



VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA

Programa: Informática y Matemática Computacional (240E)

**DEFINICIÓN DE ALGORITMOS DE  
CARACTERIZACIÓN Y EMPAREJAMIENTO DE  
HUELLAS MAGNÉTICAS PARA LA RE-  
IDENTIFICACIÓN DE VEHÍCULOS EN  
ENTORNOS INTERURBANOS BASADOS EN  
SENSORES MAGNETO-RESISTIVOS**

**Tesis Doctoral**

Presentada por  
Ramón Vicente Cirilo Gimeno

Dirigida por  
Dr. Juan José Martínez Durá  
Dra. Marta Pla i Castells

Valencia  
2015





**D. Juan José Martínez Durá**, Profesor Titular del Departamento de Informática de la Universidad de Valencia, y **D<sup>a</sup>. Marta Pla i Castells**, Doctora en Ciencias de la Computación por la Universidad de Valencia

**CERTIFICAN QUE:**

La presente Tesis Doctoral original de D. Ramón Vicente Cirilo Gimeno titulada **“DEFINICIÓN DE ALGORITMOS DE CARACTERIZACIÓN Y EMPAREJAMIENTO DE HUELLAS MAGNÉTICAS PARA LA RE-IDENTIFICACIÓN DE VEHÍCULOS EN ENTORNOS INTERURBANOS BASADOS EN SENSORES MAGNETO-RESISTIVOS”**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión y, a nuestro juicio, reúne los requisitos para su lectura y obtención del grado de Doctor.

Y para que así conste a los efectos oportunos, firmamos el presente certificado en Valencia, a 21 de septiembre de 2015.

Prof. Dr. Juan José Martínez Durá

Dra. Marta Pla i Castells



A ti, para ti, contigo y por ti.

Y a vosotros, especialmente, también.



# AGRADECIMIENTOS

A mis directores, Juan José Martínez y Marta Pla, por su excelente labor de revisión, su constante impulso, su enorme interés y sus grandes gestos de ánimo que han hecho que mi trabajo se convierta finalmente en una tesis.

A mis compañeros y excompañeros de trabajo Toni, Pablo y Vicente que han compartido su tiempo y esfuerzo para que el resultado de mi investigación haya llegado a buen término. Y al resto de compañeros que han contribuido de muchas formas a que esta tesis se pudiese realizar.

A Emilio Cacheiro, que ha hecho posible la realización de una investigación en un entorno que no está al alcance de cualquiera.

A mis amigos, que en ocasiones han sufrido mis delirios y siempre me han animado a continuar hasta el final.

A mi familia, que han mostrado un interés permanente por mi trabajo, me han alentado a cumplir con mi objetivo, y me han ayudado en todo lo que han podido para que pudiese llegar hasta aquí.

A mis padres, que siempre me han dado todo lo que han tenido, pero especialmente me han enseñado a ser responsable, una cualidad sin la que hoy en día no estaría donde estoy ni sería quien soy.

A Alex y Guille, Guille y Alex. He aprendido mucho de ellos y con ellos cuando creía que ya lo sabía todo. Han colaborado con todo lo que han podido para que yo tuviese tiempo para trabajar y para escribir. Espero que se sientan orgullosos y que en algún momento de sus vidas esto les pueda servir de inspiración.

A Nati, porque su sacrificio ha sido mayor que el mío en todo este tiempo, por ser el aliento que incesantemente me ha impulsado en este viaje, porque lo ha dado todo de forma desinteresada y porque siempre ha estado conmigo, a mi lado, donde la he necesitado y cuando la he necesitado. *Imposible sin ti.*



# RESUMEN

La gestión del tráfico es una tarea que requiere disponer de la máxima información sobre el estado de las vías de circulación y sobre los vehículos que las utilizan. Esta información se obtiene a través del procesamiento de los datos que ofrecen un gran conjunto de sensores distribuidos sobre la infraestructura y los vehículos que se desea monitorizar. En este contexto, los datos más apreciados son los que permiten conocer los itinerarios individuales de cada vehículo, y son muy pocos los tipos de sensores que pueden ofrecerlos a través de un proceso de re-identificación de vehículos en distintos puntos de la red viaria.

Los sensores magnéticos se han aplicado a la detección del tráfico desde los años 1960. La evolución tecnológica de los últimos años ha permitido la aparición de un nuevo tipo de sensores que pueden obtener información muy detallada de los vehículos en movimiento: los sensores magneto-resistivos. Estos sensores son capaces de obtener una caracterización propia de cada vehículo a través de una huella magnética, que no es más que una representación de la interferencia que genera un vehículo en movimiento sobre el Campo Magnético de la Tierra.

Las huellas magnéticas obtenidas de los sensores magneto-resistivos se han utilizado recientemente con fines de clasificación y re-identificación de vehículos. Los estudios científicos que han fundamentado estas aplicaciones constatan la dificultad de obtener con precisión la información relevante para estos fines. Los principales problemas con los que se han enfrentado los investigadores han sido la obtención de huellas magnéticas de todos los vehículos (detección), la extracción de la información relevante de cada huella magnética (segmentación de la señal), la selección de los datos de los sensores adecuados para cada una de las aplicaciones (procesamiento de la señal), la utilización de un método óptimo de comparación de vehículos a través de sus huellas (medida de similitud), la definición de una arquitectura de sensorización adecuada para la adquisición de los datos relevantes de los vehículos (red de sensores) y la consideración del modelo magnético del vehículo en los procedimientos de re-identificación (caracterización magnética del vehículo).

Esta tesis profundiza en estos problemas y propone nuevas soluciones para mejorar los ratios de re-identificación de vehículos en el caso de las vías interurbanas, donde las velocidades elevadas y las trayectorias de los vehículos representan una dificultad añadida con respecto al caso de las vías urbanas en las que se desarrollan la mayor parte de estudios de la literatura.

En primer lugar se aborda el estudio de las señales que proporcionan los sensores magneto-resistivos y la eficacia de las medidas de similitud que han sido utilizadas por otros investigadores con fines de re-identificación. Como resultado de este estudio se propone un nuevo método de extracción y comparación de señales con una parametrización adecuada de los procedimientos de tratamiento de señales y una selección adecuada y justificada de la medida de similitud. También se propone una técnica de alineación de señales que permite obtener valores de similitud más altos y mejora la eficacia de la re-identificación.

Posteriormente se analiza el modelo magnético de un vehículo según los datos que perciben los sensores magneto-resistivos. Este análisis pone de manifiesto la complejidad de la estructura de los vehículos y permite determinar y cuantificar las zonas que son más adecuadas para la extracción de huellas magnéticas que vayan a ser utilizadas con fines de re-identificación.

Finalmente, se realiza un experimento en un entorno real (autopista M-12) donde se despliega una nueva configuración de sensores para la re-identificación y se aplican todos los algoritmos y procedimientos de tratamiento y comparación de señales resultantes de las tareas previas. Con ello se constata la mejora que supone la metodología propuesta en esta tesis sobre los trabajos previos de otros investigadores en términos de ratios de re-identificación correctos.

# RESUM

La gestió del tràfic és una tasca que requereix disposar de la màxima informació sobre l'estat de les vies de circulació i sobre els vehicles que les utilitzen. Esta informació s'obté a través del processament de les dades que ofereixen un gran conjunt de sensors distribuïts sobre la infraestructura i els vehicles que es desitja monitoritzar. En este context, les dades més apreciades són les que permeten conèixer els itineraris individuals de cada vehicle, i són molt pocs els tipus de sensors que poden oferir-los a través d'un procés de re-identificació de vehicles en distints punts de la xarxa viària.

Els sensors magnètics s'han aplicat a la detecció del tràfic des dels anys 1960. L'evolució tecnològica dels últims anys ha permès l'aparició d'un nou tipus de sensors que poden obtindre informació molt detallada dels vehicles en moviment: els sensors magneto-resistius. Estos sensors són capaços d'obtindre una caracterització pròpia de cada vehicle a través d'una empremta magnètica, que no és més que una representació de la interferència que genera un vehicle en moviment sobre el Camp Magnètic de la Terra.

Les empremtes magnètiques obtingudes dels sensors magneto-resistius s'han utilitzat recentment amb fins de classificació i re-identificació de vehicles. Els estudis científics que han fonamentat estes aplicacions constaten la dificultat d'obtindre amb precisió la informació rellevant per a estos fins. Els principals problemes amb què s'han enfrontat els investigadors han sigut l'obtenció d'empremtes magnètiques de tots els vehicles (detecció), l'extracció de la informació rellevant de cada empremta magnètica (segmentació del senyal), la selecció de les dades dels sensors adequats per a cada una de les aplicacions (processament del senyal), la utilització d'un mètode òptim de comparació de vehicles a través de les seues empremtes (mesura de similitud), la definició d'una arquitectura de sensorització adequada per a l'adquisició de les dades rellevants dels vehicles (xarxa de sensors) i la consideració del model magnètic del vehicle en els procediments de re-identificació (caracterització magnètica del vehicle).

Esta tesi aprofundeix en estos problemes i proposa noves solucions per a millorar els ràtios de re-identificació de vehicles en el cas de les vies interurbanes, on les velocitats elevades i les trajectòries dels vehicles representen una dificultat afegida respecte al cas de les vies urbanes en què es desenvolupen la major part d'estudis de la literatura.

En primer lloc s'aborda l'estudi de les senyals que proporcionen els sensors magneto-resistius i l'eficàcia de les mesures de similitud que han sigut utilitzades per altres investigadors amb fins de re-identificació. Com a resultat d'este estudi es proposa un nou mètode d'extracció i comparació de senyals amb una parametrització adequada dels procediments de tractament de senyals i una selecció adequada i justificada de la mesura de similitud. També es proposa una tècnica d'alineació de senyals que permet obtindre valors de similitud més alts i millora l'eficàcia de la re-identificació.

Posteriorment s'analitza el model magnètic d'un vehicle segons les dades que proporcionen els sensors magneto-resistius. Este anàlisi posa de manifest la complexitat de l'estructura dels vehicles i permet determinar i quantificar les zones que són més adequades per a l'extracció d'empremtes magnètiques que vagen a ser utilitzades amb fins de re-identificació.

Finalment, es realitza un experiment en un entorn real (autopista M-12) on es desplega una nova configuració de sensors per a la re-identificació i s'apliquen tots els algorismes i procediments de tractament i comparació de senyals resultants de les tasques prèvies. Així es constata la millora que suposa la metodologia proposada en esta tesi sobre els treballs previs d'altres investigadors en termes de ràtios de re-identificació correctes.

# ABSTRACT

Traffic Management is a task that needs as much information as possible about the roads status and about the vehicles that are circulating on them. This information is usually obtained by processing the data that can be extracted from a large set of sensors located around the roads and from the circulating vehicles. In this context, the most appreciated data is that about the individual paths of each and every vehicle. However, few are the types of sensors that can provide the traffic managers with this kind of data by means of a re-identification process at different points of the road network.

Magnetic sensors have been applied to traffic detection since the 1960's. The evolution of the technology in the most recent years has brought a new type of sensors that can extract very detailed information from the moving vehicles: the magneto-resistive sensors. These sensors can obtain a particular characterization of every vehicle through a magnetic fingerprint. The magnetic fingerprint is just the representation of the interference that a moving vehicle causes to the Earth magnetic field.

Magnetic fingerprints from magneto-resistive sensors have been recently used for vehicle classification and re-identification purposes. The work of scientists in this field shows the difficulties of getting accurate data for these objectives. The major problems that have been found are the acquisition of magnetic fingerprints for all vehicles (detection), the extraction of relevant information from the magnetic time series (signal segmentation), the selection of the appropriate data of each signal for a particular problem (signal processing), the use of an optimal method to compare vehicles through their magnetic fingerprints (similarity measure), the definition of a sensors architecture to gather the relevant information from the vehicles (sensor network) and the consideration of a magnetic model for the vehicles during the re-identification process (magnetic characterization of the vehicles).

This thesis deals with the above mentioned problems and proposes new solutions to improve the vehicles re-identification ratios for inter-urban roads. In this

environment, the high vehicles speeds and varying trajectories increase the problem complexity in contrast to the urban roads, where almost all the previous studies have been carried out.

Firstly, a study of the signals produced by the magneto-resistive sensors will be made, together with an analysis of the similarity measures that have been used by other researchers with re-identification purposes. The result of the study will be a new signal extraction and comparison method, the definition of a procedure for an adequate signal processing phase, and the justified definition of a similarity measure to compare vehicles. A signal alignment technique will also be proposed in order to improve the similarity values and the vehicles re-identification ratios.

Secondly, a vehicle magnetic model will be studied by using the data gathered by the magneto-resistive sensors. The complexity of the vehicles structure will be analyzed and the longitudinal vehicle section that can produce the best signals for re-identification will be bounded.

Finally, an experiment with real traffic conditions will be made (M-12 highway). A new configuration for a sensors network will be tested. The algorithms and procedures defined during the previous work and experiments will be put into practice and tested. The results of the final experiment will show the improvements that the proposed methodology has on vehicle re-identification performance, compared to previous research works.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Motivación.....	2
1.2.	Antecedentes.....	4
1.3.	Planteamiento del problema.....	8
1.4.	Organización de la memoria.....	10
2.	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	13
2.1.	Objetivos.....	13
2.2.	Metodología.....	15
2.2.1.	Análisis de tecnologías y estudios previos.....	15
2.2.2.	Estudio de las señales de los sensores AMR para re-identificar vehículos.....	16
2.2.3.	Análisis del comportamiento de los ejes del sensor AMR para la re-identificación. Definición de medida de similitud óptima.....	17
2.2.4.	Diseño de un método de alineación de señales para mejorar los valores de similitud.....	18
2.2.5.	Estudio del efecto de la posición vehículo-sensor.....	18
2.2.6.	Diseño e implementación de una configuración de dispositivos en una autopista.....	19
2.2.7.	Validación del método de re-identificación propuesto en un entorno de trabajo real.....	20
3.	ESTADO DE LA TÉCNICA.....	21
3.1.	Tecnologías para la detección de tráfico.....	22
3.2.	Detectores magnéticos.....	31
3.2.1.	Espiras Magnéticas.....	31
3.2.2.	Sensores Magneto-Resistivos.....	36
3.3.	Re-identificación de vehículos con sensores magnéticos.....	52

4.	RE-IDENTIFICACIÓN DE VEHÍCULOS CON SENSORES AMR .....	67
4.1.	Introducción .....	68
4.2.	Entornos experimentales .....	74
4.2.1.	Entorno de simulación.....	74
4.2.2.	Entorno de pruebas controlado con vehículos reales.....	81
4.3.	Métodos de extracción y comparación de señales.....	84
4.3.1.	Criterios de segmentación y extracción de la señal.....	84
4.3.2.	Propuesta de método de extracción de la señal.....	96
4.4.	Estudio de medidas de similitud .....	106
4.4.1.	Selección de métodos de comparación de señales.....	106
4.4.2.	Proceso experimental.....	111
4.4.3.	Resultados experimentales en el entorno de simulación.....	113
4.4.4.	Resultados experimentales en el entorno de pruebas controlado..	140
4.4.5.	Análisis de resultados y conclusiones.....	164
5.	MEDIDAS DE SIMILITUD MEJORADAS .....	171
5.1.	Selección de componentes para la medida de similitud .....	172
5.1.1.	Descripción del proceso experimental .....	173
5.1.2.	Resultados experimentales .....	178
5.1.3.	Conclusiones.....	189
5.2.	Alineación de las señales para el proceso de comparación .....	189
5.2.1.	Descripción y estudio del problema de alineación de señales .....	190
5.2.2.	Método de alineación de señales.....	201
5.2.3.	Resultados experimentales .....	210
5.3.	Conclusiones .....	222
6.	EFFECTO DE LA POSICION VEHICULO-SENSOR .....	225
6.1.	Introducción .....	226
6.2.	Caracterización magnética de un vehículo.....	227
6.3.	Análisis del modelo magnético .....	239
6.4.	Conclusiones .....	248
7.	APLICACIÓN A LA SENSORIZACIÓN DE UN ENTORNO INTERURBANO.....	253
7.1.	Dispositivo de sensorización AMR para vías interurbanas. ....	254
7.1.1.	Dispositivos existentes .....	254

---

7.1.2.	Requisitos y características del dispositivo sensor .....	261
7.1.3.	Prototipo de dispositivo sensor .....	264
7.2.	Configuración del entorno experimental.....	268
7.2.1.	Ubicación del experimento.....	268
7.2.2.	Configuración del punto de sensorización.....	272
7.3.	Proceso experimental y resultados .....	285
7.3.1.	Descripción del experimento.....	285
7.3.2.	Resultados .....	289
7.4.	Conclusiones .....	303
8.	CONCLUSIONES FINALES.....	311
8.1.	Consecución de los objetivos .....	311
8.2.	Resultados de Investigación.....	314
8.2.1.	Análisis del comportamiento de los ejes de un sensor AMR y justificación de una medida de similitud óptima.....	314
8.2.2.	Definición de un nuevo procedimiento de pre-procesamiento de señales .....	315
8.2.3.	Diseño de un procedimiento de Alineación de Señales.....	316
8.2.4.	Descripción del modelo magnético de un vehículo.....	317
8.2.5.	Definición de un nuevo modelo de sensorización para vías interurbanas .....	318
8.3.	Trabajo futuro .....	319
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	323
9.1.	Aportaciones propias .....	323
9.2.	Referencias.....	325
10.	ANEXOS.....	347
10.1.	Anexo I. Lista de vehículos utilizados en el entorno de pruebas controlado.....	349
10.2.	Anexo II. Muestra de datos de similitud.....	351
10.3.	Anexo III. Histogramas de los valores obtenidos de las medidas de similitud.....	353
10.4.	Anexo IV. Datos de evolución de la cardinalidad de $E_{p_{i,j}}$ y $E_{a_{i,j}}$ por percentiles .....	359

---

10.5. Anexo V. Señales para la creación del modelo magnético de un vehículo.....	363
10.6. Anexo VI. Muestras por velocidad y frecuencia .....	365
10.7. Anexo VII. Datos técnicos del dispositivo sensor.....	367
10.8. Anexo VIII. Definición de la trama de red del sensor.....	369
10.9. Anexo IX. Secuencias de paso de vehículos objetivo en el experimento final .....	371
10.10. Anexo X. Comparación de señales de vehículos de la misma marca y modelo .....	391

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema funcional de una espira magnética (Ali et al. 2012).....	33
Figura 2. Instalación de espiras en la carretera CV-36 (Valencia).....	33
Figura 3. Ejemplo de huellas magnéticas de vehículos obtenidas de espiras magnéticas (Ritchie et al. 2002).....	34
Figura 4. Comparación de huellas del mismo vehículo en 2 espiras magnéticas para determinar la velocidad de paso (Ritchie et al. 2008).....	35
Figura 5. Ejemplo de magnetómetros comerciales: a) Groundhog G-8 de NuMetrics, b) Sensor inalámbrico de Sensys Networks (Mimbela et al. 2007) .....	37
Figura 6. a) Resistencia de un sensor AMR según el ángulo entre la magnetización y la dirección de la corriente; b) cambio del ángulo debido a una aplicación de un campo magnético (Lenz & Edelstein 2006). .....	38
Figura 7. Esquema de la disposición de las direcciones del campo magnético y la corriente eléctrica en un material magneto-resistivo (Kang et al. 2005)... ..	39
Figura 8. Huella Magnética de un vehículo en 3 ejes (Caruso & Withanawasam 1999) .....	41
Figura 9. Uso de sensores AMR de Honeywell para a) detección y huella magnética de un vehículo; b) sistema de cálculo de la velocidad (Honeywell 2005).....	42
Figura 10. Conversión de huella magnética a una estructura “hill pattern” .....	45
Figura 11. Configuración de sensores para el experimento de re-identificación de vehículos en (Cheung, Coleri & Varaiya 2005) .....	54

---

Figura 12. Configuración de los 7 sensores AMR en línea para re-identificar vehículos (Cheung & Varaiya 2007).....	55
Figura 13. Grafo de edición para resolver el emparejamiento de vehículos basado en la matriz de distancias (Kwong et al. 2009b).....	58
Figura 14. Dispositivo de sensorización compuesto por 10 sensores AMR de 3 ejes con la identificación del sensor usado en (Charbonnier et al. 2012).....	61
Figura 15. Ejemplo de la medida de la variación del campo magnético de la tierra por un sensor AMR al paso de un objeto metálico (Lenz & Edelstein 2006).....	69
Figura 16. Variación de la magnitud medida por un sensor AMR en función de la distancia de paso (Caruso & Withanawasam 1999) .....	70
Figura 17. Ejemplo de la medida de la variación del campo magnético de la tierra en 3 direcciones por un sensor AMR al paso de un vehículo (Charbonnier et al. 2012) .....	71
Figura 18. Sensor Honeywell HMC2003 (Honeywell 2011).....	71
Figura 19. Sensor comercial Honeywell HMR2300 (Honeywell 2012) .....	73
Figura 20. Tetraedro con propiedades magnéticas, en diferentes posiciones.....	77
Figura 21. Disposición del tetraedro magnético en uno de los compartimentos del remolque del simulador .....	79
Figura 22. Distintas disposiciones del tetraedro magnético .....	80
Figura 23. Circuito del entorno experimental de simulación .....	80
Figura 24. Parking del IRTIC. Ubicación del entorno de pruebas controlado .....	82
Figura 25. Parking del IRTIC. Detalle de la ubicación del entorno de pruebas controlado.....	83
Figura 26. Circuito del entorno experimental de simulación .....	84

---

Figura 27. a) Señal obtenida de un sensor magnético AMR (Cardell Bilbao et al. 2010); b) Señal obtenida de una espira de inducción magnética (Blokpoel 2009) .....	88
Figura 28. Medida del campo magnético de la tierra en el eje Z de un sensor AMR para un camión en movimiento sobre el sensor (Haoui et al. 2008).....	90
Figura 29. Modelo de procesos para la extracción de la Señal .....	100
Figura 30. Ejemplo de señal magnética obtenida en el entorno de simulación .....	114
Figura 31. Evolución de variaciones de la similitud en función del nivel de suavizado para señales del entorno de simulación .....	116
Figura 32. Ejemplo de extracción y normalización de la señal de un objeto en el entorno de simulación .....	119
Figura 33. Comparación de la normalización conjunta frente a la normalización independiente de una señal en el entorno de simulación.....	120
Figura 34. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de simulación.....	122
Figura 35. Histograma de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de simulación .....	123
Figura 36. Histograma de Similitudes para el modelo de Distancia Euclídea en el entorno de simulación .....	123
Figura 37. Histograma de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de simulación .....	124
Figura 38. Histograma de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de simulación.....	124
Figura 39. Histograma de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de simulación.....	125

---

Figura 40. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de simulación .....	129
Figura 41. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de simulación .....	129
Figura 42. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de simulación .....	130
Figura 43. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de simulación.....	130
Figura 44. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de simulación .....	131
Figura 45. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de simulación .....	131
Figura 46. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo del Coseno en el entorno de simulación .....	135
Figura 47. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Correlación Cruzada en el entorno de simulación.....	135
Figura 48. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de simulación .....	136
Figura 49. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Average Bar en el entorno de simulación .....	136
Figura 50. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Hill Pattern en el entorno de simulación .....	137
Figura 51. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo DTW en el entorno de simulación .....	137
Figura 52. Ejemplo de señal magnética obtenida en el entorno de pruebas controlado.....	141

Figura 53. Evolución de variaciones de la similitud en función del nivel de suavizado para señales del entorno de pruebas controlado ..... 142

Figura 54. Ejemplo de extracción de señal de vehículo real..... 144

Figura 55. Ejemplo de error en la extracción de señal de vehículo real ..... 145

Figura 56. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado..... 150

Figura 57. Histograma de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de pruebas controlado ..... 150

Figura 58. Histograma de Similitudes para el modelo de Distancia Euclídea en el entorno de pruebas controlado..... 151

Figura 59. Histograma de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de pruebas controlado ..... 151

Figura 60. Histograma de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de pruebas controlado..... 152

Figura 61. Histograma de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de pruebas controlado..... 152

Figura 62. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado ..... 155

Figura 63. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de pruebas controlado ..... 155

Figura 64. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de pruebas controlado..... 156

Figura 65. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de pruebas controlado..... 156

Figura 66. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de pruebas controlado ..... 157

Figura 67. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de pruebas controlado .....	157
Figura 68. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado .....	160
Figura 69. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Correlación Cruzada en el entorno de pruebas controlado.....	160
Figura 70. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de pruebas controlado .....	161
Figura 71. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Average Bar en el entorno de pruebas controlado.....	161
Figura 72. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Hill Pattern en el entorno de pruebas controlado .....	162
Figura 73. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo DTW en el entorno de pruebas controlado .....	162
Figura 74. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a los mismos vehículos para las medidas $M_1$ , $M_2$ y $M_3$ .....	179
Figura 75. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a distintos vehículos para las medidas $M_1$ , $M_2$ y $M_3$ .....	179
Figura 76. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a los mismos vehículos para las medidas $M_4$ a $M_{11}$ .....	180
Figura 77. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a distintos vehículos para las medidas $M_4$ a $M_{11}$ .....	180
Figura 78. Ejemplo de comparación de 2 señales .....	182
Figura 79. Gráfico de evolución del cardinal de $E_p$ en función de los percentiles sobre $E_a$ para cada medida de similitud $M_i$ .....	187

Figura 80. Gráfico de evolución del cardinal de  $E_a$  en función de los percentiles sobre  $E_p$  para cada medida de similitud  $M_i$ ..... 187

Figura 81. Detalle de la evolución del cardinal de  $E_p$  en función del percentil..... 188

Figura 82. Detalle de la evolución del cardinal de  $E_a$  en función del percentil..... 188

Figura 83. Alteraciones de las formas de las señales de un mismo objeto. .... 195

Figura 84. Comparación de señales alineadas ..... 196

Figura 85. Comparación de señales no alineadas ..... 196

Figura 86. Puntos de referencia en señales no alineadas ..... 203

Figura 87. Comparación de similitudes de señales alineadas y no alineadas pertenecientes al mismo objeto..... 208

Figura 88. Comparación de similitudes de señales alineadas y no alineadas pertenecientes a distintos objetos ..... 209

Figura 89. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno con y sin alineación en el entorno de simulación ..... 212

Figura 90. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes con Alineación para el modelo del Coseno en el entorno de simulación ..... 213

Figura 91. Gráfico de precisión de la similitud con alineación para el modelo del Coseno en el entorno de simulación ..... 214

Figura 92. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno con y sin alineación en el entorno de pruebas controlado ..... 215

Figura 93. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes con Alineación para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado ..... 217

Figura 94. Gráfico de precisión de la similitud con alineación para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado ..... 218

---

Figura 95. Modelado magnético de un vehículo con herramientas de simulación (Sifuentes de la Hoya et al. 2013).....	229
Figura 96. Modelado magnético de un vehículo sobre los datos del eje X de un conjunto de 7 sensores AMR situados bajo el vehículo (Cheung & Varaiya 2007) .....	230
Figura 97. Modelado magnético de un vehículo sobre los datos de la magnitud absoluta de sensores AMR situados bajo el vehículo (Burns 2009).....	231
Figura 98. Perfil magnético de un vehículo en el eje X (Karpis 2012) .....	232
Figura 99. Esquema de la configuración experimental para la extracción de datos y la elaboración del modelo magnético de un vehículo. ....	234
Figura 100. Modelo magnético del vehículo estudiado para la componente X de la señal .....	236
Figura 101. Modelo magnético del vehículo estudiado para la componente Y de la señal .....	236
Figura 102. Modelo magnético del vehículo estudiado para la componente Z de la señal .....	237
Figura 103. Mapa de color del vehículo estudiado para las componentes de las señales a) X, b) Y y c) Z.....	238
Figura 104. Similitud media vecinal.....	241
Figura 105. Similitudes entre señales según la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo.....	244
Figura 106. Detalle de similitudes entre señales según la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo .....	245
Figura 107. Proyección en altura del detalle de similitudes entre señales según la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo .....	246

---

Figura 108. Posición recomendada para la ubicación del sensor.....	250
Figura 109. Señal con diferentes niveles de muestreado: a) original, b) 10 muestras, c) 20 muestras, d) 50 muestras, e) 100 muestras.....	260
Figura 110. a) Imagen de la PCB para hospedar el sensor AMR HMC2003. b) Imagen de la PCB montada con el sensor AMR HMC2003 y los componentes.....	265
Figura 111. Dispositivo formado por el sensor AMR sobre una PCB acoplada a un dispositivo modular PIC 32.....	265
Figura 112. Dispositivo sensor encriptado con resina epoxi.....	266
Figura 113. Caja de protección para el dispositivo sensor.....	267
Figura 114. Distintos tipos de prensaestopa de poliamida.....	267
Figura 115. Ubicación del punto de sensorización del experimento final en la M-12. Vista 1. ....	270
Figura 116. Ubicación del punto de sensorización del experimento final en la M-12. Vista 2. ....	270
Figura 117. Ubicación del punto de sensorización del experimento final en la M-12. Vista 3. ....	271
Figura 118. Detalle del punto de instalación de los sensores en la M-12.....	271
Figura 119. Disposición de sensores en el trabajo de (Sanchez et al. 2011a).....	274
Figura 120. Disposición de sensores en el trabajo de (Cheung & Varaiya 2007) .	274
Figura 121. Disposición de sensores en el trabajo de (Cheung, Coleri & Varaiya 2005) .....	275
Figura 122. Disposición de sensores en el trabajo de (Liu et al. 2009) .....	276
Figura 123. Disposición de sensores en el trabajo de (Sanchez 2012).....	276

---

Figura 124. a) Paso ideal del vehículo sobre los sensores; b) peor paso posible del vehículo sobre los sensores .....	279
Figura 125. Esquema de la situación relativa de los sensores con respecto al centro del vehículo en diferentes pasos por la zona de sensorización.....	280
Figura 126. Configuración de los sensores en un solo carril. ....	283
Figura 127. Configuración de los sensores en dos carriles. ....	284
Figura 128. Fotografía del carril durante la instalación de los dispositivos.....	284
Figura 129. Fotografía de la zona sensorizada tras la instalación.....	285
Figura 130. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_1$ .....	353
Figura 131. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_2$ .....	353
Figura 132. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_3$ .....	354
Figura 133. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_4$ .....	354
Figura 134. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_5$ .....	355
Figura 135. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_6$ .....	355
Figura 136. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_7$ .....	356
Figura 137. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_8$ .....	356
Figura 138. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_9$ .....	357
Figura 139. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_{10}$ .....	357
Figura 140. Histograma de los valores de similitud para la medida $M_{11}$ .....	358
Figura 141. Señales obtenidas para la creación del modelo magnético de un vehículo. ....	363

---

Figura 142. Señales definitivas y ordenadas por posición para la creación del modelo magnético de un vehículo.....	364
Figura 143. Número de muestras en función de la velocidad del vehículo y la frecuencia de muestreo del sensor. ....	365
Figura 144. Tarjeta MICROCHIP DM320004 PIC32 Ethernet Starter Kit .....	367
Figura 145. Tarjeta MICROCHIP DM320002 PIC32 I/O Expansion Board .....	368



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de sensores según su nivel de intrusión .....	25
Tabla 2. Resumen de estudios y ratios de re-identificación analizados .....	65
Tabla 3. Datos de máximos relativos en la evolución de la similitud en función del suavizado en el entorno de simulación .....	117
Tabla 4. Datos característicos de las señales de prueba en el entorno de simulación.....	118
Tabla 5. Resumen de datos de similitud para los distintos métodos en el escenario de simulación.....	121
Tabla 6. Representación gráfica de las matrices de similitud para el entorno de Simulación .....	127
Tabla 7. Detalle de los valores de similitud para los puntos óptimos de la Curva ROC en el entorno de simulación .....	132
Tabla 8. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para cada método de similitud en el entorno de simulación .....	134
Tabla 9. Tiempos de ejecución de cada algoritmo en el entorno de simulación. ..	138
Tabla 10. Datos característicos de las señales de prueba en el entorno de pruebas controlado.....	143
Tabla 11. Resumen de datos de similitud para los distintos métodos en el entorno de pruebas controlado .....	147
Tabla 12. Representación gráfica de las matrices de similitud para el entorno de pruebas controlado.....	153

Tabla 13. Detalle de los valores de similitud para los puntos óptimos de la Curva ROC en el entorno de pruebas controlado.....	158
Tabla 14. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para cada método de similitud en el entorno de pruebas controlado.....	159
Tabla 15. Tiempos de ejecución de cada algoritmo en el entorno de pruebas controlado.....	163
Tabla 16. Percentiles de los valores de similitud de las medidas $M_i$ para las comparaciones de los mismos vehículos.....	181
Tabla 17. Percentiles de los valores de similitud de las medidas $M_i$ para las comparaciones de los distintos vehículos.....	181
Tabla 18. Valores de $E_p$ y $E_a$ para las medidas de similitud estudiadas, en valor absoluto y en porcentaje .....	184
Tabla 19. Resumen de datos de similitud para el método del coseno con alineación en el entorno de simulación. ....	212
Tabla 20. Detalle de los valores de similitud para el punto óptimo de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de simulación.....	213
Tabla 21. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de simulación .....	214
Tabla 22. Resumen de datos de similitud para el método del coseno con alineación en el entorno de pruebas controlado. ....	216
Tabla 23. Detalle de los valores de similitud para el punto óptimo de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de pruebas controlado.....	217

---

Tabla 24. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de pruebas controlado .....	217
Tabla 25. Porcentaje de acierto en la re-identificación de vehículos en el entorno de pruebas para las medidas de similitud con alineación de señales .....	219
Tabla 26. Comparación del ratio de re-identificación con el de otros estudios en entornos de prueba controlados.....	220
Tabla 27. Dimensiones del vehículo utilizado para la creación del modelo magnético. ....	235
Tabla 28. Número de emparejamientos en función de condiciones de similitud, distancia entre sensores y distancia media al eje central del vehículo.....	247
Tabla 29. Ratio de aciertos y errores de re-identificación según los límites de distribución espacial de sensores. ....	247
Tabla 30. Resumen de dispositivos de sensorización magnética creados para la realización de experimentos citados en la literatura. ....	258
Tabla 31. Sensores en la zona de confianza del vehículo para cada uno de los pasos del Vehículo A.....	291
Tabla 32. Sensores en la zona de confianza del vehículo para cada uno de los pasos del Vehículo B.....	291
Tabla 33. Datos de paso del Vehículo A recogidos por el sensor central.....	292
Tabla 34. Datos de paso del Vehículo B recogidos por el sensor central.....	293
Tabla 35. Datos de paso del Vehículo A recogidos por el sensor izquierdo.....	294
Tabla 36. Datos de paso del Vehículo A recogidos por el sensor derecho. ....	294
Tabla 37. Datos de paso del Vehículo B recogidos por el sensor izquierdo.....	294

---

Tabla 38. Datos de paso del Vehículo B recogidos por el sensor derecho. ....	295
Tabla 39. Datos de paso del Vehículo A recogidos por los sensores central e izquierdo. ....	296
Tabla 40. Datos de paso del Vehículo A recogidos por los sensores central y derecho. ....	296
Tabla 41. Datos de paso del Vehículo A recogidos por los sensores central, izquierdo y derecho. ....	296
Tabla 42. Datos de paso del Vehículo B recogidos por los sensores central e izquierdo. ....	297
Tabla 43. Datos de paso del Vehículo B recogidos por los sensores central y derecho. ....	297
Tabla 44. Datos de paso del Vehículo B recogidos por los sensores central, izquierdo y derecho. ....	297
Tabla 45. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por el sensor central. .	299
Tabla 46. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por el sensor izquierdo. ....	299
Tabla 47. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por el sensor derecho. ....	300
Tabla 48. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por los sensores central e izquierdo. ....	300
Tabla 49. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por los sensores central y derecho. ....	300
Tabla 50. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por los sensores central, izquierdo y derecho. ....	301
Tabla 51. Comparación del ratio de re-identificación con el de otros estudios en entornos de prueba reales .....	302

---

Tabla 52. Listado de vehículos usados en la entorno de pruebas controlado .....	350
Tabla 53. Muestra de similitudes entre pasos para el entorno de simulación .....	351
Tabla 54. Muestra de similitudes entre pasos para el entorno de pruebas controlado.....	352
Tabla 55. Evolución del cardinal de $E_{p_{i,j}}$ en función del percentil .....	360
Tabla 56. Evolución del cardinal de $E_{a_{i,j}}$ en función del percentil .....	361
Tabla 57. Descripción de la trama de comunicaciones del dispositivo sensor .....	369
Tabla 58. Ejemplo de una trama de comunicaciones del dispositivo sensor.....	370
Tabla 59. Vehículo A. Paso 1.....	371
Tabla 60. Vehículo A. Paso 2.....	372
Tabla 61. Vehículo A. Paso 3.....	373
Tabla 62. Vehículo A. Paso 4.....	374
Tabla 63. Vehículo A. Paso 5.....	375
Tabla 64. Vehículo A. Paso 6.....	376
Tabla 65. Vehículo A. Paso 7.....	377
Tabla 66. Vehículo A. Paso 8.....	378
Tabla 67. Vehículo A. Paso 9.....	379
Tabla 68. Vehículo A. Paso 10.....	380
Tabla 69. Vehículo B. Paso 1.....	381
Tabla 70. Vehículo B. Paso 2.....	382
Tabla 71. Vehículo B. Paso 3.....	383

---

Tabla 72. Vehículo B. Paso 4.....	384
Tabla 73. Vehículo B. Paso 5.....	385
Tabla 74. Vehículo B. Paso 6.....	386
Tabla 75. Vehículo B. Paso 7.....	387
Tabla 76. Vehículo B. Paso 8.....	388
Tabla 77. Vehículo B. Paso 9.....	389
Tabla 78. Vehículo B. Paso 10.....	390
Tabla 79. Vehículo B. Paso 7.....	391
Tabla 80. Vehículo C. Paso 1.....	392

# LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

AMR	Anisotrópico Magneto-Resistivo
AvB	AverageBar
CMT	Campo Magnético de la Tierra
COS	Similitud del Coseno
DEN	Distancia Euclídea Normalizada
DSRC	Dedicated Short Range Communications
DTW	Dynamic Time Warping
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile communications
HP	Hill Pattern
IMD	Intensidad Media Diaria
ITS	Intelligent Transport Systems
IVHS	Intelligent Vehicle-Highway Systems
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIDAR	Laser Imaging Detection And Ranging
PCB	Printed Circuit Board
PoE	Power over Ethernet
RFP	Ratio de Falsos Positivos

- ROC Receiver Operating Characteristic
- RVP Ratio de Verdaderos Positivos
- UMTS Universal Mobile Telecommunications System
- WSN Wireless Sensor Network
- XCOR Correlación Cruzada

# 1.INTRODUCCIÓN

---

La gestión del tráfico en vías urbanas e interurbanas se basa en la toma de decisiones adecuadas en cada momento, según las circunstancias que concurren en el estado del tráfico. La situación ideal para poder tomar una buena decisión es disponer de la máxima información posible, tanto la que se obtiene en tiempo real sobre la situación objetivo como la que proviene de las tendencias históricas en situaciones similares, para realizar predicciones fiables. La información necesaria para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión del tráfico se compone de un compendio de las rutas individualizadas de cada vehículo en tiempo real, junto con un histórico de las tendencias de flujo y movilidad que se puedan relacionar con la situación que se trata. En ambos casos, esta información se obtiene a través de sensores que están situados en las vías que se gestionan y que tratan de individualizar en la medida de lo posible los elementos monitorizados de forma que sean capaces de identificar un vehículo en su paso por distintos lugares.

En la actualidad, la mayor parte de los sensores de tráfico se usan para la obtención de datos agregados y no permiten identificar vehículos individualmente en su paso por distintos lugares. La investigación más reciente en este campo está orientada a mejorar los sensores para que permitan re-identificar vehículos a través diferentes tecnologías. El trabajo que presentamos en esta tesis está enfocado a la mejora de los procedimientos de re-identificación de vehículos utilizando nuevos sistemas de monitorización basados en tecnologías de sensorización magnética.

## 1.1. Motivación

La creciente proliferación del tráfico de vehículos en entornos urbanos e interurbanos está generando una demanda importante en el uso de las vías de transporte (Ministerio de Fomento 2014d) y, por consiguiente, una demanda en la optimización de su gestión con el objetivo de mantener unos buenos niveles de servicio. En el conjunto de la Unión Europea, y en concreto en España, la evolución del parque de vehículos cuyos datos aparecen en los informes (Dirección General de Tráfico 2014a) y (European Commission 2014a) hace necesaria una gestión más eficiente del tráfico para evitar que la calidad del transporte por carretera, los niveles de servicio y la tasa de accidentalidad en las carreteras (Ministerio de Fomento 2014a) se vean afectados negativamente.

La tecnología, a través de los Sistemas de Transporte Inteligente (cuyas siglas en inglés son ITS y corresponden a Intelligent Transport Systems)<sup>1</sup>, está contribuyendo a la mejora de los procesos de gestión del tráfico de diversos modos, desde la construcción de sistemas de información (European Commission 2014b) y la definición de estándares para el intercambio de datos entre países y administraciones (Torres Garrigós et al. 2012), pasando por la construcción de dispositivos de sensorización y monitorización de las carreteras que ofrezcan la máxima información a los operadores de tráfico y a los usuarios, la elaboración de modelos de predicción del comportamiento de tráfico y el establecimiento de protocolos de actuación en caso de emergencias (European Commission 2014c), (European Commission 2012).

Los dispositivos de sensorización tienen un papel esencial en este contexto, puesto que permiten obtener los datos necesarios para la detección temprana de incidencias y el proceso de toma de decisiones en su caso. Existe una variedad importante de tecnologías y dispositivos que aportan información (Klein et al. 2006), tanto a los gestores del tráfico como a los usuarios, aunque ninguno de ellos es capaz por sí solo de proporcionar toda la información necesaria: deben trabajar de forma combinada para aportar una visión global de la situación del tráfico en cualquier momento.

---

<sup>1</sup> Se utiliza la nomenclatura en inglés porque es más ampliamente conocida y utilizada en todos los ámbitos de gestión del transporte, incluyendo los de habla hispana.

Por otro lado, cada dispositivo tiene unas características que lo hacen más propicio para monitorizar determinados parámetros de tráfico, y funcionalmente aportan mayor o menor eficacia en determinados periodos del día. Por ejemplo, las cámaras de tráfico permiten obtener una visión genérica del estado del tráfico en una zona concreta, pero presentan dificultades al tratar de obtener de forma automática información sobre contaje y velocidad de vehículos, en especial si las condiciones climatológicas son adversas (Hautière et al. 2008) y/o las condiciones lumínicas son pobres (Robert 2009).

Es también muy común que, además de los sensores y dispositivos clásicos que no pueden faltar en la infraestructura que controla un centro de gestión de tráfico, aparezcan nuevas ideas basadas en la aplicación y adaptación de tecnologías y sensores desarrollados en otros campos al ámbito del tráfico. Entre los más recientes se pueden destacar, por su relevancia y grado de novedad, las tecnologías laser (Wender & Dietmayer 2008), las comunicaciones de corto alcance (Samedap et al. 2009), las tecnologías de radio frecuencia (Kassem et al. 2012), (Kim et al. 2008) y los sensores de detección magnéticos (Cheung, Coleri & Varaiya 2005). Todos ellos tienen en común la capacidad de poder extraer características propias de cada vehículo a nivel individual, para poderlo re-identificar posteriormente en distintos lugares de paso en su recorrido. A su vez, asociados a los dispositivos, existe una algoritmia encargada de transformar estos datos en información, es decir, realizar un tratamiento global de los datos que permita extraer conclusiones de los mismos.

Los sensores magnéticos basados en materiales magneto-resistivos son los que presentan la mayor novedad e inmadurez tecnológica en estos momentos, tal y como se afirma en (Zhou 2013), a pesar de la investigación realizada en los últimos años. La base de este tipo de sensores ha evolucionado mucho recientemente, de modo que, gracias a las propiedades magneto-resistivas de algunos materiales, se puede no sólo detectar el paso y la presencia de un vehículo, sino también cuantificar la variación del campo magnético de la tierra que genera un objeto con componentes ferrosos (como los vehículos) cuando pasa por su radio de acción, con tal precisión que se puede llegar a plantear su re-identificación (Cheung, Coleri & Varaiya 2005). Este proceso no está exento de dificultades, todavía no resueltas completamente, al igual que sucede con otros tipos de dispositivos, que están relacionadas directamente con la velocidad de los vehículos y su posición de paso relativa con respecto a los sensores.

Uno de los trabajos de investigación a nivel nacional realizados más recientemente con el objetivo de evaluar la aplicación de los sensores AMR a la gestión del tráfico ha tenido lugar en el proyecto OASIS (García-Linares Fontes et al. 2010), subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del programa CENIT 2008-2011. Entre los objetivos de investigación perseguidos en el proyecto está la validación de este método de sensorización para re-identificar vehículos y su capacidad para ser aplicado al control de tráfico en el ámbito de las autopistas. Una parte muy importante de los resultados que se muestran en esta memoria de tesis ha surgido de este proyecto de investigación y de los trabajos realizados por el autor con los sensores magneto-resistivos.

Esta Tesis está fundamentalmente orientada a estudiar las capacidades de este tipo de sensores, analizar los resultados de otros investigadores en este ámbito, y diseñar un sistema (dispositivo y método) que permita mejorar la obtención de datos de un vehículo y su procesamiento, con el fin de llegar a conseguir ratios elevados de re-identificación de vehículos en entornos interurbanos, donde las velocidades y las condiciones de trabajo presentan dificultades adicionales a las que se puede encontrar en los entornos urbanos, que han sido los principales lugares en los que este tipo de sensores ha sido utilizado e investigado en la literatura.

## 1.2. Antecedentes

La incipiente preocupación por el medio ambiente y la sostenibilidad energética está afectando a la gestión de la movilidad, exigiendo a los operadores de tráfico una gestión más racional y la aplicación rápida y eficaz de medidas correctoras en caso de detectar algún problema que le afecte.

Uno de los datos de tráfico más necesarios para una correcta gestión, y que más dificultades presenta para su elaboración, son las matrices origen-destino (Cascetta & Nguyen 1988), (Barceló et al. 2014). Las técnicas de sensorización que permiten generar matrices origen-destino con más fiabilidad son las que están basadas en la re-identificación de vehículos (C. Oh et al. 2002). En la actualidad, los sensores que más se usan con este fin son las cámaras de video que, a través del reconocimiento de matrículas, permiten re-identificar un mismo vehículo en su paso por diferentes lugares (Jiménez et al. 2008). Sin embargo, a pesar de que estos sensores son unos de los más caros del mercado, no aportan una fiabilidad del 100%.

Este hecho conduce a que se mantenga una actividad constante de investigación en el ámbito de las tecnologías aplicadas a la re-identificación de vehículos. Entre las nuevas tecnologías que se han aplicado recientemente en este ámbito se encuentran las basadas en la detección de dispositivos Bluetooth (Barceló et al. 2010), (Blogg et al. 2010), las basadas en las Dedicated Short-Range Communications (DSRC) (Samedap et al. 2009), las que pretenden hacer uso de los dispositivos de pago automático en autopistas de peaje (Kwon & Varaiya 2005) y las basadas en dispositivos RFID (Kim et al. 2008). Se han realizado también trabajos y estudios sobre el uso de tecnologías laser para detectar la forma tridimensional de vehículos en diferentes puntos de paso, con una gran precisión en la obtención y elaboración de las imágenes (Wender & Dietmayer 2008).

Todas estas tecnologías ofrecen buenos resultados bajo determinadas condiciones de trabajo. Sin embargo, no siempre es posible aplicarlas en cualquier situación y contexto, ya sea por las condiciones ambientales o por su coste. Como alternativa para la paliación de estos problemas, ha surgido en este campo una línea de trabajo que se centra en el uso de sensores magnéticos (S. Oh et al. 2002). En algunos casos se han tratado de aprovechar los dispositivos que ya están instalados en las vías de circulación y en otros casos se han desarrollado dispositivos alternativos.

