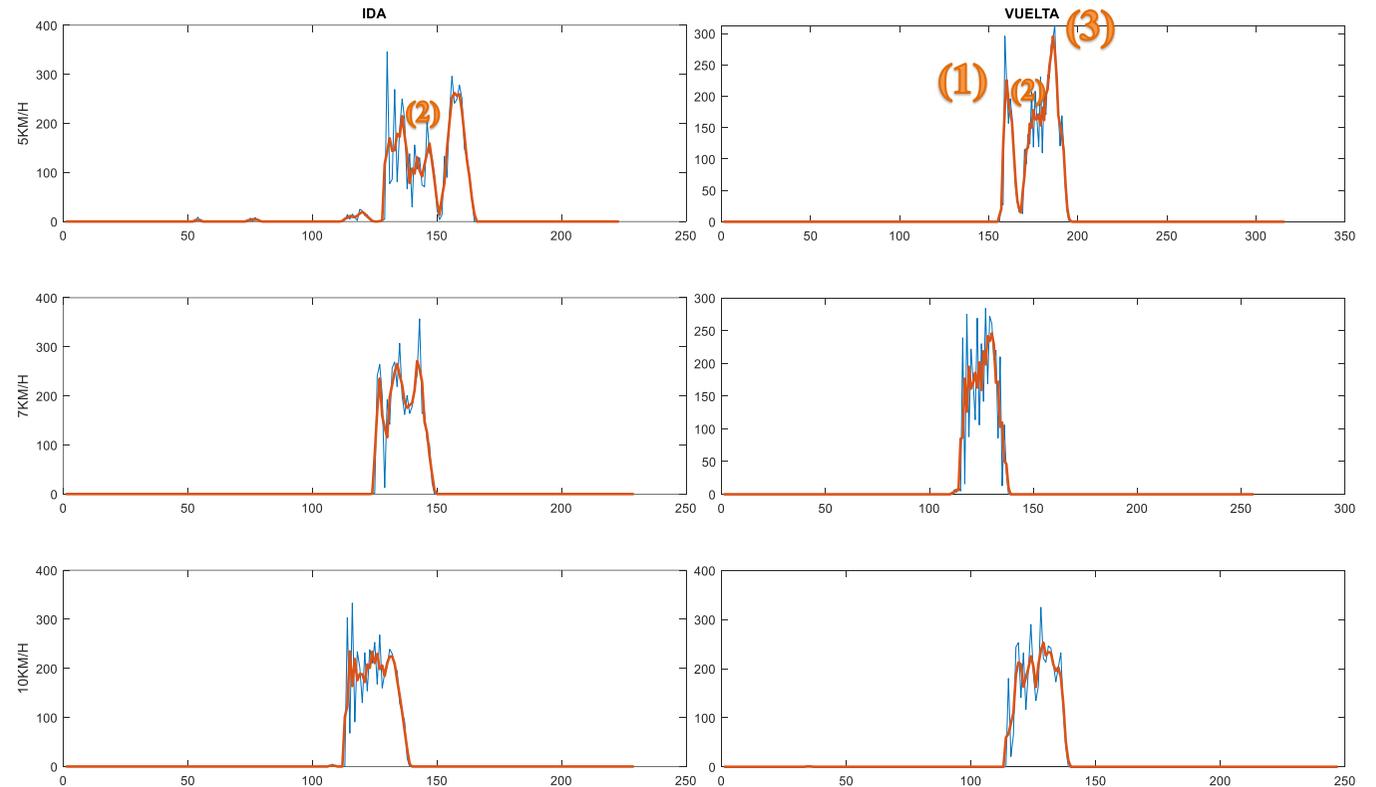


Figura 59. Patinete 516 y perfiles magnéticos obtenidos.



El patinete 516 difiere del M365 en que el motor se encuentra en la rueda trasera. En cuanto a la estructura general, el vehículo es de mayor envergadura y posee mayor masa metálica que el M365. Aun así, al encontrarse a mayor distancia del suelo (unos 15cm) la lectura que ofrece la espira resulta inconcluyente. En las simulaciones se puede observar que el vehículo se detecta, pero no se consigue identificar ningún elemento que identifique ninguna parte del patinete.

Aun así, la relación del ancho de pulso con la velocidad sigue manteniéndose.