Los sensores magnéticos más primitivos (las espiras magnéticas) trabajan midiendo la variación de la inductancia de un circuito eléctrico cuando un vehículo pasa por encima de éste, y tienen una sensibilidad y precisión reducida, lo que no permite diferenciar con claridad los cambios que producen distintos vehículos o tipos de vehículo a su paso por el sensor. A pesar de ello, existen varios estudios (Sun et al. 1999), (Coifman & Krishnamurthy 2007) que tratan de aplicarlos al problema de la re-identificación con cierto grado de éxito, sin que hayan llegado a extenderse a los sistemas de gestión de tráfico utilizados en los Centros de Gestión.

Sin embargo, el descubrimiento y diseño de materiales con una capacidad de variación importante de su magneto-resistencia ha permitido retomar esta línea de trabajo, gracias a su aplicación a la construcción de sensores que aprovechan la gran sensibilidad de estos materiales a cambios magnéticos en el entorno. Esto hace posible obtener datos muy detallados de variaciones del campo magnético producidas por objetos en el entorno del sensor (Ripka & Janošek 2010). Cuando estas alteraciones las producen objetos en movimiento, se obtienen unas señales (bautizadas con el nombre de **huellas magnéticas**) que representan variaciones

del campo magnético en el tiempo y que pueden llegar a caracterizar de forma unívoca a un vehículo en movimiento. Estas huellas se asemejan mucho, y llegan a ser prácticamente idénticas, en distintas monitorizaciones del mismo vehículo por uno de estos sensores, y son diferentes cuando se comparan con las que proporcionan otros vehículos distintos.

En los últimos años se han desarrollado sensores Magneto-Resistivos Anisotrópicos (AMR) (Lenz & Edelstein 2006), (Honeywell 2011) para su uso en dispositivos que realizan mediciones relacionadas con el campo magnético de La Tierra. Entre las aplicaciones de estos sensores se encuentra la monitorización básica del tráfico en una vía de circulación (Caruso & Withanawasam 1999), (Cardell Bilbao et al. 2010), (Cheung, Coleri, Dundar, et al. 2005) para el conteo de vehículos y para la determinación de su velocidad instantánea (Haoui et al. 2008), pudiendo así sustituir a las espiras magnéticas, dado que aportan más información, más fiabilidad y menor coste de mantenimiento.

Sin embargo, la aplicación de estos nuevos sensores para la re-identificación de vehículos y el uso de una medida de similitud que permita comparar huellas magnéticas, compaginando la capacidad de emparejamiento de señales pertenecientes al mismo vehículo con la capacidad de discriminación de vehículos distintos, no se ha extendido en una aplicación práctica en los centros de gestión de tráfico debido a las dificultades que plantea.

Estas dificultades se pueden concretar en tres problemas principales que no se han resuelto completamente. El primer problema reside en la capacidad de procesamiento de los sensores, puesto que la construcción de dispositivos de este tipo se ha orientado a crear estructuras de redes de sensores inalámbricas que, por sus requisitos de bajo consumo (Kaewkamnerd et al. 2008), no permiten obtener datos con el máximo nivel de detalle para todas las condiciones de trabajo que se puedan dar (por ejemplo, para vehículos que circulan a elevadas velocidades en vías interurbanas).

El segundo problema se encuentra en la variación de las formas de las señales que se extraen de los vehículos en función de la velocidad con la que circulan (Haoui et al. 2008). Aunque el problema de la velocidad se ha tenido en cuenta en prácticamente todos los estudios de re-identificación de vehículos, se han propuesto distintas formas de afrontarlo sin que se haya proporcionado una solución que resuelva definitivamente este problema.

El tercer problema consiste en la variabilidad de los datos obtenidos de un vehículo por un sensor según la posición relativa de paso del vehículo con respecto al mismo. Se ha constatado que las huellas obtenidas por un sensor AMR de un vehículo en diferentes posiciones son distintas (Cheung & Varaiya 2007). En estas condiciones, no se puede garantizar la obtención de huellas magnéticas idénticas para un mismo vehículo en distintas mediciones.

Esto conduce a que no se pueda re-identificar un vehículo en base a huellas magnéticas si estas no son comparables. Este es el problema más grave que existe en este ámbito y todavía no se ha definido una solución completa (configuración de redes de sensores, métodos selección de datos, justificación científica de la selección de datos para la re-identificación) de manera que se puedan obtener huellas magnéticas que garanticen los mejores valores de similitud cuando pertenecen al mismo vehículo y se comparan utilizando una determinada medida de similitud.

Existen ya algunos trabajos que han tratado de abordar estos problemas y que se toman como punto de partida para el desarrollo de esta tesis en base a un análisis de las técnicas, algoritmos y soluciones propuestas en estudios anteriores. Una de las alternativas propuestas, por ejemplo, consiste en extraer datos de un conjunto de sensores distribuidos uniformemente sobre el carril que se desea monitorizar (Kwong et al. 2010). En este caso los datos utilizados son los picos de las señales capturadas. Sin embargo, el problema que se plantea es que se obtienen pocos datos cuando el objetivo es la re-identificación de vehículos, aunque el procedimiento propuesto consigue realizar un emparejamiento parcial de vehículos en unas condiciones de trabajo muy particulares.

Respecto a las medidas de similitud utilizadas para comparar huellas magnéticas, no queda claro en los estudios encontrados en la literatura con anterioridad a esta tesis cuál es el método más fiable y adecuado. De hecho, este es un aspecto débil en la literatura. Aunque es posible encontrar una comparativa de medidas de similitud cuando se trabaja con espiras magnéticas (Abdulhai & Tabib 2003), no existe ningún estudio orientado a comparar las medidas de similitud que se pueden utilizar en base a los datos extraídos de los sensores AMR.

### 1.3. Planteamiento del problema

Esta Tesis Doctoral plantea y aborda el problema de la re-identificación anónima de vehículos que circulan por una red de carreteras (entornos interurbanos), con fines de gestión de tráfico, utilizando las huellas magnéticas que producen los vehículos en movimiento y que se recogen cuando pasan por encima de sensores magnéticos. Los sensores magnéticos que se utilizan para la obtención de los datos son de tipo anisotrópico magneto-resistivo.

Se pretende definir y evaluar un método de obtención y comparación de huellas magnéticas que permitan una re-identificación de vehículos que resuelva los problemas que se han planteado en la literatura y mejore los resultados de los sistemas actuales. El método consta de un conjunto de procesos y técnicas para la obtención, emparejamiento y comparación de señales correspondientes a las perturbaciones que generan los vehículos en el campo magnético de La Tierra debido a su movimiento y que son capturadas por sensores AMR.

El desarrollo de este método consiste en resolver los siguientes problemas: en primer lugar, la construcción de un dispositivo de sensorización con una sensibilidad suficiente como para permitir obtener señales de vehículos que se mueven a gran velocidad; en segundo lugar, la definición de una metodología para la extracción, tratamiento y emparejamiento óptimo de las señales obtenidas; por último, la definición de una configuración de redes de sensores que garanticen la obtención de los datos idóneos para comparar vehículos y obtener los mejores ratios posibles de re-identificación.

Es necesario tener en cuenta una serie de factores que van a incrementar la complejidad de estos problemas. Por un lado, las variaciones en la velocidad de paso de un vehículo sobre un sensor, que generan señales (huellas magnéticas) distintas en cuanto al muestreo y amplitud se refiere, aunque intrínsecamente contienen la misma información. La comparabilidad de estas huellas se sustentará en la posibilidad de aplicar un procedimiento de normalización de las señales para que puedan ser emparejadas convenientemente. Por otro lado, el comportamiento del sensor en distintas condiciones ambientales, dado que los sensores AMR son relativamente sensibles a la temperatura, de manera que será necesario incorporar este comportamiento en los métodos de extracción de señales. También será necesario resolver el problema de la instalación de los sensores en un entorno de

trabajo real para realizar experimentos. En este caso habrá que diseñar un sistema de encapsulamiento que permita introducir el sensor en el asfalto y extraer la información que proporciona, siguiendo las normativas vigentes en este ámbito.

Como ya hemos dicho anteriormente, para resolver el problema de la sensibilidad para la detección de vehículos a gran velocidad se debe trabajar con sensores que puedan ofrecer frecuencias de muestreo elevadas. El fin perseguido es que se puedan obtener un número significativo de muestras en las señales de vehículos con velocidades elevadas, elemento que diferencia el caso que se trata en esta tesis con el caso de una zona urbana (el más estudiado hasta el momento en la literatura), donde las velocidades son significativamente inferiores. Dado que no existen este tipo de sensores en el mercado, una de las tareas consistirá en definir las características de este dispositivo y encargar la construcción de un sensor que proporcione esta funcionalidad.

El problema de la definición del método de extracción y comparación de huellas magnéticas se enfocará desde un análisis de los métodos utilizados en la literatura y se realizará una propuesta para la segmentación de la señal obtenida de los sensores. También se evaluarán diferentes medidas de similitud que contemplen todos los datos que se pueden obtener de un sensor AMR y se justificará la elección de una medida de similitud óptima de entre un conjunto de medidas propuestas y analizadas.

Para resolver el problema de la obtención de huellas magnéticas idóneas de cada vehículo hay que tener en cuenta que la posición relativa del sensor con respecto al vehículo en movimiento influye en la forma de las señales (huellas magnéticas) obtenidas, que no son comparables para un mismo vehículo en el caso en que dichas posiciones sean diferentes: las huellas magnéticas de distintas posiciones de un mismo vehículo son intrínsecamente distintas. Se debe analizar si existen puntos críticos en los vehículos (aquellos en los que la densidad de material ferroso del vehículo es muy elevada) que ocasionan perturbaciones elevadas del campo magnético de La Tierra y generan señales que no pueden ser comparadas con otras del mismo vehículo. También se debe analizar cuáles son las zonas de los vehículos que generan las mejores señales para la re-identificación, en base a que en estas zonas pequeñas variaciones de la posición relativa del sensor con respecto al vehículo no generan grandes diferencias entre las señales obtenidas.

Este último problema será abordado a través del diseño de una configuración de sensores que permita tomar muestras del vehículo en diferentes puntos. La configuración deberá ser capaz de independizar la posición relativa de paso del vehículo en movimiento para obtener señales comparables y con muchas posibilidades de concordancia, lo que se reflejará en el número y distribución de sensores que se deben situar en la carretera. Posteriormente, de las tomas de datos que se realicen de cada vehículo, se determinarán aquellas que son válidas para el proceso de comparación y re-identificación.

Finalmente, el hecho de trabajar con varios sensores para obtener una caracterización de un vehículo a través de distintas huellas correspondientes a diferentes puntos de paso, planteará un último problema: la determinación del número adecuado de señales de los sensores que se deben usar para re-identificar vehículos. Para resolverlo, se estudiará un caso real en el que se monitorizarán vehículos en una autopista y se analizarán los resultados de la re-identificación utilizando un único sensor o varias combinaciones de sensores. Este experimento completará la definición y validará el método que se propone en esta tesis.

## 1.4. Organización de la memoria

La memoria de esta tesis se organiza en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1. En este capítulo se realiza una introducción al problema que la tesis pretende resolver y presenta un esquema de los diferentes elementos que conforman el problema.
- Capítulo 2. Este capítulo detalla los objetivos que se persiguen en esta tesis y describe la metodología que se ha utilizado para llegar a la conclusión de los objetivos planteados y la resolución de todos los problemas que se abordan.
- Capítulo 3. En este capítulo se realiza una revisión de la literatura en las líneas de trabajo en las que se enmarca esta tesis. Se hace especial mención a las tecnologías de sensorización magnética y su aplicación a la re-identificación de vehículos, en particular a la capacidad que ofrecen los sensores AMR y su estado de desarrollo.

- Capítulo 4. Este capítulo presenta un estudio de la señal magnética generada por un sensor AMR de 3 ejes y analiza las diferentes alternativas que existen para extraer la parte relevante de la señal de una serie temporal. Como consecuencia, se propone un método de segmentación de la señal para lograr este objetivo. También se analizan diferentes medidas de similitud que aparecen en la literatura para comparar señales o series temporales, en particular las que provienen de sensores AMR o sensores magnéticos utilizados en la gestión de tráfico. Se determinará la capacidad de re-identificación de cada una de las medidas en base a dos experimentos diseñados ad-hoc: un entorno de simulación y un entorno controlado con vehículos reales.
- Capítulo 5. En este capítulo se identifican los principales problemas que se han encontrado en los experimentos del capítulo anterior para las tareas de re-identificación, y se realiza un estudio de la influencia de los datos de cada eje del sensor AMR en la re-identificación. Se propone una medida de similitud basada en el resultado del estudio del comportamiento de los ejes. También se analiza la casuística de los errores de re-identificación de los experimentos del capítulo anterior, y se propone un método de pre-procesamiento de señales que permite obtener mejores valores de similitud.
- Capítulo 6. Este capítulo analiza los efectos que tiene la posición del sensor con respecto al vehículo en la huella magnética que se obtiene. Este análisis se realiza a través de la caracterización magnética de un vehículo y el estudio de la evolución de las señales obtenidas en distintas posiciones del vehículo, lo que permite determinar las zonas del vehículo más apropiadas y menos apropiadas para obtener buenas huellas magnéticas para la re-identificación.
- Capítulo 7. Tras los estudios y análisis de señales y medidas de similitud en entornos simulados o controlados, en este capítulo se define un método para la re-identificación de vehículos en un entorno interurbano. Se describe en el capítulo todo aquello contemplado en el método, es decir, las características del sensor AMR necesario para las condiciones del tráfico, la solución para su integración en el asfalto en el punto de sensorización y la configuración de la red de sensores para la obtención de las huellas magnéticas. Se presentan los resultados del experimento realizado en

condiciones de tráfico reales y se analiza la necesidad del uso de uno o varios sensores para el método de re-identificación.

- Capítulo 8. Por último, en este capítulo se presentan las conclusiones finales de este trabajo, las principales publicaciones derivadas de él, y las líneas de investigación futuras.
- Anexos. Al final del documento se ha añadido toda aquella información necesaria para comprender el trabajo realizado en esta tesis pero que no se ha considerado conveniente introducir en el cuerpo principal por su tamaño, por su relevancia, o porque podría interrumpir el hilo argumental. De esta forma se han trasladado a los anexos algunas gráficas, datos técnicos y tablas de datos menos relevantes que clarifican y apoyan algunas de las aseveraciones realizadas a lo largo de esta memoria.

## 2.OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

---

En este capítulo se definen de forma detallada los objetivos que se plantean en el desarrollo de esta tesis y la metodología que se va a utilizar para poder alcanzar dichos objetivos.

### 2.1. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis se puede enunciar de la siguiente forma:

*Definición, desarrollo y evaluación de un sistema de monitorización de vehículos en zonas interurbanas basado en la re-identificación de vehículos a través de los datos recogidos por sensores de tipo magneto-resistivo.*

Este objetivo principal se divide en un conjunto de objetivos específicos enfocados a la investigación de las tecnologías a utilizar, el desarrollo de sensores AMR, la definición de algoritmos de detección y re-identificación, y la construcción de un sistema de extracción y comparación de datos de los sensores desarrollados, de la siguiente forma:

1. Analizar las características de las huellas magnéticas que generan los vehículos cuando son detectados por los dispositivos basados en sensores magneto-resistivos.
2. Diseñar algoritmos para la extracción y comparación de huellas magnéticas de vehículos para que puedan ser usadas en los procesos de comparación y emparejamiento de vehículos y además descarten señales que no son válidas para estos procesos.
3. Definir una medida de similitud óptima para la comparación de huellas magnéticas y diseñar un procedimiento de comparación que mejore los resultados de los cálculos de similitud y los ratios de re-identificación con respecto a otros trabajos de investigación previos.
4. Definir un modelo de implantación de los dispositivos sensores en una vía interurbana para poder obtener la máxima información posible con el mínimo número de sensores, teniendo en cuenta los factores que afectan al proceso de obtención de huellas magnéticas.
5. Disponer de un dispositivo capaz de obtener huellas magnéticas significativas correspondientes a los vehículos que circulan por vías interurbanas y que pueden llegar a alcanzar velocidades elevadas.
6. Validar el sistema de sensorización en diferentes etapas y en distintos entornos experimentales de manera progresiva, para ir adaptando los algoritmos y procedimientos de extracción y emparejamiento de señales hasta encontrar un punto de funcionamiento óptimo.

## 2.2. Metodología

En el Capítulo 1 de esta memoria se ha presentado la motivación que conduce a la realización de esta tesis, así como los antecedentes que existen en cuanto a la problemática de la monitorización de vehículos para la gestión del tráfico. En particular se ha mostrado la necesidad de poder re-identificar vehículos para que los gestores de tráfico dispongan de la información más adecuada para desempeñar su trabajo. En ese mismo capítulo también se ha presentado el problema concreto que se aborda en esta tesis y se ha descrito el conjunto de problemas que lo componen y que se deben abordar ordenadamente. En esta sección se define la metodología utilizada para resolver los problemas planteados. Las fases que se han seguido se detallan a continuación.

### 2.2.1. Análisis de tecnologías y estudios previos

La primera parte del trabajo de esta tesis consistió en un estudio de las investigaciones previas realizadas en el campo de la sensorización magnética y la re-identificación de vehículos. Se analizaron los sensores magnéticos que se utilizan en la gestión del tráfico y el uso habitual que se les da, así como las posibilidades de que puedan ser utilizados con fines de re-identificación de vehículos.

Por un lado se investigaron los sensores magnéticos clásicos (espiras magnéticas) y los trabajos que han tratado de utilizar la información que se obtiene de ellos para clasificar y re-identificar vehículos. También se analizó una nueva línea de trabajo basada en el uso de sensores magneto-resistivos para la detección de vehículos, y la base de su funcionamiento. En particular, se analizaron los trabajos realizados con sensores magneto-resistivos y las ventajas que aportan con respecto a las tecnologías magnéticas anteriores, así como los principales inconvenientes que presentan para un uso efectivo.

Se prestó especial atención a las capacidades de re-identificación que otros investigadores han logrado en sus trabajos científicos, comparando los resultados que se obtienen con los sensores en experimentos controlados o en experimentos en condiciones de trabajo reales. También se constataron las principales problemáticas que se han encontrado hasta el momento para poder obtener resultados de re-identificación mejores.

## 2.2.2. Estudio de las señales de los sensores AMR para re-identificar vehículos

Los sensores AMR generan señales que se asocian a un vehículo concreto y que pueden servir para re-identificarlo en distintas mediciones. Para conseguir este objetivo hay que acometer dos acciones: extraer la señal que genera un vehículo de una serie temporal de datos que ofrece el sensor y definir un método de comparación de señales que ofrezca unos valores de similitud elevados cuando pertenecen al mismo vehículo y bajos cuando pertenecen a vehículos distintos.

El proceso de extracción de la señal (o segmentación) se ha detallado muy poco en la literatura y no se ha establecido un procedimiento estándar para el mismo. Este procedimiento puede depender de los sensores y de los objetos a sensorizar, lo que implica realizar una calibración del sensor para su uso en cada instalación.

En esta fase de la investigación se realizó un estudio de las señales que generan distintos objetos, y se establecieron y validaron unos criterios de segmentación que permitieron realizar el proceso de extracción de la huella magnética de un vehículo de la serie temporal que ofrece el sensor.

Para poder realizar el estudio de los sensores AMR y su capacidad de respuesta era necesario disponer de al menos un entorno experimental y al menos un sensor. Para esta tesis se prepararon 2 entornos experimentales distintos en la etapa inicial de la investigación.

En los primeros experimentos realizados se utilizó un sensor comercial que permitió analizar la información básica que se puede obtener en distintas condiciones de trabajo y para distintos tipos de objetos. Este sensor se utilizó en los 2 entornos experimentales.

El primer entorno experimental consistió en la construcción un sistema de simulación basado en un circuito de coches eléctricos en miniatura (Scalextric<sup>®</sup>), donde se realizaron las pruebas de laboratorio que permitieron realizar experimentos con más facilidad y más rapidez. Los resultados obtenidos en este entorno experimental sirvieron para analizar la viabilidad del trabajo de investigación según se fue desarrollando.

El segundo entorno experimental consistió en un entorno de pruebas con vehículos reales, en una zona libre de tráfico, donde se aplicaron los resultados obtenidos en el entorno de simulación y se refinaron y perfeccionaron los algoritmos y procedimientos estudiados. De este entorno se extrajeron conclusiones aplicables al caso particular de detección de vehículos.

Siguiendo los procedimientos de trabajo descritos en la literatura, se configuraron y utilizaron técnicas de pre-procesamiento de señales para conseguir unos valores de similitud mayores al aplicar las medidas de similitud. Como resultado, se definió un proceso de trabajo completo para aplicarlo a la obtención de huellas magnéticas que incluye los aspectos de extracción, pre-procesamiento y normalización de las señales.

La comparación de huellas magnéticas se realiza en base a una medida de similitud que contrasta los valores de las muestras de cada señal. Dado que existen diversas medidas de similitud que se pueden usar con este propósito, se realizó un estudio comparativo de las medidas más relevantes por ser las que más aparecen en la literatura y se valoraron en los 2 entornos experimentales las capacidades de emparejamiento y de discriminación de cada una de ellas. También se tuvo en cuenta el coste computacional de cada medida.

### 2.2.3. Análisis del comportamiento de los ejes del sensor AMR para la re-identificación. Definición de medida de similitud óptima.

Los sensores AMR que se utilizan habitualmente en la re-identificación de vehículos suelen ser sensores de 3 ejes. La información que proporciona cada eje puede ser utilizada o no en el método de re-identificación. En el análisis de los trabajos de investigación previos realizado del estado de la técnica no se encontró ningún estudio que hubiese analizado el comportamiento de los ejes y su aportación positiva o negativa al proceso de re-identificación. En esta fase de la investigación se utilizaron los resultados experimentales de la fase anterior para realizar un análisis del comportamiento de los datos que aportan cada uno de los ejes de los sensores AMR y determinar su influencia en los resultados de la re-identificación de vehículos.

El análisis sirvió para definir una nueva medida de similitud que contempla, por un lado, los datos necesarios de los ejes de los sensores y, por otro lado, la forma de combinarlos para obtener los mejores datos posibles. Esta medida de similitud se basó en una métrica básica seleccionada como la más adecuada por sus resultados y su coste computacional, obtenida de los experimentos de la fase anterior.

#### 2.2.4. Diseño de un método de alineación de señales para mejorar los valores de similitud

Los métodos de comparación de señales computacionalmente más simples que se utilizaron en la valoración previa de las medidas de similitud son dependientes de las alineaciones de la formas de onda. Los métodos que son independientes de ellas son computacionalmente más costosos. Al comparar dos señales con los métodos que ofrecen menor coste no es posible controlar la alineación de las mismas, puesto que esto depende de la forma en la que las señales se han extraído de la serie temporal, es decir, del proceso de segmentación. Si este procedimiento no es lo suficientemente preciso, la falta de alineación se convierte en uno de los motivos que disminuye la efectividad del método de comparación de señales.

En esta fase se diseñó un procedimiento para minimizar este efecto en la comparación de las señales. El procedimiento consiste, fundamentalmente, en la aplicación de una técnica de alineación de señales basada en la transformación lineal de una de ellas para que se ajuste lo más posible a la señal con la que se quiere comparar. Se realizaron experimentos con la aplicación de este algoritmo de alineación de señales y se validó la mejora que supone con respecto al trabajo con las señales originales.

#### 2.2.5. Estudio del efecto de la posición vehículo-sensor

Otro de los factores que influye en la efectividad de la re-identificación, y que se ha contrastado con las experiencias de otros investigadores en la literatura, está basado en la información que el sensor obtiene del vehículo. En este sentido, la posición del sensor con respecto al vehículo es un elemento fundamental para obtener señales comparables.

En esta fase de la tesis se investigó cómo afecta la posición del sensor con respecto al vehículo a la obtención de señales “comparables” para la re-identificación. En los estudios de la literatura se ha constatado que existe este problema, pero no ha sido cuantificado ni se ha propuesto una forma de abordar el problema para minimizar sus efectos.

El estudio realizado en esta tesis se basó en la obtención de una caracterización magnética del vehículo, es decir, en conocer la forma de onda de las huellas magnéticas que se obtienen para distintas secciones longitudinales del vehículo. Este estudio permitió conocer la forma en la que la estructura ferro-magnética del vehículo afecta a las señales que se obtienen del vehículo en cada sección longitudinal.

Con esta información fue posible estudiar los efectos de la variación de la posición del sensor con respecto al vehículo y determinar aquellos puntos en los que pequeñas variaciones de posición relativa afectan mucho a la forma de la señal y los puntos en los que sucede lo contrario. Con estos datos se pudo cuantificar los efectos de la posición vehículo-sensor en las medidas de similitud obtenidas y delimitar las zonas del vehículo óptimas para obtener señales útiles para la re-identificación.

## 2.2.6. Diseño e implementación de una configuración de dispositivos en una autopista

La aplicación del método de re-identificación propuesto en base a los resultados de las investigaciones realizadas hasta este momento requería de un proceso de validación en un entorno de trabajo real. Para ello era necesario disponer, en primer lugar, de un dispositivo de sensorización que se ajustase a las condiciones de circulación de los vehículos en las vías interurbanas, en particular a velocidades elevadas. No se encontraron, ni en la literatura ni en los distribuidores habituales de dispositivos de monitorización, sensores comerciales que pudieran cumplir con los requisitos establecidos y que se detallan en la sección 7.1.2 (pag. 261). Por tanto, fue necesario construir un sensor magnético ad-hoc para la realización de los experimentos en un entorno de trabajo real. La construcción de este sensor no es objetivo de esta tesis, pero fue necesario para el desarrollo de los experimentos.

La disposición del sensor en la carretera es un aspecto importante para obtener las señales adecuadas. Se planteó en esta fase el diseño de una configuración de sensores que permitiese obtener, en base a los criterios obtenidos de posición relativa vehículo-sensor, señales útiles para la re-identificación.

Finalmente, la instalación del conjunto de sensores en carretera requiere ajustarse a la normativa vigente y garantizar tanto la seguridad de los vehículos como la integridad de los sensores frente al paso de vehículos y condiciones ambientales adversas. Por ello se diseñó un contenedor adecuado a la norma para albergar el dispositivo en su instalación final en la carretera.

## 2.2.7. Validación del método de re-identificación propuesto en un entorno de trabajo real

La última fase de la tesis consistió en realizar la validación del método propuesto. Para ello se diseñó un experimento que se debía realizar en condiciones de circulación reales en una vía interurbana.

Se seleccionó un entorno experimental que permitió obtener información de los sensores e información de contraste (a través de cámaras de tráfico dotadas con lectores de matrículas). En el punto seleccionado se realizó la instalación de los dispositivos y se prepararon para la realización del experimento.

Se diseñó un experimento que permitió obtener un ratio de identificación de vehículos en las condiciones de tráfico que se iban a tener en una vía interurbana. Los resultados del experimento se compararon con los resultados de estudios previos y se comprobó de esta forma la validez del método de re-identificación propuesto.

Este trabajo de investigación se ha realizado en el marco del proyecto OASIS (García-Linares Fontes et al. 2010), subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del programa CENIT 2008-2011, donde han participado socios que han cedido sus instalaciones para la realización de las pruebas en el entorno real. En particular la empresa OHL Concesiones ha cedido sus instalaciones en la Autopista Eje-Aeropuerto (M-12) en Madrid para la realización de las pruebas experimentales finales.

## 3. ESTADO DE LA TÉCNICA

---

En este capítulo se han descrito los aspectos técnicos más relevantes relacionados con el desarrollo de esta tesis, y la situación tecnológica actual de los métodos y sistemas aplicados a la detección y re-identificación de vehículos en el ámbito del tráfico. En particular, se han estudiado y analizado los dispositivos de sensorización magnética y se describirá su aplicación y funcionamiento para la gestión del tráfico.

De igual modo, se ha realizado un análisis de los trabajos de investigación que desde una perspectiva histórica han conducido a la situación tecnológica actual en el ámbito de la re-identificación de vehículos, así como las tendencias más novedosas que se pueden encontrar en los trabajos recientes de los investigadores con el uso de sensores magneto-resistivos, ya que son los tipos de sensores en los que se fundamenta el trabajo de esta tesis.

El estudio del estado de la técnica que se presenta aquí se ha abordado desde una estrategia de fuera adentro. Se ha comenzado por realizar una revisión de los principales sistemas de sensorización que se utilizan en la detección y monitorización del tráfico, para poder situar los sensores magnéticos en su contexto. A continuación se ha focalizado el análisis en el funcionamiento de los sensores basados en tecnologías magnéticas. Finalmente, se ha realizado una revisión de los trabajos de re-identificación de vehículos que han utilizado sensores magnéticos de tipo AMR.

Aunque se profundizará en los aspectos mencionados, se hará desde una perspectiva general, abarcando la mayor parte de las características que es necesario conocer antes de emprender un trabajo de investigación como el que aquí se presenta. Sin embargo, los detalles más concretos y específicos de los problemas que se pretenden resolver se han analizado en el momento de abordar cada problemática en particular, y hemos considerado más conveniente documentarlos en los capítulos correspondientes.

### 3.1. Tecnologías para la detección de tráfico

El constante incremento de la población y del número de automóviles en las ciudades está provocando un exceso de la demanda de movilidad. Si a eso se le añade una gestión del tráfico poco eficiente, se genera un aumento de las congestiones con unas consecuencias económicas y medioambientales considerables. La falta de una sensorización adecuada en las vías de circulación es uno de los principales motivos por los que la gestión del tráfico no es eficiente (Kurzanskiy & Varaiya 2015). Según Kurzanskiy y Varaiya, la gestión del tráfico debe estar orientada a mejorar: a) la movilidad, a través de la disminución de las congestiones, b) el entorno, a través de la reducción de emisiones y el consumo de carburantes, c) la seguridad, a través de la reducción de los errores humanos en la conducción, y d) el aparcamiento, a través de la reducción de vehículos infrutilizados.

El papel que juegan los dispositivos de sensorización en la gestión del tráfico es, por tanto, fundamental. Por este motivo éste es un campo que atrae la atención de los investigadores (J. Zhang et al. 2011); (Tang et al. 2014) en busca de mejoras en el rendimiento y la fiabilidad de dispositivos y tecnologías (Antoniu et al. 2011).

Los sensores de tráfico se utilizan tanto para alimentar sistemas de información y de ayuda a la toma de decisiones como para proporcionar datos a los gestores de tráfico a la hora de realizar su trabajo. La calidad de las variables de tráfico que se obtienen de los sensores y de los dispositivos de monitorización es fundamental para el diseño y calibración de los modelos de flujo de tráfico en los que se fundamentan los sistemas de gestión y de toma de decisiones. En particular, la predicción basada en una combinación de datos históricos y datos en tiempo real es uno de los datos más importantes para muchos sistemas de control de tráfico

(Pascale et al. 2012). Este es otro motivo más que justifica el interés constante en la mejora de los dispositivos de detección.

Los sistemas de monitorización han estado tradicionalmente asociados a la ingeniería de tráfico, pero recientemente se han ligado a un ámbito más general de la gestión del transporte, en concreto a los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, siglas en la versión inglesa). La directiva Europea 2010/40/EU de 7 de julio de 2010 (European Parliament 2010) define los ITS como *“aplicaciones avanzadas que, sin incorporar inteligencia como tal, pretenden proporcionar servicios innovadores relativos a distintos modos de transporte y gestión de tráfico y habilitar a varios usuarios para estar mejor informados y hacer más seguro, coordinado e inteligente es uso de las redes de transporte”*. De esta manera, integran tecnologías de la información y las comunicaciones para la planificación, diseño, operación, mantenimiento y gestión de sistemas de transporte. De hecho, en (An et al. 2011) se definen los ITS como el conjunto de tecnologías de la información, las comunicaciones y las tecnologías aplicadas a los vehículos y las infraestructuras que unifican la gestión del tráfico y las comunicaciones entre usuarios y operadores. Los objetivos más importantes de los ITS son mejorar la seguridad vial, reducir los niveles de congestión y de contaminación ambiental, mejorar la eficiencia energética y garantizar una movilidad segura, eficiente y sostenible.

Los ITS aparecen en la década de los 90 del siglo XX como consecuencia de una creciente demanda de la movilidad en entornos urbanos e interurbanos, tal y como indican los autores de (Martínez Reynés & Seguí Pons 2004). La aparición de los ITS supone un cambio en la estrategia de la gestión del tráfico, pasando de estar centrada en un objetivo de incremento de infraestructuras viarias a buscar un enfoque basado en la movilidad sostenible compuesto de 3 partes: eficacia, eficiencia y seguridad. Los ITS no se pueden entender, por tanto, sin tener en consideración la innovación en las tecnologías de la información y las comunicaciones y su aplicación a los sistemas de información.

A nivel de arquitectura, los ITS se componen de cuatro subsistemas principales: de vigilancia (recoge los datos de vehículos y carreteras), de estrategia (define el objetivo de la gestión del tráfico), de ejecución (genera la información para la gestión directa del tráfico) y de comunicación (transfiere los datos entre diversos subsistemas) (Wenjie et al. 2006). El subsistema de vigilancia es el que debe alimentar al resto de subsistemas con los datos que recoge a través de los dispositivos de sensorización, que a su vez son los que permiten realizar las tareas

de gestión de tráfico. De hecho, los dispositivos sensores son uno de los componentes más relevantes en los sistemas ITS porque proporcionan la base para que puedan funcionar el resto de subsistemas.

El principal objetivo de estos sensores es obtener información del tráfico y de los vehículos a través de parámetros como contaje, ocupación, volumen, velocidad, presencia y paso (Tubaishat et al. 2009). Estos datos ofrecen al operador de tráfico una imagen en tiempo real de lo que sucede en las carreteras. Además, los datos se agregan y se almacenan para proporcionar información histórica que permita evaluar tendencias y realizar predicciones de comportamiento del tráfico.

Atendiendo a su funcionalidad, los sensores se pueden clasificar en 3 tipos (Antoniou et al. 2011): puntuales, de trayecto (o punto-a-punto), o de extensión. Los sensores puntuales son los que permiten obtener datos concretos de los vehículos a su paso por la ubicación de los sensores. Los sensores de trayecto aprovechan las tecnologías emergentes para detectar vehículos en distintos puntos de la red, lo que permite realizar una re-identificación de los mismos. Los sensores de extensión son los que permiten localizar a los vehículos a través de sistemas de geoposicionamiento sin tener que recurrir a sistemas de monitorización instalados físicamente en la carretera.

Por otro lado, las tecnologías que utilizan los sistemas de monitorización se pueden clasificar en 3 tipos (Klein 2001): intrusivas, no intrusivas y remotas. Las tecnologías intrusivas son las que requieren una instalación directa sobre el pavimento. Las no intrusivas son las que no necesitan ser instaladas directamente en el pavimento, pero deben estar presentes en puntos cercanos a las carreteras. Por otra parte, las tecnologías remotas son las que no precisan de una instalación en las cercanías de la carretera, como el GPS, teléfonos móviles, etc. (Bottero et al. 2013). Según (Tubaishat et al. 2009), los sensores de tipo intrusivo tiene como principal ventaja que son más precisos en la detección de vehículos, y además, utilizan tecnologías más maduras, mientras que las principales desventajas están en los costes de instalación y mantenimiento. Por su parte, los sensores no intrusivos permiten monitorizar varios carriles de forma simultánea, y proporcionan los mismos datos que los sensores intrusivos, aunque la principal desventaja que presentan es su alto consumo energético, aparte de que ofrecen un rendimiento bajo en determinadas condiciones de trabajo (especialmente en malas condiciones meteorológicas).

Las tecnologías de detección y vigilancia de vehículos están evolucionando constantemente para proporcionar datos mejorados de velocidad, contaje, detección de presencia, clasificación de vehículos y pesaje dinámico (Mimbela et al. 2007), entre otros. Las tecnologías de sensorización intrusivas y no intrusivas proporcionan datos muy precisos del estado del tráfico y comprenden un conjunto de tipos de sensores de los cuales, los más representativos, se pueden ver en la Tabla 1.

Tecnologías	Sensores
Intrusivas (sobre la calzada)	Tubos neumáticos Espiras magnéticas Sensores magnéticos Sensores piezoeléctricos Pesaje dinámico
No intrusivas (externos a la calzada)	Procesamiento de imágenes de video Radar de microondas Sensores laser Sensores de infrarrojos Sensores de ultrasonidos Matrices de sensores acústicos

*Tabla 1. Tipos de sensores según su nivel de intrusión*

Estos tipos de sensores están ampliamente descritos en la literatura. A modo de resumen y basándonos en los estudios más destacados (Klein et al. 2006), (Mimbela et al. 2007), (Minge et al. 2010), (Antoniou et al. 2011) y (Tewolde 2012), se describen a continuación sus principales características.

**Tubos neumáticos.** Son sensores que envían un impulso de aire a presión por un tubo de goma cuando las ruedas de un vehículo pasan sobre él. Los pulsos de presión cierran unos interruptores eléctricos a través de unas membranas situadas en un extremo del tubo que actúan como contadores. El tubo se instala en dirección perpendicular a la dirección del tráfico en el carril. Se suelen utilizar para contaje de vehículos y para su clasificación en base al número de ejes y el espacio entre ellos.

Los datos que se obtienen pueden usarse para inferir otra información de tráfico, como distancia entre vehículos, flujo y tiempos de paso.

**Espiras magnéticas.** Están basadas en una tecnología que se ha aplicado a la detección de vehículos y control del tráfico durante décadas. Se instalan en cada carril, bajo el asfalto. Proporcionan datos de conteo, clasificación, presencia y velocidad. Las espiras son cables en disposición circular o rectangular por los que se hace circular una corriente eléctrica de entre 10KHz y 50KHz, lo que genera un campo magnético en el área interior de la espira. Cuando un objeto ferro-magnético se introduce en la espira se genera una variación del flujo del campo magnético que se detecta como una variación de la corriente. Son dispositivos que requieren un cuidado especial durante la instalación y/o reparación y su mantenimiento es caro debido a los equipos y software necesarios para ello. Se suelen instalar por pares para poder obtener datos de velocidad.

**Sensores magnéticos.** Son detectores pasivos que miden perturbaciones en el campo magnético de la Tierra ocasionado por los componentes metálicos de los vehículos. Su funcionamiento se basa en medir las perturbaciones del flujo magnético ocasionadas por los vehículos en movimiento para obtener una huella magnética que lo caracterice. Si los sensores son de inducción no pueden detectar vehículos detenidos, pero si son magneto-resistivos sí pueden hacerlo. Se utilizan para obtener información sobre volumen, distancia entre vehículos, velocidad, presencia y clasificación de vehículos. Las limitaciones más importantes que tienen son los costes de instalación.

**Sensores piezoeléctricos.** Están basados en materiales que generan un voltaje cuando se someten a un impacto mecánico, vibración o presión. El voltaje que se genera es proporcional a la fuerza o el peso con la que se ejerce presión sobre el sensor. Estos dispositivos se utilizan para clasificar vehículos en base al número de ejes y al espacio que existe entre ellos y para medir el peso y la velocidad de paso de los vehículos.

**Sistemas basados en cámaras de video.** Pueden detectar, contar, clasificar vehículos y estimar su velocidad. Si se aplican técnicas de reconocimiento óptico de matrículas también pueden usarse con fines de re-identificación. Se extraen series de imágenes de las cámaras y utilizan microprocesadores para analizar las imágenes captadas. Existen diferentes aproximaciones para la detección, en función de los algoritmos y métodos de procesamiento de imágenes utilizados.

Pueden detectar vehículos e incluso trazar su recorrido por la zona de sensorización. Se usan para medir volumen, velocidad, presencia, ocupación, densidad, longitud de colas, tiempo de permanencia, distancia entre vehículos, cambios de dirección o de sentido, cambios de carril, y clasifican y re-identifican vehículos. Son más precisos que las espiras magnéticas, aunque presentan problemas funcionales ante condiciones ambientales que afecten a la calidad de las imágenes, condiciones de baja luminosidad y ocultación de vehículos. Es necesario calibrar adecuadamente las cámaras para que ofrezcan un buen rendimiento.

**Radar de microondas.** Utilizan una frecuencia de radio específica en el espectro de las microondas (de 1GHz a 30GHz) para localizar y detectar vehículos. Usan una señal continua, modulada en frecuencia o en fase, para determinar el tiempo de retraso en la señal de retorno al sensor cuando rebota contra el vehículo que están detectando. De esta manera, se puede calcular la distancia al vehículo detectado. Existen dos tipos de radares. Los del primer tipo utilizan el efecto Doppler para conseguir la detección y la velocidad del vehículo. Su principal inconveniente es que no puede detectar vehículos detenidos. Los del segundo tipo transmiten una onda continua de frecuencia modulada que varía de forma continua en el tiempo. Están preparados para detectar volumen, presencia, velocidad, distancia entre vehículos y, además, pueden clasificar vehículos. Tienen problemas de zonas muertas y detecciones fantasma cuando se instalan en zonas que tienen barreras u otros tipos de elementos de obstrucción y sobre-estiman la ocupación y la velocidad real de los vehículos.

**Sensores laser.** Permiten contar, clasificar y medir la velocidad de los vehículos. En algunos casos, también permiten obtener la forma del vehículo, lo cual puede ser utilizado con propósitos de re-identificación. Son sistemas fiables y duraderos, aunque también bastante caros. Su instalación es menos costosa y no requiere el cierre de los carriles, aunque deben situarse en una posición idónea para la detección, lo que implica disponer de una estructura adicional para su ubicación. También presentan problemas de ocultación de vehículos, como en el caso de las cámaras.

**Sensores de infrarrojos.** Existen 2 tipos de sensores de infrarrojos: pasivos y activos. Los pasivos no emiten energía y detectan la energía en el espectro del infrarrojo (0.85  $\mu\text{m}$  de longitud de onda) de los objetos situados en su campo de detección. Los activos iluminan la zona de detección con diodos laser de baja potencia (pulsos de baja energía) y detectan la energía reflejada a través de un

dispositivo óptico. Los sensores miden el tiempo de retorno al detector de la señal reflejada, lo que proporciona información sobre la presencia del vehículo. Pueden medir volumen, presencia, detección de colas, longitud, velocidad y número de ejes. Presentan problemas de oclusión, suciedad en las lentes y cuando las condiciones meteorológicas son adversas.

**Detectores de ultrasonidos.** Utilizan ondas sonoras por encima del rango auditivo para determinar la presencia o la distancia de un objeto. Detectan la parte de la energía que rebota en los vehículos y vuelve al receptor. La medida del tiempo del eco permite calcular la distancia al objeto. También utilizan el efecto Doppler para medir velocidades en los vehículos detectados. Pueden monitorizar varios carriles y son capaces de detectar vehículos con exceso de altura. Sus principales inconvenientes son que les afectan considerablemente las condiciones meteorológicas adversas y pueden presentar problemas de infra-detección para vehículos que circulan a altas velocidades.

**Matrices de sensores acústicos.** Trabajan con una matriz bidimensional de micrófonos que detectan la energía acústica producida por el tráfico, tanto desde los propios vehículos como desde la interacción de los neumáticos con el asfalto. Un incremento de la energía se reconoce como un paso de un vehículo a través de algoritmos de procesamiento de señales. Estos sensores sólo pueden medir paso, presencia y velocidad. Los principales inconvenientes de este tipo de sensores es que no trabajan bien a bajas temperaturas ni en condiciones de arranque-parada o con vehículos circulando a velocidades lentas.

La tendencia que se está siguiendo en los últimos años en la monitorización del tráfico consiste en la combinación de varios dispositivos y tecnologías para poder obtener información más detallada de las situaciones de tráfico. Hay dos líneas de trabajo principales que se están aplicando: el uso de las redes de sensores inalámbricos y las técnicas de fusión de datos.

Las redes de sensores son una tecnología que está siendo cada vez más utilizada en aplicaciones de monitorización. En este sentido, la gestión del tráfico no es una excepción, y las redes de sensores inalámbricas están apareciendo como una solución a la recogida de datos tecnológicamente más avanzada y flexible (Losilla et al. 2012). El objetivo que se persigue es poder aglutinar varios dispositivos de recogida de información de un mismo lugar de manera coordinada para que ofrezcan más y mejores datos sobre la situación que se pretende monitorizar.

Uno de los motivos que ha llevado a la proliferación de esta tecnología es que las redes de sensores inalámbricas ofrecen, en general, más precisión y menos coste que los dispositivos de monitorización clásicos (Coleri et al. 2004). Otro de los argumentos que se ofrecen en favor de estos sistemas de monitorización es la facilidad de instalación y mantenimiento, debido a que pueden ocasionar costes económicos importantes (por ejemplo, los cortes de carriles para realizar la instalación suelen ser costosos para las empresas que mantienen las infraestructuras).

A nivel estructural, las redes de sensores inalámbricas se componen de nodos de sensores relativamente pequeños y económicos, capaces de recopilar, procesar, almacenar y transferir datos entre ellos o a un dispositivo recolector o punto de acceso (Padmavathi 2010). Los nodos sensores de estas redes se componen de 4 subsistemas: de computación, de comunicación, de sensorización y de alimentación. Con esta estructura se puede capturar, procesar y transmitir información sobre la zona monitorizada donde se instala la red de sensores.

El uso de redes de sensores inalámbricos para la detección de tráfico aporta la ventaja de que se puede combinar el uso de varias tecnologías (aquellas que han evolucionado lo suficiente como para poder disponer de dispositivos pequeños, con poco consumo, y con capacidad de medición en entornos relativamente controlados) simultáneamente para la detección de vehículos y/o condiciones de circulación.

Aunque las redes de sensores se utilizan para obtener datos precisos en lugares muy concretos de la red viaria, su funcionalidad puede ir más allá. En particular, se pueden aplicar a la estimación de parámetros de tráfico en lugares donde no es posible la sensorización y a la predicción de las condiciones de tráfico, dos problemas que tradicionalmente han ocupado a los operadores (Tubaishat et al. 2009). A pesar de que las redes de sensores permiten un mayor despliegue de sistemas de monitorización ITS, no es técnica ni económicamente factible llenar una ciudad o una carretera de sensores, y se debe recurrir a métodos de estimación de tráfico.

Uno de los principales fines que se persigue con el despliegue de sistemas de monitorización es la obtención de matrices Origen-Destino, puesto que proporcionan información muy detallada de la demanda. La construcción más precisa de estas matrices se realiza a través de la re-identificación de vehículos en

distintos puntos de paso de la red viaria. Por este motivo, las tecnologías que ofrecen la posibilidad de realizar el seguimiento de vehículos y su re-identificación en distintos lugares de las vías de circulación son las que más auge están teniendo (Hamra & Attallah 2011).

La segunda línea más destacada en la investigación en el ámbito de los ITS es la Fusión de Datos. A pesar de que el término (Data Fusion en inglés) esta comúnmente aceptado, no existe todavía una definición clara. Se entiende que la fusión de datos agrupa una variedad de actividades orientadas al uso de datos de múltiples fuentes que permiten inferir más información que si se trabaja sólo con una fuente (Mitchell 2007). Existen muchos motivos para utilizar la fusión de datos, pero en general, esta técnica permite mejorar la fiabilidad, robustez, redundancia, precisión, certidumbre, completitud, cobertura, ratio coste-efectividad, y representación de los datos (Bachmann et al. 2013).

En la literatura de la ingeniería de tráfico, el interés por la fusión de datos es relativamente novedoso y coincide con la aparición de los sistemas ITS. Uno de los primeros trabajos en este sentido (Sumner 1991) define la fusión de datos como la acumulación, organización y difusión de datos en los sistemas de control precursores de los ITS: los IVHS (Intelligent Vehicle-Highway Systems) (Martin et al. 1999) y destaca su importancia para la efectividad de los ITS.

La aplicación de la fusión de datos en el ámbito de los ITS es muy amplia y abarca prácticamente la totalidad de las distintas áreas de trabajo (Faouzi et al. 2011): sistemas avanzados de información al viajero, detección automática de incidentes, ayuda avanzada a la conducción, control de la red, prevención y análisis de accidentes, estimación de la demanda de tráfico, monitorización y predicción del tráfico y estimación precisa de la posición de los vehículos. Todas estas aplicaciones comprenden el abanico de tecnologías emergentes que se están aplicando a los sistemas de detección que conforman los ITS actuales.

La combinación de las redes de sensores con las técnicas de fusión de datos ayudarán a mejorar las capacidades de monitorización de las vías de circulación, aportarán más datos y de más calidad a los gestores de tráfico, y se seguirá trabajando en ellas como líneas de investigación preferentes en el ámbito de los ITS. No obstante, el perfeccionamiento de las tecnologías a nivel individual debe seguir siendo una prioridad para los investigadores, puesto que aportaran mejoras económicas, de efectividad y de rendimiento sobre los sistemas de monitorización.

Los sensores magnéticos son dispositivos que permiten realizar re-identificaciones de vehículos y todavía tienen un gran margen de mejora, por lo que estudiaremos este tipo de dispositivos en las siguientes secciones.

## 3.2. Detectores magnéticos

Los detectores más utilizados en la gestión de tráfico para la detección de vehículos son los basados en sensorización magnética (Krogmeier & Bullock 2008), y en particular, las espiras magnéticas. Como hemos visto en la sección 3.1, existen dos tipos de sensores basados en estas tecnologías: las espiras magnéticas y los sensores magnéticos.

Hay tres tipos principales de sensores magnéticos: los magnetómetros de saturación (fluxgate), los magnetómetros de inducción y los magnetómetros magneto-resistivos. Estos últimos son mucho más sensibles que los dos primeros y permiten la detección de vehículos en movimiento y detenidos, mientras que los otros dos presentan ciertas dificultades para detectar vehículos parados, en especial los magnetómetros de inducción. Los magnetómetros de saturación también pueden detectar vehículos detenidos, pero no ofrecen la misma precisión que los magneto-resistivos. Por este motivo, centraremos nuestro estudio en los magnetómetros magneto-resistivos, dado que están en el foco de la investigación en los últimos años.

Además de la detección de vehículos y de la extracción de varios parámetros de tráfico, estos dos tipos de sensores ofrecen información que puede ser utilizada para re-identificar vehículos. En esta sección describiremos las bases del funcionamiento de dichos sensores y la aplicación que tienen a la gestión del tráfico, como preludeo para la metodología de re-identificación de vehículos que se pretende abordar en esta tesis.

### 3.2.1. Espiras Magnéticas

Las espiras magnéticas, también llamadas lazos de inducción o bucles de inducción magnética, son uno de los detectores de tráfico más antiguos que existen (Klein et al. 2006) y datan de principios de los años 1960. A pesar de que estos sensores no van a ser empleados en esta tesis como fuente de datos para re-identificar vehículos, han sido utilizados en la literatura con este propósito (Coifman 1998),

(Sun et al. 1999), (Oh & Ritchie 2003), (Sun et al. 2004), (Lin & Tong 2011), (Guilbert et al. 2014), (Jeng & Chu 2014). Así pues, es importante describir su funcionamiento para tener en consideración las aproximaciones metodológicas utilizadas en las investigaciones sobre la re-identificación de vehículos basadas en sensores magnéticos.

La base del funcionamiento de las espiras magnéticas es la inductancia magnética. Según (Reitz et al. 1986), *“el flujo magnético que atraviesa un circuito aislado depende de la forma geométrica del circuito y es linealmente dependiente de la intensidad de corriente en el circuito”*. Cuando se hace variar la corriente por un hilo conductor o un circuito aislado también varía el flujo magnético generado, de manera que aparece una fuerza electromotriz que se opone a esta variación (Alpizar Arteaga & del Risco Sánchez 2012). Este fenómeno se denomina autoinducción, y se le asocia una constante  $L$  llamada inductancia. La inductancia en electromagnetismo, por tanto, se puede entender como una medida de la oposición al cambio de corriente que se introduce en el circuito, se mide en Henrios (H) y se define como la variación del flujo magnético respecto a la intensidad de la corriente que lo induce.

Habitualmente, los circuitos que aprovechan esta propiedad física son las bobinas, que pueden contener un inductor o no. La presencia del inductor hace aumentar la capacidad de almacenamiento de energía de la bobina, es decir, aumenta su inductancia. La inductancia también depende proporcionalmente del número de pasos (o vueltas de cable conductor) que tenga la bobina. Este es, precisamente, el principio que hace funcionar a los detectores de espiras magnéticas.

Si se sitúa en un carril de una vía un circuito aislado en forma de bobina (o conjunto de espiras) por la que se hace circular una corriente, se puede medir el valor de la inductancia cuando no hay ningún elemento físico (vehículo) situado dentro de ella. Cuando algún objeto físico, especialmente con una masa férrea considerable, se sitúe dentro de la bobina, el valor de la inductancia cambiará. Por tanto, si un vehículo circula por dentro del circuito, se podrá detectar su presencia midiendo la variación de la inductancia del circuito.

La Figura 1 y la Figura 2 muestran respectivamente la estructura funcional de una espira magnética y el resultado de la instalación de un detector de múltiples espiras en una carretera de varios carriles.

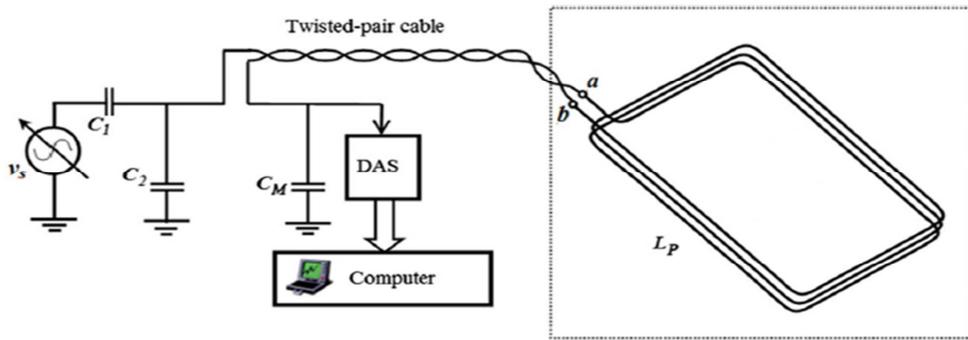


Figura 1. Esquema funcional de una espira magnética (Ali et al. 2012)



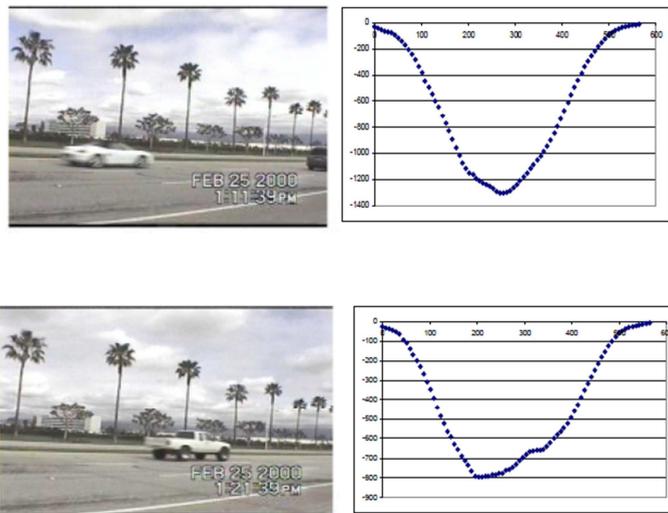
Figura 2. Instalación de espiras en la carretera CV-36 (Valencia)<sup>2</sup>

El comportamiento teórico de las espiras magnéticas se define en (Burns 2009). Cuando un vehículo circula sobre la espira, hay un descenso neto de la inductancia de la espira debido a las corrientes inducidas por el campo magnético en las partes metálicas del vehículo. Aunque la masa férrea del vehículo aumenta la inductancia de la espira debido a su permeabilidad magnética, las corrientes inducidas dominan sobre el inductor, haciendo que la inductancia neta disminuya ante la presencia de un vehículo. Si el vehículo estuviese situado sobre la espira y el campo magnético fuese constante, la inductancia aumentaría, pero la corriente alterna aplicada a la

<sup>2</sup> Imagen obtenida de <http://www.bing.com/maps>. Consultado en Agosto de 2015

espira provoca una variación del campo magnético que genera las corrientes inducidas que prevalecen de forma negativa sobre la inductancia.

La salida más habitual que se obtiene de una espira magnética es un dato binario que indica la presencia o ausencia de un vehículo en la zona de sensorización. No obstante, también se pueden obtener más datos de los sensores a través de la medición de los cambios de la inductancia observados, de manera que se puede llegar a obtener una señal en forma de onda o “huella magnética” (Ritchie et al. 2002). Un ejemplo de estas huellas se muestra en la Figura 3.



*Figura 3. Ejemplo de huellas magnéticas de vehículos obtenidas de espiras magnéticas (Ritchie et al. 2002)*

Con los datos que se obtienen de las espiras magnéticas se pueden estimar 3 parámetros de tráfico fundamentales: velocidad, volumen y ocupación. Para poder obtener estos parámetros es necesario realizar una instalación de detectores doble, es decir, se deben situar dos espiras de las mismas características en un carril y alinearlas en la dirección del tráfico, tal y como se aprecia en la Figura 2. Las espiras, además, deben estar convenientemente calibradas para ofrecer datos que sean comparables.



En España, en 2013, las estaciones de aforo de la Red de Carreteras del Estado, que comprende cada una de ellas varias espiras magnéticas, sumaban un total de 3.422 (Ministerio de Fomento 2014b). A pesar de ser los detectores más utilizados para la obtención de datos de tráfico, sus necesidades de mantenimiento los pueden hacer inútiles para su función. Las alternativas a estos detectores pasan por la aplicación de tecnologías magnéticas a la construcción de sensores que requieran menos mantenimiento, proporcionen al menos la misma fiabilidad y aporten nuevos datos que puedan aplicarse a la gestión del tráfico. Los detectores que más se aproximan a estos requisitos son los sensores magnéticos y en particular los que están basados en la propiedad de Magneto-Resistencia que poseen algunos materiales.

### 3.2.2. Sensores Magneto-Resistivos

Los sensores magnéticos son dispositivos de detección pasivos que pueden detectar la presencia de objetos metálicos en su rango de acción a través de la medición de la perturbación que generan estos objetos del Campo Magnético de la Tierra (CMT) (Mimbela et al. 2007). Como ya hemos comentado, los tres tipos de sensores magnéticos más importantes que existen son los magnetómetros de saturación (fluxgate), los magnetómetros de inducción y los magnetómetros magneto-resistivos.

Los magnetómetros de inducción tienen un funcionamiento similar al de las espiras magnéticas. Normalmente detectan vehículos en movimiento mediante la medición del cambio del flujo magnético que ocasiona un metal en movimiento, en nuestro caso un vehículo. Habitualmente están formados por una bobina y un inductor de un material magnético permeable que generan un voltaje cuando un vehículo perturba el CMT en las proximidades del sensor. Difícilmente detectan vehículos detenidos o con velocidades de circulación muy lentas (por debajo de los 10 km/h) (Klein et al. 2006).

Los magnetómetros de saturación y los magnetómetros magneto-resistivos son detectores tridimensionales, es decir, pueden medir perturbaciones del CMT hasta en 3 direcciones ortogonales. Por tanto, pueden medir variaciones en las componentes del CMT de forma individual e independiente. La forma de medir las perturbaciones del CMT es a través de cambios en el voltaje del detector inducidos

en el sensor por el paso del vehículo o por su simple presencia en la zona de sensorización.

Estos magnetómetros pueden detectar con mucha precisión el paso de vehículos, y por tanto se pueden aplicar a la obtención de parámetros como conteo, volumen y ocupación. En este sentido son más precisos que las espiras magnéticas. Sin embargo, no son buenos detectores del perímetro del vehículo debido a su elevada sensibilidad. Por este motivo, las instalaciones que contienen este tipo de sensores no suelen consistir en un único sensor, sino en un conjunto de sensores que permiten obtener datos más fiables, además de poder inferir parámetros de tráfico adicionales como la velocidad y características de los vehículos para su clasificación. En la Figura 5 se pueden apreciar dos magnetómetros comerciales.



*Figura 5. Ejemplo de magnetómetros comerciales:*

*a) Groundhog G-8 de Nu-Metrics, b) Sensor inalámbrico de Sensys Networks (Mimbela et al. 2007)*

Los materiales que conforman estos sensores y los fenómenos magnéticos que aprovechan para realizar las mediciones son variados, aunque nos centraremos en los sensores magneto-resistivos. En los años 1990 se comenzó a considerar el uso de materiales con propiedades magneto-resistivas para la construcción de sensores de tráfico magnéticos (Lenssen et al. 2000). Hubo dos fenómenos que compitieron por imponerse en la creación de los detectores: la Magneto-Resistencia Anisotrópica (AMR) y la Magneto-Resistencia Gigante (GMR), si bien fue la primera la que se terminó imponiendo en la mayor parte de dispositivos de sensorización de la industria (Mlejnek et al. 2008), incluyendo los destinados al control del tráfico. A pesar de que los sensores GMR permiten un mayor rango de detección, los AMR

son igual de competitivos, e incluso mejores, en aspectos como la sensibilidad, linealidad y estabilidad de temperatura (Tumanski 2001).

La Magneto-Resistencia es una propiedad de algunos materiales que les permite cambiar su resistencia eléctrica cuando actúa sobre ellos algún campo magnético. El descubrimiento de la Magneto-Resistencia en los metales ferromagnéticos data del siglo XIX y se debe a William Thomson (Thomson 1856). La Magneto-Resistencia Anisotrópica (AMR) es una variante de la misma propiedad que asocia el cambio de la resistencia eléctrica con un cambio en la dirección de la magnetización con respecto a la corriente a la que están sometidos los materiales ferromagnéticos (McGuire & Potter 1975).

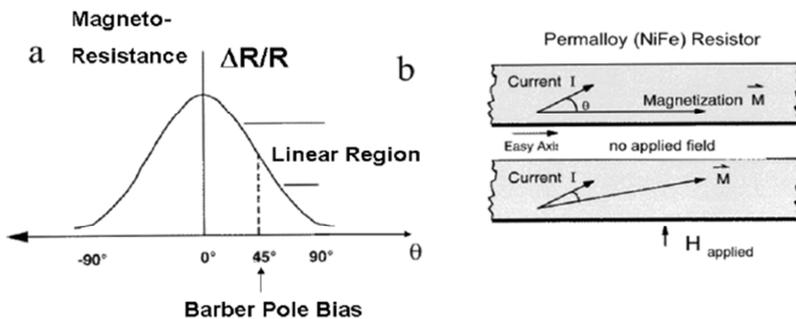


Figura 6. a) Resistencia de un sensor AMR según el ángulo entre la magnetización y la dirección de la corriente; b) cambio del ángulo debido a una aplicación de un campo magnético (Lenz & Edelstein 2006).

Uno de los materiales que tienen la propiedad AMR es el permalloy (una aleación de 80% de níquel y 20% de hierro). Su resistencia depende del ángulo formado por su magnetización y la corriente que lo atraviesa (Vopálenský et al. 2003), tal y como se aprecia en la Figura 6. En un campo magnético, la magnetización del material rotará en la dirección del campo magnético aplicado. La resistencia del permalloy aumenta a medida que lo hace el ángulo entre la dirección de la corriente y la magnetización, llegando a alcanzarse un mínimo cuando el ángulo es de  $90^\circ$ . Es posible construir dispositivos de sensorización con este material que midan las variaciones de la corriente como respuesta a perturbaciones del campo magnético en el que se encuentran. De esta forma, se puede medir la perturbación del campo magnético exterior en función del cambio en la corriente.

Los sensores basados en la AMR utilizan el cambio que se produce en la resistencia del material (denominado  $\Delta R$ ) ocasionado por la existencia de un campo magnético  $H$  (Lenz & Edelstein 2006). Son una opción muy atractiva para aplicaciones de bajo coste, ya que simplemente se les aplica como entrada una corriente eléctrica constante y se mide en la salida la variación del voltaje que se produce, lo que permite valorar la variación del campo magnético aplicado. Los valores de magneto-resistencia se suelen medir como  $\Delta R/R$ , siendo  $R$  el valor de la resistencia cuando  $H=0$ . La variación de la resistencia es proporcional al cuadrado del coseno del ángulo entre la magnetización y la corriente. En concreto, para una disposición de la orientación de la magnetización y la corriente eléctrica como la de la Figura 7, la variación de la resistencia se puede calcular según la expresión ( 1 ), donde  $H_{tot}$  es la magnetización del material formada por la combinación del campo magnético interno ( $H_{in}$ ) y el externo ( $H_{ext}$ ), y  $R_0$  y  $\Delta R_0$  son parámetros del material (Kang et al. 2005). La variación de voltaje que suelen producir estos sensores es pequeña, pero perceptible.

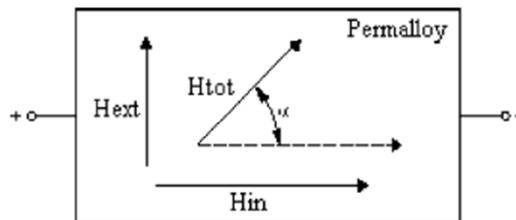


Figura 7. Esquema de la disposición de las direcciones del campo magnético y la corriente eléctrica en un material magneto-resistivo (Kang et al. 2005).

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

El desarrollo de los sensores AMR comerciales vino marcado por la necesidad de mejorar las cabezas lectoras de los discos duros (Ripka & Janošek 2010), aunque con posterioridad fueron sustituidos por otros sensores más precisos. El desarrollo comercial fue liderado por las empresas Philips<sup>®</sup>, Honeywell<sup>®</sup> y Sensitec<sup>®</sup>.

Las primeras referencias al uso de sensores Magneto-Resistivos aplicados a la detección de vehículos se localizan a finales de la década de los 90 del siglo XX. En

uno de los primeros trabajos de investigación (Phan et al. 1997) se menciona que los vehículos tienen por su propia estructura y composición un magnetismo permanente. Además, el campo magnético de La Tierra induce en ellos un dipolo magnético. La combinación de estos dos campos dota a los vehículos de una estructura magnética propia y diferenciada que puede ser utilizada para reconocer e identificar vehículos a través de dispositivos de sensorización adecuados. Este fenómeno es la base para el desarrollo de los sensores Magneto-Resistivos aplicados al tráfico.

El campo magnético que genera un vehículo en movimiento sigue el modelo magnético de un imán. Cuando se utiliza un sensor Magneto-Resistivo para detectar el vehículo se está percibiendo la perturbación magnética que genera su comportamiento como un imán en el CMT. De hecho, en una referencia muy temprana del uso de sensores Magneto-Resistivos (Lao & Czajkowski 1996) se afirma que la perturbación generada por el vehículo depende de su masa, su longitud y su forma, y la medición de la perturbación depende de la distancia al sensor y la orientación en la que se haya dispuesto el sensor.

En estos primeros trabajos los sensores estaban pensados para detectar vehículos y realizar una clasificación muy simple (motocicletas, vehículos y camiones). Los sensores se localizaban en el lateral de la carretera. De las señales obtenidas, se utilizaban la amplitud medida y la orientación del sensor para obtener detalles que permitían realizar la clasificación. Incluso se apuntaba ya la posibilidad de usar varios sensores en línea para calcular la velocidad de paso de los vehículos.

El primer estudio donde se presenta un abanico de posibilidades para la monitorización del tráfico con sensores AMR es (Caruso & Withanawasam 1999). Los autores describen las características de estos sensores, su capacidad de medición, y detallan las aplicaciones que pueden tener, pero sin documentarlo con experimentos reales. Entre las aplicaciones de los sensores destacan la detección, la clasificación, la dirección de movimiento y la presencia. Pero lo más relevante de este trabajo es que los autores introducen el concepto de lo que otros investigadores (Coleri et al. 2004) bautizarán más tarde como *Huella Magnética* del vehículo obtenida por un sensor AMR (aunque el concepto de huella magnética de un vehículo existía con anterioridad a este trabajo para los datos obtenidos de las espiras magnéticas).

La definición de la huella magnética de un sensor AMR surge al comparar 2 tipos de vehículos con los datos extraídos de un sensor de 3 ejes. Los autores del estudio toman muestras del sensor a intervalos de tiempo regulares cuando los vehículos pasan sobre ellos, con lo que obtienen una serie temporal de datos sobre la intensidad del campo magnético medido. Dado que trabajan con sensores de 3 ejes, obtienen una serie distinta para cada uno. Cada serie tiene una forma de onda que se diferencia entre los vehículos del estudio, y a esa forma de onda característica de cada vehículo en cada eje se la denomina *huella magnética del vehículo* (Figura 8). La huella magnética será posteriormente utilizada por muchos investigadores en sus estudios para extraer datos de vehículos individuales y generar parámetros de tráfico, aplicando técnicas de procesamiento de señales.

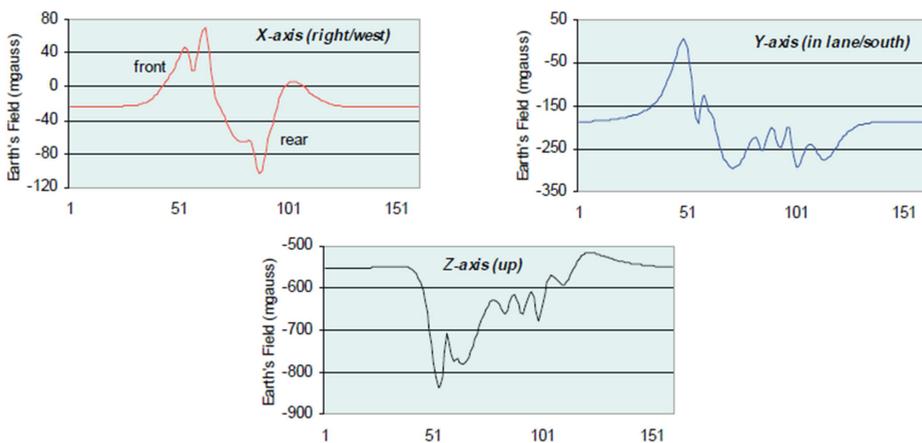


Figura 8. Huella Magnética de un vehículo en 3 ejes (Caruso & Withanawasam 1999)

Pero el empuje definitivo para la aplicación de estos sensores a la medición del tráfico parte del desarrollo comercial por parte de empresas como Honeywell®, donde además de proporcionar el hardware necesario para la construcción de detectores estudian el problema de la detección de vehículos con sus componentes (Honeywell 2005). En este estudio se explica el efecto de la perturbación del CMT que genera un vehículo y cómo los detectores pueden percibir la perturbación y representarla a través de una *huella magnética* (Figura 9a), la detección del sentido de circulación del vehículo, la medición de su velocidad de paso (Figura 9b), los problemas asociados a la detección y su posibilidad de uso como detectores de ocupación para plazas de aparcamiento.

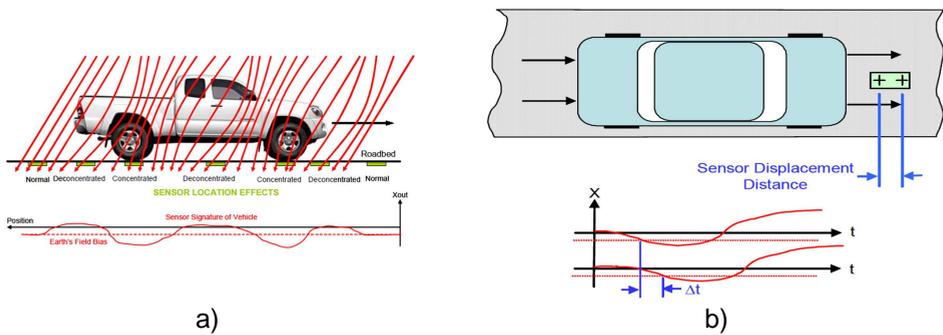


Figura 9. Uso de sensores AMR de Honeywell para a) detección y huella magnética de un vehículo; b) sistema de cálculo de la velocidad (Honeywell 2005)

Los estudios que se han desarrollado con sensores AMR desde principios de la década del 2000 han tenido múltiples propósitos. El análisis de la literatura que hemos realizado en esta tesis nos permite afirmar que las áreas de aplicación mayoritarias de estos sensores son las siguientes:

- Detección de vehículos
- Cálculo de la velocidad instantánea
- Cálculo del tiempo de recorrido entre 2 puntos cercanos
- Clasificación de vehículos
- Detección de plazas de estacionamiento libres
- Posición de paso de los vehículos
- Re-identificación de vehículos

Existen otras áreas de investigación menos frecuentes en las que también se ha trabajado, como el control de la señalización semafórica (Tubaishat et al. 2007), (Yoo et al. 2007), (Zou et al. 2009), el seguimiento de trayectorias de vehículos (Wahlström et al. 2011), (Day et al. 2011), la prevención de colisiones (Taghvaeeyan & Rajamani 2014b), sistemas de ayuda a la navegación con balizas (Lopes et al. 2007), cálculo de la distancia de vehículos a los puntos de sensorización (Zhou 2013), o detección de posiciones de elementos dentro de los vehículos, como las ruedas, la transmisión, el cigüeñal, la leva, posición de los pedales, etc. (Adelerhof & Geven 2000), lo que demuestra el amplio rango de aplicación que tienen los sensores AMR en la gestión del tráfico y en la industria de la automoción.

Una gran parte de los estudios más relevantes de la literatura combinan varios de los objetivos mencionados. A continuación revisaremos los aspectos más destacados de los principales trabajos que se han analizado, sin seguir un orden estricto en cuanto a los objetivos que se persiguen en cada trabajo, dado que en algunos casos se tratan varios al mismo tiempo. En cualquier caso, los trabajos que se han centrado en la re-identificación de vehículos no se mencionan a continuación, puesto que serán analizados en detalle en la sección 3.3.

Antes de analizar la forma en la que se han empleado los sensores AMR en los trabajos de investigación de la literatura, es importante destacar que son pocos los casos en los que se ha utilizado un único dispositivo de sensorización para estudiar situaciones de tráfico con vehículos en movimiento (en los estudios de plazas de aparcamiento libres lo habitual es trabajar con un único sensor para detectar presencia de vehículos). Por ejemplo, en (Cheung, Coleri, Dundar, et al. 2005) se utiliza un único sensor para estudiar el ratio de detección de vehículos, aunque el estudio se completa trabajando con conjuntos de sensores. También se usa un único sensor para evaluar la capacidad de detección en (Kanathantip et al. 2010). En la investigación de (Li et al. 2011) se trabaja con un único dispositivo, pero que contiene 2 sensores AMR separados una distancia de 10 cm para poder calcular velocidades de paso y longitud de vehículos. Esta misma idea se aplica también en el trabajo de (Cardell Bilbao et al. 2010), donde el desfase temporal calculado entre las señales de los 2 sensores permite estimar la velocidad de paso del vehículo. En (Charbonnier et al. 2012) se utiliza la información de un único sensor para re-identificar vehículos, aunque en el experimento se toman datos de varios sensores para poder seleccionar el sensor más adecuado para el objetivo. En el trabajo de (Deng et al. 2010) se intenta estimar la velocidad de los vehículos y clasificarlos con un único sensor, aunque los resultados no son comparables con los de los trabajos que utilizan varios sensores.

Siguiendo con los trabajos que utilizan un único sensor, la investigación de (He et al. 2012) se centra en la extracción de las características de la huella magnética recogida por un único sensor para clasificar vehículos en 4 categorías. Los autores obtienen unos ratios de éxito del 99%, si bien las categorías de clasificación son inferiores en número a las de otros estudios de clasificación. También en el trabajo de (Kaewkamnerd et al. 2008) se utiliza un único sensor para extraer características de la huella magnética y detectar y clasificar el vehículo. En el trabajo de (Wahlström et al. 2012) se utiliza un único sensor situado fuera de la calzada para

detectar la dirección de movimiento de los vehículos y poder detectar de esta forma vehículos circulando en sentido contrario, con resultados próximos al 100% en un experimento en condiciones reales con tráfico reducido.

Estos estudios tienen en común que se han centrado en el problema de la detección de vehículos o han tratado de estimar otros parámetros que son fácilmente calculables con dos o más sensores y que obtienen resultados más precisos. De hecho, la extracción de parámetros de tráfico relevantes, como la velocidad o la longitud de un vehículo, con un único sensor magnético no se ha podido obtener con una precisión elevada en los trabajos que hemos visto. La mayor parte de investigadores ha utilizado en sus experimentos una configuración de varios sensores que les permitan obtener estos parámetros con precisión, para inferir información sobre condiciones de tráfico que puedan ser utilizadas con seguridad por parte de los operadores de tráfico.

Los trabajos de investigación con varios sensores AMR en la literatura han considerado de forma distinta la configuración de los dispositivos en los puntos de monitorización. En algunos casos los detectores se han considerado como redes de sensores, mientras que en otros casos los detectores se han considerado como conjuntos de sensores que trabajan de forma independiente y cuyos datos son procesados con posterioridad.

Adicionalmente, la gran mayoría de los trabajos de la literatura han tratado de combinar el uso de sensores AMR con tecnologías de comunicación inalámbricas, para justificar la mejora en la simplicidad de los procedimientos de instalación de los sensores frente al gran competidor que son las espiras, cuya instalación, como ya hemos visto en la sección 3.2.1, es costosa y delicada. Por este motivo es muy habitual encontrar los sensores AMR relacionados con redes de sensores inalámbricas.

En los primeros trabajos de campo en los que se han valorado las capacidades de los sensores AMR se produce esta interrelación. En (Coleri et al. 2004) se propone el uso de una red de sensores AMR como sustituto a las espiras magnéticas y las cámaras de tráfico con fines de monitorización. Los autores argumentan que el bajo coste y la capacidad de escalabilidad de esta configuración de sensores los hace ideales para el propósito de monitorización que se persigue. En este estudio se sitúan varios sensores dispuestos longitudinalmente en sentido del tráfico y en el centro de los carriles que se desea monitorizar (no enterrados en el asfalto, pero

con una envoltura resistente al paso de los vehículos). Con ello los autores consiguen detectar vehículos hasta en un 97% de los casos, y aunque pueden estimar la velocidad de paso y la longitud de los vehículos no hacen referencia explícita a ello. Lo que sí que aparece en este trabajo es una referencia al tiempo de vida de los sensores inalámbricos, debido al consumo de la batería tanto para la detección como para las comunicaciones. Este problema aparecerá en estudios posteriores y será uno de los aspectos más críticos para el desarrollo de sistemas comerciales.

Siguiendo esta línea de trabajo, los autores del mencionado estudio publican con posterioridad los trabajos (Cheung, Coleri & Varaiya 2005) y (Cheung, Coleri, Dundar, et al. 2005), donde perfeccionan la red de sensores para conseguir un incremento de las detecciones (98%-99%), e introducen algunas técnicas para estimar la velocidad de los vehículos, hacer una clasificación e incluso proponen la posibilidad del uso la huella magnética para re-identificar vehículos en diferentes puntos. Para la clasificación de vehículos introducen una técnica que denominan “*hill pattern*” que consiste en determinar los picos y valles de la huella magnética obtenida de los vehículos con un sensor que trabaja a 128 Hz y construir un patrón binario equivalente a la huella magnética (Figura 10).

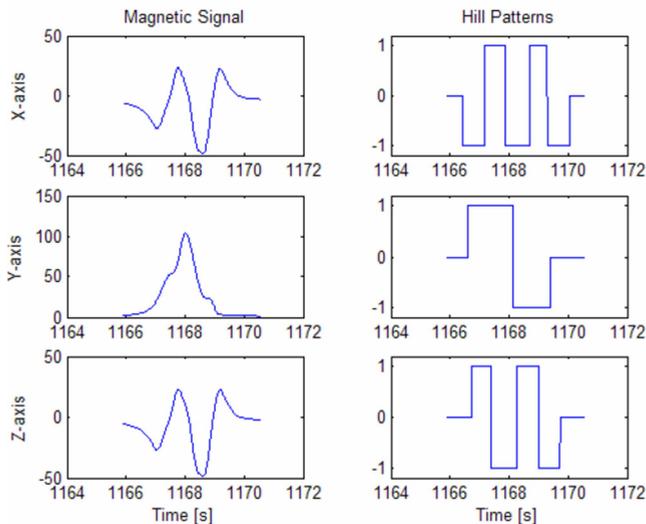


Figura 10. Conversión de huella magnética a una estructura “*hill pattern*”

La capacidad de detección de los sensores AMR también se destaca en el trabajo de (Kang et al. 2005). Para ello, los autores sitúan 2 sensores enterrados en el centro del carril. En este caso, los dispositivos son cableados. Con esta configuración consiguen obtener un 99.7% de acierto en la detección. De nuevo, los autores no hablan de cálculo de la velocidad ni de obtención de otros parámetros de tráfico, lo que da a entender que la investigación sobre la comparación de datos de sensores en aquel momento no estaba muy avanzada.

El trabajo más relevante, en nuestra opinión, en cuanto a la capacidad de detección de los sensores AMR y de los problemas asociados con la tecnología lo encontramos en (Cheung & Varaiya 2007). En este trabajo se destacan 2 problemas importantes en la aplicación de los sensores AMR para la detección. El primero es el efecto que tiene la temperatura de trabajo sobre el nivel de flujo magnético que se mide. El segundo tiene que ver con la posición relativa de paso de los vehículos sobre los sensores. Con respecto a la temperatura, los autores estudian la respuesta del sensor cuando no se detecta ningún vehículo en diferentes condiciones de temperatura, y observan que existe una variación de la medida (línea base de medición). Por este motivo, desarrollan un algoritmo adaptativo para la detección de vehículos basada en umbrales. En referencia a la posición relativa de paso de los vehículos con respecto al sensor (que los autores denominan "*lateral offset*" y hemos traducido por *desplazamiento lateral*), se constata que la huella magnética obtenida para diferentes secciones longitudinales de un mismo vehículo es diferente, lo que obliga a utilizar varios sensores dispuestos en una alineación transversal a la dirección del vehículo para poder obtener un conjunto de caracterizaciones que permitan emparejar huellas similares (pertenecientes a la misma posición relativa del vehículo) cuando se pretende re-identificar vehículos.

En este mismo trabajo se fundamentan los procedimientos generales de trabajo con los datos obtenidos de los sensores AMR, especialmente los relacionados con el pre-procesamiento de las señales y la detección de vehículos. Los autores también realizan experimentos para demostrar la viabilidad del cálculo de velocidad utilizando dos sensores en línea en el carril en la dirección del tráfico, la clasificación de vehículos a través de transformaciones de las huellas magnéticas obtenidas en un conjunto de muestras reducido (denominado por los autores como "*Average Bar*"), y la re-identificación de vehículos comparando sus huellas magnéticas transformadas de igual modo que para la clasificación, utilizando la

correlación cruzada (la descripción del procedimiento de re-identificación se amplía en la sección 3.3).

Volviendo a la utilización de los sensores AMR, se han realizado posteriormente muchos trabajos de investigación con este tipo de sensores en el ámbito de la clasificación y re-identificación de vehículos, en la detección de plazas de aparcamiento libres y en la detección de trayectorias de vehículos. Los investigadores han tratado de mejorar los procedimientos y algoritmos aplicados en cada campo, con distintas propuestas y aproximaciones matemáticas. A continuación destacaremos las que consideramos más relevantes al respecto.

En el ámbito de la clasificación de vehículos con sensores AMR, podemos encontrar un grupo importante de trabajos como los de (Kaewkamnerd et al. 2008), (Zhang et al. 2008), (Chinrungrueng & Kaewkamnerd 2009), (Feng & Mingzhe 2009), (Kaewkamnerd et al. 2009), (Liu et al. 2009), (Kaewkamnerd et al. 2010), (Zhang et al. 2010), (Lan et al. 2011), (He et al. 2012). En estos estudios se proponen distintas técnicas de pre-procesamiento de datos para adaptar la señal a los procedimientos de detección y extracción de características. Las principales técnicas que se han utilizado son el suavizado de las señales, la adaptación del umbral de detección y la normalización de las señales en amplitud y velocidad (o longitud del vehículo). Estos mismos procedimientos se han aplicado en el tratamiento de las huellas magnéticas utilizadas para los estudios de re-identificación.

Los sensores AMR también se han aplicado a la detección de plazas de aparcamiento libres. Para esta aplicación particular se trabaja con un único sensor que se sitúa en el suelo o en la pared de una plaza de aparcamiento. Existen dos aproximaciones para determinar si la plaza está ocupada. La primera consiste en calibrar el sensor cuando la plaza está vacía y monitorizar el nivel de flujo de CMT que ofrece la salida del sensor, de forma que cuando la medida supera cierto umbral significa que la plaza está ocupada. La segunda consiste en detectar fluctuaciones de del flujo magnético medido a través de picos de señal junto con la información de la primera aproximación, de manera que se pueda determinar cuándo un vehículo entra o sale de la plaza de aparcamiento. Esta segunda aproximación intenta evitar falsos negativos ocasionados por vehículos que generan poca variación de la señal o por interferencias con vehículos en plazas adyacentes, o falsos positivos por cambios transitorios en el CMT medido por el sensor y que no son debidos a una ocupación de la plaza.

Un ejemplo temprano de la primera aproximación a la detección de plazas de aparcamiento libres lo encontramos en (Wolff et al. 2006), donde se trabaja con un sensor AMR cableado y se realizan experimentos de detección situando el sensor en el centro de la plaza de aparcamiento, en una posición próxima a donde se estima que puede quedar situado el motor, o situando el sensor en la pared a unos 20 cm. de altura.

Otro ejemplo es el que se propone en (Sifuentes de la Hoya et al. 2013), donde se construye un sensor AMR y se aplica un algoritmo simple para la detección de la presencia del vehículo. Se establece un valor de referencia de la medida del CMT cuando no existe ningún vehículo aparcado y a continuación se toman muestras en pequeños intervalos de tiempo. Cuando se produce en la medición una variación sensible del valor de referencia se considera que hay ocupación de la plaza de aparcamiento.

La segunda aproximación se aplica en (Guan et al. 2013) y (Zhang et al. 2015), donde los autores argumentan que establecer un umbral de detección único para todas las plazas de aparcamiento es muy complejo, y que la presencia de vehículos en plazas de aparcamiento adyacentes influyen en el sensor de la plaza monitorizada. Se trabaja con una señal suavizada con una media móvil, y se detecta el movimiento de vehículos a través de la fluctuación de la señal, por lo que necesitan que esté suavizada. Además, se realiza un cálculo de la posición de los picos de la señal para diferenciar entradas y salidas de la plaza de aparcamiento contando las fluctuaciones detectadas. En la extracción de picos aplican un filtrado que elimina picos de poca amplitud o poca duración. Utilizan las señales de los 3 ejes del sensor, pero de manera combinada con la amplitud total de las 3 juntas (la raíz de la suma de los cuadrados de cada punto).

Adicionalmente, en (Guan et al. 2013) tratan de resolver el problema que genera la interferencia de vehículos con una carga magnética importante en plazas de aparcamiento adyacentes al sensor. Proponen un algoritmo basado en el valor relativo de los extremos combinado con el uso de múltiples umbrales según la potencia de la señal, para obtener resultados de hasta un 98,8% de acierto en un experimento que dura 6 meses en un parking con 82 plazas/sensores. En este trabajo se menciona que las características dinámicas de los vehículos influyen en la perturbación del CMT, y muestran como el arranque y la parada del motor generan perturbaciones magnéticas adicionales que son detectadas de forma clara por los sensores AMR.

El uso de los sensores AMR para la detección de la posición y trayectorias de los vehículos es más reciente. Podemos destacar en este ámbito el trabajo de (Zhou 2013), donde el autor utiliza una matriz de sensores situados en la zona exterior del carril para obtener la velocidad de paso de los vehículos. Compara los datos obtenidos por cada sensor de 3 ejes en el plano X-Y (de circulación del vehículo), en concreto la amplitud del campo magnético medido en cada eje. La combinación de datos obtenidos en una serie temporal le permite obtener la velocidad de paso del vehículo.

También se investiga la viabilidad de detectar trayectorias en el estudio de (Taghvaeeyan & Rajamani 2014a). Los autores usan 4 sensores portátiles situados en los vértices de un cuadrado de 20 cm. de lado en una esquina de un cruce en una zona urbana para detectar giros de vehículos. También analizan la capacidad de detección y clasificación con la configuración de sensores que proponen. En este trabajo se argumenta que la detección se hace con sensores situados fuera del carril porque las señales obtenidas son más uniformes, y el algoritmo de detección es más simple.

No obstante, la mayoría de los estudios se han realizado con varios dispositivos conformando una red de sensores, habitualmente inalámbrica. Estos estudios han perseguido varios objetivos orientados a mejorar tanto la tecnología del tratamiento de la información como los algoritmos de detección, clasificación y re-identificación de vehículos. También se ha perseguido probar diferentes topologías de redes para la monitorización de distintas situaciones de tráfico y el diseño de infraestructuras de monitorización para integrar la extracción de datos con la gestión del tráfico.

Los argumentos que se han esgrimido para la utilización de las redes de sensores inalámbricos para la monitorización del tráfico, utilizando sensores AMR han sido sobre todo el bajo coste de los dispositivos, la facilidad de instalación en distintos lugares y sobre todo en zonas donde no es posible realizar instalaciones cableadas, precisión en la monitorización en cuanto a datos de contaje y cálculo de la velocidad, la escalabilidad de la solución de sensorización y el dinamismo de la infraestructura. El principal problema que plantea esta solución y que ha sido mencionada por muchos investigadores es el consumo energético de los dispositivos, aunque la integridad de los sensores en cuanto a su ubicación en la instalación también es un inconveniente que ha quedado reflejado en las configuraciones de las redes que se han usado en los estudios de la literatura.

Una de las primeras aplicaciones de redes de sensores AMR la encontramos en el trabajo de (Wenjie et al. 2005), que está orientado a construir una arquitectura de sensores que proporcione información en tiempo real y que permita gestionar de forma eficiente las señalizaciones semafóricas. En (Zhang, Huang, Cui, et al. 2007) y (Zhang, Huang & Cui 2007) se propone una arquitectura de redes de sensores situados en el lateral de la carretera para detectar vehículos de forma coordinada, haciendo hincapié en el consumo energético de los sensores y en la capacidad de procesamiento de datos en los propios sensores. Otros trabajos, como los de (Corredor et al. 2008), (Chinrungrueng et al. 2010), (Yoo et al. 2010), (L. Zhang et al. 2011), (Bottero et al. 2013), (Koszteczyk & Simon 2013), (Liepins & Severdaks 2013), se centran también en la definición de la arquitectura de la red de sensores AMR que debe satisfacer los requisitos de recogida y transmisión de datos efectiva para la gestión del tráfico en entornos urbanos e interurbanos.

Las redes de sensores se han aplicado también para perfeccionar los métodos de extracción de datos de los vehículos y de las carreteras. Entre los estudios de este tipo se puede mencionar el de (Zhang et al. 2010), donde se utilizan sensores en línea en la parte externa del carril para detectar y clasificar vehículos. Los autores proponen un algoritmo de detección de umbral distribuido para los sensores de la red, y clasifican con una red neuronal extrayendo parámetros de la huella magnética (básicamente aplicando el método del “*Average Bar*”).

En la investigación de (Ding et al. 2011) se propone un tratamiento de los datos recogidos por los sensores previo a su envío, orientado a mejorar la calidad de la información, a través de un algoritmo distribuido.

El estudio (Ahdi et al. 2012) usa redes de sensores para detectar vehículos y calcular su velocidad. Se plantea el problema de las falsas detecciones por interferencias de vehículos próximos. Hace mención al problema de establecimiento del umbral de detección, que es distinto en las condiciones experimentales en el entorno de pruebas y el entorno real. Se constata que el umbral de detección depende de la velocidad y de las condiciones ambientales. También hace énfasis en el problema de la energía para estos dispositivos, dado que en su experimento la duración de la energía de los sensores sin luz solar no superaba las 12 horas.

Algunos autores proponen el uso de redes de sensores para construir infraestructuras inteligentes y arquitecturas de sistemas de monitorización avanzadas. Este es el caso de (Karpiriski et al. 2006), donde los autores proponen

la utilización de sensores para la creación de una carretera inteligente. Por ejemplo, los sensores estarían encargados de la detección de vehículos en condiciones peligrosas para otros conductores (como adelantamientos en zonas de poca visibilidad) y la infraestructura estaría equipada con dispositivos de comunicación para avisar a los conductores afectados.

Los autores de (Wenjie et al. 2006) proponen una arquitectura de redes de sensores llamada WITS para la ubicación de sensores en la WSN. Se definen los tipos de nodos que debería tener la red, su funcionalidad, y se determinan los puntos en los que debe haber sensores: en el vehículo, en el lateral de la carretera, y en las intersecciones. Este trabajo se centra en la descripción de la red de sensores, aunque basa el sistema de detección en sensores AMR.

El trabajo llevado a cabo en (Wang et al. 2011) propone también una arquitectura de redes de sensores (EasiTia) independiente para la obtención de parámetros de tráfico. Se utilizan varios sensores, con varias tecnologías, para activar los sensores magnéticos por un lado, y por otro lado para mejorar la toma de datos, usando correlación entre las señales de 2 sensores magnéticos y mejorar los ratios de detección y los cálculos de velocidad. Adicionalmente, se propone un procedimiento de trabajo colaborativo entre sensores para analizar las detecciones y evitar los errores típicos de infra-detección y sobre-detección.

Finalmente, se ha constatado en la literatura un interés por la combinación de varias tecnologías para conseguir un mismo objetivo, y la aplicación de técnicas de fusión de datos para mejorar la calidad de la información recibida de los dispositivos de sensorización. Los sensores AMR también han sido objeto de este tipo de estudios y se han combinado con otros tipos de sensores, como se muestra a continuación.

En las primeras aplicaciones de los sensores AMR, el proceso de detección se combinó con sensores acústicos (Ding et al. 2004). De esta manera, se conseguía más fiabilidad en el proceso de detección. Aunque no se contempló en este trabajo, existía la posibilidad de obtener un importante ahorro energético combinando el funcionamiento de ambos sensores, de manera que el sensor magnético podía quedar latente y despertar cuando el sensor acústico detectase la presencia próxima de un vehículo. Esta idea de ahorro energético se ha implementado con posterioridad en otros casos y con otro tipo de sensores. Por ejemplo, en (Sifuentes et al. 2011) se utiliza un sensor óptico para despertar al sensor magnético, y se

combinan las salidas de los sensores para realizar una detección energéticamente más eficiente de los vehículos.

La combinación de sensores también está presente en el trabajo de (Bajwa et al. 2011), cuyo objetivo principal es la clasificación de vehículos. La detección de ejes es fundamental para este proceso, pero los sensores magnéticos no aportan suficiente información para obtener el número de ejes del vehículo. Por este motivo, los autores combinan sensores AMR con sensores de vibración para obtener el complemento de información necesario para clasificar con más precisión los vehículos.

En (Ma et al. 2014) también se utiliza una combinación de sensores magnéticos y, en este caso, de proximidad para detectar con más fiabilidad si una plaza de aparcamiento está ocupada o no. Con ello se consigue simplificar el algoritmo de detección magnética a costa de usar un sensor adicional, con la contrapartida del consumo que ello supone.

### 3.3. Re-identificación de vehículos con sensores magnéticos

La re-identificación de vehículos, tal y como hemos visto en el Capítulo 1, es una técnica muy importante en la gestión del tráfico puesto que proporciona el mayor nivel de detalle que se puede tener sobre el flujo de tráfico en una determinada zona.

La re-identificación de vehículos consiste, en general, en la capacidad de poder detectar un mismo vehículo a su paso por distintos puntos de la red viaria (Cetin & Monsere 2012). En concreto, se puede decir que un vehículo se ha re-identificado cuando ha sido localizado en 2 puntos distintos en 2 momentos distintos, usando tecnologías que permiten distinguirlo de los demás en dichos puntos de paso.