5.2.11 516 exterior

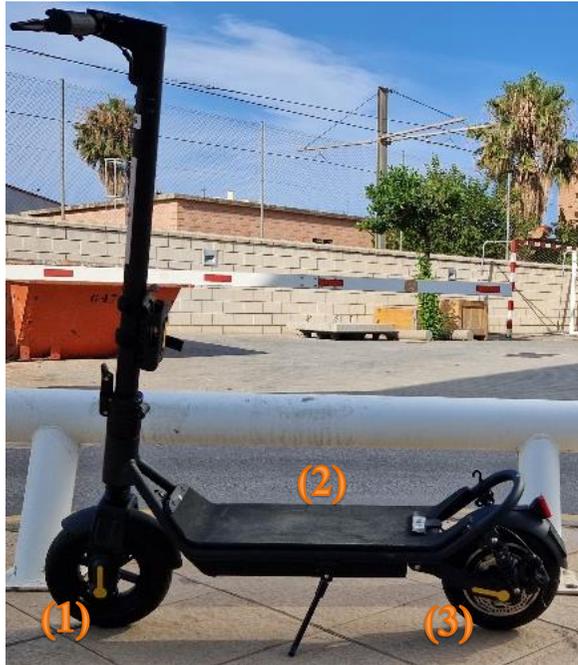
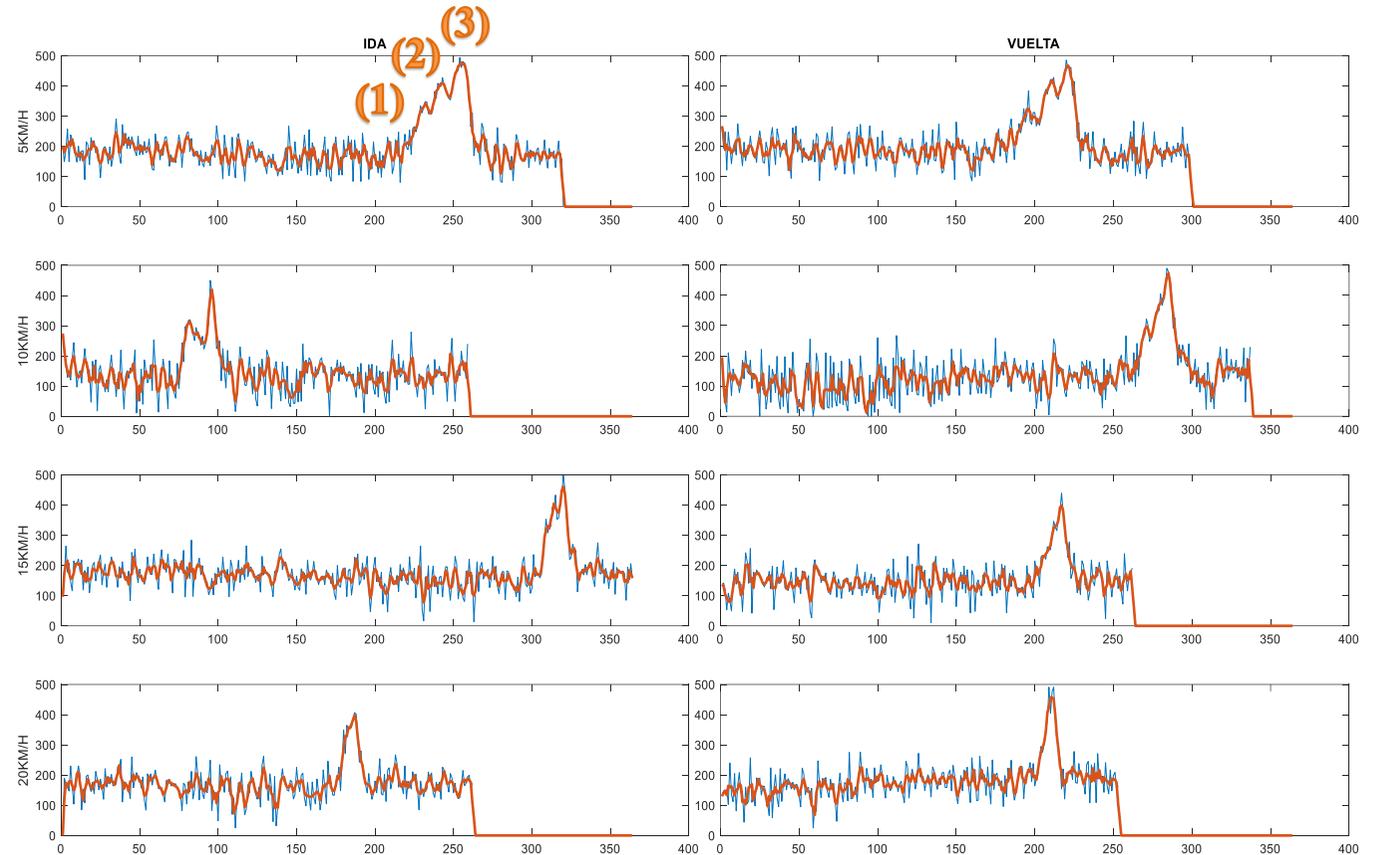


Figura 60. Patinete 516 y perfiles magnéticos obtenidos.