Las tecnologías que se utilizan para la re-identificación de vehículos se basan en la captación de determinadas medidas físicas en los puntos de sensorización para su comparación, como la longitud de los vehículos, la velocidad, el color, la forma, el peso, o la distancia entre ejes, aunque también se pueden usar los resultados de las mediciones de algunos dispositivos de sensorización, como la matrícula de los vehículos extraídas a través de sistemas de OCR de cámaras de tráfico, o las

huellas magnéticas extraídas de las espiras y los sensores magnéticos. La capacidad de re-identificación de la tecnología vendrá determinada por su potencial para emparejar o discriminar vehículos en base a las características que se puedan obtener con ellas. En cualquier caso, el proceso de re-identificación no tiene por qué estar basado en una única tecnología y puede realizarse como combinación de varias de ellas (Sun et al. 2004).

Según (Steiner & Sick 2008), las tecnologías utilizadas para la re-identificación se pueden clasificar en 2 tipos: *directas* e *indirectas*. Las tecnologías directas son aquellas que permiten que el vehículo se comunique con la infraestructura de manera que pueda proporcionarle un dato identificativo único. Dentro de estas tecnologías estarían el GPS, GSM/GPRS/UMTS, Bluetooth, WiFi, etc. Las tecnologías indirectas son las que están basadas en la detección por parte de los dispositivos de monitorización de la infraestructura de características propias de los vehículos que permitan su identificación unívoca. En este grupo estarían el reconocimiento automático de matrículas, sensorización magnética, LASER, LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), etc.

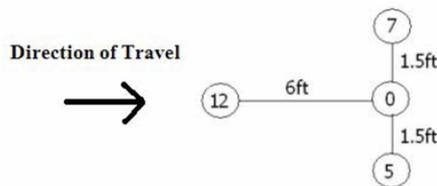
En (Aubin et al. 2007) podemos encontrar una descripción de las tecnologías más importantes que se utilizan para la detección y el seguimiento de vehículos. En este estudio se describe un amplio abanico de tecnologías, y todas ellas pueden aportar información para poder realizar una re-identificación de vehículos, bien de forma autónoma (como el reconocimiento de matrículas) o bien de forma combinada con otras tecnologías (como los tubos neumáticos que aportan datos de distancia entre ejes como parte de la información necesaria para la re-identificación). Entre los detectores de infraestructura más avanzados para la re-identificación de vehículos podemos encontrar los sensores de infrarrojos, sensores acústicos, sensores magnéticos, espiras magnéticas, cámaras de vídeo, sensores de radar y ultrasonidos y LIDAR.

En esta tesis nos vamos a centrar en la capacidad de re-identificación que proporcionan los sensores magnéticos, en particular los que utilizan la magneto-resistencia anisotrópica como la propiedad física en la que se basa su funcionamiento. Como hemos visto en la sección 3.2.2, estos sensores permiten obtener huellas magnéticas de los vehículos que pueden ser consideradas como características propias. A continuación analizaremos los principales trabajos de la literatura que han utilizado estos sensores con fines de re-identificación.

### **Re-identificación de vehículos con sensores AMR**

Son pocos los estudios que se pueden encontrar en la literatura que traten la re-identificación de vehículos con sensores AMR. Una de las primeras referencias que se pueden encontrar en la literatura con respecto a la re-identificación de vehículos con sensores AMR es la de (Caruso & Withanawasam 1999). A pesar de que los autores no hablan específicamente de re-identificación de vehículos, destacan la diferencia que existe en las huellas magnéticas de diferentes vehículos que se pueden obtener con este tipo de sensores. También proponen métodos para la extracción de características (como la longitud y la velocidad) que pueden ser utilizados en la clasificación de vehículos, pero que lógicamente pueden extender su uso a la re-identificación.

La primera aproximación concreta a la re-identificación de vehículos con sensores AMR aparece en (Cheung, Coleri & Varaiya 2005), donde los autores presentan el estudio como “*un experimento preliminar para el uso de las redes de sensores con fines de re-identificación*”. Si en otras aplicaciones se utilizaban uno o dos sensores, los autores establecen una primera configuración de cuatro sensores distribuidos en forma de T en el carril, tal y como se muestra en la Figura 11.



*Figura 11. Configuración de sensores para el experimento de re-identificación de vehículos en (Cheung, Coleri & Varaiya 2005)*

El hecho de usar varios sensores con esta configuración en T (o parecida), en la que se sitúa una línea de sensores perpendicular a la dirección del movimiento del vehículo, y un sensor aislado con anterioridad a la línea transversal y a una distancia relativamente pequeña, se va a repetir en la mayor parte de los estudios. Esta configuración tiene 2 objetivos. El primero es poder obtener suficientes señales del vehículo como para que el efecto del *desplazamiento lateral* no suponga un problema en la re-identificación. El segundo es disponer de 2 huellas magnéticas casi idénticas para poder calcular la velocidad de paso por el sensor.

En este primer estudio se realiza un experimento con 3 vehículos que pasan 5 veces sobre la zona sensorizada. La velocidad calculada de cada paso se utiliza para normalizar las señales en número de muestras, y en el experimento se comparan todas las señales obtenidas de los vehículos. Los autores del trabajo no aportan ningún dato sobre la forma de comparar las huellas magnéticas ni sobre los resultados del experimento de re-identificación.

El siguiente trabajo relevante que encontramos en la literatura es el de (Cheung & Varaiya 2007) que, como ya hemos comentado anteriormente en este capítulo, es el más completo en la literatura. En este caso se utiliza una configuración de 8 sensores en forma de T, con 7 sensores en línea situados en el centro del carril para re-identificar vehículos y otro sensor adelantado para calcular la velocidad de paso (Figura 12). Los autores utilizan la correlación cruzada como método para comparar señales individuales de cada uno de los sensores de la línea transversal. Sin embargo, en lugar de trabajar sobre la señal original, trabajan sobre una transformación a un espacio dimensional reducido. En concreto, aplican un método de simplificación definido en el estudio y que los autores denominan “Average Bar” para obtener 20 muestras para cada una de las señales. Todos los sensores utilizados en este estudio son sensores AMR de 3 ejes.



*Figura 12. Configuración de los 7 sensores AMR en línea para re-identificar vehículos (Cheung & Varaiya 2007)*

La medida de similitud que aplican para establecer emparejamientos de vehículos es la combinación de la correlación cruzada de las señales de los 3 ejes de un sensor (el producto de las correlaciones cruzadas de las señales de cada eje). Como procedimiento de trabajo, los autores proponen tomar dos puntos de sensorización, y almacenar las señales de los vehículos para cada sensor en los 2 puntos de control. De esta manera, cuando se recibe una señal en el segundo

punto de control, se compara con un conjunto de señales obtenidas en el primer punto, usando una ventana temporal determinada por la velocidad estimada para el vehículo y la distancia entre los puntos de control. La comparación se realiza entre las 7 señales de los sensores (49 comparaciones para cada par de vehículos, suponiendo que todos los sensores hayan generado señal), y se selecciona como candidato a la re-identificación el vehículo que aporte un valor de similitud superior a cierto umbral. Si hay varios vehículos que cumplen la condición, se selecciona el vehículo para el que el valor de la similitud es mayor. No obstante, en el experimento que realizan utilizan un único punto de sensorización, donde capturan varias señales de los vehículos de prueba. Posteriormente aplican una simulación como si tuviesen dos puntos de sensorización siguiendo el método propuesto.

En este experimento con vehículos controlados se comparan las señales de todos los vehículos entre ellas siguiendo un orden incremental del conjunto de señales a comparar, es decir, se parte de un conjunto de señales, se añade otra señal y se compara con las existentes, y así sucesivamente. Se considera que existe una re-identificación positiva para un emparejamiento si el valor de similitud entre las señales está por encima de un umbral de 0.9. De esta forma, los autores obtienen un ratio de re-identificación de un 98.9%.

Además de este experimento controlado, los autores realizan otro experimento en una situación real. El experimento consiste en determinar la trayectoria de un vehículo en una incorporación, es decir, detectar un vehículo que llega a un cruce para incorporarse a una vía y determinar si el vehículo gira a la izquierda o a la derecha. Para este experimento utilizan el mismo número de sensores y la misma metodología, pero los vehículos tienen mayor grado de libertad en el movimiento y la posición de paso sobre los sensores está menos controlada. En estas condiciones, y sobre un conjunto de 80 vehículos, los autores obtienen un ratio de re-identificación de un 72.5% y se ven obligados a disminuir el umbral de similitud a 0.56. Como conclusión, los autores destacan que este método es válido por los resultados que obtiene, pero que a pesar de reducir la dimensión del problema con la transformación del "Average Bar" el coste computación es alto ( $N^2$ ).

Posteriormente, Kwong et al. realizan varios estudios sobre la capacidad de re-identificación de los sensores AMR. Los resultados se muestran en (Kwong et al. 2009a), (Kwong et al. 2009b) y (Kwong et al. 2010). Estos estudios están orientados a calcular tiempos de viaje entre dos puntos en una vía principal de una ciudad. Para ello, necesitan re-identificar vehículos en varios puntos del recorrido. Utilizan

de nuevo una red de 7 sensores en línea en cada punto de sensorización, con una separación de 30 cm. entre los sensores. Los sensores trabajan con una frecuencia de muestreo de 128 Hz. De cada nodo obtienen una señal cuando un vehículo pasa sobre él, y de cada señal se extrae un vector de características. El conjunto de los 7 vectores de características de cada vehículo es lo que los autores consideran la huella magnética del vehículo. El vector de características de una señal se define como el conjunto de extremos (picos y valles) que se pueden encontrar en ella. La huella de un vehículo estará compuesta, por tanto, por 7 vectores que consisten en la secuencia de picos y valles que se encuentran en las señales de cada sensor que la componen.

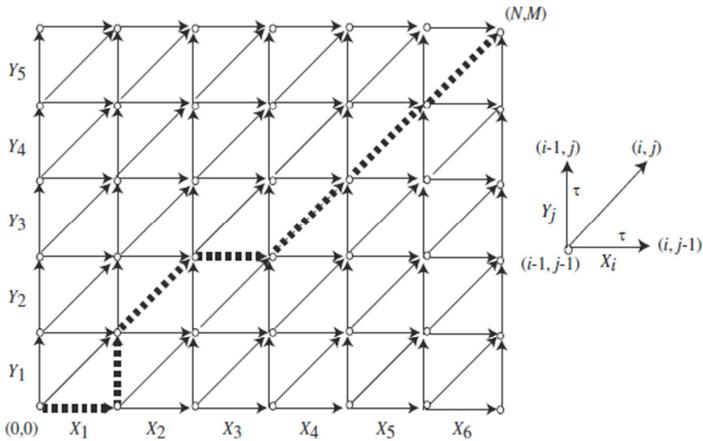
El proceso de emparejamiento de vehículos tiene lugar en 2 fases. En la primera se realiza un cálculo de similitud entre todas las huellas que se desea emparejar, lo que proporciona una matriz de valores de similitud. En la segunda fase se aplica un criterio de selección de pares, de manera que se asocian vehículos que se consideran idénticos y se descartan vehículos sin pareja.

Para el cálculo de la distancia entre huellas se mide la distancia entre todos los vectores de características que la componen (cada vector corresponde a un sensor) y se elige la menor, siempre que esté por debajo de cierto umbral. Si la distancia mínima no se encuentra por debajo del umbral se considera que la distancia es infinita, es decir, que los vehículos a los que pertenecen las huellas no son el mismo.

Para el emparejamiento de vehículos se utiliza la matriz de distancias obtenidas en el paso anterior y se aplica un procedimiento de resolución de emparejamientos buscando la distancia mínima en el recorrido de pares, siguiendo un procedimiento de programación dinámica (Figura 13).

Este procedimiento es computacionalmente costoso, y los autores muestran en su estudio que el coste depende de la dimensión de la matriz y del valor umbral seleccionado para el cálculo de la similitud entre huellas. También afirman que el procedimiento de emparejamiento no se puede aplicar en tiempo real si se consideran todos los vehículos porque para cada señal nueva que entre en un punto de sensorización se deben calcular las similitudes con el resto de señales que existan. No obstante, si se restringe la búsqueda a una ventana temporal acorde con el tiempo máximo de viaje entre los dos puntos de sensorización, el coste

computacional disminuye y se hace estable. Esto equivale a disminuir el tamaño de la matriz de distancias y configurar adecuadamente el umbral de similitud.



*Figura 13. Grafo de edición para resolver el emparejamiento de vehículos basado en la matriz de distancias (Kwong et al. 2009b)*

Para conseguir un emparejamiento óptimo se utiliza un modelo estadístico basado en 2 funciones de densidad de probabilidad gaussianas asociadas a los valores de similitud que corresponden a re-identificaciones correctas y a re-identificaciones incorrectas. Los parámetros de las distribuciones, obtenidos empíricamente, permiten establecer unos valores óptimos para la dimensión de la matriz y el umbral de similitud. Estos valores son los que determinan el funcionamiento óptimo del algoritmo propuesto. Los ratios de acierto que se obtienen aplicando este método están entre 67% y 74%, según el tramo de vía del experimento.

El procedimiento de emparejamiento en los primeros trabajos se lleva a cabo sin añadir ninguna restricción adicional. Sin embargo, los autores introducen en un tercer estudio restricciones que ayudan a mejorar los resultados. En concreto, proponen una restricción poco real, pero que mejora los resultados de la re-identificación, y que consiste en considerar que no se han producido adelantamientos entre los dos puntos de sensorización. Esta restricción, aunque falsa, permite acercarse a condiciones de trabajo en tiempo real y mejorar los ratios de re-identificación, llegando hasta el 75% de ratio de acierto, sin afectar a los cálculos de tiempo de viaje (que son el objetivo final de los estudios).

En relación con el problema de la estimación de tiempos de viaje encontramos el estudio de (Volling 2009). Este trabajo pretende evaluar el rendimiento de los sensores AMR en cuanto al ratio de re-identificación y el tiempo necesario para obtener datos fiables con el objetivo de obtener el tiempo de viaje en función de dicho ratio (cuanto mayor es el ratio de re-identificación menos tiempo se tarda en tener suficientes datos para poder calcular el tiempo de viaje entre 2 puntos). La configuración experimental propuesta es de 5 sensores en línea en cada uno de los puntos de detección. Los detalles sobre la extracción de señales y el método de comparación para la re-identificación no se mencionan en el trabajo. Con esta configuración, el autor del estudio presenta los resultados de una prueba controlada sobre un total de 347 vehículos, de los cuales 240 son re-identificados correctamente, lo que representa un 69% de ratio de re-identificación.

Los trabajos realizados por (Sanchez et al. 2011a) y (Sanchez et al. 2011b) muestran una continuidad sobre la idea propuesta inicialmente en (Kwong et al. 2009b). En este sentido, los métodos de extracción de la señal, la construcción de las huellas magnéticas de los vehículos usando los extremos de las señales, y el algoritmo de re-identificación son idénticos, si bien se introducen algunas novedades. En (Sanchez et al. 2011a) se utilizan 5 sensores AMR en línea en cada punto de sensorización y se aplica la restricción FIFO que consiste en considerar que la probabilidad de adelantamiento en la sección estudiada es 0. El estudio se desarrolla en la ciudad de New York, en una sección de 0.51 Km. La evaluación de la capacidad de re-identificación en este experimento sitúa el ratio de acierto en un 69%.

El segundo estudio (Sanchez et al. 2011b) se desarrolla en una zona interurbana, en una sección de salida-incorporación entre dos grandes autopistas, con 7 sensores AMR en línea. Se toman 23 vehículos para la validación del método de re-identificación del experimento (de un total de 543), que pretende mejorar los ratios de acierto de trabajos previos. Las mejoras que se introducen en este estudio son la aplicación del método DTW para comparar las señales individuales de cada sensor y la variación de los parámetros de las funciones de densidad de probabilidad para ajustarlas al experimento en cuestión, es decir, una calibración adecuada del modelo. Los resultados que obtienen en estas condiciones son de un 92% de ratio de re-identificación en situaciones de no congestión y un 86% en situaciones de congestión. Por otro lado, el autor de estos trabajos, en su disertación de tesis doctoral (Sanchez 2012), presenta los resultados de un experimento adicional en

una vía arterial con los mismos métodos de trabajo, llegando a obtener un 83% de ratio de re-identificación. En este último trabajo el autor destaca que los sensores utilizados trabajan a una frecuencia demasiado baja (128 Hz) para poder procesar las señales de vehículos que se desplazan a gran velocidad, y que el coste del sistema de re-identificación es cuadrático, lo que supone un inconveniente para su aplicación a entornos de trabajo que precisan datos en tiempo real cuando la intensidad de vehículos es muy elevada.

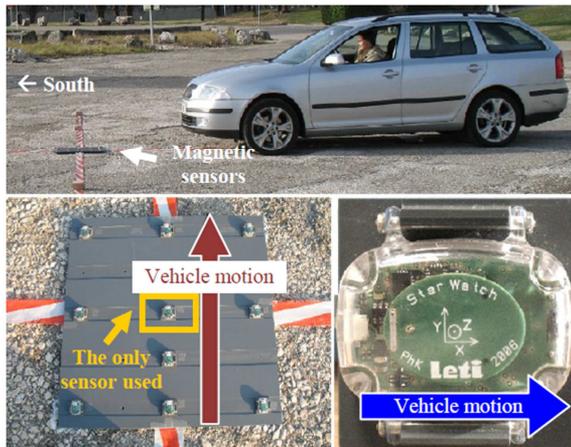
A pesar de que los trabajos sobre re-identificación tienden a utilizar varios sensores para obtener mejores resultados, existen trabajos que se mueven en dirección opuesta. Este es el caso del trabajo de (Charbonnier et al. 2012), donde se utiliza un solo sensor AMR de 3 ejes. Se trata de un experimento controlado, en el que se utilizan 25 vehículos para comprobar la validez del algoritmo de re-identificación. En este experimento se pone especial cuidado en que los vehículos pasen a una velocidad constante y con una posición relativa con respecto al sensor lo más parecida posible en las distintas pasadas que realizan los vehículos sobre el sensor. El sensor utilizado es uno de los que tienen más frecuencia de muestreo en comparación con los de la literatura (200 Hz).

En el experimento planteado los vehículos pasan sobre el sensor varias veces y con varios sentidos de circulación (Norte-Sur, Sur-Norte, Este-Oeste y Oeste-Este), y consiguen un total de 261 huellas magnéticas para el experimento. Las señales se obtienen utilizando el método de detección de umbral y son normalizadas y suavizadas una vez extraídas. Los autores de este estudio utilizan como medidas de similitud la correlación cruzada, la distancia mínima ofrecida por el método DTW y un clasificador basado en la probabilidad máxima gaussiana. Los resultados del estudio de re-identificación corresponden a un conjunto de pasadas de vehículos en uno de los sentidos de circulación propuestos, y se muestran a través de una curva ROC, lo que permite valorar la relación entre aciertos y fallos dependiendo del umbral de similitud que se seleccione para clasificar una pareja de señales como pertenecientes al mismo vehículo o no. De los tres métodos propuestos, el DTW es el que ofrece los mejores resultados, puesto que es capaz de aportar un 78% de re-identificaciones correctas manteniendo un ratio de error del 0%.

Los autores destacan que el DTW es el mejor método para calcular las similitudes, pero es muy costoso computacionalmente. Por ese motivo, introducen una variante que consiste en hacer un pre-filtrado de candidatos a re-identificación con los otros métodos propuestos (que son menos costosos computacionalmente), y

posteriormente aplicar el DTW. Los ratios de re-identificación son muy similares a los obtenidos exclusivamente con el método DTW, pero el ahorro en tiempo de computación es considerable.

Los mismos autores de este estudio firman otro trabajo en el que investigan la capacidad de re-identificación con varios sensores AMR (Pitton et al. 2012). Las condiciones experimentales son las mismas que en el estudio anterior, pero en lugar de utilizar un único sensor AMR de 3 ejes utilizan varios de los sensores que integran el dispositivo de monitorización, que es el mismo que utilizan en el estudio anterior (Figura 14). En este dispositivo los sensores están separados 0.25 metros dentro de una caja de plástico cuadrada de 0.6 metros de lado. En la Figura 14 se aprecia la ubicación de los sensores a través de las marcas metálicas sobre la superficie de la caja contenedora.



*Figura 14. Dispositivo de sensorización compuesto por 10 sensores AMR de 3 ejes con la identificación del sensor usado en (Charbonnier et al. 2012)*

En este caso, las señales que utilizan las normalizan en velocidad, con lo que obtienen señales en el dominio del espacio en lugar del dominio del tiempo, independientes de la velocidad. Para evaluar la capacidad de re-identificación utilizan la distancia euclídea como la medida de similitud, y la comparan con los resultados de la medida de la DTW del estudio anterior, pero agregando sensores al problema. De esta forma, cuando utilizan 2 sensores en la comparación, la distancia euclídea ofrece un ratio de acierto en la re-identificación del 90% para un error del

0%, y cuando se utilizan 4 sensores, el ratio de acierto es del 100% para un error del 0%. No obstante, los autores afirman que el experimento se ha realizado con unos pasos de vehículos que han mantenido la posición relativa del vehículo con el sensor lo más parecida posible. De hecho, constatan que si se utilizan dos sensores separados 25 cm. para calcular la similitud, el ratio de acierto desciende hasta el 60%, lo que constata la importancia que tiene el efecto del desplazamiento lateral y lo que supondría en un experimento realizado en condiciones de flujo reales, donde los vehículos pueden circular libremente por la zona de sensorización.

Existen otros estudios que, aunque no se han realizado con sensores AMR, han utilizado sensores magnéticos que ofrecen información similar: los microloops. Dado que existen estudios de re-identificación con estos dispositivos magnéticos y el proceso de tratamiento de datos es muy similar al utilizado en los estudios de sensores AMR, hemos considerado conveniente mencionarlos en este apartado. En concreto, existen en la literatura 2 estudios que son los más destacables por sus procedimientos de trabajo y sus resultados.

El primero es el trabajo de (Ernst et al. 2010) que está orientado a valorar los efectos que tiene la velocidad y la aceleración de los vehículos en los procesos de re-identificación basados en huellas magnéticas. Para ello plantea un experimento con 2 puntos de medida, y en cada uno de ellos sitúa 2 microloops en el centro del carril a una distancia inferior a 6 metros. En cada paso de un vehículo extrae una huella magnética y calcula su velocidad y su aceleración. El autor propone como medida de similitud entre señales el coeficiente de correlación.

El procedimiento de emparejamiento de vehículos se lleva a cabo comparando la señal correspondiente a un vehículo que llega al segundo punto de sensorización con un conjunto de señales recogidas en el primer punto de sensorización. Este conjunto está definido por el intervalo de tiempo en el que han sido tomadas y que corresponde con el tiempo estimado de viaje del vehículo objetivo entre los dos puntos, es decir, el conjunto de señales correspondientes a una ventana temporal adecuada para la velocidad del vehículo.

Como paso previo a la comparación, las señales son tratadas para compensar los efectos de la velocidad y de la aceleración. Los resultados de la aplicación de los procedimientos de compensación permiten obtener mejoras en el rendimiento de la re-identificación, pasando de 38.5% de aciertos cuando no se tiene en cuenta la

velocidad a un 56.5% si se considera la velocidad y un 68.3% si se considera además la aceleración.

El segundo es el trabajo de (Ndoye et al. 2011), en el que también se utilizan microloops situados por parejas en el centro del carril. Un elemento importante de este trabajo es que los autores describen una metodología concreta para el tratamiento de las señales y su uso en la re-identificación. Los procesos que componen la metodología propuesta son: un procedimiento de segmentación de señales mejorado, una selección de huellas magnéticas que no estén distorsionadas, una normalización de las señales por efectos de la velocidad y la utilización de conceptos de teoría de comunicaciones para realizar el emparejamiento de señales. Como paso previo a la obtención de las señales, los autores proponen la aplicación de un filtro paso bajo para suavizar la señal y mejorar así la eficacia de la segmentación y la comparación de señales.

En el procedimiento de segmentación se introduce la novedad de usar la energía de la señal en lugar del valor absoluto de la magnitud que representa como parámetro a evaluar. Se aplica un criterio de detección basado en un valor umbral. Al trabajar con microloops, sólo existe una señal por cada vehículo, frente a las 3 que aportan los sensores AMR de 3 ejes. El proceso de segmentación es, por tanto, más simple y rápido.

Para el emparejamiento de señales, los autores utilizan un concepto de teoría de señales que es la probabilidad máxima a posteriori, donde cada huella magnética se considera como un pulso que contiene información en un sistema de comunicaciones. El receptor óptimo consiste en un banco de Filtros Adaptados que asumen que todas las señales han sido normalizadas para tener la misma energía. En este caso, el filtro adaptado se basa en la correlación cruzada. De esta manera, el procedimiento de emparejar una señal con otra que pertenece a un conjunto de candidatos consiste en calcular la correlación cruzada de la señal objetivo con el resto y seleccionar la que mejores resultados ofrece. Sin embargo, dado que en cada punto de sensorización se obtienen dos señales (una por cada sensor), el cálculo de similitud entre señales de vehículos contempla ambas señales independientemente, con lo que se obtiene un cálculo cruzado que da 4 valores de similitud, de los cuales se selecciona el más alto.

El modelo de trabajo que plantea el estudio es, como en otros casos, situar dos puntos de sensorización alejados unos cientos de metros, y situar en cada uno de

ellos dos sensores. El proceso de re-identificación propuesto consiste en comparar las señales de los vehículos que pasan por ambos puntos de sensorización. Al igual que en otros estudios, también se propone reducir el espacio de búsqueda para el emparejamiento de señales utilizando ventanas temporales relacionadas con la velocidad de los vehículos y el tiempo estimado de viaje entre los dos puntos de sensorización.

El trabajo contiene 2 experimentos separados. En el primero, el entorno experimental propuesto es un único punto de sensorización con dos sensores separados una distancia aproximada de 6 metros. Los autores argumentan que esta configuración experimental está orientada a validar el método de comparación de señales sin que existan interferencias de otro tipo que puedan afectar a los resultados. En concreto, los autores comparan las huellas obtenidas en un sensor con las obtenidas en el otro sensor (separados escasamente 6 metros). Para ello simulan que los sensores se hallan a una distancia de una milla, y aplican la restricción de la ventana temporal para seleccionar el conjunto de candidatos a la re-identificación de un vehículo. Los ratios máximos de re-identificación que obtienen con esta simulación son del 95.6%. Obviamente, aunque los sensores los sitúan en un entorno de trabajo real, este experimento se puede catalogar como controlado por las condiciones de recogida de las señales que se comparan.

En el segundo experimento los autores sitúan 2 puntos de sensorización separados una distancia de 0.7 millas. Aplican los mismos procedimientos que en el primer experimento, pero en este entorno real sí que existen elementos que perturban la capacidad de re-identificación, como vehículos que entran y salen de la sección de la carretera o cambios de carril. Con esta configuración experimental en un entorno real, los autores consiguen obtener un valor máximo de re-identificación del 45%, lo que puede poner en entredicho los resultados del primer experimento por la diferencia tan importante de efectividad entre los 2 casos.

Como conclusiones, los autores argumentan que, frente a otros estudios, la aproximación propuesta consistente en el uso de un solo sensor en lugar de varios es suficiente para obtener tiempos de viaje y económicamente menos costosa, valoran positivamente utilizar todos los datos de la señal en lugar de un vector de características y han sido capaces de controlar el efecto de la velocidad sin tener que recurrir a redes de sensores complejas y métodos de comparación estadísticos que conllevan problemas de calibración importantes.

### **Resumen de estudios y ratios de re-identificación**

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los estudios de re-identificación de la literatura que hemos revisado con los ratios de re-identificación que se han obtenido. A cada estudio se le ha asignado un identificador para facilitar la representación y lectura comparada de los datos, de la siguiente forma:

1. (Cheung & Varaiya 2007), experimento 1
2. (Cheung & Varaiya 2007), experimento 2
3. (Kwong et al. 2009a) y (Kwong et al. 2009b)
4. (Kwong et al. 2010)
5. (Volling 2009)
6. (Ernst et al. 2010)
7. (Ndoye et al. 2011), experimento 1
8. (Ndoye et al. 2011), experimento 2
9. (Sanchez et al. 2011a)
10. (Sanchez et al. 2011b)
11. (Sanchez 2012)
12. (Charbonnier et al. 2012)
13. (Pitton et al. 2012)

RESUMEN DE ESTUDIOS Y RATIOS DE RE-IDENTIFICACION													
Estudio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Tipo de experimento	C	R	R	R	R	R	C	R	R/F	R/F	R	C	C
Número de Sensores	7	7	7	7	5	2	2	2	5	7	7	1	2/4
Puntos de sensorización	1	2	4	2	2	2	1	2	2	2	2	1	1
Número de vehículos	7	80	--	--	347	--	--	--	15	23	--	25	25
Ratio de re-identificación (%)	98.9	72.5	74	75	69	68.3	95.6	45	69	90	83	78	90/100

*Tabla 2. Resumen de estudios y ratios de re-identificación analizados*

El dato correspondiente al tipo de experimento denota si la investigación se ha llevado a cabo en un entorno controlado o en un entorno real. La codificación utilizada es: C (Controlado), R (Real), R/F (Real con un filtrado selectivo de vehículos de interés). El número de sensores indica los sensores AMR que han sido necesarios en cada punto de sensorización para poder aplicar el método de re-identificación propuesto. Los puntos de sensorización indican se el experimento se ha realizado en un tramo con dos grupos de sensores independientes (2) o si se ha realizado utilizando los datos de un único grupo de sensores (1). El número de vehículos hace referencia a la cantidad de vehículos que se han utilizado para analizar la efectividad del método de re-identificación propuesto.

Todos los estudios que han sido analizados nos han permitido extraer ideas interesantes para aplicarlas al desarrollo de esta tesis y que han servido de fundamento para obtener mejoras en algunos algoritmos y procedimientos de trabajo con las huellas magnéticas de los vehículos. Además, nos han permitido identificar algunos aspectos técnicos y científicos que presentan carencias y que son mejorables para poder obtener ratios de re-identificación más elevados. Por tanto, al final de nuestro trabajo, contrastaremos nuestros resultados con los que se han presentado en la Tabla 2 para valorar las aportaciones que hemos realizado en esta tesis.

# 4. RE-IDENTIFICACIÓN DE VEHÍCULOS CON SENSORES AMR

---

En este capítulo se analiza la capacidad de un sensor AMR comercial para su aplicación en la re-identificación de vehículos a través del análisis de los datos que ofrecen, los procedimientos de extracción de información relevante de las señales de los vehículos monitorizados, las características de las señales obtenidas en distintos entornos de trabajo y la selección de métodos de cálculo de similitud entre señales que ofrezcan una métrica útil para emparejar señales pertenecientes a los mismos vehículos.

Los estudios preliminares analizados a lo largo del capítulo muestran que es posible obtener una señal característica para cada vehículo con distintos sensores, algunos de ellos creados ad-hoc. La extracción y el tratamiento de los datos extraídos del sensor están sujetos a un proceso que puede depender de varios factores, y que no tienen que ser iguales para cada sensor. Los procedimientos utilizados para comparar señales son también variados en la bibliografía, tal y como se detalla en las siguientes secciones.

El propósito de esta parte del trabajo es determinar los procedimientos y las técnicas que permiten obtener una señal del sensor AMR para caracterizar un vehículo, así como validar los mecanismos que permiten comparar las señales

extraídas y procesadas, y analizar si son aplicables al objetivo de utilizar el sensor para re-identificar vehículos en autopistas. Para ello se plantean dos objetivos: la definición de una metodología de extracción de señales de los sensores AMR y el análisis de la capacidad de re-identificación de las señales extraídas de los sensores AMR.

El capítulo se estructura en varias secciones. En primer lugar se diseñan y describen los entornos experimentales que se han utilizado para probar y validar los métodos de trabajo que conducen a la re-identificación de vehículos. A continuación se describen y analizan diferentes métodos de extracción y comparación de señales. En base a este análisis, se propone un nuevo algoritmo para la realización de estas tareas. Finalmente se analizan diferentes técnicas de procesamiento y comparación de señales en base a los métodos utilizados por otros autores en la literatura. Este análisis se realiza con varios experimentos desarrollados en los entornos de investigación propuestos. El resultado experimental permite obtener una visión del rendimiento de los distintos procesos y técnicas empleados en la re-identificación, y valorar la capacidad de re-identificación de distintas medidas de similitud, además del coste computacional que conlleva cada uno de los métodos analizados.

## 4.1. Introducción

Los sensores magnéticos de tipo AMR permiten medir las intensidades y las direcciones del campo magnético que los rodea gracias a la propiedad de magneto-resistencia de los materiales con los que están formados y que son la base de su funcionamiento. La capacidad de medición de los sensores comerciales de este tipo es direccional, es decir, que monitorizan la intensidad del campo magnético en una determinada dirección, según su configuración.

Uno de los múltiples usos que se puede hacer con este tipo de sensores es la medición de la variación del campo magnético al que se ven sometidos en función del tiempo cuando hay algún elemento externo que lo perturba. Cuando los sensores AMR se usan para este fin, la representación de los datos que proporcionan en una línea temporal se puede percibir como una señal característica de la variación de un parámetro físico con el tiempo, tal y como muestra la Figura 15.

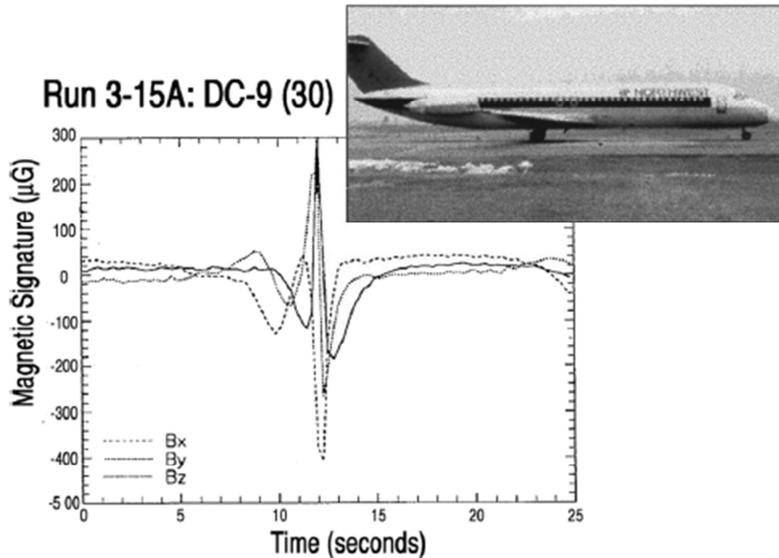


Figura 15. Ejemplo de la medida de la variación del campo magnético de la tierra por un sensor AMR al paso de un objeto metálico (Lenz & Edelstein 2006)

En una situación en la que no existan elementos con una carga ferrosa o magnética cercanos al sensor y en movimiento, la intensidad del campo magnético medida por un sensor AMR permanece constante. Si se produce una perturbación en el campo magnético en las proximidades del sensor, se produce una variación en la resistencia eléctrica del material magneto-resistente del sensor que permite calcular la variación de la intensidad del campo magnético externo. La señal obtenida representa la variación en el tiempo de la intensidad del campo magnético externo al sensor en una determinada dirección.

Los sensores AMR tienen una sensibilidad de medición lo suficientemente grande como para medir la intensidad del campo magnético de La Tierra y detectar variaciones en el mismo cuando algún elemento lo perturba. Los elementos que pueden perturbar cualquier campo magnético, y en particular el campo magnético de La Tierra, son objetos magnéticos u objetos férreos. La capacidad de un sensor AMR para medir estos cambios dependen del tamaño del objeto perturbador, y de la distancia a la que se encuentre el objeto del sensor (ver Figura 16).

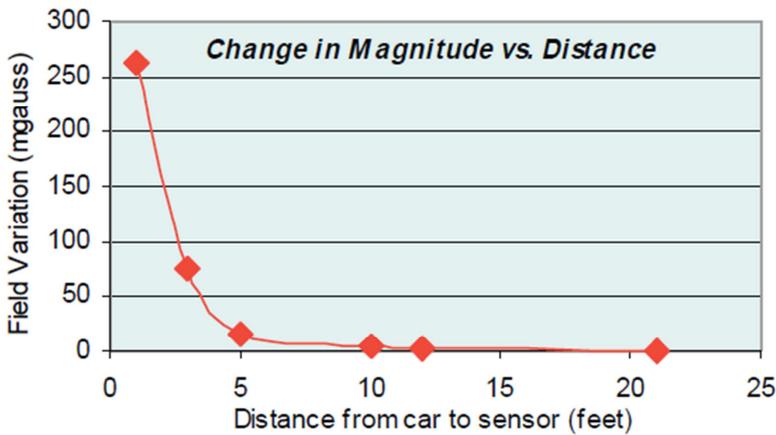


Figura 16. Variación de la magnitud medida por un sensor AMR en función de la distancia de paso (Caruso & Withanawasam 1999)

Considerando esta capacidad, los sensores AMR pueden utilizarse en aplicaciones de control de tráfico de vehículos en el ámbito del transporte. Un sensor magnético situado en determinados puntos estratégicos en las inmediaciones de una calle o carretera es capaz de percibir el paso de los vehículos que circulan por ella. Cada uno de los pasos de los vehículos podrá ser representado a través de una señal, que denominaremos huella magnética, y que mostrará la variación del campo magnético de La Tierra que percibe el sensor a su paso. La posición y orientación del sensor con respecto al vehículo durante su movimiento influirá en la forma y amplitud de la huella magnética.

Algunos dispositivos que incorporan sensores AMR tienen capacidad de medir variaciones del campo magnético en más de una dirección al mismo tiempo. Es habitual encontrar dispositivos que monitorizan 3 dimensiones ortogonales (X, Y, Z), y que cuando se aplican a la detección de vehículos permiten obtener señales como las que se representan en la Figura 17. En esta figura se aprecia la señal magnética percibida por un dispositivo de sensorización de tipo AMR en 3 direcciones como una variación del campo magnético en función del tiempo (huella magnética).

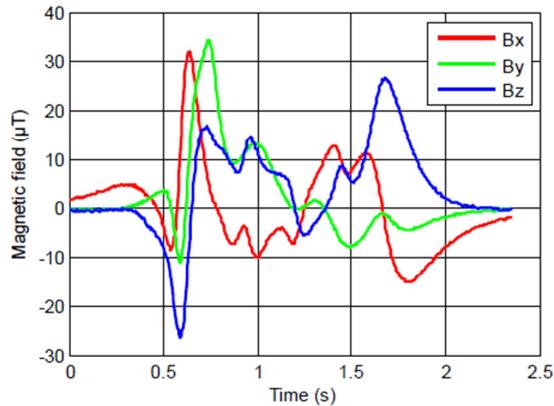


Figura 17. Ejemplo de la medida de la variación del campo magnético de la tierra en 3 direcciones por un sensor AMR al paso de un vehículo (Charbonnier et al. 2012)

En el estado de la técnica se ha mostrado que esta idea ya ha sido aplicada en estudios y trabajos precedentes, y se ha demostrado en ellos que los sensores AMR permiten tanto la detección de vehículos como su identificación en dos puntos distintos de secciones de tráfico controladas. Estos estudios han utilizado diversos dispositivos de sensorización, aunque muchos de ellos están basados en el mismo sensor de base: el Honeywell HMC2003 (Honeywell 2011) que se muestra en la Figura 18.



Figura 18. Sensor Honeywell HMC2003 (Honeywell 2011)

El sensor HMC 2003 se caracteriza por tener una alta sensibilidad capaz de medir intensidades del campo magnético en 3 ejes ortogonales (X, Y, Z). Dispone de un interfaz analógico para extraer los datos de cada uno de los ejes. Está equipado con unos resistores de offset y ganancia que disminuyen los errores de temperatura y las oscilaciones de offset. También dispone de un filtro de paso bajo integrado que reduce el ruido no deseado. Entre las características más destacables de este

sensor están su reducido tamaño (1" x 0,75"), salidas analógicas calibradas de fábrica, capacidad de detección desde 40 micro-gauss a  $\pm 2$  gauss en rango dinámico, y capacidad de operación entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $85^{\circ}\text{C}$ . La sensibilidad al campo magnético es de 1 V/gauss. Estas características le permiten detectar objetos metálicos de considerables dimensiones en movimiento a alta velocidad, según las especificaciones del fabricante.

Los estudios precedentes en este ámbito que han utilizado este sensor no aportan detalles sobre los procedimientos seguidos para la extracción de las señales y su tratamiento, con el fin de obtener unas huellas magnéticas que se puedan utilizar en el proceso de detección y re-identificación de vehículos, a excepción de (Cheung & Varaiya 2007), (Haoui et al. 2008), y (Ndoye 2010) que aportan información parcial sobre el procedimiento completo del tratamiento de señales.

Dado que en la literatura no existe un procedimiento estándar, único y bien documentado para extraer la información de un sensor AMR y procesarla con fines de re-identificación, el primer paso que se debe plantear es formalizar el tratamiento de los datos y las señales que generan estos sensores para su posterior uso. Así pues, se debe plantear un proceso de análisis de la información que se puede obtener a partir de los datos extraídos de un sensor AMR, y en particular la parametrización de los procedimientos de obtención de señales. En segundo lugar, se debe analizar la capacidad de re-identificación de las señales obtenidas, definiendo una métrica o medida de similitud entre señales y estableciendo una función de emparejamiento de vehículos en base a las señales que se obtienen de ellos.

Para la consecución de estas tareas se utiliza una aproximación dual, basada en el estudio de las señales que proporciona un sensor AMR comercial en dos entornos distintos. Por un lado, se utiliza un entorno simulado, a pequeña escala, donde se pueden realizar de forma sencilla y rápida las primeras pruebas. De esta forma, se podrá acotar el problema y restringir las pruebas necesarias a una mayor escala. El segundo entorno consiste en un campo de pruebas con vehículos reales, en un contexto controlado de velocidad, posicionamiento del sensor, y aislamiento razonable de perturbaciones externas. En este segundo entorno se podrán poner en práctica los procedimientos testeados y configurados procedentes del primer entorno, y se podrán refinar para adaptarlos al caso real de detección de vehículos.

La experimentación se llevará a cabo utilizando el sensor comercial Honeywell HMR2300 (Honeywell 2012) que se muestra en la Figura 19. Se trata de un magnetómetro digital que permite cuantificar la dirección e intensidad de un campo magnético que incida sobre él. Es un detector de 3 ejes (ortogonales, X, Y, Z) que mide las componentes vectoriales del campo magnético en dichas direcciones. Las salidas del sensor se convierten en valores digitales de 16 bits, y la comunicación con el dispositivo se realiza a través de un interfaz RS-232 full dúplex. Las capacidades del detector permiten capturar valores de campo magnético con una resolución de 70 micro-gauss, y con una rango de  $\pm 2$  gauss. Puede configurarse para trabajar con una frecuencia de muestreo entre 10 y 154 muestras por segundo, y se distribuye con una carcasa de aluminio para su conservación y fijación en el lugar de detección deseado. El rango de temperatura de operación es de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ .



*Figura 19. Sensor comercial Honeywell HMR2300 (Honeywell 2012)*

El dispositivo dispone de un software propio para la extracción de datos, pero el fabricante también proporciona unas especificaciones y un API para poder extraer información ad-hoc y configurar el sensor para aplicaciones propias.

## 4.2. Entornos experimentales

Esta tesis está enfocada a la investigación del uso de sensores magnéticos de tipo AMR en entornos interurbanos. Las hipótesis que se proponen para el desarrollo de un sistema de re-identificación de vehículos en estos entornos deben, por tanto, ser comprobadas en un entorno de trabajo real.

Los experimentos realizados para validar las hipótesis en un entorno real, que se detallarán en la sección 7.3, se han desarrollado en la autopista M-12 – Eje Aeropuerto, en Madrid. Estos experimentos han tenido un coste de ejecución elevado, debido a que ha sido necesario instalar los dispositivos en la carretera y probar y comprobar su funcionamiento, además de realizar las intervenciones necesarias para paliar fallos en los dispositivos y/o corregir errores de instalación.

En previsión de esta situación, y con el objetivo de minimizar los costes económicos que suponen para la empresa concesionaria de la autopista la preparación del entorno experimental, se ha considerado oportuno validar previamente, y en la medida de lo posible, las hipótesis planteadas en condiciones de laboratorio y condiciones reales controladas.

Por este motivo, se han planteado dos entornos experimentales previos que garantizarán una adecuada configuración y ejecución de la prueba experimental final. Por un lado se ha decidido utilizar un entorno de simulación que permita validar o negar de forma rápida y poco costosa las primeras ideas e hipótesis a desarrollar. Por otro lado, se ha planteado un entorno de pruebas controlado, con vehículos reales, que ha servido para contrastar los resultados obtenidos en el entorno de simulación y ajustar los parámetros de los algoritmos usados, con vistas a su aplicación en los experimentos en el entorno real.

### 4.2.1. Entorno de simulación

El principal objetivo de analizar las señales de los sensores AMR en un entorno de simulación, como ya se ha comentado, es el de disponer de un marco de trabajo en el que se puedan realizar múltiples pruebas con un coste temporal y económico reducido. Las primeras tareas que se deben realizar sobre el sensor son la extracción y el análisis de las señales que éste puede generar. En este sentido, un entorno de simulación facilita estas tareas (Kothari 2004), (Dooley 2002) y permite

realizar diversas pruebas con configuraciones variables tanto del contexto espacial en el que se realizan las mediciones como en el proceso de tratamiento de las señales obtenidas.

La elección del entorno simulado es importante para obtener información fiable que se pueda trasladar al entorno experimental controlado. Las condiciones que debe cumplir el entorno de simulación son:

- Capacidad de trabajo con sistemas físicos reales que generen perturbaciones del campo magnético de la tierra considerables, medidas por un sensor AMR real. Este requisito descarta el uso de simuladores por software.
- Aislamiento magnético del entorno, de forma que las condiciones ambientales y materiales que rodean a los experimentos sean uniformes y constantes durante la experimentación, y puedan ser reproducibles.
- Posibilidad de generación de múltiples perturbaciones que puedan diferenciarse unas de otras y queden reflejadas en las señales que se obtengan del sensor. Las perturbaciones deben estar asociadas a configuraciones físicas del objeto u objetos que generan las perturbaciones.
- Posibilidad de cambiar las condiciones inerciales del objeto o los objetos que están siendo estudiados, de manera que se puedan simular condiciones de medición de objetos en movimiento con distintas velocidades. De esta forma se aproxima el comportamiento de los objetos estudiados a los vehículos en movimiento (que pueden ser detectados por un sensor a distintas velocidades).

Estas restricciones están encaminadas a generar un entorno de simulación lo más parecido posible a un vehículo circulando por una carretera, pero a pequeña escala, y en unas condiciones de trabajo de laboratorio, donde es posible controlar tanto las condiciones ambientales como magnéticas del entorno. A la vista de esta idea, se plantea el uso de un Scalextric<sup>®</sup> (Hornby Hobbies 2015) como entorno de simulación, puesto que permite cumplir parte de las condiciones de trabajo establecidas.

La idea de usar un Scalextric<sup>®</sup> como entorno de simulación o de demostración para estudios académicos no es nueva (Dominguez-Morales et al. 2012), y aunque no se ha usado de manera frecuente en simulaciones en el ámbito de los ITS, se ha contemplado en otras áreas de conocimiento. También se menciona en la literatura (Kovavisaruch et al. 2009) la utilización de entornos de simulación similares basados en pistas miniaturizadas, que permiten emular el paso de vehículos y donde se utiliza un circuito de trenes para simular la secuencia de paso de varios vehículos consecutivos a una determinada distancia y detectarlos de manera diferenciada con sensores ópticos y magnéticos. En (Yoo et al. 2007) y (Yoo et al. 2010) también se utiliza un entorno experimental reducido a modo de pista circular donde se simula el paso de un vehículo para probar sensores desarrollados por los autores.

El Scalextric<sup>®</sup> se puede considerar como un circuito que permite tener un vehículo en miniatura en circulación con unas condiciones de velocidad variables, pasando por una posición controlada con respecto al sensor AMR. Sin embargo, los vehículos disponibles para el circuito no contienen una carga ferrosa o magnética lo suficientemente importante como para generar perturbaciones del campo magnético de La Tierra muy diferentes. Por consiguiente, es necesario completar este entorno de simulación con un objeto adicional que haga cumplir este requisito.

Los objetos que producen perturbaciones magnéticas más fuertes son los imanes, dado que generan campos magnéticos con una intensidad superior a la del CMT a distancias próximas al sensor. El acoplamiento de un imán a un vehículo Scalextric<sup>®</sup> permite, a priori, generar perturbaciones del campo magnético suficientemente importantes como para ser capturadas por el sensor.

Sin embargo, un único imán, con una estructura magnética dipolar, tan sólo permite generar unas pocas estructuras físicamente distinguibles. El sensor AMR podría distinguir la orientación del imán y la distancia de paso, aunque no sea el objetivo del estudio. Por tanto se necesita una estructura magnética más compleja para desarrollar el experimento. Esta estructura se ha construido a través de la composición de objetos con distintos imanes y que en función de su disposición espacial permite generar distintos tipos de perturbaciones.

Ha sido posible construir un objeto con estas características recurriendo de nuevo a un juego educativo que permite crear estructuras complejas usando imanes y esferas de metal. Una estructura simple compuesta por varios de estos imanes

puede generar las perturbaciones del campo magnético que se buscan. La propuesta de objeto inicial para el estudio es un tetraedro formado por 4 esferas en los vértices y 6 imanes en las aristas.

Es condición indispensable que el tetraedro pueda ser orientado de diversas formas junto con el vehículo y que todas ellas sean distinguibles visualmente para poderlas identificar en los experimentos, minimizando los posibles errores de medida. Para ello, se ha decidido limitar las posibles posiciones del mismo para los experimentos, asignando unos códigos de colores y una nomenclatura que permita su diferenciación, al tiempo que se mantienen las condiciones de variabilidad de perturbación del campo magnético requeridas.



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 20. Tetraedro con propiedades magnéticas, en diferentes posiciones*

Los 6 imanes que forman el tetraedro son de 3 colores: azul, verde y rojo. Cada color se denota por una letra mayúscula, respectivamente, la A, la V y la R. Se toman 3 imanes de color A, 2 de color R y uno de color V. Los imanes se fijan arbitrariamente a los vértices (esferas metálicas) y se unen con un material adhesivo que impida su separación. A cada esfera se le asigna un código (1, 2, 3 o 4), de forma que cada imán está identificado unívocamente por los vértices que lo delimitan. En la Figura 20 se puede apreciar el aspecto que tiene el tetraedro con la combinación de colores en las aristas y las esferas de los vértices, colocados en diferentes posiciones.

Con el fin de que el experimento sea repetible en distintas condiciones o en diferentes lugares y momentos, es conveniente limitar las posibles posiciones que puede tomar el tetraedro durante la realización de los experimentos. Una forma sencilla de conseguirlo es a través de la disposición referenciada de aristas y bases del tetraedro con respecto al lugar donde se ubicará y a la dirección del movimiento. Para ello, la posición del tetraedro debe cumplir alguna de estas restricciones:

- La parte inferior o superior de la figura es una base del tetraedro (situada en un plano horizontal), lo que permite obtener una pirámide normal (Figura 20 a y b) o una pirámide invertida (Figura 20 d).
  - Una arista del triángulo de la base (normal o invertida) debe ir situada siempre en posición longitudinal o transversal con respecto al sentido del movimiento. Esto permite, para cada una de las cuatro bases, situar dicha arista delante, detrás, a la izquierda o a la derecha, lo que genera un total de 24 posiciones diferentes para cada plano de la base (superior o inferior).
- La parte inferior de la figura es una arista del tetraedro (Figura 20 c) situada en paralelo a la pista y en posición longitudinal o transversal con respecto a la dirección del movimiento. Puesto que cada arista puede tener cuatro posiciones relativas (izquierda-derecha, derecha-izquierda, delante-detrás, detrás-delante), esta restricción genera un total de 24 posiciones diferentes<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Nótese que en esta configuración no tiene sentido invertir la base, puesto que una arista en la parte inferior de la figura va a tener también una arista en la parte superior, y la inversión de la figura generaría posiciones repetidas.

En total, la suma de configuraciones permitidas es de 72, lo que proporciona un conjunto significativo de disposiciones para realizar los experimentos, si bien es posible que algunas de las configuraciones sean similares en cuanto a su comportamiento y generen señales muy similares en cuanto a su forma de onda.

En el siguiente paso se ha acoplado el objeto magnético al vehículo que circulará por el circuito. Dadas las configuraciones establecidas, ha resultado complejo encontrar un mecanismo que fije el tetraedro en la orientación deseada sobre el vehículo. Para resolver este problema se ha situado el objeto en una plataforma remolcada por el vehículo. La plataforma se ha construido con un set de piezas de Lego (Lego Group 2015) que permiten encajar el tetraedro en cualquiera de las 72 orientaciones establecidas a priori.

Con el fin de obtener un número mayor de diferentes configuraciones en las pruebas, se ha decidido dividir la plataforma de remolque en 4 secciones distintas, identificadas con los valores 1, 2, 3 y 4, de forma que la sección 1 es la más próxima al vehículo y la sección 4 es la más alejada de él. Se puede apreciar un ejemplo de la disposición del tetraedro en uno de los compartimentos del remolque en la Figura 21. Con ello se ha conseguido capacidad para generar un total de 288 configuraciones magnéticas para realizar las pruebas sobre el simulador. Un ejemplo de alguna de dichas configuraciones se puede ver en la Figura 22.



*Figura 21. Disposición del tetraedro magnético en uno de los compartimentos del remolque del simulador*



Figura 22. Distintas disposiciones del tetraedro magnético

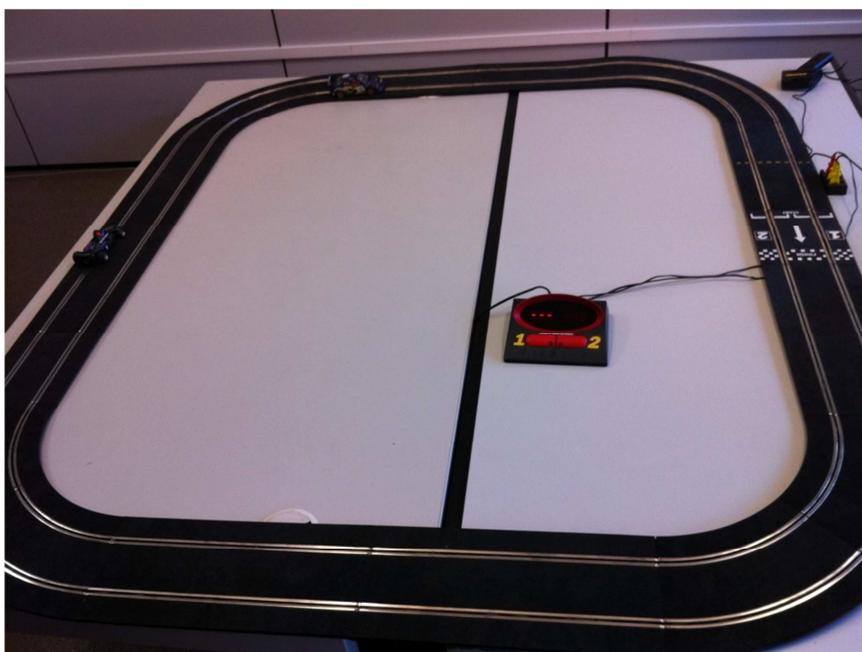


Figura 23. Circuito del entorno experimental de simulación

Finalmente, se ha construido un circuito Scalextric<sup>®</sup> en forma rectangular con unas dimensiones de 148 x 163,5 cm., de tal manera que el sensor AMR se ha situado justo bajo la pista de circulación del vehículo al final de una de las rectas, con el fin de que el vehículo y el remolque haya adquirido una velocidad estable al llegar a ese punto, sin que influya en la velocidad el hecho de que el coche tractor comience a tomar la curva. En la Figura 23 se puede observar una fotografía del circuito utilizado en el entorno experimental de simulación.

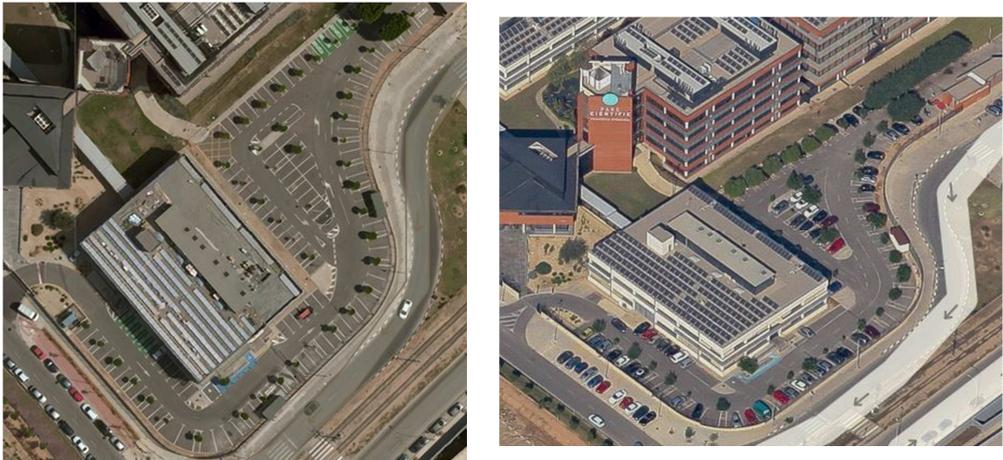
Una vez construido el simulador, se ha hecho circular el vehículo por la pista de manera que se han obtenido señales magnéticas de cada configuración seleccionada, tantas como han sido necesarias para la realización de los experimentos. Por tanto, se van a tener varias instancias (señales) de la misma configuración que se podrán usar para compararse entre ellas y para compararse con otras configuraciones distintas.

En resumen, se ha construido un simulador sencillo y completo utilizando 3 juegos infantiles/educativos que suelen emplearse en la docencia e investigación en el campo de la robótica. Este simulador, además de fundamentar parte del trabajo de esta tesis, se ha usado en jornadas abiertas de divulgación científica en la Universidad de Valencia aplicando de los resultados obtenidos en esta investigación (Expociencia 2014).

## 4.2.2. Entorno de pruebas controlado con vehículos reales

El segundo de los entornos de prueba pretende servir de puente entre la experimentación en el entorno de simulación y la experimentación final en un entorno de trabajo real, con condiciones absolutamente reales. La diferencia más importante entre ambos entornos se encuentra en el tipo de señales con las que se trabaja, debido fundamentalmente a la diferente complejidad de los objetos que son sensorizados. Por este motivo, se hace indispensable diseñar y configurar un entorno de pruebas en el que se pueda trabajar con vehículos reales, pero siempre en una situación controlada. En este contexto, controlado significa poder delimitar las velocidades de paso de los vehículos sobre los sensores AMR y las posiciones de paso relativas de los vehículos con respecto a la localización del sensor en el punto de medición.

El entorno de pruebas controlado con vehículos reales se ha situado en una zona asfaltada del parking del instituto de investigación donde se desarrolla su labor de investigación (Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones – IRTIC). En la Figura 24 se pueden apreciar dos imágenes aéreas de la zona seleccionada para la realización de los experimentos. En este entorno se ha utilizado el mismo sensor que en el entorno de simulación para detectar el paso de vehículos.



*Figura 24. Parking del IRTIC. Ubicación del entorno de pruebas controlado<sup>4</sup>.*

La realización de los experimentos se ha realizado sobre vehículos propios de los miembros del IRTIC. Los primeros experimentos de validación del sensor se han realizado con dos o tres vehículos de prueba, cuyas características no son relevantes para los resultados obtenidos. Los experimentos relevantes se hacen con un conjunto de 30 vehículos diferentes (ver **Anexo I. Lista de vehículos utilizados en el entorno de pruebas controlado**).

Al igual que en el entorno de simulación, los experimentos pretenden obtener señales características de los vehículos, que sean comparables y reproducibles, por lo que se ha establecido que los vehículos circulen a velocidades reducidas y con posiciones relativas de paso sobre el sensor idénticas. Aunque en un entorno interurbano real las velocidades de paso serán muy elevadas, se plantean estas

---

<sup>4</sup> Imágenes obtenidas de <http://www.bing.com/maps>. Consultado en junio de 2015.

condiciones en el estudio para analizar la información inicialmente con bajas velocidades y obtener así información lo más detallada posible, para luego extrapolar el comportamiento al caso de velocidades elevadas, como se verá en el Capítulo 7. Por tanto, se ha establecido un circuito con marcas en la que los vehículos han circulado teniendo una referencia de paso para los conductores.

El sensor magnético se ha situado sobre la superficie del asfalto, de manera que los vehículos han pasado por encima del sensor. Las marcas establecidas en el circuito han permitido establecer la posición relativa del sensor justo en el centro del vehículo. De esta forma se ha garantizado que se puede obtener una señal clara, relativamente reproducible en diferentes pasos de los vehículos.

De igual modo, esta configuración del entorno de pruebas ha permitido obtener varias señales de un mismo vehículo y a diferentes velocidades, que serán utilizadas para la aplicación de los algoritmos que se pretenden validar. En la Figura 25 se ofrece un detalle del punto de realización de las pruebas, con el sentido de circulación de los vehículos y la localización del sensor.

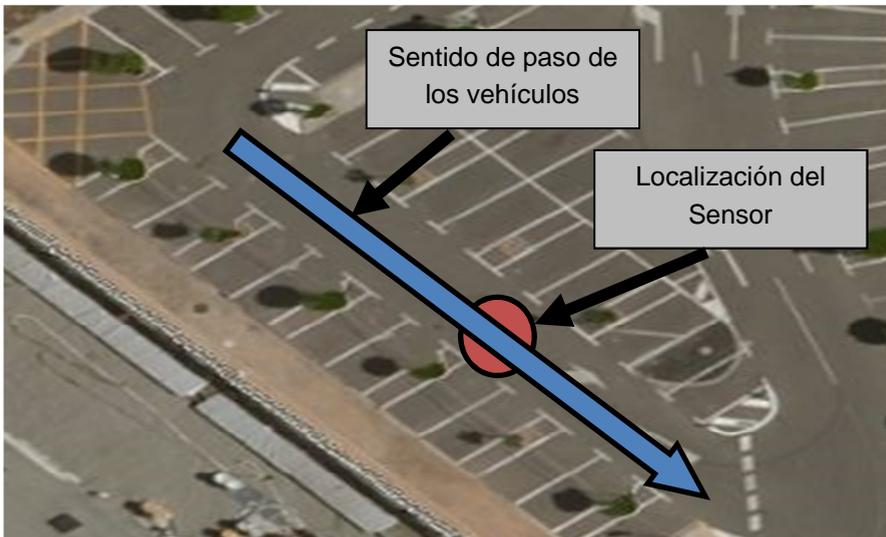


Figura 25. Parking del IRTIC. Detalle de la ubicación del entorno de pruebas controlado<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Imagen obtenida de <http://www.bing.com/maps>. Consultado en junio de 2015.



*Figura 26. Circuito del entorno experimental de simulación*

### 4.3. Métodos de extracción y comparación de señales

El trabajo que se ha realizado en el entorno de simulación pretende, por un lado, establecer un método para la extracción de señales y, por otro lado, analizar diversos métodos de comparación de señales, con el objeto de comprobar su validez y su capacidad de aplicación al caso real de autopistas. En esta sección se estudian diversos procedimientos de extracción y de comparación de señales que aparecen en la literatura y se analiza su posibilidad de uso en este trabajo.

#### 4.3.1. Criterios de segmentación y extracción de la señal

Determinar qué es una señal dentro de una serie temporal, es decir, obtener las fronteras que delimitan el dato de interés con el que se pretende trabajar, es una tarea que se puede realizar en el dominio del tiempo o de la frecuencia (Cohen 1995). Dado que los datos de origen se toman en el dominio temporal y los procesos de tratamiento de señales pretenden ser óptimos en el tiempo, trabajar en el dominio de la frecuencia conlleva la realización de transformaciones que penalizarán temporalmente el proceso. Por este motivo, se toma la decisión de trabajar en el dominio del tiempo, seleccionando el algoritmo más adecuado con una buena relación precisión/coste temporal en base a una revisión bibliográfica en problemas similares al que estamos abordando.

La detección de las fronteras de una señal para el caso de huellas magnéticas es un proceso que se asemeja al que tiene lugar en áreas de procesamiento del lenguaje (ej. en el problema de encontrar palabras dentro de un discurso (Rabiner et al. 1979)) o de la cardiología (ej. para la detección de una onda PQRST y cada una de sus fases en un electrocardiograma (Daskalov & Christov 1999), (Arafat & Hasan 2009), (Hadj Slimane & Naït-Ali 2010), (Suárez et al. 2007), (Thomas & Jagannath 2013), (Thomas & Jagannath 2013), (Yeh & Wang 2008)). Es conveniente analizar la forma en la que se ha abordado esta cuestión en estos campos para evaluar su posible aplicación a las señales de los sensores AMR.

En el caso de la detección de palabras en el procesamiento del lenguaje, los algoritmos clásicos más utilizados para la obtención de las fronteras de las señales son los basados en la energía de la señal, los cruces en cero, la duración y la energía del error de la predicción lineal (Junqua et al. 1994). En general, los algoritmos que menos parámetros usan son los más complejos a la hora de obtener buenos rendimientos.

Los algoritmos basados en la energía de la señal tratan de obtener los límites de ésta utilizando niveles de energía y periodos temporales (duraciones), de manera que se puede considerar que una señal comienza cuando en una ventana temporal deslizante del espacio de muestras (Bastiaans 1985) la energía de la señal supera cierto umbral, y finaliza cuando la energía se encuentra por debajo de otro umbral (Lamel et al. 1981). Los umbrales de inicio y final de la señal no tienen por qué ser idénticos. Es más, los umbrales se pueden adaptar al entorno de trabajo, lo que proporciona una versatilidad importante al algoritmo. En este tipo de detección de señales se da más importancia a la detección del final que la detección del principio, puesto que el proceso conlleva más dificultad. La detección del inicio de la señal es una cuestión casi exclusiva de valoración de la energía en la ventana móvil, mientras que la detección del final debe resolver conflictos derivados de la sucesión de palabras en el discurso, es decir, del posible solapamiento de una palabra con la siguiente.

Los algoritmos de detección de *cruces por cero* se basan en detectar los cambios de signo que se producen en la magnitud de la señal. En particular, el parámetro que interesa en este método es el ratio de cruces en cero, que puede ayudar a discriminar señales con distintas frecuencias (Bachu et al. 2008). Lógicamente, las señales que se someten a este tipo de algoritmo deben estar normalizadas en amplitud y alineadas en el nivel de cero. En el ámbito del reconocimiento de la voz,

el ratio de cruces en cero se utiliza para medir la frecuencia de la señal acústica en determinados puntos del espacio temporal y poder diferenciar, dentro del sonido que se percibe, el que pertenece a una voz humana del resto de sonidos ambientales (Waheed et al. 2002). La aplicación de este método sólo tiene sentido en aquellos casos en los que las señales estén caracterizadas por una frecuencia alta, donde la variedad de ratios de cruces en cero permite una mayor capacidad discriminante. Lo más habitual, no obstante, es combinar ambos métodos para obtener mejores valores de precisión (Beritelli 2000), (Lokhande et al. 2011). Los ratios de cruces en cero en combinación con los ratios de variación de la energía de la señal son las dos medidas principales que se tienen en consideración para desarrollar los procesos de detección.

En el ámbito de la cardiología, la detección automática de las señales ECG se puede abordar desde diversas perspectivas que se llevan estudiando durante más de 40 años, si bien la mayor parte de ellas parten de la base de un conocimiento a priori de la forma de onda que se desea detectar (Last et al. 2004). El problema se puede abordar, entre otras, con técnicas de pre-procesado y aplicación de reglas para toma de decisiones, o usando la correlación cruzada con una señal de referencia conocida y aplicando valores umbrales sobre la similitud que permite tomar la decisión de si existe o no señal. En algunos casos, el problema se enfoca a través de la segmentación de la señal, de modo que sea más sencillo identificar una parte de la misma, y a partir de ahí, recuperar el resto (Last et al. 2004), (Hadj Slimane & Naït-Ali 2010), (Yeh & Wang 2008). También se aborda el problema a través de la detección de picos (Arafat & Hasan 2009) y encajando los puntos detectados en un patrón conocido de la señal.

La detección de las fronteras de las señales se realiza en algunos casos utilizando la medida de la variación de la amplitud de la señal en un punto con respecto a los colindantes (Daskalov & Christov 1999). También se aplican técnicas de emparejamiento geométrico de la muestra de entrada con respecto a un conjunto de patrones de referencia (Suárez et al. 2007), generando aproximaciones polinómicas de las señales y estableciendo criterios de decisión sobre medidas de similitud entre señales.

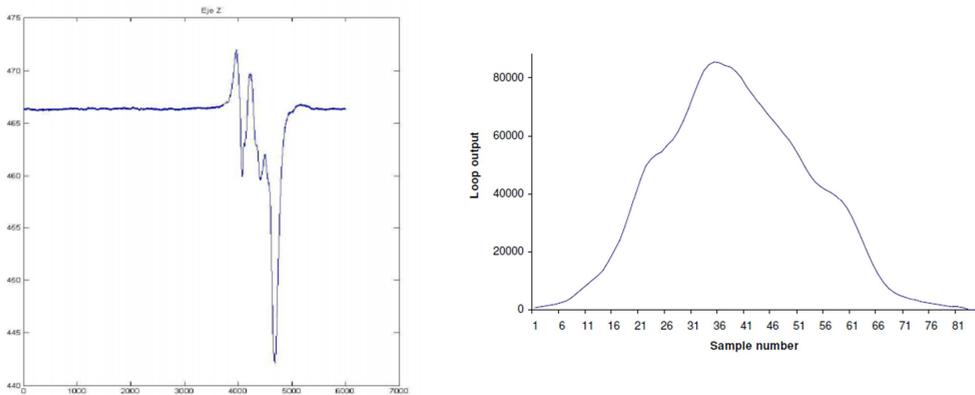
Si no se usa el conocimiento sobre la forma de la onda, como en el caso de la actividad cardíaca monitorizada a través de sonido (Varghees & Ramachandran 2014) se pueden aplicar varias técnicas de detección de señales clasificadas en 4 tipos: métodos basados en referencias de pulsos ECG, métodos basados en

parámetros temporales-espectrales, métodos basados en análisis de tiempo-frecuencia, y métodos basados en la forma de las señales. Estos métodos combinan técnicas de medición de energía junto con el uso de valores umbrales, transformaciones para pasar del espacio temporal al de frecuencias (Fourier, Wavelet, Hilbert-Huang, etc.), técnicas de detección de cruces por cero para detección de picos, y aplicación de diversos tipos de filtros. Cada clase de métodos tiene sus ventajas e inconvenientes, aunque el estudio de Varghees & Ramachandran concluye que los métodos basados en la energía son más eficientes que el resto. Adicionalmente, son métodos que conllevan un coste computacional inferior al resto.

En el ámbito de los ECG en general, el proceso de detección de una señal se puede resumir como la aplicación de una metodología de 4 fases (Thomas & Jagannath 2013) en las que, utilizando diferentes técnicas en cada una de ellas, se llega a encontrar (delimitar) la señal buscada. Estas fases son: pre-procesamiento de la señal (aplicación de filtros para la eliminación de ruido), el ajuste a la línea base (baseline drift removal) (Kaur et al. 2011), (Stantic & Jo 2014), detección del complejo QRS (Daskalov & Christov 1999), (Hadj Slimane & Naït-Ali 2010), (Yeh & Wang 2008), y la detección de las zonas P y T (Thomas & Jagannath 2013).

En cualquier caso, hay un elemento común en el tratamiento de las señales en la literatura (Stantic & Jo 2014) que determina que para poder realizar un correcto análisis de las señales de un ECG se debe realizar un pre-procesamiento, una eliminación del ruido, y una normalización de los datos. A partir de la señal obtenida tras la aplicación de estos procesos, se desarrollan casi todos los trabajos de búsqueda de señales, características, e identificaciones de patrones.

En el ámbito del tráfico, la extracción de señales se utiliza para realizar contaje y clasificación de vehículos que circulan por un determinado punto. Las señales se obtienen por medio de sensores magnéticos situados en el asfalto y que proporcionan una serie temporal de datos. Estos sensores son básicamente de dos tipos: los clásicos lazos o espiras magnéticas y los más recientes sensores magneto-resistivos. Ambos tipos de sensores ofrecen series de datos temporales, pero las señales que generan al paso de los vehículos son diferentes (basta con comparar las señales obtenidas en algunos de los trabajos de la literatura (Kanathantip et al. 2010), (Chinrungrueng et al. 2010), (Sifuentes et al. 2011), (Blokpoel 2009), (Gajda et al. 2001), (Cardell Bilbao et al. 2010) para observar las diferencias que existen), tal y como se aprecia en la Figura 27.



*Figura 27. a) Señal obtenida de un sensor magnético AMR (Cardell Bilbao et al. 2010); b) Señal obtenida de una espira de inducción magnética (Blokpoel 2009)*

La detección en las espiras magnéticas se utiliza habitualmente para obtener el conteo de vehículos y el cálculo de velocidades instantáneas, e inferir a partir de estos datos otra información más utilizada en gestión de tráfico, como la ocupación, densidad, flujo, velocidad media, etc., en secciones concretas; más recientemente, también se han aplicado al objetivo de re-identificación de vehículos, pero se ha realizado en un entorno académico y no ha trascendido significativamente al entorno comercial y de aplicación práctica real.

En cualquier caso, la detección de señales de las espiras magnéticas para fines básicos se realiza a través de algoritmos de segmentación y detección propietarios que no están específicamente orientados a la re-identificación, y no requieren de una gran precisión. Estos métodos, tal y como se muestra en (Klein et al. 2006), consisten en la detección de una variación de la inductancia del sensor por encima de un umbral  $x$  durante un periodo de tiempo superior a otro umbral  $y$ . Pero cuando el objetivo es la re-identificación de vehículos, se debe prestar más atención y trabajar más detenidamente este proceso. La primera aproximación a la obtención de una señal limpia se encuentra en (Sun & Ritchie 1999), donde en un primer paso se eliminan las oscilaciones (ruido) próximas a la línea base de la medición de la inductancia usando un valor umbral relativo (10%-20%) de corte, por debajo del cual se considera que no existe señal. En un segundo paso, se obtienen los puntos que delimitan la señal, y para ello se localiza el máximo local de la señal y a partir de él se obtiene los puntos próximos que se encuentran por encima del umbral

usado en el paso anterior. Este método funciona en este caso debido a la característica típica de la forma de onda de la señal que generan las espiras magnéticas (Figura 27b).

Otra de las aproximaciones para obtener señales de forma precisa la encontramos en (Krogmeier & Bullock 2008) donde se supone que la señal generada por una espira contiene un ruido gaussiano de forma inherente, y la extracción de la señal se aborda a través de la aplicación del Test de Razón de Verosimilitudes<sup>6</sup> (Keener 2010) con una selección de valores umbrales adecuada. Posteriormente, la señal pasa por un proceso de normalización en dos fases. En primer lugar, se normaliza la señal en energía (amplitud) con el fin de obtener un máximo absoluto idéntico en todas las señales. En segundo lugar, se normaliza en número de muestras para corregir los efectos de detección de un vehículo a distintas velocidades, usando un método de re-muestreo lineal basado en técnicas de procesamiento de señales multi-ratio.

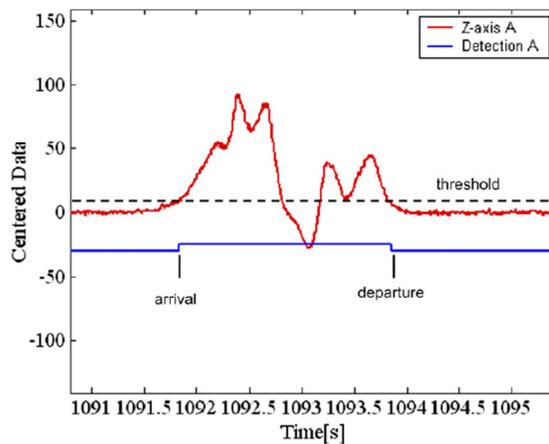
La combinación del uso de valores umbrales de energía y de normalización para la detección de la señal en espiras magnéticas es una práctica que se repite con frecuencia y de la que queda constancia en algunos trabajos, como en (Jeng & Chu 2013) y (Tok et al. 2009). En este último caso, además, se propone que el proceso de normalización dependa de la velocidad del vehículo, en tanto en cuanto afecta a la forma de la señal en su etapa inicial. De nuevo, esta aproximación es válida si se conoce con antelación la forma esperada de la señal, ya que este es el caso de los datos que se obtienen de las espiras magnéticas.

En cuanto a señales generadas por sensores AMR, no se ha encontrado en la literatura ningún desarrollo de algoritmos de detección específicos que difieran de los clásicos que ya se han mencionado. No obstante, dado que las señales obtenidas por estos sensores tienen características propias, son distintas a los otros tipos de señales estudiados y presentan anomalías propias asociadas a la naturaleza de los sensores, suelen ser sometidas a procesamientos específicos para obtener datos de calidad.

---

<sup>6</sup> El término anglosajón que define esta técnica es "Generalized Likelihood Ratio Test"

La detección de vehículos a través de la identificación de la señal magnética generada por sensores AMR puede ser obtenida a través de la observación de los datos correspondientes a un solo eje (Haoui et al. 2008). En este caso, se seleccionan los datos del eje Z medidos por el sensor, y se aplica una regla de detección por umbral. Se considera que el inicio de la detección de un vehículo se produce cuando el campo magnético medido supera un umbral  $\alpha$ , y el final de la detección del vehículo se produce cuando el campo magnético baja de otro umbral  $\beta$  ligeramente inferior al anterior (véase como ejemplo la Figura 28). En este caso, los valores seleccionados son de 40 y 23 miligauss respectivamente.



*Figura 28. Medida del campo magnético de la tierra en el eje Z de un sensor AMR para un camión en movimiento sobre el sensor (Haoui et al. 2008)*

Este método precisa de dos modificaciones para ajustarse a los dos problemas intrínsecos que presentan los sensores AMR. Por un lado, el campo magnético oscila en el tiempo de forma que el valor de la línea base (valor del campo magnético sin influencias externas) varía con el tiempo. Debe existir, pues, una monitorización del cambio y aplicarse una corrección para referenciar siempre todas las señales con respecto a cero. En segundo lugar, el campo magnético puede cruzar la línea de cero (línea base) en varias ocasiones de manera que la señal se encuentre por debajo del umbral  $\beta$  y se detecten erróneamente varios vehículos en lugar de uno. Esto se corrige con la definición de un parámetro  $\delta$  que indica el tiempo que debe mantenerse la señal por debajo del umbral para detectar el final del vehículo. Esta misma técnica se propone en otros estudios, como el de

(Chinrungrueng et al. 2010). Los autores del estudio (Haoui et al. 2008) señalan que, si bien la estimación de los valores  $\alpha$  y  $\beta$  son razonablemente sencillas de conseguir, la estimación del valor de  $\delta$  es más compleja y depende factores aleatorios como la velocidad y la longitud del vehículo cuando pasa por el sensor. En dicho estudio los tres valores se determinan experimentalmente para el caso en cuestión, y por ende no pueden ser extrapolados a otras situaciones.

La detección de vehículos siguiendo este esquema aporta 2 problemas: la sobre-detección y la infra-detección. El primer caso se produce cuando la señal que genera un vehículo se detecta como varias señales debido a que la detección del final de la señal se ha realizado de manera incorrecta. El segundo caso se produce cuando la señal de un vehículo es demasiado corta (en muestras) para ser detectada, o cuando dos señales están lo suficientemente juntas como para que el detector las confunda como pertenecientes al mismo vehículo. Los ratios de detección de vehículos con el algoritmo propuesto en (Haoui et al. 2008) oscilan entre el 95% y el 100%, según las condiciones de congestión de tráfico.

Cuando el objetivo de la extracción de señales de sensores AMR es la re-identificación de vehículos, la calidad de la señal obtenida es un factor determinante para la consecución de buenos resultados (Ndoye et al. 2011), lo que implica tener que alcanzar un alto nivel de precisión en la determinación de las fronteras. Con el uso de los datos de un eje de un sensor magnético se desperdicia una información valiosa (la correspondiente a los otros 2 ejes) para la detección de la señal. Aunque algunos estudios realizados con sensores AMR han usado dispositivos con capacidad de detección unidireccional, la mayor parte de ellos, y cada vez con más frecuencia, han utilizado sensores de 3 ejes que aportan más precisión a las mediciones. Aun así, los problemas de sobre-detección e infra-detección no se han eliminado completamente y han aparecido en trabajos posteriores como los que se muestran a continuación.

El estudio de (Haoui et al. 2008) no es el único caso donde se han identificado problemas en cuanto a la detección de vehículos en determinadas condiciones, dado que el algoritmo básico de detección de fronteras aplicado en este caso no tiene en consideración las condiciones de densidad de tráfico y velocidad de los vehículos, puesto que conllevaría un incremento en la complejidad para determinar dinámicamente los umbrales de detección. En (Tian et al. 2014) y (Kanathantip et al. 2010) se mencionan los 2 problemas principales que afectan a la detección de vehículos con sensores AMR justificados con más detalle, mientras que en (Karpis

2012) se hace referencia a la sobre-detección. Por un lado, en condiciones de tráfico libre, se puede confundir la identificación de un vehículo de grandes dimensiones (un vehículo especialmente largo) con varios vehículos de dimensiones reducidas (típicamente, en entornos urbanos se confunden autobuses con coches). Por otro lado, en algunas situaciones de tráfico denso, la distancia entre vehículos es tan pequeña que la determinación del final de una señal de un vehículo interfiere con la detección del principio de la señal del vehículo que le sucede. De nuevo, en condiciones de tráfico urbano, esto puede llevar a confundir típicamente un autobús con varios coches, pero en sentido inverso al problema anterior. Estos problemas de identificación son intrínsecos a las características del tráfico, puesto que en función de la velocidad de los vehículos y la distancia de separación entre ellos, las señales obtenidas por el sensor AMR tendrán distinto número de muestras y estarán más o menos espaciadas en el tiempo. Los primeros algoritmos aplicados a la detección de vehículos no tenían en consideración estas condiciones de trabajo, pero los trabajos más recientes tratan de resolverlos con una parametrización más compleja de los métodos de detección, la aplicación de una algoritmia nueva, o una configuración del punto de monitorización basada en el uso de varios sensores.

Se han propuesto en la literatura algunas aproximaciones para mejorar la detección de vehículos y disminuir los errores. En particular, (Kaewkamnerd et al. 2008) propone un procedimiento de detección basado en el uso de una máquina de estados de 4 fases. Las fases identificadas son: S0 (no hay presencia de vehículo), S1 (vehículo aproximándose), S2 (vehículo confirmado), S3 (vehículo alejándose). La determinación de cada estado se basa en la valoración de 2 parámetros con respecto a sus umbrales, distintos para cada estado, que son la magnitud de la señal y el número de muestras. Aun así, los autores son conscientes de las implicaciones de la variabilidad de las velocidades y recomiendan un procedimiento de normalización de la señal para trabajar con más precisión.

Otras aproximaciones conllevan la modificación de la distribución de sensores para la detección. Por ejemplo, en (Kovavisaruch et al. 2009) se propone el uso de 2 sensores longitudinales a una distancia lo suficientemente corta como para diferenciar el paso de uno o dos vehículos. La distancia propuesta varía en función de los vehículos que se pretenden detectar y las velocidades de los mismos, por lo que los parámetros del modelo se establecen como porcentajes, lo que da flexibilidad a su adaptación a las condiciones de circulación.

(Ndoye et al. 2011) propone una solución para la segmentación de señales basada en el cálculo de la energía de un determinado número de muestras, y la definición de un umbral estimado a través de un procedimiento probabilístico. El proceso de segmentación es equivalente a la detección del cruce del umbral mencionado en procesos anteriores con la amplitud de la señal. La ventaja que aporta este método es la determinación del umbral, que se obtiene de una forma más justificada que en los casos anteriores.

La aplicación de un Algoritmo de Umbral Adaptativo cuando se trabaja en el dominio del tiempo y el espacio se pone de manifiesto en los primeros estudios relacionados con los sensores AMR (Ding et al. 2004). Siguiendo el procedimiento habitual, el algoritmo evalúa la energía de la señal, aplicación de un filtrado para la eliminación de ruido, aplicación de una máquina de estados, y adaptación del umbral según las condiciones de contorno de cada muestra en particular. Pero al igual que en otros casos, los parámetros del algoritmo son muy dependientes, tal y como los autores reconocen, de las características de los vehículos y de sus velocidades de paso por el sensor.

Un segundo elemento a considerar en el uso de los sensores AMR es la dependencia de la señal de las condiciones ambientales y del entorno. Básicamente, se plantea un problema que reside en la sensibilidad del sensor y en su naturaleza, de manera que los valores de las mediciones que realiza se pueden ver afectados por la temperatura y la presencia cercana de objetos metálicos distintos a los que se desea detectar (Hajimohammadi 2009), (Cheung & Varaiya 2007), (Ripka & Janošek 2010), (Kanathantip et al. 2010). En particular, la temperatura del sensor hace que la medida del campo magnético que aporta el sensor disminuya a medida que aumenta la temperatura, lo cual afecta al nivel de cero de la señal cuando no hay ninguna detección (Honeywell 2005). Por otro lado, la presencia de un objeto metálico estático o en movimiento durante el proceso de detección, también hace cambiar el valor de cero de la señal. Las variaciones de temperatura que se pueden producir sobre el sensor son más suaves en el tiempo, y se pueden corregir de forma sencilla. Las variaciones de la línea base de la señal que genera la presencia de otro objeto magnético son más complejas de tratar porque son más abruptas y suelen tener menos duración en el tiempo.

En relación a los problemas que se plantean sobre los factores intrínsecos del sensor que afectan a su capacidad de detección, como la temperatura y/o la presencia de un objeto ferroso o magnético en el alcance de sensorización,

(Hajimohammadi 2009) propone el uso de un algoritmo CFAR (Constant False Alarm Rate) que previene estos problemas en base a la utilización de un filtro específico. Estos filtros se aplican a casos en los que se pretende detectar señales con forma de pulsos, y aplican un criterio de cálculo de valor umbral basado en los valores de la señal de los vecinos próximos al pulso. Se trata, pues, de un proceso que aplica un Algoritmo de Umbral Adaptativo, donde la decisión de si una muestra de la entrada pertenece o no a la señal se evalúa en base al valor umbral del momento específico. Este estudio propone la valoración de la efectividad de la detección en base a una Tabla de Contingencia (Everitt 1992), y la correspondiente curva ROC (Receiver Operating Characteristic) (Fawcett 2006) construida para las clasificaciones binarias obtenidas en distintos valores umbrales.

Sin embargo, la aproximación que más se utiliza en la literatura es la aplicación de un algoritmo para el ajuste adaptativo de la línea base y de los umbrales de detección. En (Cheung & Varaiya 2007) se propone el uso de un algoritmo de media móvil en una ventana temporal de tamaño reducido para establecer el valor de la línea base, porque se estima que la variación intrínseca del sensor en el tiempo que dura el paso de un vehículo es despreciable. En este caso particular, además, no se contempla en la ventana los datos correspondientes a las señales de los vehículos, por el mismo motivo. En (Ding et al. 2004) se propone un algoritmo basado en la distribución de la energía en el dominio temporal. De nuevo, se propone el uso de una media móvil de la energía de la señal para calcular el valor de la línea base. En (Sharp et al. 2005) se propone el uso de una media móvil en una red de sensores, pero con una parametrización que puede condicionar la velocidad mínima de detección de un vehículo, por el uso de una ventana con pocas muestras para evitar el solapamiento de vehículos. Otros trabajos posteriores (Zhang et al. 2008), (Kanathantip et al. 2010) han adoptado estas aproximaciones bajo la premisa de que son unas de las más ligeras en términos de computación, y han demostrado su validez en otros entornos experimentales, por lo que se puede concluir que aportan garantías en su uso y aplicación a la detección de vehículos.

El último punto de relevancia a considerar en la extracción de las señales de los sensores AMR es su tamaño en términos de número de muestras y la calidad de la señal obtenida tras el pre-procesamiento. Cuando la señal se va a utilizar para encontrar patrones, relacionarla con plantillas de referencia o buscar similitudes con otras señales, es necesario trabajar sobre un espacio común, esto es, la señal debe poder ser comparable. Esto se consigue, básicamente, transformando las señales

para que todas tengan el mismo número de muestras, en un procedimiento que se denomina normalización. La normalización de la señal también se puede aplicar a la amplitud de la magnitud sensorizada, con el fin de trabajar con formas de onda equivalentes; pero esto no siempre es deseable, especialmente cuando se está trabajando en comparar señales en base a la potencia o la energía que proporcionan.

La normalización de la señal que se ha aplicado en trabajos previos (Ndoye 2010), (Ndoye et al. 2011), (Sanchez et al. 2011b), (Tian et al. 2014) ha consistido en realizar un re-muestreado de la misma, estableciendo un número de muestras objetivo que redujese en la medida de lo posible los tiempos de procesado, sin que esto afectase a la calidad de la señal y de los resultados. La tendencia ha sido disminuir, en la medida de lo posible, el número de muestras, si bien han influido en este caso la capacidad del sensor y el tiempo de exposición del objeto al sensor.

Las características de los sensores que se están utilizando en estas pruebas iniciales sólo permiten obtener un conjunto de muestras muy reducido para objetos móviles a gran velocidad, dado que la frecuencia de muestreo máxima a la que pueden trabajar es muy pequeña. Este es un punto importante que habrá que tener en cuenta cuando se aplique el procedimiento que se está estudiando a entornos interurbanos, donde se espera que la velocidad de los vehículos sea elevada y el número de muestras obtenidas para la re-identificación de vehículos puede ser determinante en el éxito o el fracaso del método.

Además del número de muestras, es importante considerar la calidad de la señal obtenida y la información que puede aportar la forma de onda de la señal tratada, especialmente cuando la señal va a ser usada con propósitos comparativos con otras señales. En este aspecto, los sensores AMR proporcionan mejores señales sobre los vehículos que las espiras magnéticas, pero las señales tienen mucha más variabilidad, es decir, tienen más probabilidad de ser diferentes para el mismo vehículo en diferentes medidas, aun respetando la posición relativa de paso del vehículo respecto al sensor. Obviamente, esto afecta a la calidad de la señal y su capacidad para la re-identificación. En (Tian et al. 2014) se propone una normalización de las señales para mejorar su calidad en este sentido, dado que un vehículo puede generar señales diferentes en distintos puntos de paso. La normalización consiste, por una parte, en igualar el número de muestras de todas las señales que se capturen, independizando la señal de la velocidad de paso y la longitud del vehículo. Por otro lado, se propone la eliminación del ruido que

acompaña la señal determinado por los autores como un ruido blanco gaussiano (Johnson 2003) a través de un proceso de sincronización, filtrado y fusión tras múltiples muestreos. Los resultados que obtienen los autores mejoran aproximaciones anteriores en base al uso de la información combinada de varios sensores para obtener señales características independientes de la velocidad y de la precisión de la detección de la señal.

En (Zhang, Huang & Cui 2007) se menciona que la calidad de la señal cuando se usa para el cálculo de velocidades es fundamental, dado que la posición de los picos y valles de la señal es determinante en un proceso de comparación. En este caso se trabaja con una red de sensores, con lo que se dispone de más información que con un solo sensor. Zhang propone un algoritmo de filtrado adaptativo embebido (AEMFA) para el procesamiento de la señal, utilizando técnicas de correlación cruzada de señales y de parametrización de tiempos de superación del umbral, que sólo es aplicable al caso de tener sensores que produzcan señales que son comparables (es decir, que estén situados en posiciones relativas de paso compatibles).

### 4.3.2. Propuesta de método de extracción de la señal

En la sección anterior se han estudiado distintas alternativas de segmentación de una serie temporal para la extracción de una señal. Se han comparado los métodos que típicamente se aplican en algunas disciplinas que trabajan con señales similares a las que son el objetivo de esta tesis, además de las del ámbito del tráfico que han sido referenciadas en estudios y trabajos previos. El análisis se ha centrado en el dominio temporal, puesto que la literatura sobre los sensores AMR se decanta claramente por esta aproximación, si bien el análisis del problema en el dominio de la frecuencia es una cuestión a investigar en el futuro.

Del análisis realizado se han obtenido varias conclusiones. En primer lugar, se puede hacer una distinción entre dos tipos de aproximaciones: las que conocen a priori la forma de la señal y sus características, y las que no tienen información previa sobre estos elementos. Los métodos de la primera aproximación están orientados a localizar puntos concretos de la señal, y a partir de ellos, inferir el conjunto de muestras que conforman la señal; los métodos de la segunda

aproximación están orientados a obtener características distintivas del comienzo y final de la señal, salvando problemas inherentes a las alteraciones que pueden sufrir las señales tanto a nivel intrínseco (generadas por los propios dispositivos sensores) como extrínsecos (generadas por las condiciones del entorno de trabajo).

Las señales de los sensores AMR correspondientes a la detección de vehículos no son señales que sigan un patrón ni tienen ninguna característica propia, tal y como se ha visto en la revisión bibliográfica, por lo que la aproximación que se ha seguido en este trabajo para segmentar la serie temporal en señales es la segunda. De esta manera, se han descartado algunos métodos analizados, especialmente los aplicados en la detección de señales en los ECG. Adicionalmente, aunque no se conoce con exactitud la forma de las huellas magnéticas de los vehículos, también se han descartado otros métodos como el del Ratio de Cruces en Cero, puesto que las señales no tienen un componente alto de frecuencias, y no es esperable encontrar un número de cruces en cero significativo como para aplicar las técnicas descritas en este caso.

Otra de las principales conclusiones que se han obtenido es que el criterio que más se utiliza para detectar las fronteras de la señal es la medición de la energía que contiene la señal. Se considera que se ha encontrado una señal en una serie temporal cuando durante un cierto periodo de tiempo (ventana de tiempo) la energía acumulada de la señal supera cierto umbral. Los valores de los umbrales y las condiciones de detección no se han definido de forma precisa y absoluta en la literatura, y se ha deducido que son completamente dependientes de los sensores utilizados y las condiciones de los experimentos planteados. Esto da a entender que cada sensor debe ser calibrado de manera específica para las condiciones de detección a las que va a ser sometido. En cualquier caso, la detección de la señal que se propone en la literatura se realiza en base a una máquina de estados que permite determinar la muestra inicial de la señal, las muestras que forman parte de la señal (detección), y la última muestra de la señal.

En este punto es importante hacer notar que se ha prestado mucha más atención a las condiciones de detección del final de la señal que a las del principio. Se ha constatado en la literatura que la precisión en la detección del final de la señal es fundamental para evitar problemas de sobre-detección e infra-detección en situaciones de densidad de tráfico elevada. Esto es debido a que en estas condiciones es muy fácil encontrar dos señales pertenecientes a distintos vehículos y que aparecen muy seguidas, o señales que por sus características parecen

pertenecer a dos vehículos distintos aunque en realidad pertenecen al mismo. La forma habitual de tratar estas diferencias es estableciendo umbrales de energía y de número de muestras diferente para las detecciones de inicio y final.