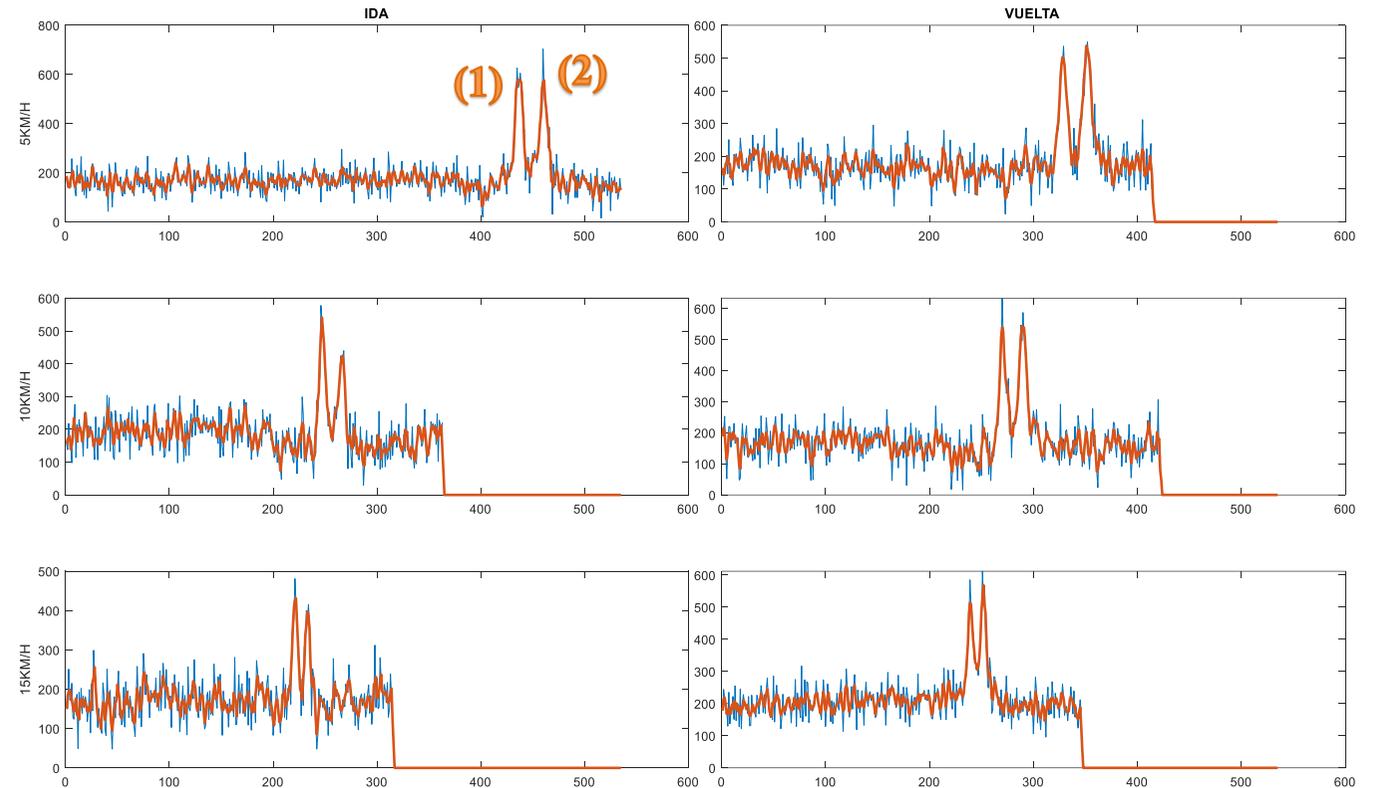
En las pruebas en exteriores, y aún con el ruido de fondo debido a la tirada de cable, la detección fue mucho más homogénea pudiendo establecer un patrón en los perfiles magnéticos. Así pues, se pueden llegar a identificar tres picos consecutivos y ascendentes en intensidad que se concuerdan con las distintas cargas ferromagnéticas del vehículo. Estas cargas van de menor a mayor densidad: rueda delantera (1), cuerpo del VMP (2) y motor (3).

A excepción de la “IDA” a 10 km/h, este patrón de (1), (2) y (3) se repite en todas las pasadas. Además, la relación ancho de pulso – velocidad se mantiene.

5.2.12 1047 exterior



Figura 61. Bicicleta 1047 y perfiles magnéticos obtenidos.



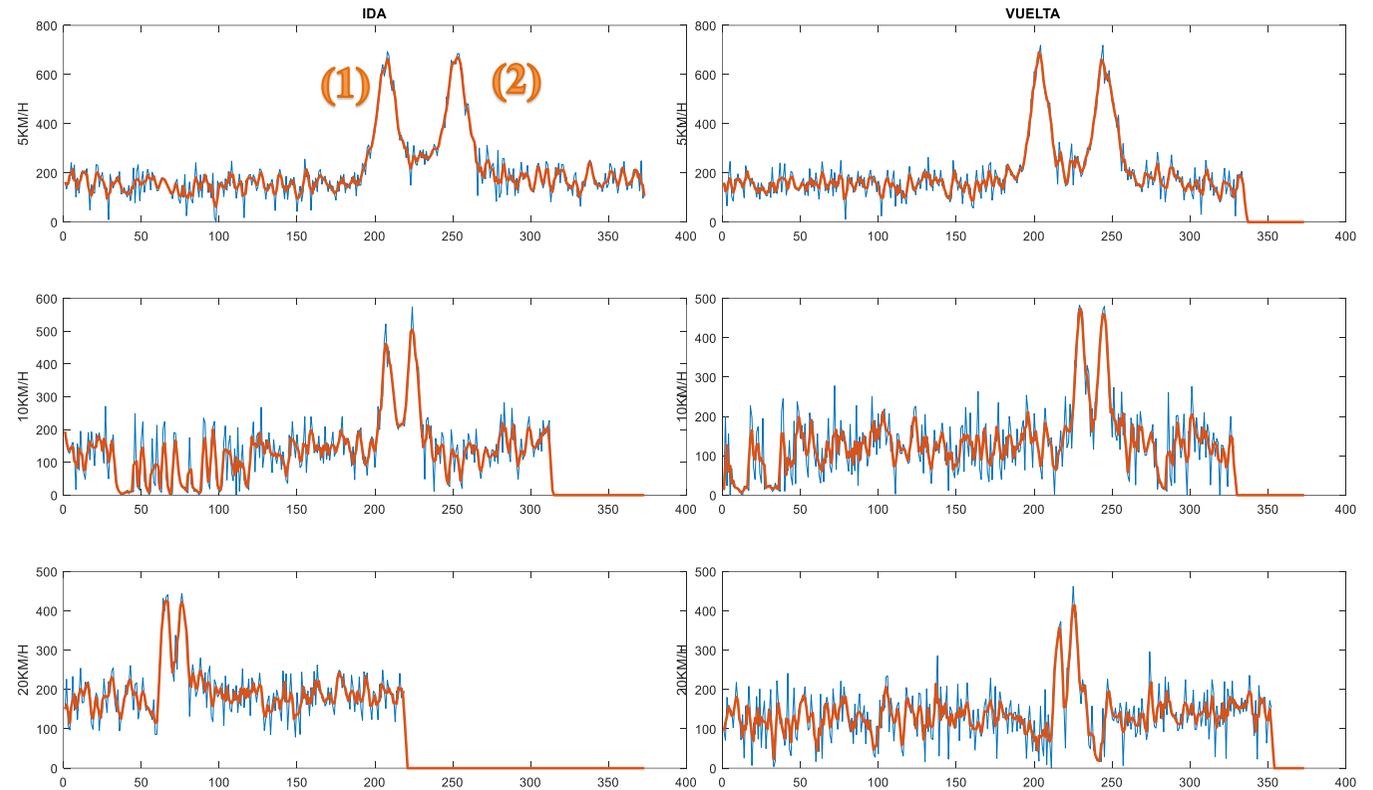
La detección de la bicicleta 1047 arroja el resultado de sus hermanas 401, 406 y 410: las dos llantas son detectadas en los picos (1) y (2). Por lo demás, no se identifican más partes ferromagnéticas debido a la lejanía de éstas a la calzada (espira).