Existe un denominador común en todos los procesos de extracción de señales que consiste en el pre-procesamiento de la señal antes de su uso, especialmente para fines de re-identificación. El tratamiento de la señal que se realiza consta de dos fases: un proceso de *limpieza* y uno de *normalización*. El proceso de *limpieza* consiste en la eliminación de ruido que pueda llevar la señal, para lo cual se aplican filtros de frecuencias altas, medias y bajas, según los casos, y en combinación con esto, también se aplican métodos de suavizado de señal. La segunda fase consiste en un proceso de *normalización*, tanto en amplitud de la magnitud medida como en el número de muestras. La *normalización* es fundamental para hacer que 2 señales sean comparables. Aunque algunos métodos de comparación de señales son independientes de la amplitud de las mismas, esta normalización ayuda a detectar puntos característicos que pueden usarse para valorar la eficacia del método de comparación. La normalización en el número de muestras es indispensable en el caso de trabajar en el dominio temporal, puesto que las medidas de similitud suelen basarse en la comparación de muestras una a una. Aunque existen métodos de cálculo de similitud de señales donde no es necesario que las señales tengan el mismo tamaño, como el DTW, siempre es recomendable realizar esta normalización para simplificar los cálculos y buscar rendimientos temporales óptimos.

Para el caso particular de las señales de los sensores AMR, la especificación de un valor umbral para determinar los límites de la señal depende de una línea base que es variable en el tiempo debido a las características propias del sensor. Por ello, es preciso establecer un mecanismo que adapte la línea base en el tiempo, y se establecen para ello métodos de detección de umbrales adaptativos. Las tipologías de estos métodos deben contemplar tanto la variación suave del cero debido a las propiedades de los materiales con los que están formados los sensores, como variaciones bruscas originadas por perturbaciones externas generadas por la presencia de objetos que alteran el campo magnético que se está midiendo.

Teniendo en consideración todas estas conclusiones, en esta tesis se propone un método de detección de señales con las siguientes características:

- El método de detección está basado en la evaluación de la energía de la señal en una ventana temporal deslizante.

- Se usa una máquina de estados para determinar el comienzo de la señal, la detección de la señal, y el final de la señal.
- Se utilizan valores umbrales para la energía y el número de señales que van a componer la ventana temporal deslizante.
- Los valores umbrales que utiliza la máquina de estados es diferente para el caso de la detección del inicio de la señal y del final de la señal.
- La señal se somete a un pre-procesamiento para obtener un método más preciso de detección de los límites. Para ello, se aplica un algoritmo de suavizado que elimina el ruido blanco asociado a la señal a medida que se van obteniendo las muestras de la serie temporal. El suavizado se realiza a través de una media móvil, dado que es un procedimiento simple que elimina el ruido asociado con las señales de los sensores AMR. Una vez la serie se ha suavizado, se aplican los procesos de detección de límites.
- A su vez, se utiliza un procedimiento para la detección de la línea base de la señal, con el fin de realizar los cálculos de la energía con el mismo criterio sobre un origen de referencia común para todas las señales componentes.
- La señal, una vez obtenida, es procesada de nuevo a través de un mecanismo de normalización. La normalización de la señal se realiza tanto a nivel de amplitud como a nivel de número de muestras de la señal, lo que incluye un ajuste de la señal a nivel de cero (línea base).
- La línea base de la señal se somete a un proceso de ajuste adaptativo para compensar los efectos adversos que generan factores externos como la temperatura y la presencia de objetos ferromagnéticos. Los parámetros óptimos del algoritmo de ajuste adaptativo se obtienen como resultado de los experimentos realizados.
- La señal que se considera como objetivo es la formada por las 3 señales componentes de los ejes X, Y, Z que proporciona el sensor magnético que se utiliza en los experimentos. Las 3 señales poseen una ligadura temporal, de manera que no deben ser tratadas de forma independiente si se pretende trabajar con ellas de forma combinada en algún momento, por ejemplo, para calcular similitudes entre señales. Esto implica que no se ha realizado una detección independiente de cada componente, sino que se han tratado todas las componentes de forma conjunta.

Todo este proceso se resume en el esquema representado en la Figura 29.

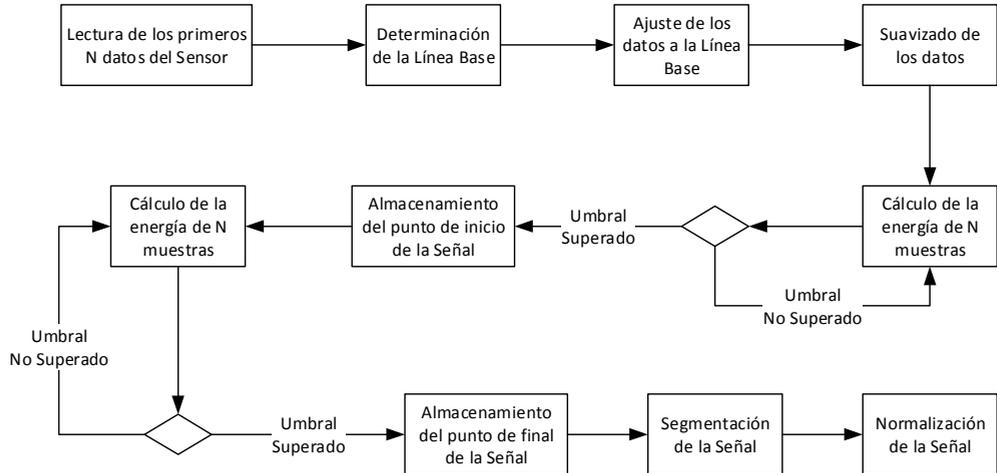


Figura 29. Modelo de procesos para la extracción de la Señal

Este método ha sido probado en los entornos experimentales que se han seleccionado y diseñado para su parametrización y validación (véase los Capítulos 5 y 7).

### ***Suavizado de la señal***

El suavizado de la señal es una tarea de pre-procesamiento que se debe desarrollar simultáneamente y a medida que se van adquiriendo los datos del sensor. Es parte del procedimiento previo a la obtención de la señal a través de la determinación de los límites. El proceso de suavizado se ha aplicado en los experimentos de forma simple sobre las muestras capturadas a medida que se han ido adquiriendo, sin que ello haya supuesto un retraso importante en la obtención de la señal. Por este motivo, se ha seleccionado un método que actúa simultáneamente sobre los datos a medida que se van capturando, y se han ido generando los datos finales suavizados.

El método que se ha propuesto en esta tesis para la realización del suavizado de la señal es un filtro de media móvil que viene descrito por la siguiente ecuación (Smith 1997):

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-n}^{i=n} Y_{j+i}}{2n + 1}, \quad j > n \quad (2)$$

Este filtro utiliza un parámetro conocido habitualmente como anchura del filtro, representado en la fórmula por el símbolo  $n$ . Este parámetro va a depender de las características del sensor en lo que a la eliminación del ruido blanco se refiere. El objetivo del suavizado es corregir la señal para eliminar las oscilaciones que se perciben de una frecuencia superior a las que caracterizan la señal, es decir, para mejorar el ratio señal-ruido (SNR) (Proakis 2006). El uso de diferentes valores para la anchura del filtro generarán distintos niveles de suavizado. En función de las características de las señales, y en particular de su tamaño en muestras, una parametrización incorrecta puede llevar a un suavizado excesivo de la señal, lo que provocaría una deformación que podría afectar al proceso de re-identificación.

Los entornos experimentales y las pruebas que se han planteado en este trabajo han permitido establecer los valores más adecuados para la anchura del filtro propuesto de manera que se ha eliminado el ruido blanco característico de estas señales y se ha conservado su característica forma de onda.

### ***Normalización de la señal a la línea base***

La segunda etapa del pre-procesado de la señal ha consistido en realizar una normalización de la línea base. Cada una de las señales recogidas por el sensor correspondientes a los ejes X, Y, y Z está midiendo el campo magnético de La Tierra, y se obtienen distintos valores para cada uno de los ejes, en función de la orientación del sensor.

Puesto que el algoritmo que se ha utilizado para la segmentación de la señal está basado en el cálculo de la energía, ha sido necesario normalizar la señal a una línea base de cero. Este proceso se ha aplicado a cada una de las componentes de forma independiente.

El método de obtención de la línea base de cada señal componente se ha basado en el cálculo de la media de la magnitud medida para un determinado número de muestras cuando no hay ningún elemento magnético que provoque perturbaciones

en el sensor. Así pues, la línea base para cada una de las señales se ha establecido utilizando la siguiente fórmula:

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{k,i}, \quad k \in \{X, Y, Z\} \quad (3)$$

donde  $m_k$  es la media de la señal componente  $k$  para cada una de las componentes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , y  $n$  es el número de muestras que se consideran para establecer la media del umbral.

### **Segmentación de la señal**

La tarea de segmentación de la señal (o de delimitación de las fronteras) se ha realizado sobre los datos suavizados y normalizados, y ha constado de dos partes: la detección del comienzo de la señal y la detección del final de la señal. Ambas partes siguen procedimientos similares, aunque no se ha asumido a priori que las dos utilizan las mismas parametrizaciones.

La detección del comienzo de la señal se basa en el hecho de encontrar en la serie temporal un número de muestras que superan cierta energía durante un periodo de tiempo. Es decir, se considera que la señal ha comenzado cuando su energía se encuentra por encima de un valor umbral de la magnitud medida durante un cierto tiempo (para un número determinado de muestras consecutivas). De esta manera, se ha definido la condición de comienzo de la señal como aquel punto  $y_{ini}$  para el que se cumple:

$$\sum_{i=y_{ini}}^{y_{ini}+w_{ini}} Y_i^2 > th_{ini} \quad (4)$$

donde los parámetros  $w_{ini}$  y  $th_{ini}$  determinan la flexibilidad de la detección. El parámetro  $y_{ini}$  indica el punto de comienzo de la señal si se cumple la ecuación. El parámetro  $w_{ini}$  indica la cantidad de muestras que se consideran en la ventana móvil para el cálculo de la energía, y el parámetro  $th_{ini}$  es el umbral de energía establecido.

Una vez detectado el punto de inicio de la señal, se ha considerado que todas las muestras que se reciben pertenecen a ella hasta que se produzca la condición de final de señal. La detección del final de la señal es la segunda parte del proceso de segmentación de la señal, y utiliza parámetros diferentes con respecto a los de la detección del comienzo de la misma.

Ya se ha constatado en la literatura (Haoui et al. 2008) que la detección del final de la señal es un proceso más sensible que la detección del comienzo, puesto que es más propenso a generar errores de detección. En los experimentos que se han llevado a cabo en este trabajo se ha valorado especialmente la parametrización del algoritmo para obtener una buena precisión.

Se ha definido el punto de final de la señal como el punto  $y_{fin}$  en el que existen un número de muestras consecutivas posteriores a él que acumulan una energía inferior a cierto valor umbral, es decir, el punto que cumple la siguiente condición:

$$\sum_{i=y_{fin}}^{y_{fin}+w_{fin}} Y_i^2 < th_{fin} \quad (5)$$

En esta ecuación, los parámetros  $w_{fin}$  y  $th_{fin}$  determinan de nuevo la flexibilidad de la detección, esta vez para el final de la señal. El parámetro  $y_{fin}$  indica el punto de finalización de la señal si se cumple la ecuación. El parámetro  $w_{fin}$  indica la cantidad de muestras que se consideran en la ventana móvil para el cálculo de la energía, y el parámetro  $th_{fin}$  es el umbral de energía establecido para la detección del final.

Dado que el sensor AMR permite obtener 3 señales para las variaciones del campo magnético en los ejes X, Y, y Z, y que las señales obtenidas están ligadas a la detección del vehículo, no se debe realizar una segmentación de las 3 señales por separado a no ser que se pretendan analizar de manera independiente. Para garantizar que la ligadura de las 3 señales se mantiene en el proceso de segmentación, se ha modificado la ecuación de detección de inicio de señal para utilizar la energía combinada de las 3 señales en lugar de cada señal de forma individual.

Por otro lado, esta aproximación ha permitido evitar algunos errores de detección del final de la señal derivados del acercamiento de alguna de las señales componentes a la línea base cuando las otras no lo hacen. Con esta aproximación propuesta, las ecuaciones que determinan los límites inicial y final de la señal son:

$$\sum_{i=s_{ini}}^{s_{ini}+w_{ini}} \sum_k S_{i,k}^2 > th_{ini}, \quad k \in \{X, Y, Z\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=s_{fin}}^{s_{fin}+w_{fin}} \sum_k S_{i,k}^2 < th_{fin}, \quad k \in \{X, Y, Z\} \quad (7)$$

donde  $S_{i,j}$  representa la muestra de la señal  $k$  en la posición  $i$ , esto es, la muestra que pertenece a una de las 3 señales componentes (en X, Y, o Z) en la posición que está siendo valorada.

### ***Ajuste adaptativo de la línea base***

El último elemento que se ha considerado en el algoritmo de extracción de la señal está relacionado con la oscilación de la línea base de la señal recogida por los sensores. Se parte de la hipótesis de que la oscilación de la línea base es incontrolable, y aunque en condiciones estables esta oscilación es mínima, existen casos en los que puede sufrir cambios bruscos. La solución más simple y rápida de aplicar que se propone en la literatura es la utilización de un algoritmo de ajuste adaptativo que, como se ha mostrado anteriormente, ha sido aceptado y utilizado por varios investigadores en sus experimentos.

El algoritmo de ajuste adaptativo debe dar respuesta a las dos situaciones de oscilación (las suaves y las bruscas). La parte más importante en la definición del algoritmo es el tiempo que pueden durar las perturbaciones. Inicialmente hemos supuesto que las perturbaciones suaves son permanentes, ya que se deben a factores intrínsecos del sensor como respuesta a condiciones de trabajo, esencialmente la temperatura. Para las perturbaciones bruscas hemos supuesto que el tiempo de duración es breve, y que son ocasionadas por la presencia de otros objetos ferromagnéticos en las proximidades del sensor durante un periodo de tiempo corto.

La aproximación más aceptada del algoritmo de ajuste adaptativo es la de (Cheung & Varaiya 2007) donde se utilizan solamente las muestras que no pertenecen a ninguna señal. Esta aproximación es perfectamente válida para las oscilaciones suaves, pero presenta un problema en las oscilaciones bruscas cuando el cambio de la línea base se produce en el momento de la detección de un vehículo. En este caso, no se podrá detectar el límite final del vehículo porque las condiciones de umbral no serán compatibles con la nueva línea base, y se corre el riesgo de dejar el sistema en un estado de detección de congestión, cuando no es el caso.

Por este motivo, en esta tesis se ha propuesto usar para el algoritmo adaptativo una aproximación que considera todas las muestras, incluidas las de las señales de detección de vehículos. Para que esta aproximación sea efectiva, las muestras de la señal deben afectar lo mínimo posible a la media, y esto se consigue utilizando más muestras en el proceso de cálculo. El principal inconveniente de esta aproximación es que, en unas condiciones de tráfico denso, ampliar el número de muestras puede significar tomar muestras que pertenecen a la señal del vehículo anterior, lo que alteraría el valor del umbral. Para los experimentos que estamos tratando en esta sección este caso no es significativo puesto que no se va a producir. No obstante, este problema se tendrá en consideración en el siguiente capítulo de esta tesis donde se proponen mejoras sobre las medidas de similitud.

También hay que considerar que el algoritmo se ha aplicado de forma independiente a las 3 señales componentes correspondientes a los 3 ejes. Por tanto, la ecuación que se ha seguido para obtener el valor de ajuste es la siguiente:

$$B_{k,i} = \alpha Y_{k,i} + (1 - \alpha)m_{k,i-1}, \quad k \in \{X, Y, Z\} \quad (8)$$

donde  $B_{k,i}$  es el valor de la señal que se usa para delimitar la línea base de la señal componente  $k$  en la muestra  $i$ ,  $m_{k,i-1}$  es la media de la señal componente  $k$  obtenida para la muestra  $i$  usando las muestras anteriores (calculada a partir de la ecuación ( 3 )), y  $\alpha$  es el factor de tolerancia, que refleja la cantidad de muestras previas que se han tenido en cuenta para obtener la media adaptativa en cada muestra.

## 4.4. Estudio de medidas de similitud

Una vez establecidos los métodos de segmentación de señales de sensores AMR, y definidos los entornos experimentales para comenzar a validar las hipótesis planteadas en esta tesis, se ha procedido a la realización de los primeros experimentos. Como ya se ha dicho anteriormente, estas pruebas tienen como objetivo inicial validar el uso de los algoritmos de extracción de señales propuestos y configurarlos con los parámetros adecuados. Como segundo objetivo se pretende valorar la capacidad de re-identificación de los sensores en base a las señales obtenidas, usando diversos métodos de comparación de señales expuestos en la literatura, y realizar finalmente un análisis de la comparativa para determinar posibles carencias y proponer mejoras para su uso en condiciones reales.

### 4.4.1. Selección de métodos de comparación de señales

A continuación se mencionan los principales métodos que el autor de esta tesis ha considerado relevantes para realizar la comparación, en base a los estudios y resultados analizados en la revisión bibliográfica.

#### 4.4.1.1. Similitud del Coseno

Si se desea comparar dos señales que tienen el mismo número de muestras, cada una de ellas puede considerarse como un vector  $n$ -dimensional, donde  $n$  es el número de muestras de la señal. Bajo esta perspectiva, la similitud del coseno es una medida que se aplica entre dos vectores para determinar el grado de cercanía que existe entre ellos. Es una medida que permite independizar la similitud del tamaño de los vectores. Está basada en la idea de que dos vectores se parecen más cuanto menor es el ángulo que subtienden.

A efectos prácticos, comparar dos vectores en base al ángulo que subtienden es costoso computacionalmente. Sin embargo, el coseno del ángulo es una medida equivalente y su cálculo, en términos computacionales, es mucho menos costoso. La manera más directa de obtener el coseno entre dos vectores es utilizar el producto escalar, a través de la siguiente fórmula:

$$\cos(\theta) = \frac{X \cdot Y}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}} \quad (9)$$

Los valores de similitud que ofrece esta medida están normalizados en el intervalo  $[-1,1]$ . Esto aporta una ventaja cuando se pretende comparar varias similitudes que provienen de la comparación de distintas señales, aportando un marco de referencia normalizado que garantiza la comparación coherente de las medidas de similitud.

En el caso de los sensores AMR, se ha considerado cada señal componente como un vector. Tras el pre-proceso de normalización, las señales que se han comparado son equivalentes a un vector n-dimensional, donde todos los vectores tienen las mismas dimensiones, con lo que se garantiza la posibilidad de calcular el producto escalar.

#### 4.4.1.2. Correlación Cruzada

En el ámbito del Tratamiento de Señales, la correlación cruzada es una medida de similitud que permite comparar dos series de datos en función del tiempo relativo entre ellas (Proakis 2006). Está basado en la aplicación del producto escalar de las dos señales sobre todas las posibles combinaciones de alineamiento de las mismas, por eso se le denomina también producto escalar desplazado. Esta medida es una de las más simples y computacionalmente rápidas que se pueden aplicar al proceso de reconocimiento de patrones.

Para señales discretas, como las que estamos utilizando en los datos extraídos de sensores AMR, la fórmula que permite obtener el valor de la correlación cruzada en un punto es la siguiente:

$$\phi_{XY}(j) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} X_i Y_{i+j} \quad (10)$$

La correlación cruzada tiene una variante denominada correlación cruzada normalizada que proporciona valores normalizados, con lo que la similitud calculada

entre dos señales en cualquier punto de desplazamiento se encontrará en el intervalo  $[-1,1]$  (Allen & Mills 2004). La ecuación que define la correlación cruzada normalizada es la siguiente:

$$\bar{\phi}_{XY}(j) = \frac{\phi_{XY}(j)}{\sqrt{\phi_{XX}(0) \phi_{YY}(0)}} \quad (11)$$

El uso de la correlación cruzada normalizada indica que, para un valor de 1, las señales tienen exactamente la misma forma, aunque la amplitud pueda ser diferente. Si el valor es -1 indica que las señales son simétricamente opuestas. Cuando el valor es 0 significa que no existe ninguna correlación entre las señales. Esto se debe a que, en esencia, la normalización equivale a utilizar el coseno como medida de similitud entre las señales en cada alineamiento.

En los experimentos planteados en este trabajo hemos definido la similitud entre dos señales como el valor máximo de su correlación cruzada normalizada.

#### 4.4.1.3. Distancia Euclídea

La distancia euclídea es una medida que permite valorar lo alejados que se encuentran dos puntos entre sí en un espacio euclídeo. Se trata de una medida de disimilitud, más que de similitud, puesto que cuanto mayor es el valor de la distancia entre dos puntos, más alejados se encuentran. Es una medida que puede utilizarse para comparar señales si, al igual que en el caso de la similitud del coseno, éstas se consideran como vectores en un espacio n-dimensional.

La selección de esta métrica se basa en el hecho de que ha sido propuesta en el trabajo de (Pitton et al. 2012) en combinación con la correlación y la DTW, y los autores la presentan como una medida de similitud muy simple pero que ofrece muy buenos resultados cuando las señales que se comparan se encuentran alineadas. Dada la simplicidad de la medida, entendemos que debe ser incluida entre las métricas a analizar.

Al igual que en el caso de la correlación cruzada, la distancia euclídea proporciona valores que no son comparables entre distintas señales si no están normalizadas. En primer lugar, los vectores deben tener la misma dimensión, pero además deben estar normalizados en sus coordenadas. Estas premisas se cumplen, puesto que en

el pre-procesamiento de las señales se ha establecido una normalización de cada componente en muestras y en amplitud. Sin embargo, aún en este caso, la distancia máxima entre dos vectores depende de la dimensión del espacio euclídeo. Por este motivo, se propone en esta tesis el uso de una distancia euclídea normalizada que se calcula atendiendo a la siguiente ecuación:

$$DEN(X, Y) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{2n}} \quad (12)$$

#### 4.4.1.4. Average Bar

El Average Bar es una técnica de simplificación de la señal que consiste en establecer un número de muestras fijo inferior al que poseen las señales ( $N$ ) y remuestrear la señal a ese número de muestras. Sin embargo, el valor de la señal que se asigna a cada nueva muestra no se extrae de la señal a través de una interpolación de los valores de las muestras colindantes, sino que se establece un valor medio de la energía de las señales que comprende cada segmento.

Por tanto, este método de cálculo de similitud consta de dos fases: en primer lugar hay que segmentar la señal en  $N$  muestras cuyo valor corresponde a la media de la energía que acumula dicha señal; en segundo lugar, se aplica una medida de similitud conocida, en particular la similitud del coseno, sobre las señales resultantes.

Este método de simplificación está concebido para acelerar el proceso de cálculo de similitudes, si bien conlleva un tiempo de pre-procesamiento para establecer los valores de las nuevas muestras que hay que considerar en el proceso.

#### 4.4.1.5. Hill Pattern

El Hill Pattern es una técnica que se utiliza para transformar las señales de los sensores magnéticos en modelos más simples, y se aplica al problema de clasificación de vehículos (Cheung, Coleri & Varaiya 2005). La transformación consiste en detectar las zonas de la señal crecientes, decrecientes, y planas, y asignar unos valores de 1, -1 y 0 respectivamente. Se consigue de este modo simplificar los posibles valores que tiene la señal, y caracterizarla a través de su forma de onda.

Esta técnica no se ha aplicado con anterioridad en la literatura al problema de la re-identificación, pero hemos considerado interesante incluirla en este estudio ya que propone una simplificación que no había sido tenido en cuenta con anterioridad. El hecho de comparar dos señales en base a sus características de forma simplificada, si diese buenos resultados, permitiría establecer un procedimiento simple y rápido en términos de computación.

El procedimiento de cálculo de la similitud ha consistido en transformar las señales originales a un modelo Hill Pattern y aplicar a continuación la medida del coseno para obtener un valor de similitud.

#### 4.4.1.6. Dynamic Time Warping

El Dynamic Time Warping (DTW) es un algoritmo que se usa para medir la similitud entre 2 series temporales que son diferentes en tiempo o en velocidad. El algoritmo consiste en obtener un alineamiento temporal dinámico óptimo de las muestras de las señales de forma que se obtenga la máxima coincidencia entre ellas. Este procedimiento es equivalente a realizar una transformación no lineal por secciones de una señal para alinearla con otra. Tradicionalmente este algoritmo se ha utilizado para el reconocimiento de patrones en señales que presentan alteraciones en la secuencia temporal de los valores con respecto al patrón objetivo que se desea reconocer (Myers et al. 1980).

El algoritmo DTW se implementa a través de programación dinámica, con una complejidad cuadrática, lo cual lo hace poco aplicable a problemas de tiempo real con un número elevado de señales.

Por un lado, es un algoritmo que se ajusta perfectamente a las necesidades que se plantean con respecto a las señales que se pueden obtener de vehículos pasando por distintos lugares a diferentes velocidades, e incluso con velocidades no constantes (aceleraciones) en los momentos de paso sobre el sensor. Por otro lado, la complejidad hace que no sea una solución aceptable en términos temporales para resolver el problema de la re-identificación de vehículos.

En cualquier caso, dado que es un algoritmo que ha sido propuesto en la literatura para la resolución del problema de la re-identificación, ha sido contemplado en este análisis comparativo para evaluar su rendimiento y capacidad de emparejamiento de señales.

El algoritmo DTW que hemos utilizado en los experimentos ofrece una distancia normalizada para cada emparejamiento de señales, de manera que se ha obtenido un valor de similitud óptimo entre 2 señales. Teniendo en cuenta que el algoritmo utiliza transformaciones no lineales, y que las 3 señales componentes que obtenemos de los sensores AMR tienen ligaduras temporales, se ha aplicado sobre las tres señales de forma conjunta, obligando de esta manera a que las transformaciones óptimas encontradas sean las mismas para las 3 señales.

#### 4.4.1.7. Similitud final entre 2 señales

Los métodos que se han descrito han permitido comparar señales componentes una a una, excepto en el caso del DTW donde se han comparado los valores de las 3 componentes a la vez. A su vez, los sensores AMR ofrecen 3 señales componentes que tienen una ligadura temporal. La similitud entre dos señales, por tanto, no se ha realizado a nivel individual de las señales componentes, sino que se ha computado de manera conjunta considerando todas las componentes; comparar señales de forma independiente haría que se perdiera la ligadura de tiempo que llevan intrínsecamente.

Los trabajos previos que se han estudiado en el estado de la técnica no proporcionan ningún criterio objetivo para determinar si es necesario utilizar las 3 señales para obtener buenos resultados en los cálculos de similitud, o si es suficiente con utilizar alguna de las componentes a nivel individual o alguna combinación de ellas. Este es un punto débil que no ha sido estudiado previa y convenientemente, y que abordaremos en el Capítulo 5. Mientras tanto, hemos asumido la aproximación de (Cheung & Varaiya 2007) donde los experimentos muestran que los resultados de identificación son mejores cuando se usan las 3 señales. En concreto, se ha usado la media aritmética de las similitudes que proporcionan cada comparación de las señales componentes individualmente.

#### 4.4.2. Proceso experimental

El proceso experimental que se ha definido pretende obtener datos para analizar la capacidad del algoritmo de extracción de señales y la capacidad de re-identificación de cada una de las medidas de similitud que se han seleccionado de la literatura. Para ello, se ha establecido el mismo procedimiento experimental para el caso del entorno de simulación y el entorno real controlado.

Las fases de las que consta el proceso experimental son las siguientes:

- Selección de objetos de prueba que van a ser sometidos a las pruebas experimentales.
- Sensorización múltiple de cada objeto para conseguir un conjunto de señales pertenecientes al mismo objeto que serán sometidas a diversas pruebas.
- Realización de pruebas de extracción de la señal, con el fin de parametrizar adecuadamente el método de extracción seleccionado. En esta parte se incluyen:
  - Pruebas de suavizado de las señales
  - Parametrización de la línea base de las señales
- Realización de pruebas de cálculo de similitud, con el fin de comparar diversos métodos de similitud a través de su rendimiento temporal y de su eficacia.

Como primer paso se han seleccionado para cada entorno experimental un conjunto de objetos que pueden generar diferentes señales a su paso por el sensor. Cada objeto ha sido sensorizado varias veces, y se han obtenido un conjunto de muestras que contienen varias instancias que pertenecen al mismo objeto, que serán utilizadas para realizar diversas pruebas que permitan ajustar los métodos de extracción y comparación de señales que se utilizarán en futuros experimentos de esta tesis.

Las señales obtenidas se han sometido a un primer experimento con el fin de obtener una configuración adecuada para la extracción de la señal, distinguiendo los 2 entornos de pruebas. Con todas las señales obtenidas se han realizado distintas pruebas de parametrización de algoritmos de segmentación de la señal, suavizado, y normalización.

Posteriormente se ha realizado un segundo experimento para valorar la capacidad de re-identificación de objetos con las señales obtenidas en el experimento anterior, utilizando distintos métodos de comparación de señales.

En primer lugar se ha analizado la capacidad de re-identificación de los objetos sobre el total de las señales, en una comparación cruzada, obteniendo una matriz cuadrada de tantas dimensiones como señales hay disponibles, para cada uno de los métodos de similitud propuestos. Dado que todos los métodos de cálculo de

similitud están normalizados, esta matriz permite hacer una comparación entre los resultados obtenidos.

En segundo lugar se ha valorado la capacidad intrínseca de re-identificación. Para ello, cada señal se ha comparado con el resto y se han obtenido las señales que ofrecen una similitud mayor con respecto a la señal objetivo. En función de las repeticiones de pasadas realizadas con cada objeto o vehículo sobre el sensor, se ha contabilizado el número de aciertos entre las señales que han ofrecido un valor mayor de similitud, y se ha determinado los aciertos y los fallos conseguidos en cada caso. Con esto se ha obtenido un valor relativo de la precisión del método de cálculo de similitud y de capacidad de re-identificación.

En tercer lugar se ha valorado la capacidad de discriminación de cada método de similitud obteniendo una matriz de contingencia para cada caso. Para ello se ha evaluado el rendimiento del método a través de un curva ROC, valorando los verdaderos y falsos positivos y negativos, y los consecuentes ratios de verdaderos positivos y falsos positivos. Se ha representado la información obtenida en una gráfica de dispersión y se ha determinado el punto óptimo del clasificador que permite determinar cuándo se ha re-identificado un vehículo y cuando no.

Finalmente, se ha realizado un análisis de los datos obtenidos y se han obtenido unas conclusiones importantes para la siguiente etapa del procedimiento experimental de esta tesis.

### 4.4.3. Resultados experimentales en el entorno de simulación

#### 4.4.3.1. Selección de datos experimentales y procedimiento

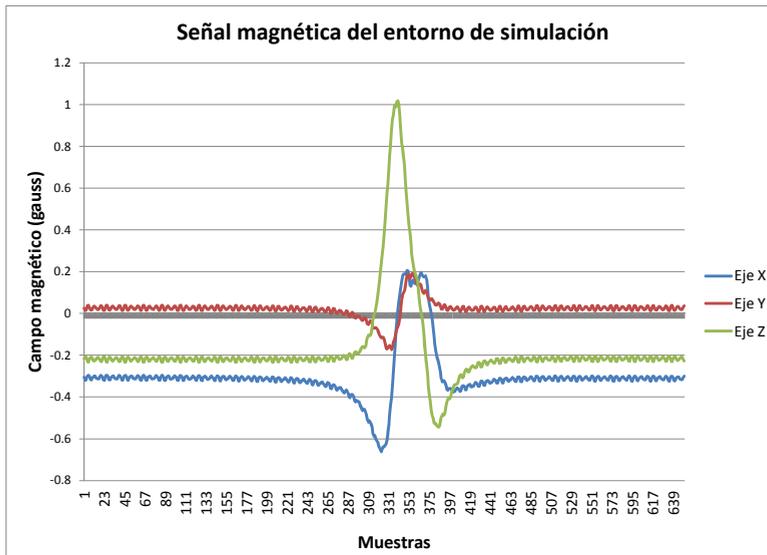
El entorno de simulación ha permitido disponer de objetos metálicos con propiedades magnéticas variadas que, con las restricciones que se han definido para la disposición del tetraedro, han aportado un total de 288 configuraciones magnéticas posibles. Del conjunto total de estas configuraciones se han seleccionado arbitrariamente un subconjunto de 48 configuraciones para realizar los experimentos.

Cada una de las configuraciones seleccionadas se ha dispuesto en el simulador y se han realizado 5 pasadas del objeto sobre el sensor, de forma que se han capturado un total de 240 señales para su estudio. Sobre estas señales se ha aplicado la metodología experimental definida.

#### 4.4.3.2. Pruebas de extracción de la señal

Las pruebas de extracción tienen como objetivo obtener los parámetros que deben usar los algoritmos de pre-procesamiento de la señal (suavizado y normalización) y los valores umbrales y de factor de tolerancia para el algoritmo de segmentación.

Una señal magnética correspondiente a un objeto en el entorno de simulación tiene un aspecto como el que se muestra en la Figura 30.



*Figura 30. Ejemplo de señal magnética obtenida en el entorno de simulación*

Se puede apreciar que la señal consta de 3 componentes que corresponden a las perturbaciones medidas por el sensor en los ejes X, Y y Z. Se observa también que las componentes no están alineadas en la base al nivel de cero, y que contienen un ruido que puede interferir en el tratamiento de los datos. Por tanto, las primeras acciones que se han realizado con los datos obtenidos son el ajuste de la línea base al nivel de cero y el suavizado de la señal.

La determinación de la línea base se ha realizado utilizando la expresión ( 3 ), donde ha sido necesario definir el número de muestras que se toman al comienzo de la señal para su aplicación. El procedimiento que se ha seguido para determinar este valor ha sido experimental. Para todas las muestras consideradas, y para cada una de las señales componentes, se ha calculado la media aritmética de los  $n$  primeros valores, variando  $n$  entre 1 y 1000. Para cada uno de los valores de  $n$  se ha determinado la diferencia en valor absoluto de su media con respecto a la media correspondiente al valor anterior ( $n-1$ ). Fijando un valor umbral de 0.0001, se ha obtenido para cada componente de cada señal el valor de  $n$  para el que esta diferencia de valores absolutos es inferior a dicho umbral, y se ha añadido la condición de que se mantenga durante al menos 5 valores consecutivos. Por último, se ha tomado el valor mínimo de  $n$  que cumple estas condiciones para las 3 componentes de una misma señal.

Para los 240 casos que se han considerado en el experimento del entorno de simulación, se ha realizado una media de los valores obtenidos de  $n$  y se ha redondeado, lo que ha dado un resultado de 102. Con este dato, se ha tomado la decisión de que la cantidad de muestras que se deben utilizar para calcular la línea base de todas las señales es  $n = 100$ .

El suavizado de la señal se ha realizado utilizando la expresión ( 2 ). De nuevo, ha sido necesario establecer el número de muestras que se deben utilizar para realizar un suavizado que elimine el ruido, pero que afecte a la forma de la señal lo menos posible.

El criterio que se ha seguido para obtener este número de muestras para el suavizado ha sido también empírico y se detalla a continuación. Se ha tomado un conjunto reducido de muestras y se han extraído manualmente las señales componentes de cada una de ellas, esto es, se ha fijado el punto de comienzo y de final de la señal de forma visual. A continuación se han aplicado diferentes niveles de suavizado, siendo  $s$  el número de muestras considerado y haciéndolo variar de 1 a 99. Posteriormente se han comparado las señales original y suavizada usando la similitud del coseno y finalmente se han analizado los valores de similitud obtenidos, de forma que se ha podido valorar cómo evoluciona la similitud de las señales en función del suavizado. En la Figura 31 se muestra un ejemplo de la evolución para algunas de las señales.

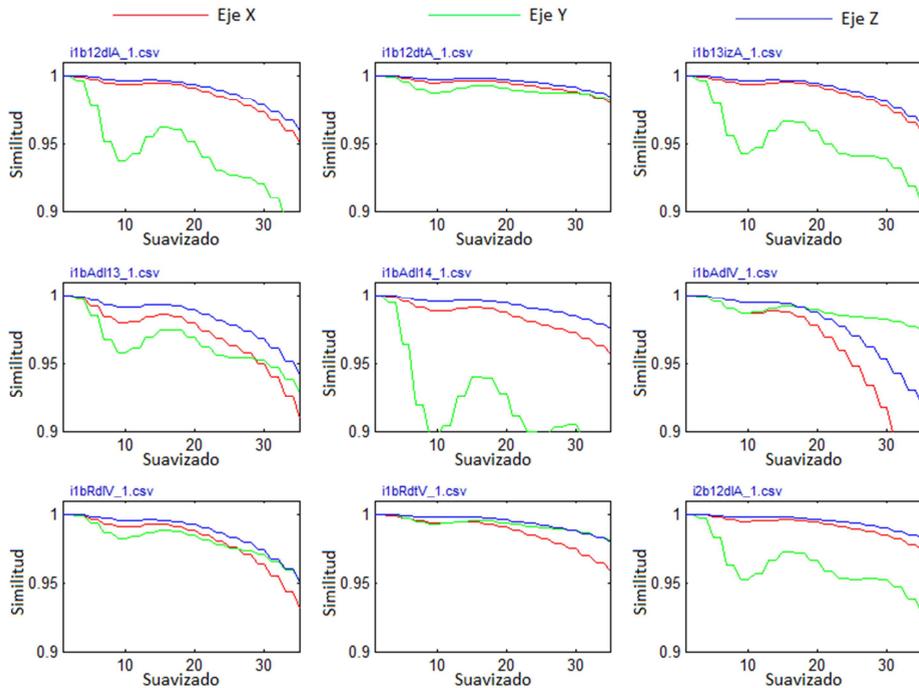


Figura 31. Evolución de variaciones de la similitud en función del nivel de suavizado para señales del entorno de simulación

Se puede aplicar un criterio absoluto para definir el nivel de suavizado, por ejemplo, determinando un porcentaje máximo de similitud que se desea garantizar tras el suavizado (por ejemplo un 95%). A partir de ese valor, se pueden encontrar los niveles de suavizado que cumplen esta condición en cada señal y obtener un valor medio para todas las señales componentes. El valor del porcentaje que se desea garantizar debe asegurar que no existirán variaciones considerables en la forma de la señal, lo cual se consigue si se selecciona un valor suficientemente alto.

No obstante, en las gráficas de las señales, algunas de las cuales se muestran en la Figura 31, se puede apreciar que en muchas de ellas aparece un máximo relativo para un nivel de suavizado en torno al valor 15. Este hecho conduce a la investigar en cuántos casos se produce esta situación y para qué valores de suavizado. El análisis que se ha realizado de los datos muestra que se producen varios máximos relativos en cada señal componente, de los cuales el primero es el que tiene mayor interés, puesto que aporta un suavizado con mayor nivel de similitud. Tomando

siempre el primer máximo relativo, si existe, se han obtenido unos resultados que se resumen en la Tabla 3.

	Componente X	Componente Y	Componente Z
Valor de suavizado mínimo	13	13	13
Valor de suavizado máximo	15	17	15
Valor de suavizado medio	14.61	15.02	13.58
Ocurrencias	46	48	33

*Tabla 3. Datos de máximos relativos en la evolución de la similitud en función del suavizado en el entorno de simulación*

Las señales componentes X e Y poseen un primer máximo relativo en 46 y 48 casos respectivamente, mientras que en la señal Z esto sólo ocurre en 33 casos. El mayor valor del suavizado medio para el que se ha obtenido el primer máximo relativo es 15 y corresponde a la componente Y de la señal. En estas condiciones, se ha tomado la decisión de considerar el valor 15 como número de muestras a utilizar para el suavizado de las señales.

El siguiente paso en el procedimiento ha consistido en la segmentación, es decir, encontrar los límites de la señal dentro la secuencia temporal de datos del sensor. Se ha partido de una serie de datos que ya ha sido suavizada y sobre la que se conoce el valor de la línea base para todas las componentes de la señal gracias a los procedimientos descritos previamente.

La segmentación de la señal se ha realizado usando la expresión ( 4 ) para determinar el comienzo de cada señal componente y la expresión ( 5 ) para determinar su final. Para usar estas expresiones ha sido necesario determinar el número de muestras y los valores umbrales de la energía que se van a usar como parámetros. Se ha aborda el problema de forma empírica, tomando de nuevo el conjunto de muestras reducido usadas para el suavizado. Un paso previo para tomar una decisión correcta ha sido conocer las características de las señales con las que se está trabajando, para lo cual se han extraído algunas características básicas de las señales componentes que se muestran en la Tabla 4.

En la primera fila de la tabla se ha representado la energía media de cada componente de la señal por número de muestras. La componente Y es la que menos energía aporta en término promedio, mientras que la componente Z es la que más energía contiene. En la segunda fila se han representado los tamaños de las componentes de las señales en términos de su número de muestras. A continuación se ha calculado la media de las energías por muestra de todas las señales componentes, lo que representa un valor de 0.0563.

	Componente X	Componente Y	Componente Z
Energía media por muestra	0.0372	0.0161	0.1155
Número medio de muestras	229	195	210
Energía media	0.0563		
Nº de muestras iniciales para alcanzar la energía media	51.0125	51.0542	51.8750
Nº de muestras finales por debajo de la energía media	52.8792	52.7375	53.0042

*Tabla 4. Datos característicos de las señales de prueba en el entorno de simulación*

Con estos datos, el nuevo procedimiento que se ha aplicado para obtener los límites de la señal ha consistido en establecer el umbral de energía en el valor promedio de la energía media por muestra de las componentes y realizar una estimación promedio del número de muestras que son necesarias tomar en las señales en bruto para superar dicho umbral. El resultado se muestra en la cuarta línea de la tabla. Este resultado indica que es necesario tomar entre 51 y 52 muestras de cada señal para que se detecte de forma correcta el comienzo de la misma, según los datos experimentales de las señales de prueba.

El proceso que se ha aplicado para determinar el final de la señal es equivalente. Tomando el mismo valor umbral de la energía, se ha calculado el promedio del número de muestras por componente que son necesarias para que el punto en el que se ha marcado como final de forma experimental aporte una energía por debajo del umbral fijado. En este caso, los valores obtenidos para las componentes son similares, variando entre 52 y 54.

Estos datos se pueden considerar como un límite superior, de manera que trabajar con menos muestras resultará en una acotación de la señal con un número inferior de muestras. Por otro lado, si se acota la señal de forma más restrictiva, se pueden evitar los problemas de sobre-detección e infra-detección mencionados. Por estos motivos, se ha tomado la decisión de seleccionar el valor mínimo del número de muestras tanto para la detección del comienzo como del final de la señal en 50 muestras para el cálculo de los límites.

Una vez obtenidas las señales a través de los procedimientos establecidos, se han normalizado en número de muestras y en amplitud. Para normalizar en número de muestras se ha realizado un re-muestreo de la señal, estableciendo el valor de muestras final en 100 (que está por debajo del número de muestras medio para las componentes). La normalización en amplitud se ha realizado escalando las componentes de la señal de manera independiente en el intervalo  $[-1, 1]$ . En la Figura 32 se presenta un ejemplo de aplicación de los procesos de tratamiento de la señal, segmentación y normalización, mostrando una porción de la señal original en la secuencia temporal y la señal final obtenida.

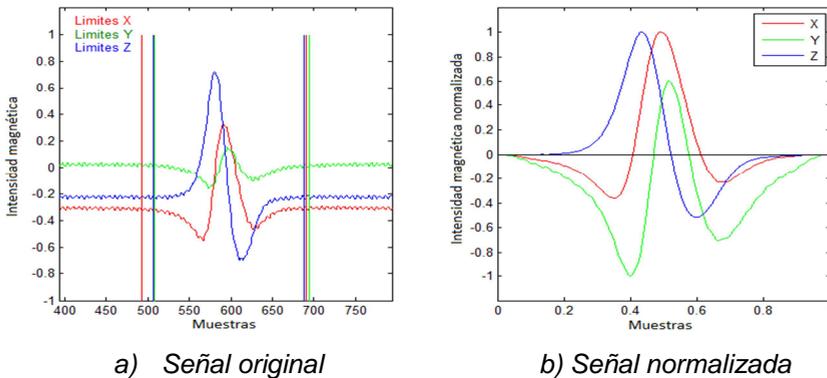


Figura 32. Ejemplo de extracción y normalización de la señal de un objeto en el entorno de simulación

La normalización independiente de las señales tiene sentido cuando se realizan los cálculos de similitud en los que la amplitud de la señal no afecta al resultado. Sin embargo, dado que alguno de los métodos seleccionados (ej. DEN) sí que dependen de la amplitud, también se han normalizado las señales de forma conjunta al intervalo  $[-1, 1]$ , y posteriormente se han utilizado en cada método de cálculo de similitud la señal más conveniente.

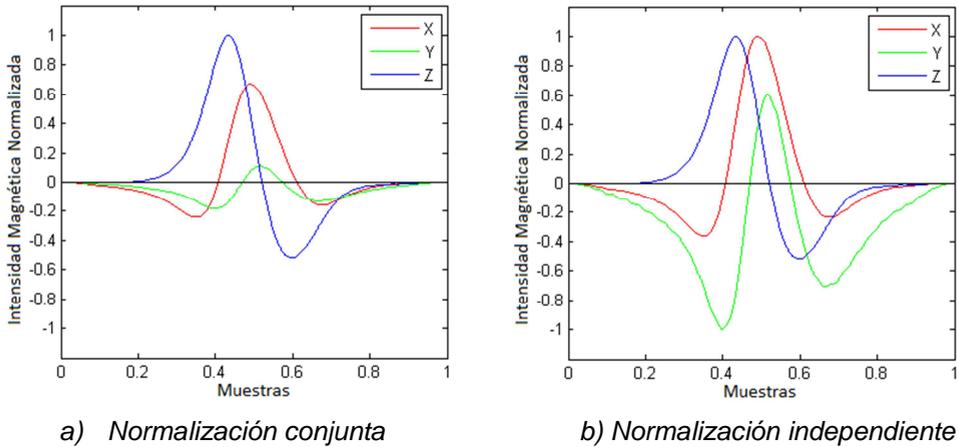


Figura 33. Comparación de la normalización conjunta frente a la normalización independiente de una señal en el entorno de simulación

Finalmente, para comprobar el funcionamiento del método de extracción de señales, se han aplicado los procesos parametrizados en esta sección sobre la colección completa de 240 muestras, y se ha comprobado que todas las señales componentes de cada muestra son detectadas y extraídas de la serie temporal.

#### 4.4.3.3. Pruebas de re-identificación

En las pruebas de re-identificación se han utilizado los 6 algoritmos propuestos en la sección 4.4.1 para obtener unas medidas de similitud en todos los pasos de los objetos. Con el fin de facilitar su nomenclatura, se han utilizado las siguientes abreviaturas:

- Similitud del Coseno: COS
- Correlación Cruzada: XCOR
- Distancia Euclídea Normalizada: DEN
- Average Bar: AvB
- Hill-Pattern: HP
- Dynamic Time Warping: DTW

En el caso del entorno de simulación, para cada uno de los métodos se ha obtenido una matriz cuadrada de similitudes simétrica con una diagonal que contiene valores

unitarios. Se puede ver un ejemplo de los valores de similitud obtenidos entre varios pasos en la Tabla 53, en el **Anexo II. Muestra de datos de similitud**. Para facilitar la identificación de los mismos objetos en distintos pasos, se han ordenado dichos pasos en la matriz de manera que los 5 primeros corresponden al mismo objeto, los 5 segundos corresponden al segundo objeto, y así sucesivamente.

En primer lugar se han analizado los valores de similitud obtenidos y se ha calculado el grado de acierto que proporciona cada medida de similitud. Para ello, en cada uno de los pasos, se han ordenado de forma descendente las similitudes obtenidas con cada método comparando la señal correspondiente a dicho paso con el resto de señales. Esto ha permitido obtener un listado ordenado de candidatos a la re-identificación.

Para valorar el grado de acierto en la lista de candidatos, se han analizado las cuatro primeras señales (que deberían corresponder con el mismo objeto si el cálculo fuese perfecto), y se ha determinado cuantas de ellas se corresponden realmente con el mismo objeto en las distintas pasadas realizadas. De esta manera se han contabilizado los aciertos y los fallos cometidos. En estas condiciones, el número máximo de aciertos posible es de 960. En términos de la tabla de contingencia, los aciertos son los verdaderos positivos (VP), y los fallos son los falsos positivos (FP). Los datos más relevantes de similitud obtenidos, así como los valores relativos de VP y de FP frente al total de positivos (TP) y el total de negativos (TN), para todos los métodos, se resumen en la Tabla 5.