Al igual que en las pruebas anteriores, la relación ancho de pulso – velocidad de paso, se mantiene.

5.2.13 1072 exterior



Figura 62. Bicicleta 1072 y perfiles magnéticos obtenidos.



Por último, la bicicleta 1072, aun con una estructura diferente a la 1047, obtiene unos resultados similares a ésta: las dos llantas quedan detectadas en los picos (1) y (2). Las otras partes susceptibles a ser detectadas no aparecen, una vez más, debido a su lejanía para con la espira.

Además, la relación ancho de pulso – velocidad queda demostrada que se mantiene para todos los modelos y, el ruido por la tirada de 15 metros de cable, sigue apareciendo.

Capítulo 6. Discusión y contextualización de los resultados.

Como se ha explicado en el Capítulo 2, en la actualidad las autoridades y las grandes ciudades se enfrentan al panorama de las nuevas formas de movilidad. La proliferación de los llamados Vehículos de Movilidad Personal ha inundado las calles y las administraciones han comenzado a reorganizar el espacio público, construyendo carriles bici y demás infraestructuras para el tráfico de estos vehículos. Aun así, los sistemas para la regulación de este tráfico necesitan ofrecer nuevas prestaciones para hacer frente al ritmo de evolución de los VMP, provocando un aumento significativo de los accidentes entre éstos y el resto de los usuarios de la vía.

La esencia de este TFM es contribuir a mejorar la seguridad y, por lo tanto, la reducción de estos accidentes mediante la detección y posterior aviso al resto de usuarios de la circulación de VMP's a su paso por intersecciones u otros lugares críticos. Los resultados alcanzados confirman que el sensor que se ha diseñado y fabricado logra detectar y caracterizar el paso de Vehículos de Movilidad Personal y de bicicletas.

La elección de evolucionar la tecnología de las espiras magnéticas respecto a otras tecnologías más modernas descritas en el Capítulo 2, no ha sido sin fundamento:

1. Las espiras requieren de una pequeña inversión en su instalación.
2. Nulos costes de mantenimiento respecto a los otros sensores que se instalan a la intemperie (Fibras ópticas, tubos neumáticos, cámaras...).
3. Es un sistema que trabaja en tiempo real sin necesidad de elevados costes de procesamiento de datos como puede ser la IA basada en imágenes (cámaras, láser, ...).

Además, la configuración de la espira permite obtener un parámetro de vital importancia para garantizar la seguridad: la velocidad de paso. Como se ha descrito en el marco teórico y en los materiales y métodos, ya existen sistemas que permiten obtener este parámetro, no obstante, esos sistemas requieren de instalaciones duales (es decir, dos sensores) mediante los cuales se calcula la diferencia de tiempos de paso para obtener la velocidad. En el caso de vías tan reducidas como los carriles bici, que además tienen densidades e intensidades de tráfico pico muy significativas (por ejemplo, varios patinetes pasando a la vez en ambos sentidos), estos sistemas no pueden garantizar el cálculo de la velocidad de paso, ya que no pueden asociar unívocamente los pulsos generados por el paso del vehículo. En cambio, la espira doble, con una única instalación, permite obtener este parámetro de forma muy fiable.

Así pues, al final de este proyecto, se ha conseguido diseñar un sistema que además de ofrecer una detección de paso/presencia/velocidad de VMP, permite identificar del tipo de vehículo que, por otros medios, sólo es posible obtener mediante cámaras de tráfico.

Esta identificación, como se ha visto en los resultados, se basa en el estudio de los llamados perfiles magnéticos que han demostrado reflejar elementos clave en las estructuras de los distintos VMP que consigue distinguir el vehículo en 2 grandes familias:

- Vehículos con estructura base de bicicleta: se identifican con 2 picos contiguos y claramente diferenciados.
- Vehículos que no son bicicletas: cualquier otro VMP que no siga la estructura de una bicicleta convencional.

Además, como añadido, la segunda familia puede subdividirse en tantas partes como tipos de VMP existan, siempre que difieran de la estructura original de una bicicleta y haya diferencias significativas en cuanto a la distribución de los materiales ferromagnéticos que forman el vehículo.

Estos resultados preliminares no han podido establecer una base clara para la detección del sentido de la marcha (simetrías en las señales, picos más intensos que otros...) Pero este problema no resulta ser una limitación del sistema, ya que la espira es asimétrica tanto en geometría como en número de vueltas, lo que genera un campo magnético que no es homogéneo, por lo tanto, cabe



esperar que, solucionando los problemas que se enumeran en el siguiente punto, esta detección pueda ser posible.

El circuito diseñado para acondicionar la señal ha cumplido con las expectativas y ha permitido obtener perfiles de señal muy limpios, y que una vez digitalizados, pueden ser enviados a las unidades de procesamiento (locales o remotas) para en análisis masivo de los flujos de movilidad. Al tratarse de una infraestructura crítica, el sensor deberá incorporar las preceptivas medidas de seguridad (aislamiento eléctrico del resto de elementos de control), y enfocados a la explotación masiva de datos, el sensor deberá integrarse en una plataforma distribuida que permita enviar los datos en tiempo real mediante un sistema embebido.

El éxito de las pruebas de laboratorio y de entorno real abren paso a probar nuevas configuraciones que eviten zonas de oclusión magnética, como se describe en los posibles trabajos futuros del Capítulo 7.

6.1 Limitaciones y problemas

Los problemas surgidos a lo largo de este proyecto no han sido pocos: problemas de estabilidad, acoples, ruidos tanto de red de alimentación como de conmutación en la adquisición de datos... Casi todas estas situaciones eran esperadas y pudieron ser solucionadas sin una dificultad añadida. Al solucionar dichos problemas también salieron a la luz los límites físicos del sistema que han dado lugar a establecer unas líneas futuras para continuar el desarrollo del producto.

El principal límite físico del sensor es la longitud del cable que conecta la espira, enterrada en el asfalto, con la electrónica.

Este problema hace que, si la calzada se encuentre a una distancia considerable del armario de protección, donde se encuentra alojado el circuito, el sistema resulte inservible.

La tirada de cable realizada en las pruebas reales es buena muestra de ello: se llevó al límite el sistema estableciendo una distancia de 15 metros entre el sensor y la electrónica.

Esto supuso una pérdida considerable de intensidad de campo en la espira, provocando una relación señal a ruido muy baja dado que los perfiles magnéticos apenas superaban el umbral de ruido. Esta situación provocó también que sólo las partes ferromagnéticas más próximas a la calzada pudieran ser detectadas e identificadas por el sistema. Aun así, se decidió proseguir con las pruebas para comprobar que, con un filtrado adecuado, se podía salvar el perfil magnético del ruido de fondo.

Lejos de esta clase de pruebas, con un interés meramente empírico, resultará necesario una reestructuración del sistema para resolver esta limitación, que resulta ser la raíz del resto de limitaciones del sistema y de todos los problemas relacionados con ruidos, acoples e inestabilidad.



Capítulo 7. Conclusiones

Después de exponer los resultados obtenidos tanto en los entornos de laboratorio y real, los siguientes objetivos han quedado completamente superados:

1. Se han solucionado los problemas de ruido del circuito de partida, mejorando la estabilidad y robustez del sistema.
2. Se ha corroborado que los resultados obtenidos por el sistema son fiables y ajustados a la realidad debido a su amplia coincidencia con las herramientas de simulación.
3. Se ha demostrado la viabilidad del sistema con cualquier tipo de VMP u otro vehículo que posea carga ferromagnética.
4. Se ha demostrado que el sensor es capaz de detectar vehículos independientemente de su velocidad, y que con un solo sensor se puede estimar la velocidad de paso.
5. Se ha rediseñado completamente el sistema adoptando una estructura modular, dando posibilidad a ampliaciones y mejoras.
6. Se ha logrado crear un primer prototipo candidato a ser comercializado.

En conclusión, el uso de espiras magnéticas para la detección de VMP ha resultado ser un éxito. Un sistema que, ha sabido cumplir ampliamente con las siguientes expectativas:

- Generar perfiles magnéticos distintivos de diversos tipos de VMP.
- Poder detectar el paso de VMP.
- Establecer la posibilidad de calcular la velocidad de paso del VMP.
- Elevar el nivel de madurez tecnológica (TRL) del prototipo
 - o Desde un TRL-3 que se llevó a cabo en el TFG como una prueba experimental de concepto.
 - o Hasta un TRL-6 en la que se ha demostrado la tecnología en un entorno relevante.

Aun el potencial de este tipo de tecnología, este sistema no resultará viable si no se subsana el problema raíz (y crucial) de la distancia entre el la espira y la electrónica que hace que el sensor sea completamente inservible.

7.1 Líneas futuras

7.1.1 *Rediseño. Solución de la limitación en la longitud del cable.*

Desde su inicio hasta la actualidad, la historia de las telecomunicaciones nos ha enseñado a que la transmisión de señales analógicas resulta ser problemática. Con el paso de los años, el cambio a tecnologías y comunicaciones digitales ha supuesto una simplificación de los sistemas y aumento en la inmunidad frente a interferencias.

Es aquí donde reside la limitación del sensor: se trabaja con una señal analógica que se envía a través de un cable que produce pérdidas y actúa como antena captando ruido e interferencias. Por ello, el dicho popular “Divide y vencerás” resulta ser la solución a la gran flaqueza de este sistema.