Método	Similitud Máxima	Similitud Mínima	Aciertos	Porcentaje de Acierto	Porcentaje de Error
COS	0.999729	-0.5582	346	36.04%	63.96%
XCOR	0.999816	-0.5800	486	50.63%	49.37%
DEN	0.988655	0.1161	344	35.83%	64.17%
AvB	0.999752	-0.5694	348	36.25%	63.75%
HP	0.972007	-0.6431	350	36.46%	63.54%
DTW	0.994734	0.4586	698	72.71%	27.29%

*Tabla 5. Resumen de datos de similitud para los distintos métodos en el escenario de simulación.*

Los porcentajes de acierto obtenidos son claramente muy pobres, aunque algunos algoritmos funcionan mejor que otros. Esto justifica que parte del trabajo de esta tesis consista en la mejora de estos resultados. En los datos de la tabla se aprecia claramente que el mejor de los métodos similitud con respecto al porcentaje de acierto es el DTW, seguido del XCOR. Ambos métodos destacan sobre el resto, puesto que tienen la característica de poder adaptar las formas de las señales en el proceso de comparación. Los otros métodos considerados, COS, DEN, AvB y HP aportan valores muy similares en cuanto al porcentaje de acierto.

El motivo de que DTW y XCOR destaquen sobre el resto es debido a las diferencias leves que se producen en la determinación de las fronteras de la señal. Esto hace que las señales que se comparan no estén completamente alineadas y no se puedan obtener valores de similitud del 1 para señales pertenecientes al mismo objeto. Adicionalmente, las señales del escenario de simulación son muy parecidas entre sí, lo cual acentúa más este efecto.

Para valorar el espectro de valores de similitud obtenidos también se han construido histogramas para cada uno de los métodos aplicados, los cuales se proporcionan representados de la Figura 34 a la Figura 39.

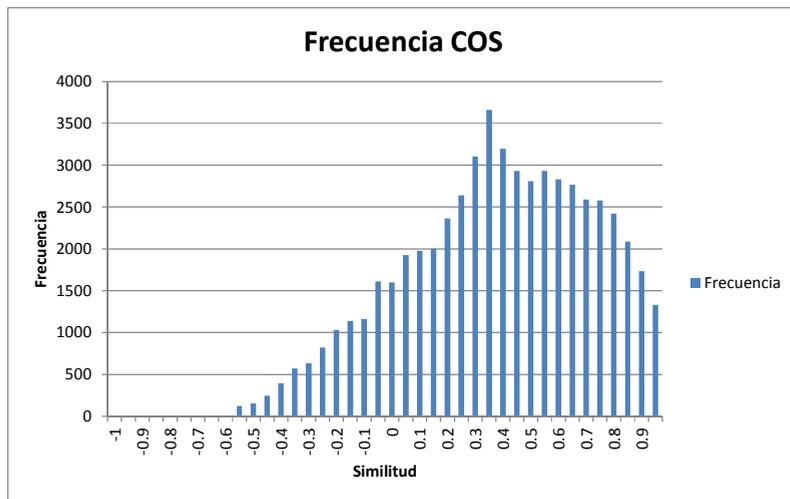


Figura 34. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de simulación

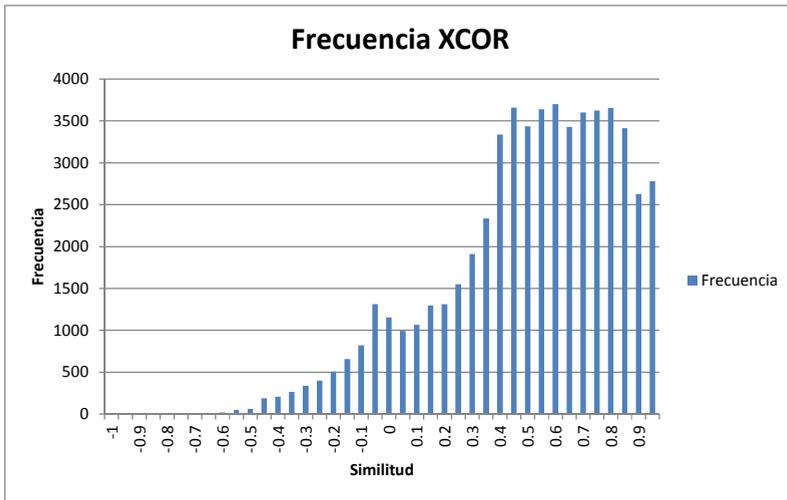


Figura 35. Histograma de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de simulación

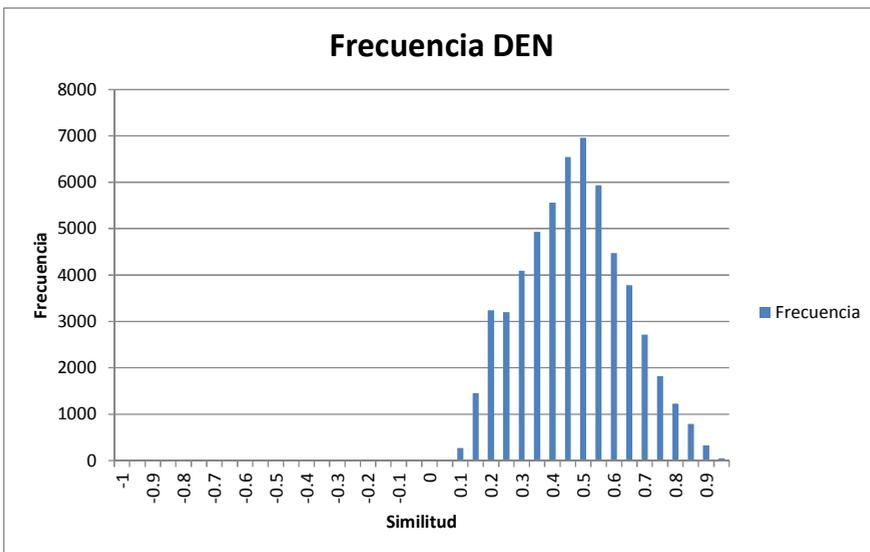


Figura 36. Histograma de Similitudes para el modelo de Distancia Euclídea en el entorno de simulación

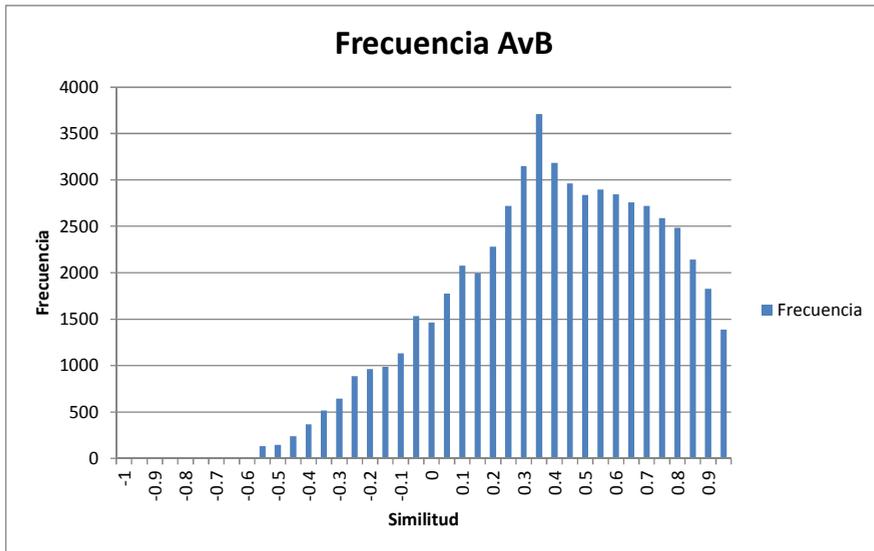


Figura 37. Histograma de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de simulación

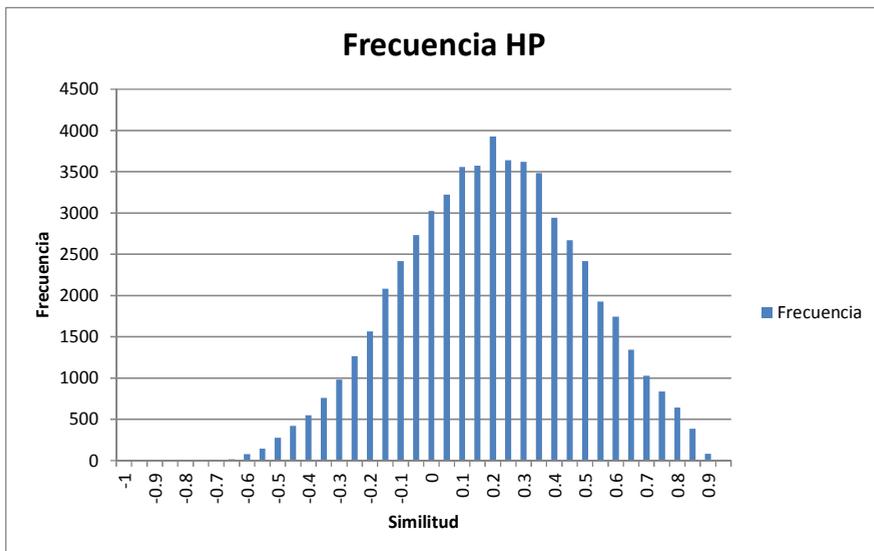


Figura 38. Histograma de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de simulación

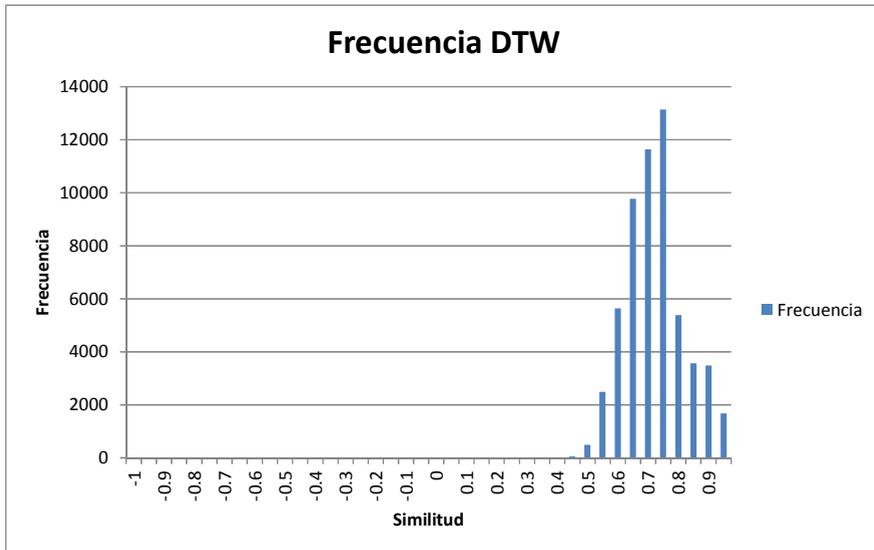


Figura 39. Histograma de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de simulación

Los histogramas han aportado una información adicional para el análisis de los métodos de similitud. Han permitido valorar, en particular, la cantidad de valores que se encuentran próximos a 1. Este dato es muy importante para poder determinar la capacidad de discriminación de la medida de similitud.

En un experimento controlado como este, donde se conocen la cantidad de objetos idénticos y el punto de detección es único, la determinación de las señales que pertenecen a un mismo objeto es fácil de obtener a través de la selección los mejores candidatos en función de la similitud obtenida en la comparación cruzada de señales. Sin embargo, en un contexto real, compuesto por varios puntos de control, y donde el problema consiste en localizar los dos puntos de paso de un vehículo a través de su re-identificación basada en la forma de la señal, y con la posibilidad de que el vehículo entre en la zona de sensorización pero no salga, la solución del problema se transforma en la selección del mejor candidato *siempre que la similitud se encuentre por encima de un cierto valor umbral*.

En este caso, es fundamental ser capaces de determinar un valor umbral por debajo del cual se considerará que dos vehículos no son coincidentes. Para ello, lo ideal es que la densidad de valores con similitudes altas sea lo más baja posible, y la dispersión de los valores de similitud altos sea elevada. Si observamos los histogramas, esto se puede apreciar en la parte de la gráfica cercana al 1 en el eje de abscisas. Cuanto más valores se acumulen en ese punto, menos capacidad discriminatoria tendrá la medida de similitud.

Para la DTW y la XCOR, se observa que existen muchos más valores de VP con una similitud superior a 0.95 que en el resto. Por tanto, a pesar de que tienen una buena capacidad de re-identificación, tienen poca capacidad de discriminación por el estrecho margen en los valores altos de similitud. El COS y el AvB tienen una mayor capacidad de discriminación, pero aun así los valores de similitud por encima de 0.95 son superiores al valor VP. Tan sólo el DEN y el HP aportan una dispersión de valores de similitud que permiten establecer unos rangos más amplios de similitud para situar el umbral de detección.

Para ilustrar mejor esto, se ha realizado a su vez una representación gráfica en escala de grises de los valores de las matrices de similitud, con el fin de poder interpretar visualmente el grado de emparejamiento y la tendencia de los valores que aporta cada método. Todo ello puede apreciarse en los gráficos que se incluyen en la Tabla 6. Estas gráficas se han construido asignando un valor de 0 a 255 para cada valor de similitud, de manera que se ha realizado una transformación lineal de escala de  $[0,1]$  a  $[0,255]$ . Los valores comprendidos entre 0 y 255 indican la graduación de color en una escala de grises de negro (0) a blanco (255).

Los tonos claros de los gráficos indican la proximidad de los valores a similitud a 1, y en este sentido puede verse que el DTW tiene los valores muy desplazados a este valor. La misma situación, pero más suavizada, se puede observar en el DEN. El resto de métodos tienen una distribución de valores más dispersa. También se pueden apreciar en los gráficos la existencia de *clases de equivalencia magnética*, es decir, casos en los que los objetos son distintos pero tienen una correlación elevada. Estas clases vienen marcadas por las líneas diagonales más claras (de izquierda a derecha) que representan similitudes altas entre los objetos, y por las agrupaciones de cuadros de tamaño 5x5 con colores más claros que destacan sobre el resto. El DTW es el método que mejor permite observar las diagonales, mientras que el HP es el que mejor permite analizar los cuadros.

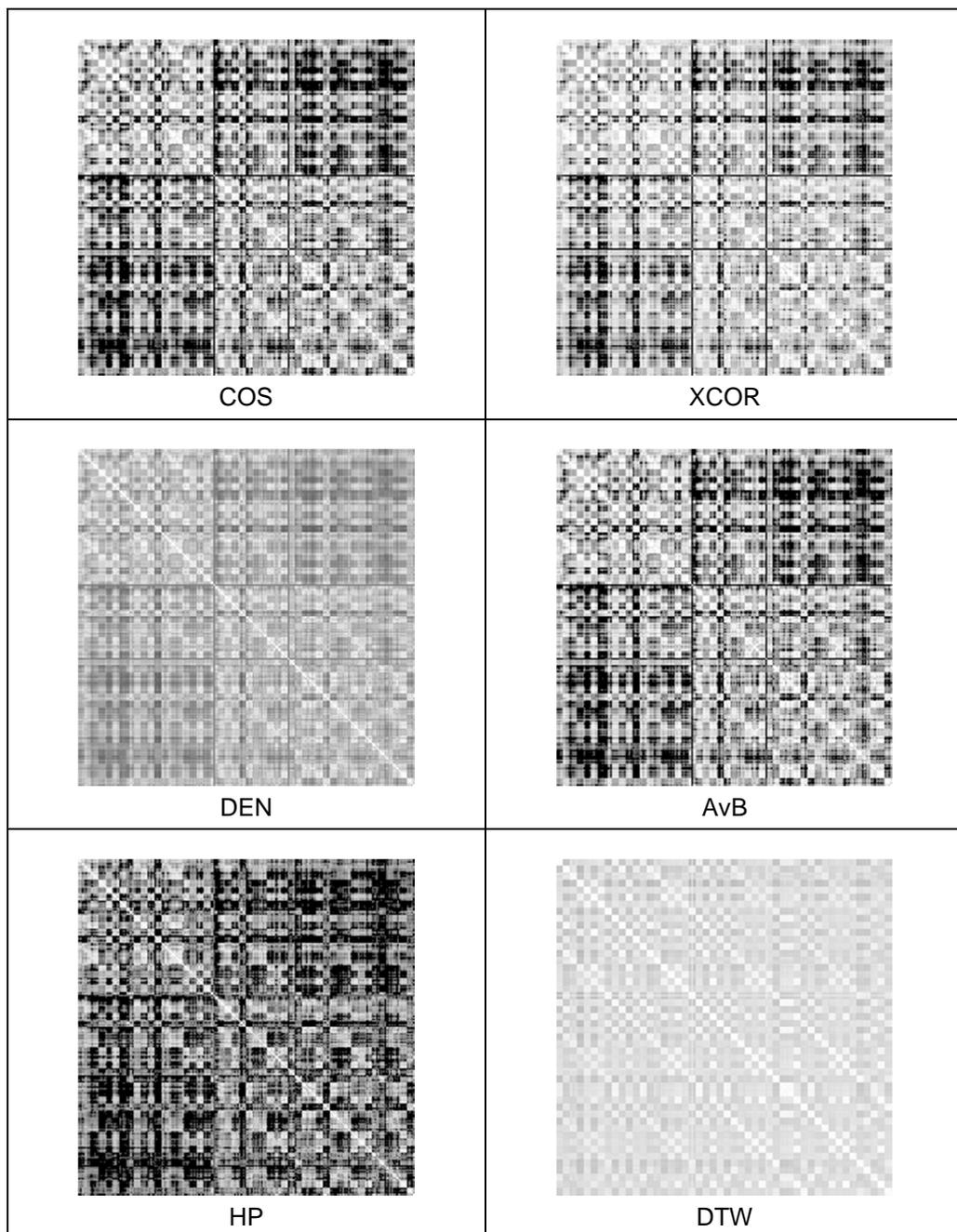


Tabla 6. Representación gráfica de las matrices de similitud para el entorno de Simulación

Los cuadros de 5x5 pixels con tonos más claros que se sitúan agrupados en la diagonal y que se aprecian con más claridad en el gráfico del método HP corresponden a los valores de similitud de las comparaciones de los pasos de un mismo objeto. En una situación ideal, donde los valores de similitud entre los mismos objetos fuesen mayores que en el resto de comparaciones, debería percibirse en los gráficos una diferencia notable de los tonos de la diagonal y los cuadros de 5x5 frente al resto de casos.

Sin embargo, los gráficos no muestran esta tendencia, lo cual es un indicativo claro de que los métodos de similitud utilizados no son óptimos. Por un lado, no se identifican como únicos todos los pasos del mismo objeto. Por otro lado, los tonos más claros en otras zonas de los mapas indican que hay una tendencia a identificar objetos erróneamente, es decir, se obtienen valores de similitud elevados para comparaciones de objetos que no son el mismo. Existe, por tanto, un margen de mejora en la aplicación de los métodos de similitud.

El análisis de los datos obtenidos se ha completado a través de la creación de curvas ROC en base a tablas de contingencia. Se ha realizado una segmentación del espectro de similitudes obtenidas para cada método en intervalos de 0.01 unidades. De esta manera, se han obtenido rangos de similitudes para los que se ha podido calcular el Ratio de Verdaderos Positivos (RVP)<sup>7</sup> y el Ratio de Falsos Positivos (RFP)<sup>8</sup> y representar esta información en una curva ROC.

Las curvas ROC se usan habitualmente en la teoría de detección de señales para analizar cómo se comporta un clasificador binario, en función del umbral considerado. En el caso del experimento que hemos realizado, se ha ampliado el objetivo de la re-identificación en dos puntos al objetivo de la detección repetida de un mismo evento, con lo que la decisión a tomar consiste en determinar si una señal (obtenida de un conjunto de señales) pertenece o no al mismo objeto, utilizando para ello un umbral de similitud, con lo que estamos ante un problema de decisión binaria. En la curva ROC se representa el RVP frente al RFP. De esta manera se puede observar la dependencia de la precisión y la exhaustividad del método (de identificación en este caso) para cada umbral considerado. Las curvas ROC obtenidas se encuentran entre la Figura 40 y la Figura 45.

---

<sup>7</sup> El RVP se calcula como el cociente VP/TP.

<sup>8</sup> El RFP se calcula como el cociente FP/TN.

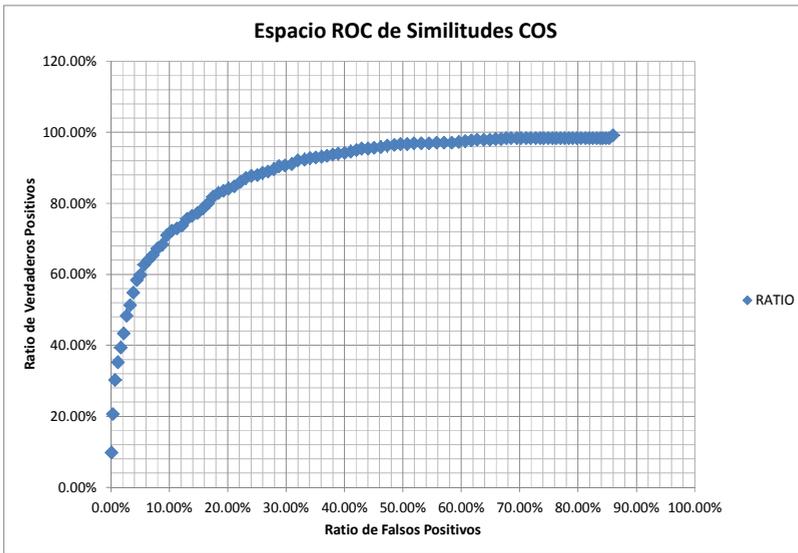


Figura 40. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de simulación

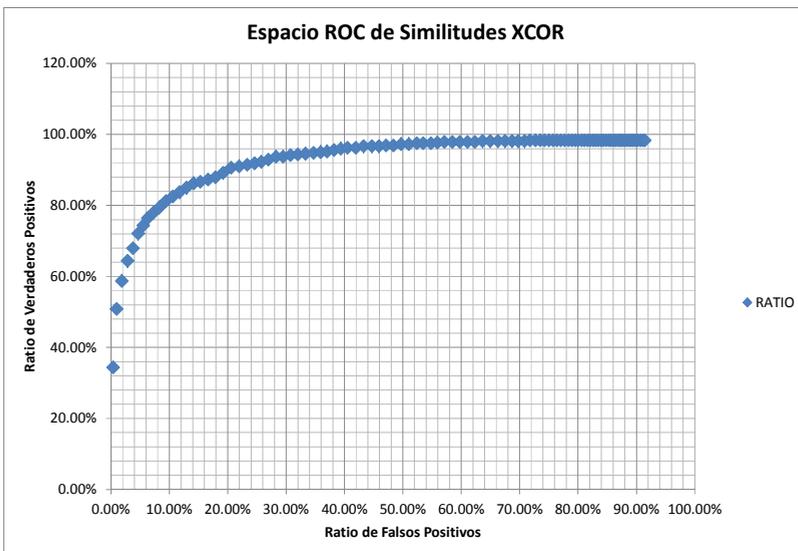


Figura 41. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de simulación

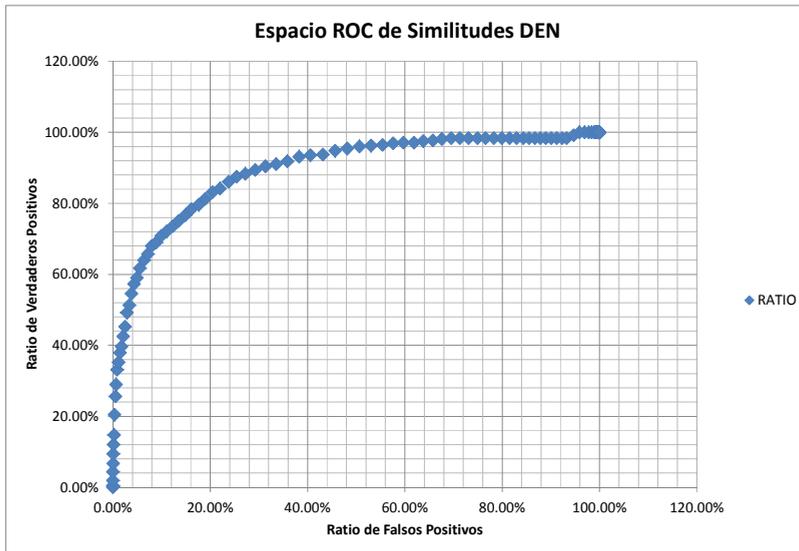


Figura 42. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de simulación

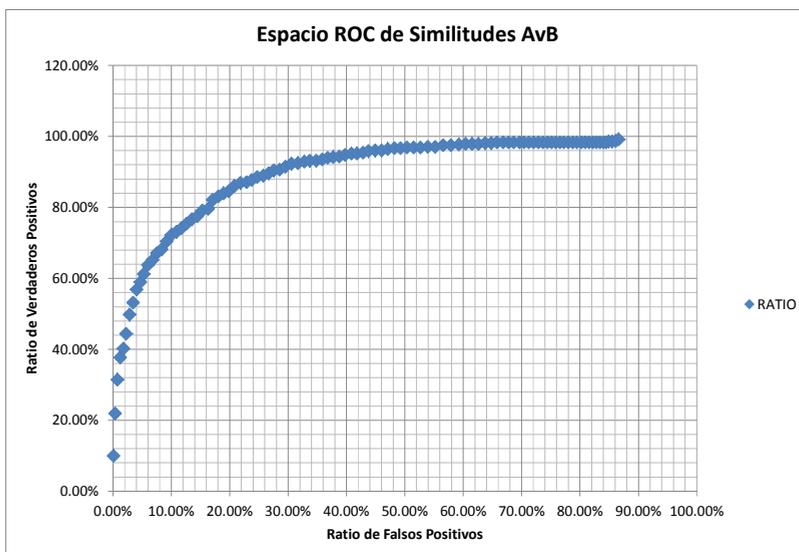


Figura 43. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de simulación

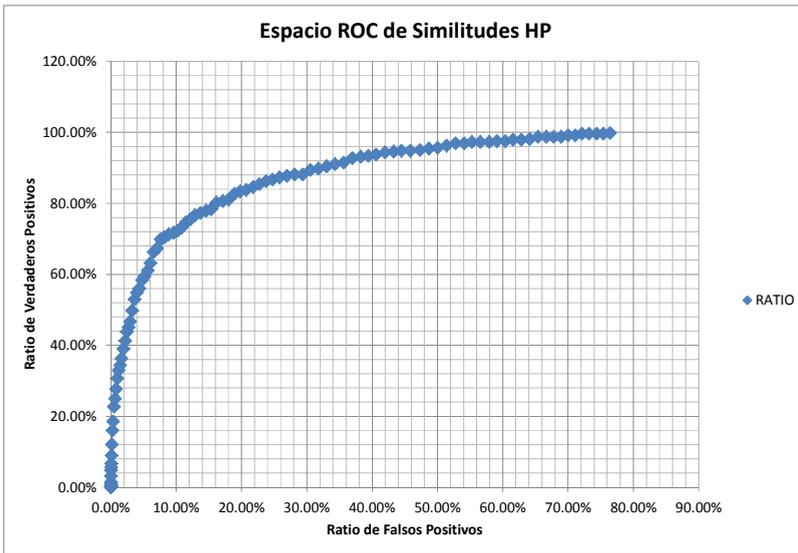


Figura 44. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de simulación

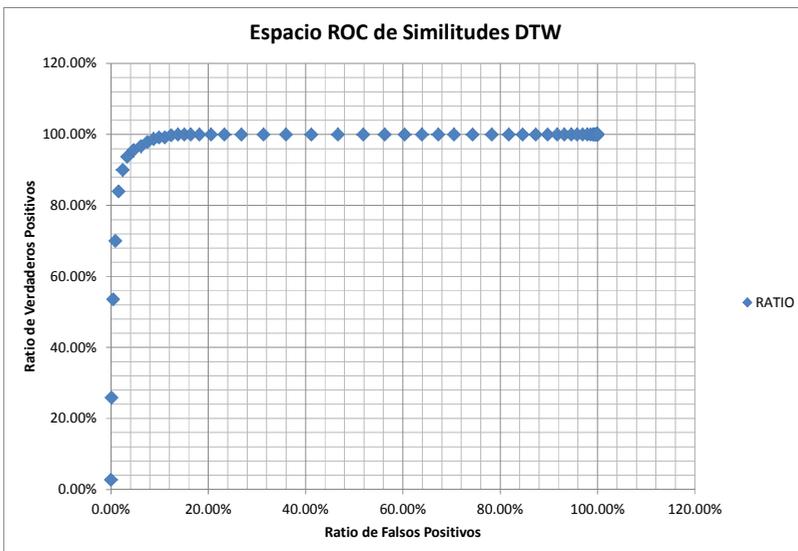


Figura 45. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de simulación

La curva ROC permite determinar, además, cuál es el punto óptimo del clasificador. Un clasificador ideal tendría un punto (RFP, RVP) = (0,1), es decir, un punto para el cual todos los elementos clasificados como verdaderos lo son, y no hay ninguna detección incorrecta. En un caso real esto no sucede, y para determinar el punto óptimo que maximiza la correcta clasificación frente a la incorrecta se evalúa la distancia de cada punto de la curva ROC al punto (0,1). El punto óptimo es el que más se aproxima a este valor.

Se ha calculado para cada método cuál es el valor de similitud que ofrece una distancia mínima, y se han analizado los valores relativos y absolutos de similitud. Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Método	Similitud	VP	FP	VP+FP	RVP	RFP	Distancia
COS	0.73	796	10372	11168	0.83	0.18	0.2510
XCOR	0.85	828	7994	8822	0.85	0.13	0.1975
DEN	0.63	798	11558	12356	0.83	0.20	0.2655
AvB	0.77	760	8632	9392	0.79	0.15	0.2585
HP	0.48	794	10680	11474	0.83	0.19	0.2564
DTW	0.92	918	2640	3558	0.96	0.05	0.0641

*Tabla 7. Detalle de los valores de similitud para los puntos óptimos de la Curva ROC en el entorno de simulación*

Los resultados de la tabla muestran una variación considerable en los umbrales de similitud para el clasificador ideal. El método HP es que posee el umbral más bajo frente al método DTW que posee el más alto. Pero quizás más importante que el valor umbral son los valores absolutos y relativos de aciertos y fallos. A nivel absoluto, la suma VP+FP ofrece un dato importante sobre la capacidad de discriminación del método en el punto considerado. Obviamente, cuanto menor sea esta cantidad, mayor será la capacidad de discriminación.

Con esta medida, el algoritmo DTW es el que ofrece mejores resultados, aunque en esta ocasión no se puede afirmar que haya un segundo algoritmo, como en el caso de los histogramas, que destaque sobre los demás. El XCOR sería el siguiente

método en este ranking, muy alejado del DTW, pero bastante próximo al AvB que es el peor de todos.

A nivel relativo, también es importante analizar los datos de RVP y RFP que se obtienen para cada punto de clasificación óptimo. Se pretende obtener un valor lo más alto posible de RVP y un valor lo más bajo posible de RFP, dado que para un mismo valor de RVP será mejor el método que menor RFP ofrezca. De nuevo, el algoritmo DTW es el que ofrece mejores resultados, y el resto de métodos se encuentran agrupados en una capacidad de discriminación más baja.

En todo caso, hay que destacar un dato relevante para el análisis a través de la curva ROC que merece un análisis y una interpretación. De los 960 casos de VP posibles, es posible llegar a alcanzar un RVP del 96% en el caso del DTW, incluso con un RFP muy bajo (del 5%). Pero hay que plantearse cuánto ruido representa el RFP frente al RVP, en términos absolutos. En el estudio que estamos realizando intervienen una cantidad importante de comparaciones, de las cuales la relación entre VN y VP es de 56,400/960, es decir, un ratio de 58.75. Hay, por tanto, una cantidad de VN muy superior a la de VP. En este contexto, un número reducido de RVP puede significar que el valor de FP supere al valor de VP, lo cual complicaría mucho un proceso de clasificación, y en consecuencia, de re-identificación.

Así pues, se puede apreciar que el punto de clasificación óptimo que sugieren los métodos de similitud para este problema ocasiona un ruido importante y que altera profundamente los resultados de la re-identificación. El problema de definir un umbral de similitud por encima del cual se pueda considerar que dos vehículos son el mismo, abordado desde la perspectiva teórica de la curva ROC, ocasiona un número de falsos positivos demasiado elevado. El objetivo que se pretende para re-identificar objetos no consiste sólo en encontrar las instancias repetidas de un objeto, sino también ser capaz de discriminar al mismo tiempo aquellas instancias que no corresponden a él.

Por este motivo, si se analizan los datos de la Tabla 7, los puntos óptimos de clasificación proporcionan falsos positivos que superan a los verdaderos positivos en un factor que va desde 2.88 en el caso de DTW hasta 14.48 en el caso del DEN (ver Tabla 8). Esto indica que se está cometiendo un error de detección que va desde el 288% al 1448%, lo cual no es razonable para el modelo de re-identificación que se está buscando.

Método	Similitud	VP	FP	ERROR
COS	0.73	796	10372	1303.02%
XCOR	0.85	828	7994	965.46%
DEN	0.63	798	11558	1448.37%
AvB	0.77	760	8632	1135.79%
HP	0.48	794	10680	1345.09%
DTW	0.92	918	2640	287.58%

*Tabla 8. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para cada método de similitud en el entorno de simulación*

Para solucionar este problema, se ha propuesto el uso de una métrica distinta que ha permitido valorar el número de FP con respecto al número de VP en términos absolutos. Esta métrica proporciona un punto óptimo para el cual el ratio de VP en relación al de FP es máximo y ofrece un valor de precisión para cada valor de similitud. La nueva fórmula propuesta para el cálculo de la métrica es la que se define en la expresión ( 13 ).

$$Precisión = \frac{VP - FP + \delta}{TP + TN} \quad (13)$$

donde  $\delta$  es el factor de tolerancia. Esta fórmula permite valorar la diferencia entre elementos VP y FP, de forma que el resultado será positivo siempre que VP supere a FP. Ahora bien, se puede permitir una tolerancia de exceso de valores de FP que hacen que el resultado de la *Precisión* sea positivo. Este valor es el que representa el factor de tolerancia.

En el experimento que hemos realizado se ha calculado la precisión en función de la similitud para todas las medidas propuestas, usando un valor  $\delta=0$ , y los resultados se muestran en las gráficas que van de la Figura 46 a la Figura 51.

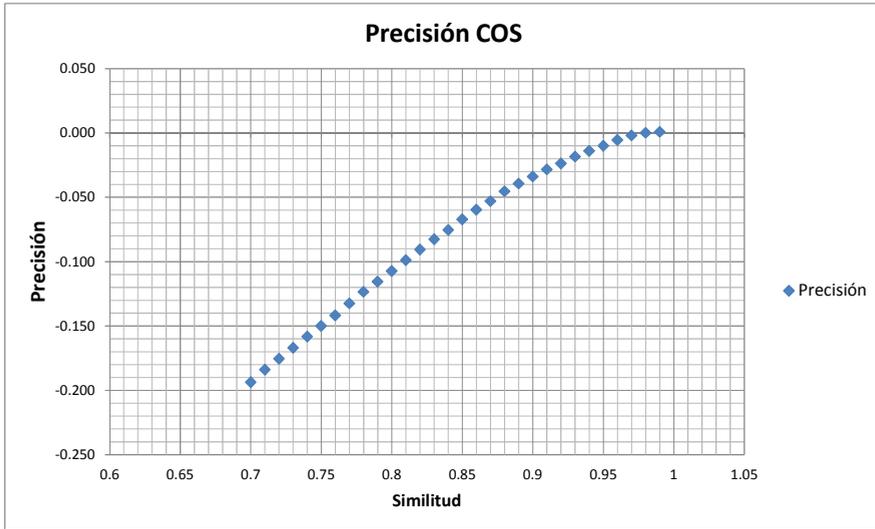


Figura 46. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo del Coseno en el entorno de simulación

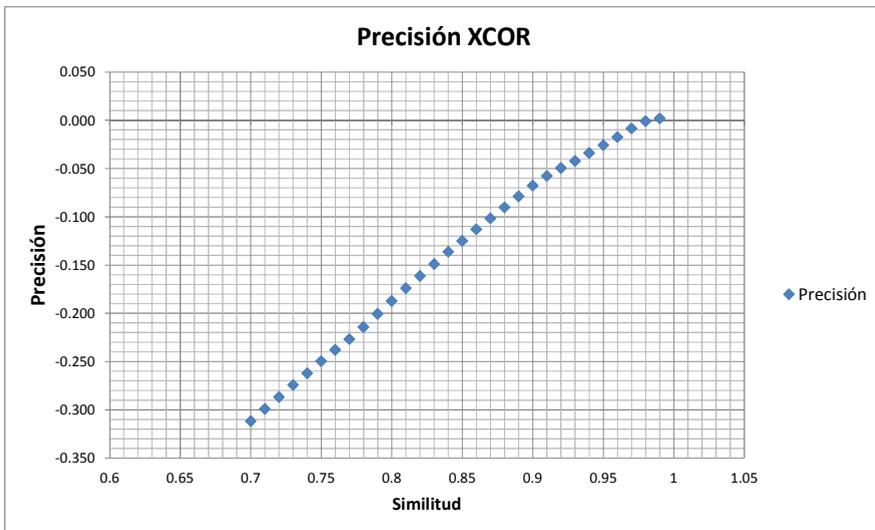


Figura 47. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Correlación Cruzada en el entorno de simulación

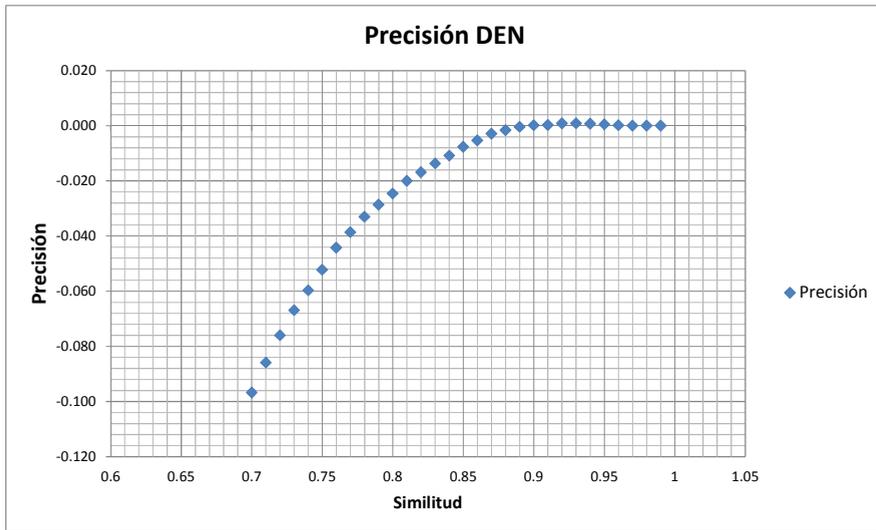


Figura 48. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de simulación

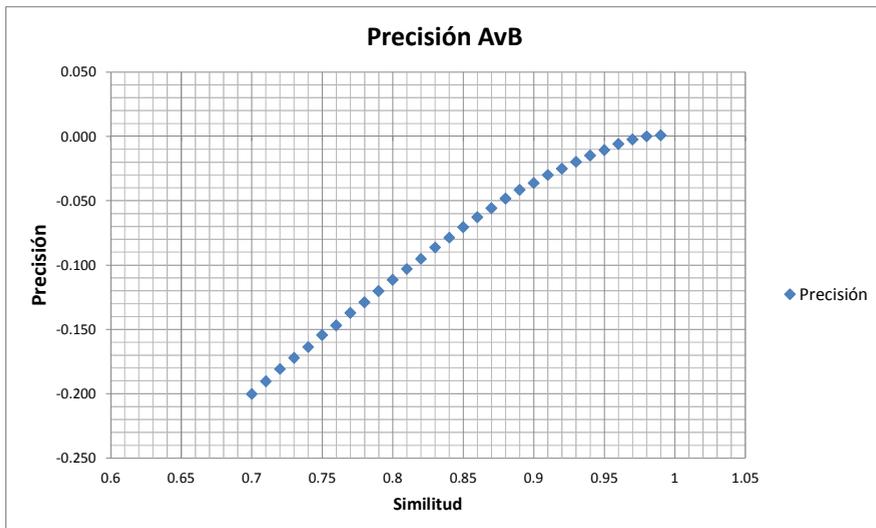


Figura 49. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Average Bar en el entorno de simulación

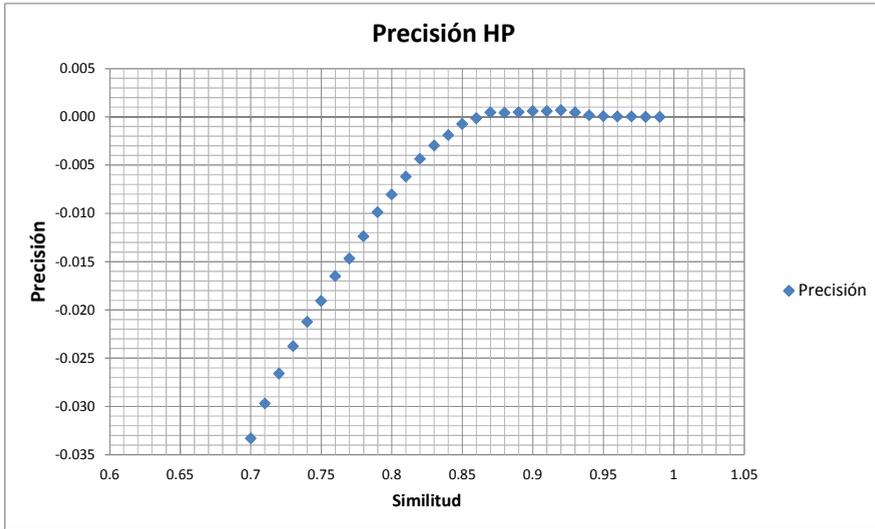


Figura 50. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Hill Pattern en el entorno de simulación

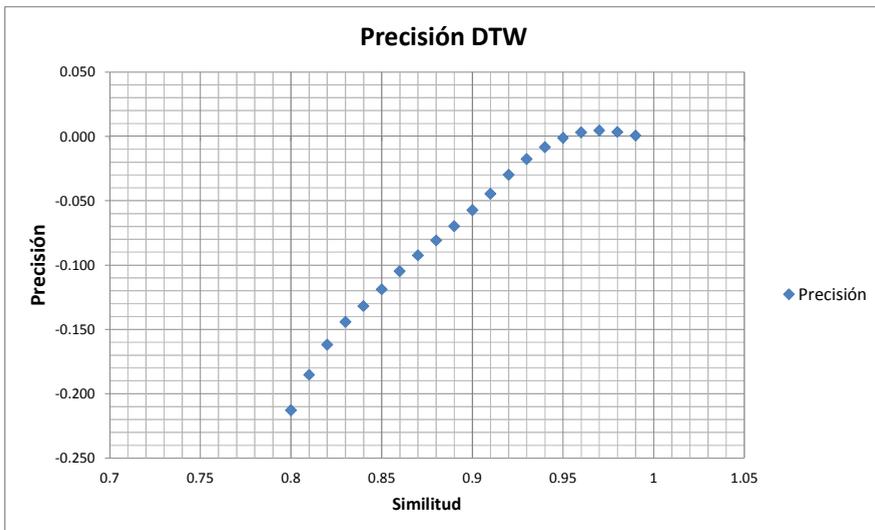


Figura 51. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo DTW en el entorno de simulación

Estas gráficas muestran la tendencia de la distancia relativa entre VP y FP frente al total de muestras, y más concretamente la distancia que existe entre ambos valores absolutos. Los valores positivos indican que la detección de VP supera en número a la de FP y los valores negativos indican que los FP superan a los VP, todo ello para un valor de similitud de corte concreto.

Dado que el objetivo es buscar un punto de clasificación óptimo, se establece que el mejor valor de similitud que se puede usar es aquel para el que los VP superan a los FP en un valor máximo, pero de manera relativa al total de muestras, es decir, el valor de similitud que ofrece un valor de Precisión máximo.

El resultado óptimo que hemos definido se puede determinar con claridad en las gráficas como un máximo absoluto. Además, este máximo se puede diferenciar claramente de los valores vecinos, para garantizar así una buena selección del valor máximo. Si se analizan las gráficas de *Precisión*, se puede observar que sólo en los casos de los métodos HP y DTW el máximo absoluto está separado del valor de similitud de corte de 0.99. En el método HP se tiene un conjunto de puntos relativamente difuso donde se localiza el máximo, entre 0.87 y 0.94. El método DTW es de nuevo el que proporciona un máximo claro, en el punto 0.97, aunque con una proximidad importante con respecto a los valores colindantes.

Así pues, los valores obtenidos con esta fórmula de precisión aportan una mayor efectividad en cuanto a los VP de las similitudes consideradas, a costa de disminuir ligeramente el RVP en relación a la disminución que se obtiene del RFP.

En último lugar, se ha considerado el coste de computación de cada método de los propuestos. En los experimentos iniciales estos datos no son relevantes, pero en un caso de trabajo real, en el que se deben realizar muchos cálculos, puede resultar un factor determinante. Los tiempos que se han tomado para cada algoritmo en el cómputo de la similitud cruzada de todas las señales se muestran en la Tabla 9.

	COS	XCOR	DEN	AvB	HP	DTW
Tiempo (h:min:s)	0:28:10	0:40:15	0:31:26	0:35:28	0:57:14	5:28:58

Tabla 9. Tiempos de ejecución de cada algoritmo en el entorno de simulación.

Esta nueva información aporta datos relevantes para la toma de decisiones con respecto al mejor método de similitud. Si se tiene en consideración no sólo la efectividad del método, sino que el rendimiento temporal es un elemento clave (como así sucede en entornos de trabajo real en estas situaciones (Figueiredo et al. 2001)), el método DTW no puede ser utilizado debido a la gran cantidad de tiempo que consume. El método que mejores resultados ofrece es, a su vez, el más simple, y corresponde al COS. El cálculo de DEN también está en unos valores temporales muy similares al del COS, los métodos AvB y XCORR se alejan de un tiempo optimo, y el método HP queda ya a una distancia considerable del mejor caso.

En resumen, los valores de similitud obtenidos y los ratios de acierto que hemos conseguido con los métodos de extracción de señal y de cálculo de similitud estudiados son muy bajos, a la vez que los ratios de falsos positivos son muy elevados, si se comparan con los resultados obtenidos por otros autores y que se han presentado en el Capítulo 3. Sin embargo, este experimento no es suficiente para determinar si los procedimientos empleados en todo el proceso del cálculo de similitudes y comparación de señales son adecuados o no, puesto que no se han aplicado al caso de vehículos reales. Por este motivo se ha realizado un segundo experimento, descrito en la siguiente sección, en el que se aplica la misma metodología a vehículos reales en un entorno controlado.

La explicación del bajo ratio de acierto en la re-identificación se encuentra fundamentalmente en dos hechos. Por un lado, la variación que existe entre las señales correspondientes a diferentes configuraciones magnéticas es muy pequeña, lo que hace aumentar la posibilidad de cometer un error de tipo falso positivo. Por otro lado, existe la posibilidad de que distintas configuraciones físicas del tetraedro en el experimento generen variaciones del campo magnético similares, lo que de nuevo aumenta la posibilidad de que aparezcan errores de tipo falso positivo. En cualquier caso, lo que sí que es relevante e independiente de los objetos monitorizados es el dato obtenido sobre los tiempos de cálculo que necesitan los métodos de comparación. Esta información permite valorar el coste computacional de los métodos empleados y se puede comprobar cómo los métodos que mejores resultados ofrecen, tal y como se ha mostrado en el estudio de la literatura, son los más costosos. Aunque este hecho habrá que confirmarlo en el siguiente experimento, abre una línea de investigación para buscar métodos de comparación que utilicen como base las medidas de similitud menos costosas, como la fórmula del coseno.