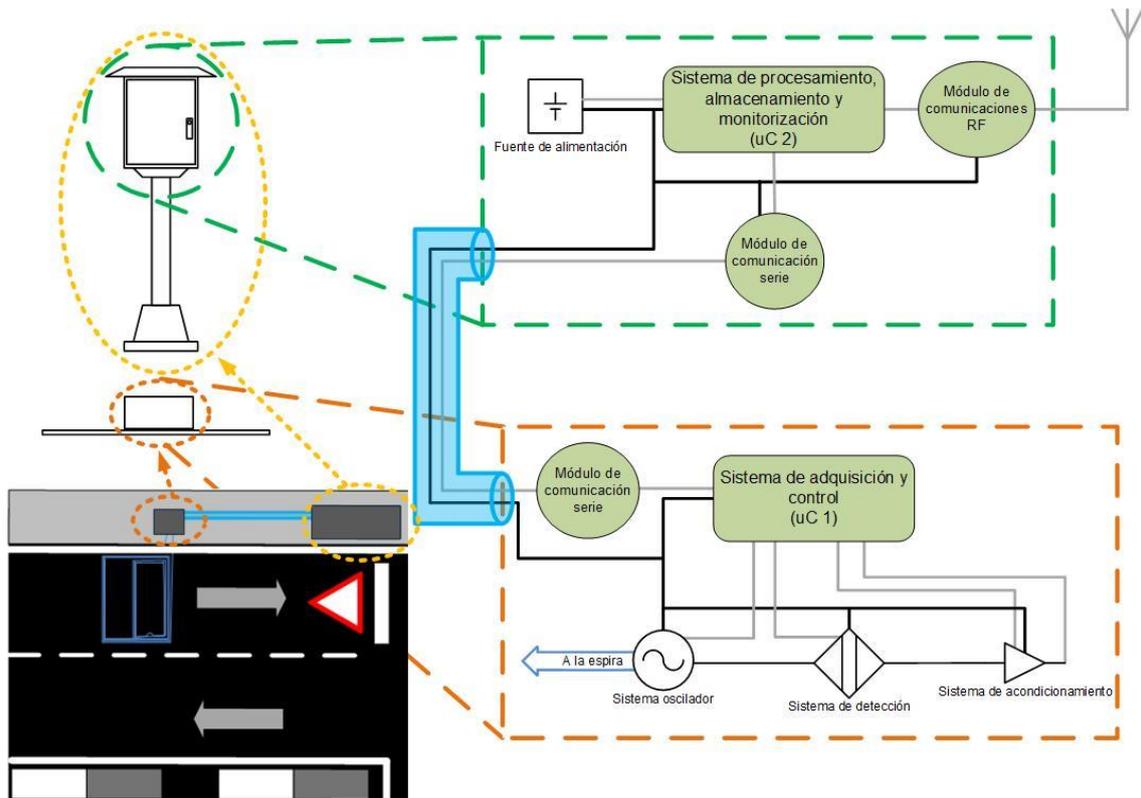


Figura 63. División del sistema en 2 subsistemas.

Así pues, el nuevo diseño quedaría tal y como se ve en la FIGURA TAL. Dado que el sistema es modular, la electrónica encargada de manejar y trabajar con las señales analógicas de la espira, se “acercarán” lo máximo posible a ésta.

Por otra parte, y después de haber adquirido las lecturas, éstas se enviarán a través de una comunicación serie que siga algún protocolo estándar industrial tipo rs-485 o similar.

7.1.2 Sistema multiespira

Dado que la espira se diseñó basándose en las medidas de un carril, sólo se detecta el tráfico en la mitad de la infraestructura. Una solución sería instalar otro sistema idéntico en el carril contrario, pero no resultaría viable debido a:

1. La duplicación de equipos
2. La imposibilidad de instalar una espira junto a otra debido a que los campos magnéticos se acoplarían, provocando el incorrecto funcionamiento entre los 2 sistemas.

Debido a estos motivos, un sistema capaz de gestionar múltiples espiras no sólo cobra sentido, si no que resultaría fundamental en una instalación real.

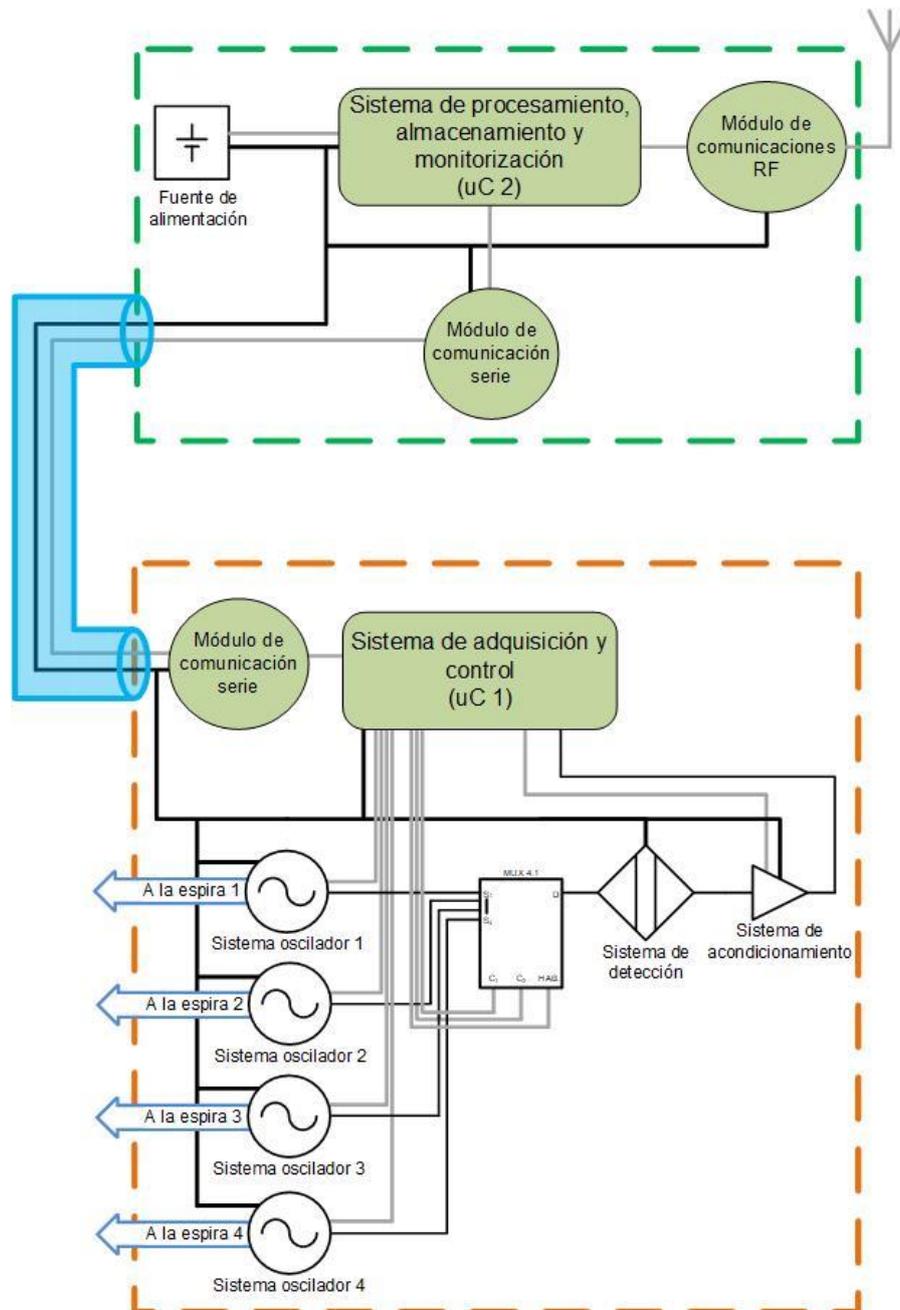


Figura 64. Modificación del sistema para controlar hasta 4 espiras.

Como ya se vio en el capítulo 4, el corazón del oscilador reside en el CI 4093. Dicho integrado consta de 4 puertas Trigger-Schmitt de las cuales sólo 1 se usa. Por ello, con simplemente replicar la electrónica que envuelve a una de las puertas, con el mismo integrado, un solo sistema sería capaz de gestionar hasta 4 espiras.

Por último, habría que reprogramar el microcontrolador para:

1. Controlar el encendido y apagado de cada espira para que sólo una de ellas esté radiando en un instante de tiempo, solucionando así el problema de acoplo entre espiras.
2. Controlar el multiplexor 4 a 1 para conectar la salida de cada oscilador al sistema de detección.
3. Crear una etiqueta junto a cada lectura que identifique qué espira ha proporcionado dicho dato.



7.1.3 Validación comercial

Desde que se hizo eco la noticia de que el grupo de Sistemas de Control de Tráfico se encontraba trabajando en un sistema de detección en tiempo real para VMP's, no fueron pocos los organismos y administraciones que esperaban, con gran expectación, avances en la investigación. Aunque, el organismo que demostró más interés es sin duda el Ayuntamiento de València.

Una vez se presentaron los avances conseguidos en el TFG, la Regidoria de Mobilitat Sostenible del Ajuntament de València, se mostró dispuesta a realizar una prueba piloto en una de las vías con mayor afluencia de tráfico de VMP de toda la ciudad: el carril bici de la calle Xàtiva.



Capítulo 8. Bibliografía

- [1] - P. Sendra, R. Sennett "Representando el mañana" Fundación Telefónica, 20-jul-2021. Recurso en línea: [‘Repensando el mañana’: Pablo Sendra y Richard Sennett | Fundación Telefónica España \(fundaciontelefonica.com\)](#)
- [2] – M. Rodríguez, "Las ciudades post-coronavirus: así va a transformar la pandemia el diseño urbano", Euronews, 2020. Recurso en línea: [Las ciudades post-coronavirus: así va a transformar la pandemia el diseño urbano | Euronews](#)
- [3] - Dirección General de Tráfico (DGT), "Instrucción 16 / V-124 sobre Vehículos de Movilidad Personal", 2016.
- [4] - Ajuntament de València, "Ordenança de mobilitat", 23 de enero 2019.
- [5] - Red Eléctrica de España y Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP), "Guía de movilidad eléctrica para entidades locales," Congreso de Movilidad Sostenible, Bilbao, 2019.
- [6] - J. Perdiguero, and J. Luis Jiménez, "Policy options for the promotion of electric vehicles: a review", Institut de Recerca en Economia Aplicada Regional i Pública Document de Treball, 2014.
- [7] - L. A. Klein, D. R. P. Gibson, and M. K. Mills, Traffic Detector Handbook, vol. FHWAHRT-06-108, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2006.
- [8] - Fundación Línea Directa, "El número de fallecidos en accidentes con patinetes eléctricos se triplicará en 2019," 2019.
- [9] - GAKENHEIMER, R. Los problemas de la movilidad en el mundo en desarrollo. Eure, 1998, vol. 24, nº 72.
- [10] - Ministerio del Interior. Dirección General de Tráfico (DGT), "Accidentes mortales y fallecidos a 24 horas en vías interurbanas. Cuadro comparativo por tipo de vía, medio de desplazamiento, género y edad". Recurso en línea: [DGT - DGT en cifras detalle](#)
- [11] - Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, "Real Decreto 970/2020, de 10 de noviembre, por el que se modifican el Reglamento General de Circulación, aprobado por Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre y el Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, en materia de medidas urbanas de tráfico." «BOE» núm. 297, de 11 de noviembre de 2020, páginas 98638 a 98643 (6 págs.). Recurso en línea: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2020/11/10/970>
- [12] C. Ventura, A Royo. "Dispositivos de sensorización y control en las luminarias de Rivas con integración periféricos de IoT para la gestión inteligente de servicios smart de ciudad". 2017. Recurso en línea: <https://www.esmartcity.es/>
- [13] - P. Burnos, J. Gajda, Z. Marszalek, P. Piwowar, R. Sroka, M. Stencel, et al., "Road traffic parameters measuring system with variable structure," Metrology and Measurement Systems; vol. 18, no. 4, pp. 659–666, 2011.
- [14] - S. Meta and M.G. Cinsdikici, "Vehicle-classification algorithm based on component analysis for single-loop inductive detector," IEEE Transactions on Vehicular Technology; vol. 59, no. 6, pp. 2795–2805, 2010.
- [15] - Y. K Ki and D.K.Baik, "Vehicle-classification algorithm for single-loop detectors using neural networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology; vol. 55, no. 6, pp. 1704–1711, 2006.



- [16] - Y. K Ki and D.K.Baik, "Model for accurate speed measurement using double-loop detectors," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*; vol. 55, no. 4, pp. 1094–1101, Jul, 2006.
- [17] - J. Gajda, P. Piwowar, R. Sroka, M. Stencel, and T. Zeglen, "Application of inductive loops as wheel detectors," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*; vol. 21, no. 1, pp. 57–66, 2012.
- [18] - A. Mocholi Salcedo, J.H. Arroyo Núñez, V. Milian Sanchez, M.J. Palomo Anaya, A. Arroyo Núñez, "Magnetic field generated by the loops used in traffic control systems," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*; vol. 18, no. 8, pp. 2126–2136, Aug 2017.
- [19] - M.K Mills, "Self-Inductance Formulas for Multi- Turn Rectangular Loops Used with Vehicle Detectors," *33rd IEEE VTG Conference Record*, May 1983, pp. 64–73.
- [20] - J.H. Arroyo Núñez, A. Mocholí Salcedo, R. Barrales Guadarrama, and A. Arroyo Núñez, "Communication between magnetic loops," *Proceedings of 16th World Road Meeting*, Lisbon, Portugal, May 2010.
- [21] - L. A. Klein, D. R. P. Gibson, and M. K. Mills, *Traffic Detector Handbook*, vol. FHWAHRT-06-108, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2006.
- [22] - L. Bhaskar, S. Ananya, V. Garima y T. Jain, "Intelligent Traffic Light Controller Using Inductive Loops for Vehicle Detection", 1ª ed., 2015.
- [23] - Ministerio de derechos sociales y agenda 2030, "¿Qué es la Agenda 2030?"
Recurso en línea: [Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 - Conoce la Agenda \(mdsocialesa2030.gob.es\)](https://www.mdsocialesa2030.gob.es)
- [24] - División de estadísticas de las Naciones Unidas, "Marco de indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible".
Recurso en línea: [A.RES.71.313 SPA.doc \(un.org\)](https://www.un.org)
- [25] – J. Gilpin, T. Bonnell, M. Fralick, K. Paulson, L. Zefting, "A review of available technologies and practical experience to aid in the creation of smarter intersections that work for all users", julio 2021. Recurso en línea: [ALTA Bike detection. White Paper - \(altago.com\)](https://www.altago.com)

8.1 Índice de figuras

2. [Disposición 987 del BOE núm. 18 de 2022](#)
- 6.1 [Los bicitaxis, un negocio del siglo pasado que renace con fuerza - Bicihome](#)
- 6.2 [Algunas empresas de paquetería ya están usando patinetes eléctricos para hacer el reparto \(motorpasionmoto.com\)](#)
- 9.1 [3 Av. d'Ausiàs March - Google Maps](#)
- 9.2 [Sicurezza in bici: Londra sperimenta il semaforo bike friendly - rivista BC](#)
- 10.1 [¿Qué son las extrañas marcas cuadradas que hay en el asfalto de las calles y avenidas de Valencia? | Las Provincias](#)
- 10.2. [Traffic Detector Handbook:Third Edition—Volume II - FHWA-HRT-06-139 \(dot.gov\)](#)
- 11.1 [Piezoelectric Sensor - Vehicle Counting Definitions \(retailsensing.com\)](#)
- 11.2 [Piezoelectric Traffic Sensor | Roadtrax BL Series | TE Connectivity](#)
12. [Los tubos neumáticos, qué son y para qué sirven \(sport.es\)](#)
- 13.1 [Sensor Line | Fiber Optics Sensors](#)
- 13.2 [Optical Fiber Sensing at Work in New Technologies, Applications | Sep 2020 | Photonics.com](#)
14. [Elements of an inductive loop detector. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
15. [1: Inductive loop detectors based traffic management | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
17. [Advantages offered by the double magnetic loops versus the conventional single ones](#)
18. [Advantages offered by the double magnetic loops versus the conventional single ones](#)



Capítulo 9. Anexos

Se adjunta la hoja de cálculo “Gantt – Planificación.xlsx” que contiene el diagrama de Gantt mencionado en el punto 1.5