## 4.4.4. Resultados experimentales en el entorno de pruebas controlado

### 4.4.4.1. Selección de datos experimentales y procedimiento

En el entorno de pruebas controlado se ha realizado un experimento en el que se han utilizado 30 vehículos de distintas marcas y modelos que se han hecho pasar de forma controlada sobre un sensor AMR dispuesto sobre la superficie del asfalto, en una posición centrada debajo del vehículo.

Cada vehículo ha pasado 6 veces sobre el sensor, a distintas velocidades, pero siempre a velocidades bajas (inferiores a los 25 Km/h). Todas las pasadas de un mismo vehículo se han realizado de forma consecutiva y en el mismo día, para asegurar unas condiciones de temperatura y ambientales muy similares. Esto ha permitido obtener un total de 180 señales. Con ellas se ha obtenido un matriz cuadrada de 180 filas y columnas con datos de similitud para cada método. Se puede ver un ejemplo de los valores de similitud obtenidos entre varios pasos en la Tabla 54, en el **Anexo II. Muestra de datos de similitud**.

### 4.4.4.2. Pruebas de extracción de la señal

El procedimiento de extracción de la señal ha replicado el proceso desarrollado para el entorno de simulación que se ha descrito en la sección 4.4.3. Se ha pretendido, de nuevo, parametrizar empíricamente los métodos de pre-procesamiento de segmentación de la señal.

En el entorno de pruebas controlado se esperaba obtener señales más complejas en lo que a la forma de onda se refiere y con más número de muestras. También se esperaba obtener señales que tuviesen una amplitud inferior a las del entorno de simulación, puesto que el sensor se situó más alejado del objeto móvil. En la Figura 52 se muestra un ejemplo de una señal obtenida para un vehículo real en el entorno de pruebas controlado.

A diferencia del entorno de simulación, hemos comprobado que esta señal posee una forma de onda más compleja, donde todas las componentes tienen más picos y valles. Las amplitudes de las señales son inferiores en el caso de vehículos reales

debido a la distancia de separación entre el sensor y el vehículo. Además, el tamaño de las señales en términos de muestras son mayores debido al tiempo que el vehículo se encuentra dentro del alcance del sensor.

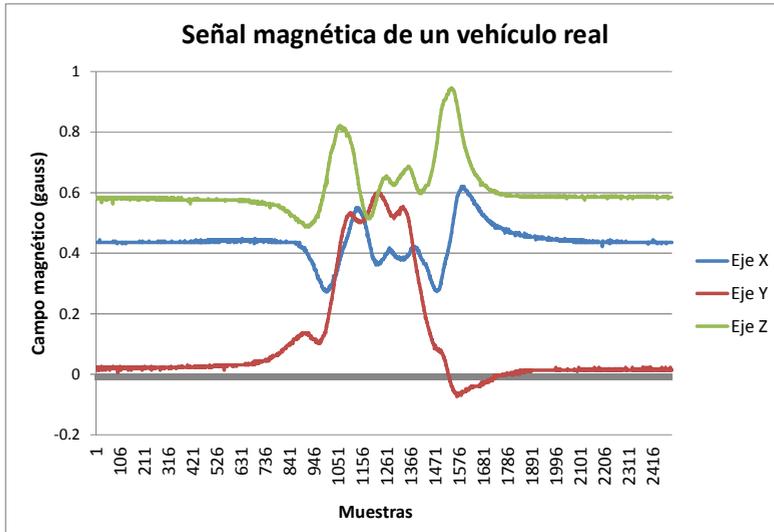


Figura 52. Ejemplo de señal magnética obtenida en el entorno de pruebas controlado

Siguiendo el mismo proceso que en el entorno de simulación, establecido en la sección 4.4.3, el procedimiento empezó con el cálculo de la línea base de cada una de las componentes de las señales de prueba seleccionadas. La definición de la cantidad del valor de muestras que se precisan para obtener una buena línea base se realizó usando el mismo procedimiento y criterio que en el caso del entorno de simulación. En este caso, se obtuvo que el promedio del valor de  $n$  redondeado es 44, por lo que se podría fijar inicialmente un número de muestras ligeramente superior a este valor para aplicar la fórmula del cálculo de la línea base. No obstante, teniendo en cuenta que las señales tienen más cantidad de muestras en este caso, se consideró que el valor obtenido es una cota inferior y se estableció un valor más alto, que proporcionase más fiabilidad. Siguiendo este criterio, se fijó el valor de muestras en 100.

A continuación se procedió a realizar los cálculos para parametrizar la fórmula de suavizado. También se aplicó el mismo criterio que en el entorno de simulación y se realizó un análisis de la variación de la similitud entre las señales original y

suavizada. Sin embargo, en este caso los resultados obtenidos no fueron similares a los del experimento en el entorno simulado. Para vehículos reales a baja velocidad, mientras las variaciones de la similitud en las señales X e Y son prácticamente inapreciables para valores de suavizado entre 1 y 99, las variaciones en la similitud de la señal Z son mucho más significativas, tal y como se puede apreciar en algunos casos representados gráficamente en la Figura 53.

Tampoco se aprecia ningún máximo relativo en las gráficas, por lo que no fue posible aplicar el mismo criterio de suavizado del entorno de simulación. Se recurrió entonces a la utilización de un criterio absoluto que permitiese conservar la forma de la señal de manera razonable con un suavizado que eliminase el ruido blanco. Se estableció para ello el criterio de que la señal suavizada y la original debían mantener una similitud (usando la similitud del coseno) superior al 99%, y se buscó en la componente Z este conjunto de condiciones para todas las muestras de prueba. Con este procedimiento, se calculó que el valor promedio de suavizado en la componente Z que cumplía el criterio era 64.8, con lo que se estableció que el número de muestras para realizar el suavizado en 65.

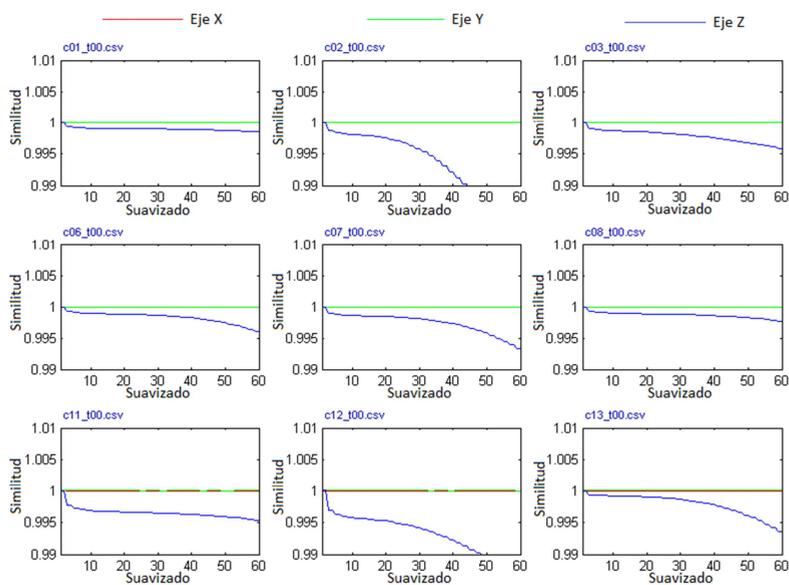


Figura 53. Evolución de variaciones de la similitud en función del nivel de suavizado para señales del entorno de pruebas controlado

Una vez las señales fueron suavizadas y alineadas a la línea base, se procedió a la realización de los cálculos para obtener los parámetros de las ecuaciones que permitieron la segmentación de la señal. Se analizaron algunas características básicas de las componentes de las señales, y los datos obtenidos se presentan en la Tabla 10.

Respecto a la energía media de cada componente de la señal por número de muestras, se confirmó que los valores eran inferiores al entorno de simulación. En este entorno la componente Y es la que menos energía aporta en término promedio, mientras que a diferencia del entorno de simulación es la componente X la que más energía contiene.

También se observó que el tamaño de las componentes de las señales en términos de su número de muestras era mucho mayor. Este valor depende exclusivamente del tiempo que el objeto se encuentre dentro del alcance del sensor y a velocidades bajas los vehículos pueden estar varios segundos en esta situación. Esto permitió obtener señales con más precisión en términos del número de muestras.

	Componente X	Componente Y	Componente Z
Energía media por muestra	0.0086	0.0130	0.0204
Número medio de muestras	1352	1075	1211
Energía media	0.0140		
Nº de muestras iniciales para alcanzar la energía media	51.3594	51.5156	51.7083
Nº de muestras finales por debajo de la energía media	53.0573	52.7708	53.8906

*Tabla 10. Datos característicos de las señales de prueba en el entorno de pruebas controlado*

Se calculó también la media de las energías por muestra de todas las señales componentes, lo que supuso en este experimento un valor de 0.0140, que es un valor aproximadamente 4 veces inferior al entorno de simulación debido a, como se ha explicado anteriormente, la distancia del sensor con los vehículos.

Se realizó, a continuación la estimación del número de señales que eran necesarias al principio de la señal para llegar a obtener la energía media por muestra en cada componente. Los resultados se muestran en la 4ª fila de la Tabla 10. Se aprecia que los valores están entre 51 y 52, igual que en el entorno de simulación. De igual modo, se calculó el número de muestras necesario para encontrar el final de la señal, utilizando el mismo procedimiento, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la quinta fila de la Tabla 10, es decir, se encuentran entre 52 y 54.

Los datos correspondientes al número de muestras se consideran un límite superior, con lo que se puede elegir un valor de muestras ligeramente inferior a los valores encontrados. En este caso, el número de muestras se estableció en 50 tanto para la detección del comienzo como del final de la señal, un valor idéntico al que se obtuvo en el caso de la simulación.

A continuación se normalizaron las señales en número de muestras y amplitud. Dado el promedio del número de muestras obtenido, se decidió re-muestrear la señal a 1000 muestras para normalizar en tamaño. La normalización en amplitud se realizó con un escalado de las componentes de forma individual al intervalo  $[-1, 1]$ . En la Figura 54 se puede ver un caso de extracción de la señal para un vehículo.

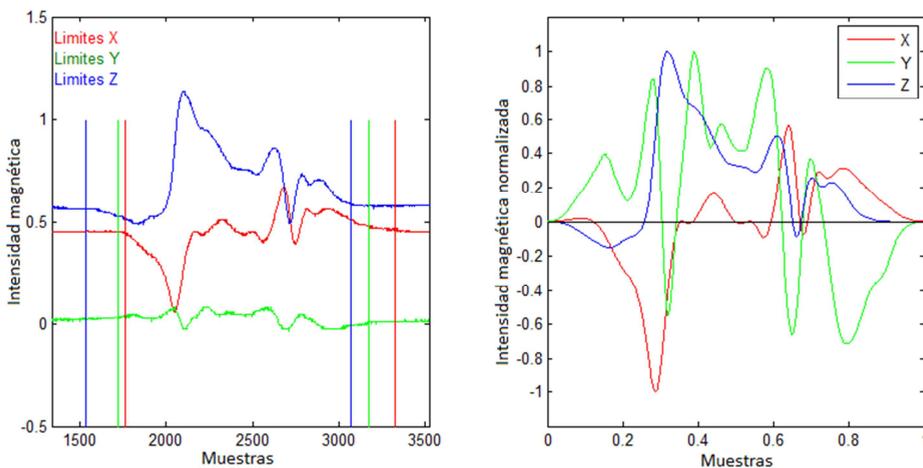
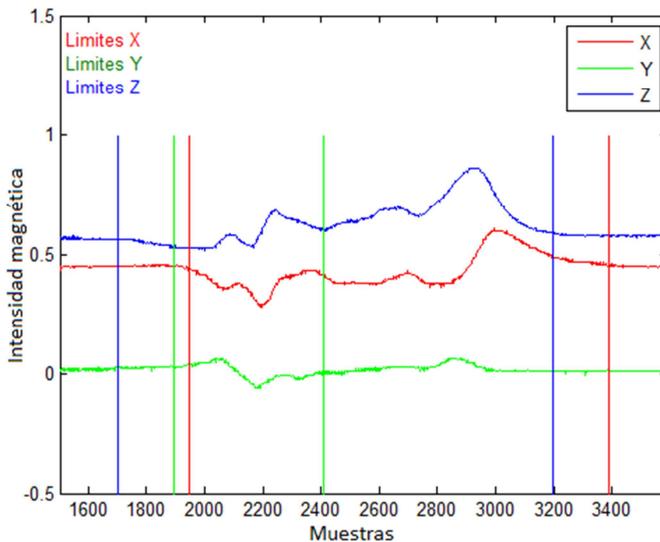


Figura 54. Ejemplo de extracción de señal de vehículo real

La imagen de la izquierda representa la señal en bruto, con los límites obtenidos para cada una de las componentes; la imagen de la derecha representa las señales

extraídas, suavizadas, ajustadas a la línea base y normalizadas. De forma paralela, también se normalizaron las señales de forma conjunta al intervalo  $[-1, 1]$  para que se pudieran utilizar en las medidas de similitud que son dependientes de la amplitud de las señales.

Por último, se comprobó si la parametrización funcionaba con todos los casos propuestos, es decir, las 180 mediciones realizadas. Para ello se comprobó si existían algunos casos en los que no se detectaba bien el final de la señal. La Figura 55 muestra uno de los casos en el que se produjo un error en la detección de una de las componentes.



*Figura 55. Ejemplo de error en la extracción de señal de vehículo real*

Esta situación se debe a que la componente de la señal que no ha sido detectada correctamente se ha aproximado a cero durante un tiempo suficientemente largo como para que el algoritmo interprete que la señal ha finalizado. Además, la energía acumulada para el número de muestras está por debajo del umbral.

Para resolver este problema existen varias alternativas. Una de ellas consiste en disminuir el umbral o aumentar el número de muestras que deben cumplir la condición de que la energía acumulada se encuentre por debajo del umbral. Esta

alternativa es la más conveniente si se desea realizar un tratamiento diferenciado de cada una de las componentes. No obstante, la casuística de las señales es muy diversa e impredecible, con lo que aun aplicando un método experimental para fijar el nuevo umbral o el nuevo número de muestras, no existe la garantía de que se detecten todas las señales. En cualquier caso, es preferible disminuir el umbral de energía a variar el número de muestras, con el fin de evitar situaciones de superposición de señales correspondientes a distintos vehículos que pasan muy seguidos por encima del sensor. Experimentalmente se constató que para las 180 señales obtenidas, la disminución del umbral en un 50% permitía eliminar todos los errores de detección.

La segunda alternativa a tener en cuenta para evitar los fallos de detección del final de las señales componentes consiste en considerar la señal de forma completa, de manera que las 3 componentes intervengan en el cálculo de la energía, tal y como se muestra en la expresión ( 7 ). De esta forma, la probabilidad de que se produzca una situación de cercanía al cero para las tres componentes a la vez disminuye considerablemente en los casos en los que la geometría del objeto no sea la causante de dicho comportamiento.

Además, esta forma de extraer la señal marca un límite único para las 3 componentes, lo que puede ser beneficioso en el cálculo de la similitud entre objetos. Las señales componentes no son independientes entre sí respecto a su posición en dominio temporal, y tratarlas de forma separada en los cálculos de similitud puede generar errores de tipo falso positivo. Si se consideran las 3 señales componentes en el cálculo de la similitud, manteniendo las ligaduras temporales que presentan, se deberían obtener mejores resultados. En cualquier caso, esta hipótesis será tratada posteriormente.

Cuando se consideraron las 3 señales componentes al mismo tiempo, se calculó que la energía media de la señal para las mediciones de prueba era de 0.0355. Con este valor se estimaron las muestras necesarias para alcanzarlo al comienzo de la señal, en promedio, y se obtuvo como resultado 71.0781. Con el mismo umbral se calculó el número de muestras que estaban por debajo del mismo desde el final de la señal hacia atrás, y se obtuvo el resultado de 79.8490. Con estos datos se fijó un valor umbral de energía de la señal de 0.035 para la detección de ambos extremos de la señal, y un número de muestras de 75 para el comienzo de la señal y 85 para el final. Para concluir, se verificó que estos parámetros permitían la segmentación de todas las señales de forma satisfactoria sin ningún error.

#### 4.4.4.3. Pruebas de re-identificación

En esta sección se seguirá un esquema idéntico al usado en el entorno simulado (sección 4.4.3.3) para comparar los resultados de los cálculos de similitud entre ambos entornos. Dado que en la sección 4.4.1 ya han sido explicadas las medidas de similitud y su objetivo, en este apartado sólo se mostrarán los resultados obtenidos del experimento en el entorno de pruebas controlado.

En el experimento planteado disponíamos de 6 señales distintas por objeto, con 30 objetos pasando sobre el sensor (180 señales). En primer lugar realizamos una tabla cruzada de comparaciones de todas las señales entre ellas para todos los métodos de cálculo de similitud, y para cada método y señal obtuvimos las 5 señales que más se ajustaban a cada una de ellas, determinando el objeto al que pertenecían, lo que daba un número máximo de 900 aciertos. Posteriormente se determinaron cuántos de esos objetos correspondían a la señal objetivo que se estaba estudiando (eran el mismo objeto), obteniendo de esta manera un ratio de aciertos y fallos que queda reflejado en la Tabla 11, junto con los valores de similitud máximos y mínimos que se obtuvieron.

Método	Similitud Máxima	Similitud Mínima	Aciertos	Porcentaje de Acierto	Porcentaje de Error
COS	0.998477	-0.5019	655	72.78%	27.22%
XCOR	0.998576	-0.4940	684	76.00%	24.00%
DEN	0.971980	0.1209	661	73.44%	26.56%
AvB	0.998568	-0.5991	664	73.78%	26.22%
HP	0.943834	-0.4837	579	64.33%	35.67%
DTW	0.975415	0.2279	811	90.11%	9.89%

*Tabla 11. Resumen de datos de similitud para los distintos métodos en el entorno de pruebas controlado*

En este entorno de pruebas controlado, los porcentajes de acierto aumentaban de forma generalizada para todos los métodos con respecto al entorno de simulación. Esto se puede deber a que existe una mayor diferencia entre las formas de las

señales correspondientes a diferentes objetos sensorizados. Las diferencias entre los distintos métodos, por tanto, disminuyeron, y los valores que se obtuvieron a nivel individual estaban más acordes con lo que la literatura muestra al respecto. De igual modo, los valores de los porcentajes de error también disminuyeron, como era de esperar.

De todos los métodos considerados, el DTW fue el que mejores resultados ofreció, al igual que en el entorno de simulación. Sin embargo, a pesar de que el XCOR es el siguiente mejor método, no hay una clara diferenciación con respecto al resto. También el método HP continuó siendo el peor de los métodos propuestos.

Al analizar los resultados se observa un detalle importante con respecto a los valores obtenidos de similitud. Algunos métodos como el COS, XCOR y AvB proporcionan valores de similitud máxima muy próximos a 1, mientras que en el caso HP, DEN y DTW estos valores máximos quedan más alejados. En particular, contrasta que el método DTW ofrece mejores porcentajes de acierto, pero no es capaz de obtener similitudes próximas a 1. Los valores de similitud mínima también se mantienen de forma generalizada, aunque en el caso del DTW este valor disminuye, lo que amplía el rango de valores de similitud para este método y facilita la labor de encontrar un valor umbral para clasificar aciertos y fallos.

Las mejoras de los resultados con respecto al entorno de simulación se deben a que las señales correspondientes a vehículos reales son más complejas que las que generan los tetraedros magnéticos. Pero además, no sólo influye en ello la complejidad de las señales, sino también su tamaño. Esta complejidad hace que existan más diferencias entre un tipo de señales y otras. El tamaño de las señales permite, a su vez, que existan más elementos de comparación y la capacidad de discriminación aumente.

En este punto es necesario considerar que en un escenario real las señales con las que hay que trabajar deben ser lo suficientemente complejas y tener el suficiente número de muestras como para poder llegar a obtener valores significativos de similitud con capacidad discriminante. Si se analizan los histogramas de los valores de similitud que se obtuvieron en el experimento, mostrados entre la Figura 56 y la Figura 61, se puede confirmar que en el escenario que trabaja con vehículos reales la capacidad de discriminación de las medidas de similitud mejora con respecto al caso del entorno simulado. Esto se puede observar en los casos en los que la similitud se aproxima al valor de 1: existe una agrupación de casos con similitudes

próximas al valor 1, separados por un valle de un grupo mayor de datos con similitudes que se alejan del valor 1.

Por ejemplo, en la medida COS, se observa que las similitudes parecen seguir una distribución normal con la excepción de los valores próximos a 1. En esta zona hay un conjunto de valores de similitud que se sale de la distribución normal, debido obviamente a que existen un número de casos en los que la similitud es elevada porque se están re-identificando vehículos. Esta situación se repite en las medidas XCOR y AvB y se aprecian muy ligeramente en las medidas DEN y DTW. Esto parece indicar que los métodos COS, XCOR y AvB tienen una capacidad de discriminación mayor que DEN y DTW a pesar de que los resultados de los porcentajes de acierto no sean mejores.

La explicación a este hecho se puede buscar en la naturaleza de los métodos. El DTW es un método adaptativo, que trata de buscar la mejor correlación posible entre 2 señales, mientras que XCOR es menos flexible en la adaptabilidad, y COS y AvB carecen por completo de esta capacidad. Esto sugiere que si se investiga un método de adaptación de las señales y posteriormente se aplican alguno de los métodos XCOR, COS y/o AvB se podrían obtener medidas más simples y con mayor capacidad de discriminación. Esta investigación se llevó a cabo en este trabajo de investigación en posteriores etapas y se documenta en el Capítulo 5.

Una diferencia importante de los histogramas obtenidos aquí para el entorno de pruebas controlado en comparación con el entorno de simulación es que todos siguen una distribución normal (cada método con diferente media y desviación típica). Esta característica denota que la variedad de señales que se obtuvieron en el entorno de pruebas controladas frente al entorno de simulación fue mayor a pesar de que el número de objetos con los que se trabajó era menor.

Por otro lado, en la parte de los histogramas que corresponden a los valores máximos de similitud, el comportamiento de cada modelo es diferente. La tendencia creciente de la gráfica en esta zona es más acusada en unos modelos que en otros. Se puede realizar la hipótesis de que en los modelos donde la tendencia creciente es mayor, y hay más distancia en los valores de similitud de esta zona y los que quedan dentro de la zona que abarca la distribución normal, la capacidad de discriminación del modelo será superior y el umbral podrá ser definido dentro de un rango más amplio, es decir, con mayor tolerancia al fallo.

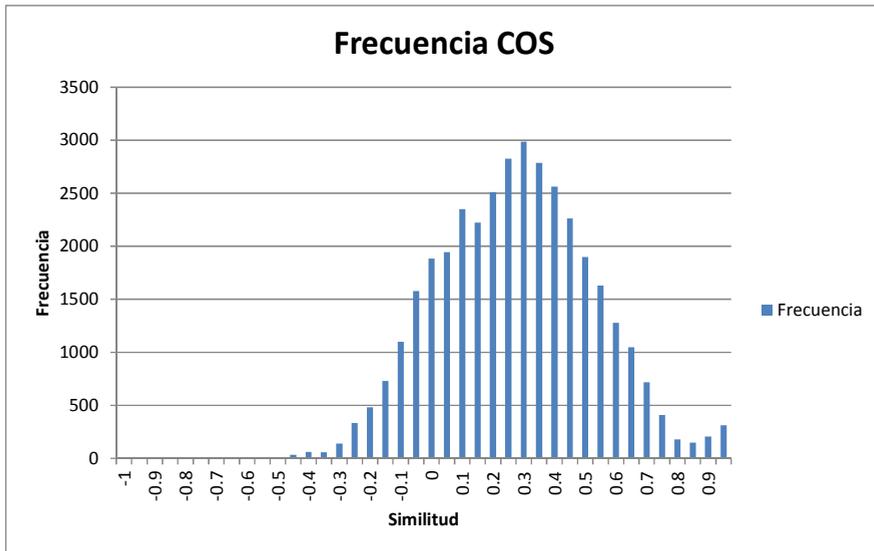


Figura 56. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado

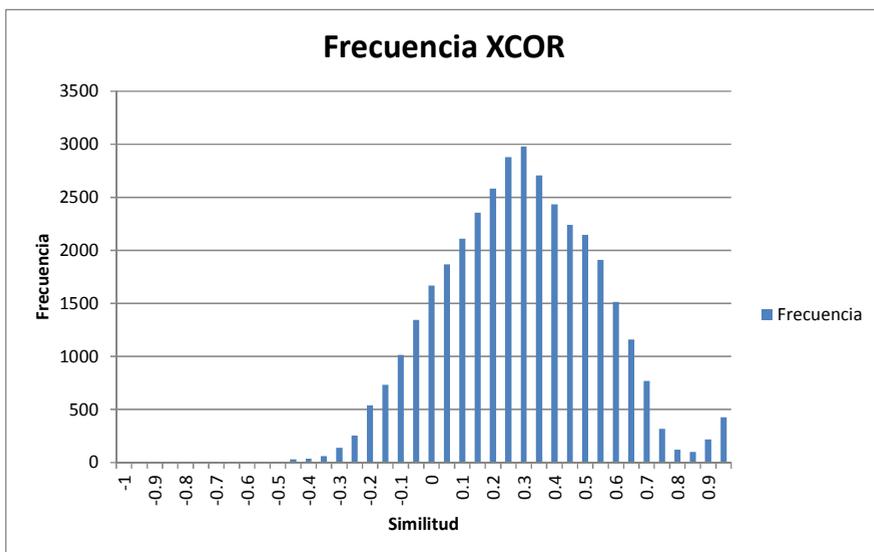


Figura 57. Histograma de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de pruebas controlado

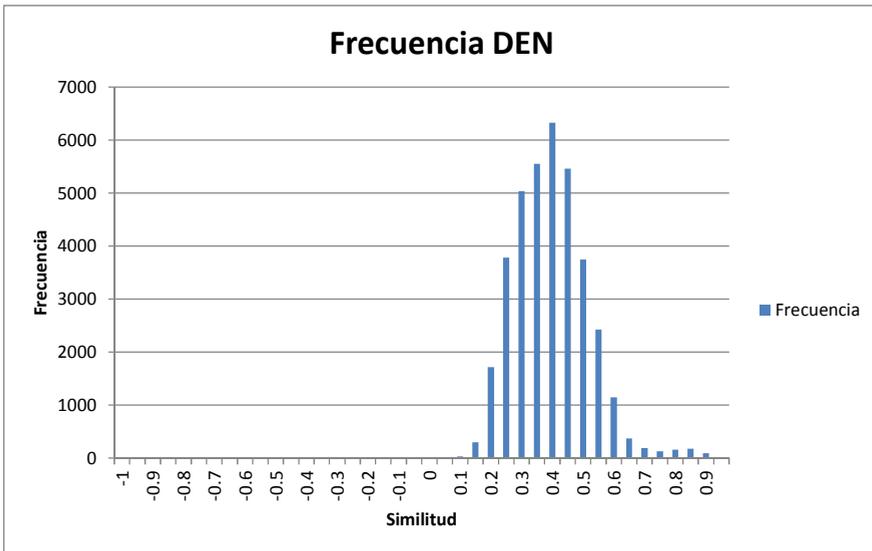


Figura 58. Histograma de Similitudes para el modelo de Distancia Euclídea en el entorno de pruebas controlado

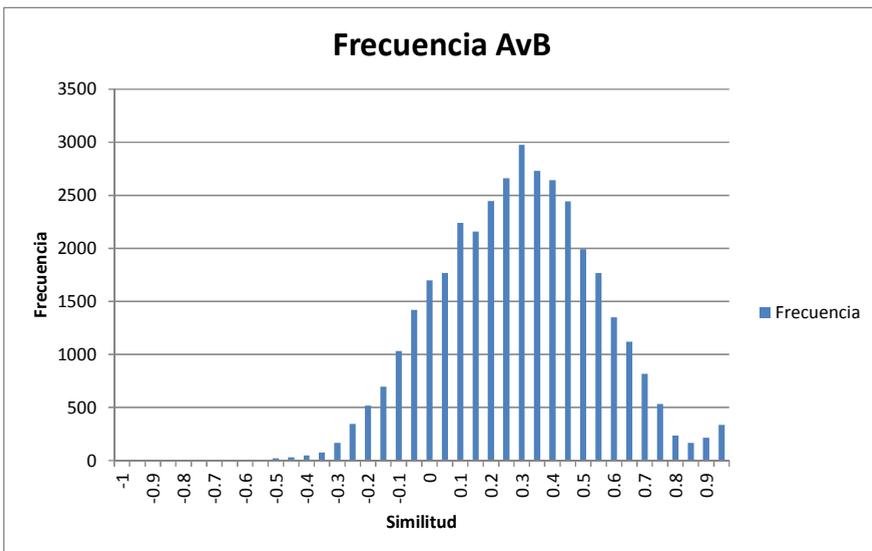


Figura 59. Histograma de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de pruebas controlado

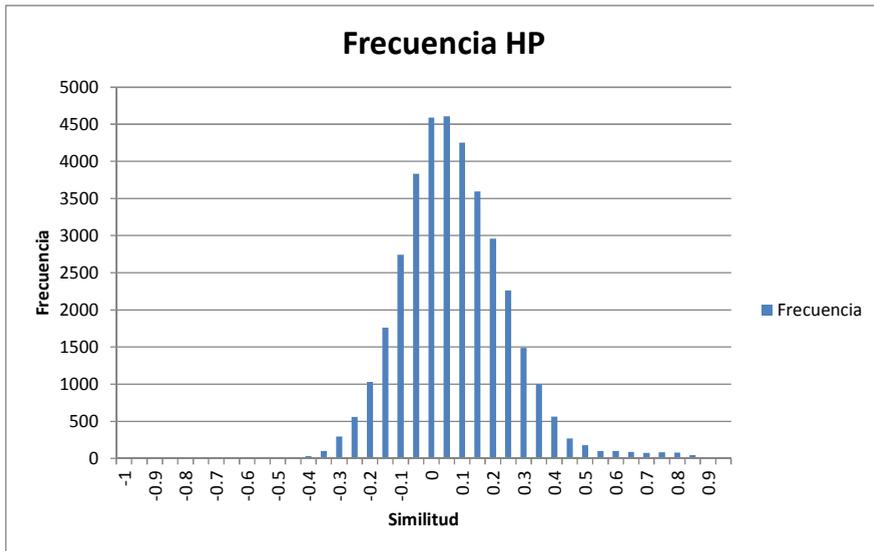


Figura 60. Histograma de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de pruebas controlado

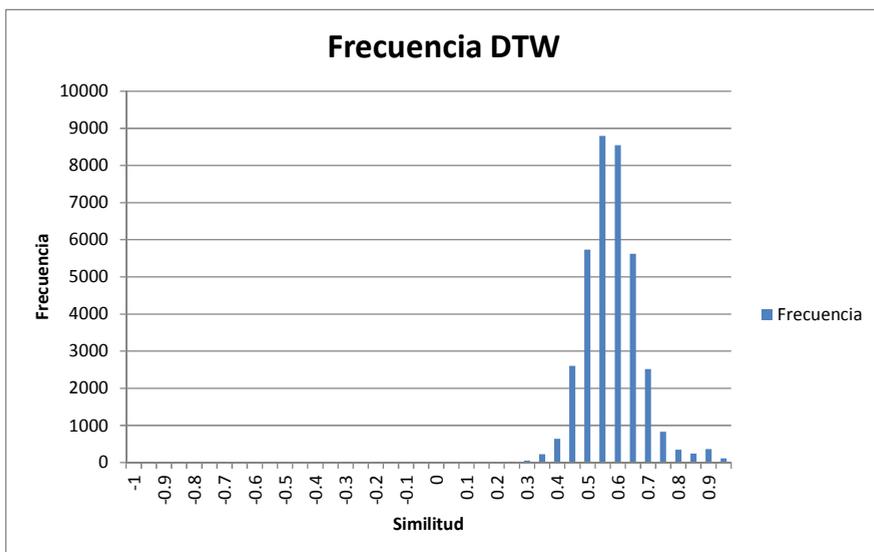


Figura 61. Histograma de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de pruebas controlado

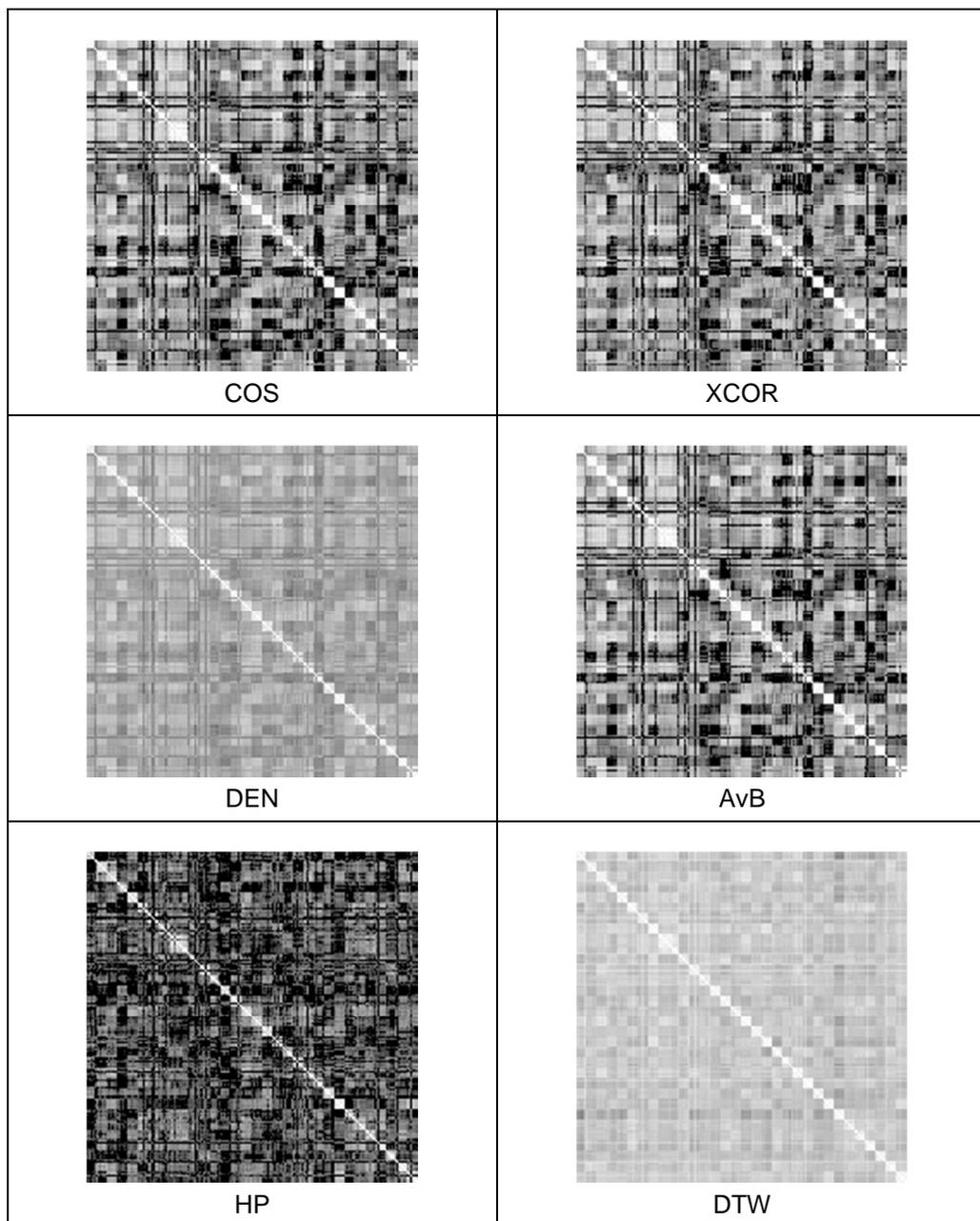


Tabla 12. Representación gráfica de las matrices de similitud para el entorno de pruebas controlado

Otra forma de percibir la capacidad de re-identificación y de discriminación de cada método es a través de los mapas de similitud en escala de grises que se pueden observar en la Tabla 12. Estos mapas de similitud se construyeron de la misma forma que en la sección 4.4.3.3. En todos los gráficos se puede apreciar que la diagonal principal tiene un color bastante más claro que para el resto de posible valores. En esta diagonal aparecen cuadros que contienen los 6 valores de similitud para un mismo vehículo.

Las gamas de tonos de cada gráfico también reflejan los datos que se han mostrado en los histogramas. La imagen correspondiente al DTW, de nuevo, presenta poco contraste, lo que es un indicativo de la poca dispersión de valores de similitud. Esto afecta a la capacidad de discriminación del método, que debe ser más preciso a la hora de fijar un valor umbral de similitud para la re-identificación positiva. Lo mismo sucede con el método DEN, aunque en este caso la diagonal principal parece contener más perturbaciones (más falsos negativos). El resto de gráficas poseen más contraste y se sigue apreciando en ellas la diagonal principal con un color más claro destacado notablemente del resto de datos.

Como no se puede valorar cualitativamente la bondad del método a través de un examen visual, recurrimos de nuevo al uso de las curvas ROC para observar el comportamiento de cada medida en cuanto a su capacidad de clasificación. Las gráficas correspondientes a estas curvas para cada método se pueden ver desde la Figura 62 a la Figura 67.

El análisis de las curvas ROC muestra claramente que hay un modelo muy superior a los demás: el DTW. Su capacidad de mantener un RFP próximo a cero y llegar a valores del 80% de RVP, junto con el hecho de que a partir del 20% de RFP se obtengan valores del 98% de RVP lo lleva a un comportamiento muy próximo al ideal.

El resto de métodos se comportan de un modo similar, y muy alejados del comportamiento del DTW. Tan solo merece la pena destacar el comportamiento del XCOR que supera al resto de métodos dado que la separación del RFP de cero tiene lugar para valores de RVP por encima del 75%, lo que en la práctica significa que es posible obtener mayor número de aciertos sin introducir ningún falso positivo, aunque el ratio de aciertos no esté próximo al 100%.

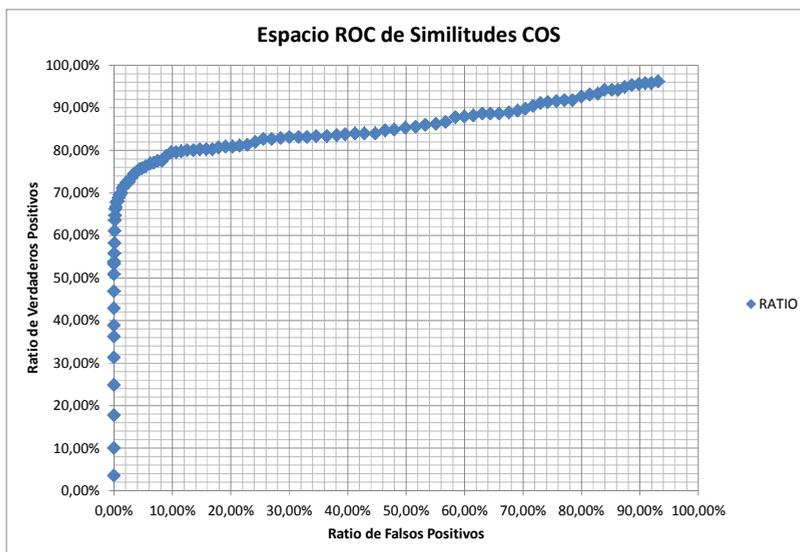


Figura 62. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado

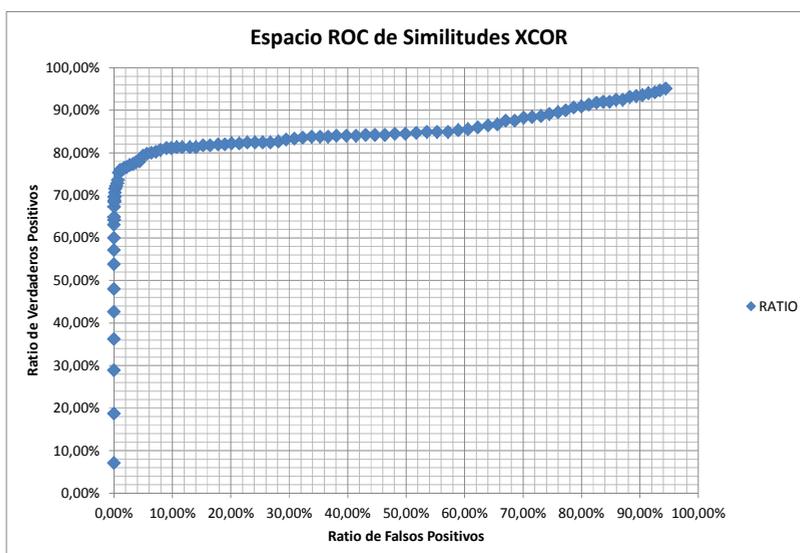


Figura 63. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de Correlación Cruzada en el entorno de pruebas controlado

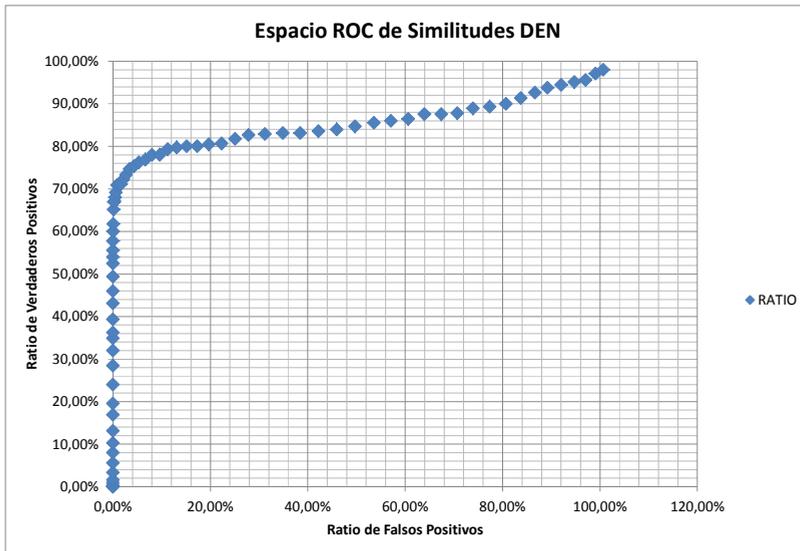


Figura 64. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de pruebas controlado

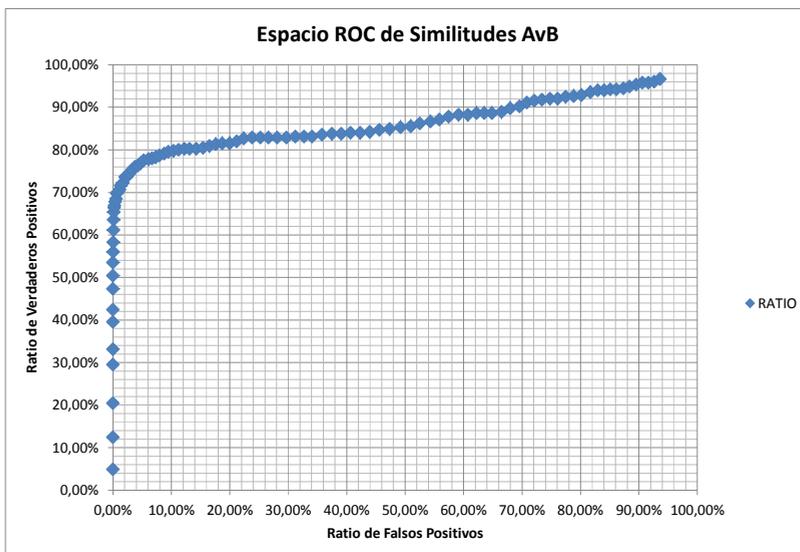


Figura 65. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Average Bar en el entorno de pruebas controlado

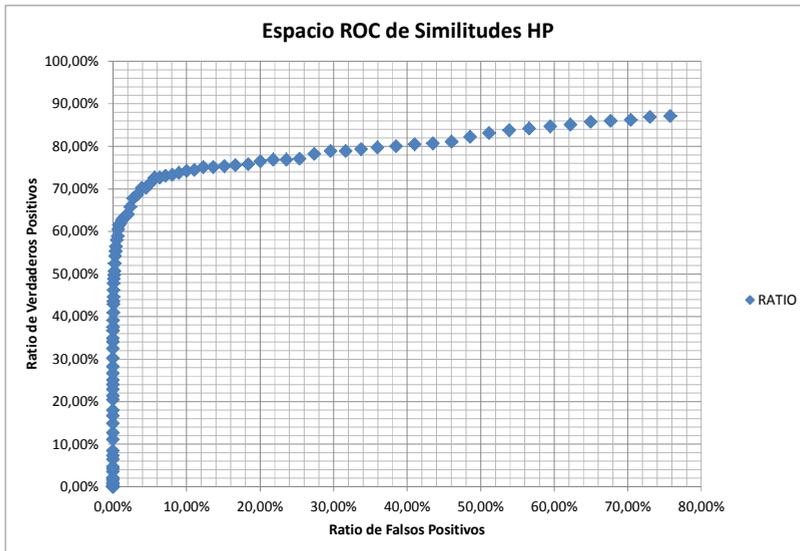


Figura 66. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo Hill Pattern en el entorno de pruebas controlado

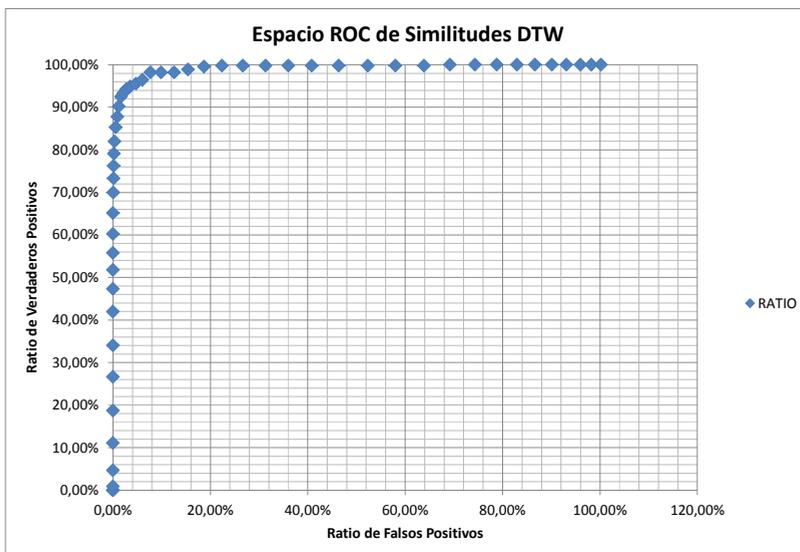


Figura 67. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes para el modelo DTW en el entorno de pruebas controlado

En cualquier caso, es necesario analizar objetivamente la bondad de cada método como clasificador atendiendo a la distancia mínima al punto (0,1) en las gráficas. En la Tabla 13 se puede apreciar cuáles son los valores analíticos relevantes obtenidos en este experimento para todos los métodos de similitud.

Método	Similitud	VP	FP	VP+FP	RVP	RFP	Distancia
COS	0.60	716	3331	4047	0.80	0.11	0.2510
XCOR	0.65	720	2007	2727	0.80	0.06	0.2100
DEN	0.55	714	3521	4235	0.79	0.11	0.2353
AvB	0.62	716	2966	3682	0.80	0.09	0.2253
HP	0.30	668	3134	3802	0.74	0.10	0.2765
DTW	0.74	854	1114	1968	0.95	0.04	0.0623

*Tabla 13. Detalle de los valores de similitud para los puntos óptimos de la Curva ROC en el entorno de pruebas controlado*

La superioridad del método DTW se aprecia al comparar las distancias al punto óptimo de todos los métodos. El valor de la distancia del resto de métodos es similar, pudiéndose destacar que el mejor de este grupo es el método XCOR, pero sin una gran diferencia con el resto.

Al igual que en el entorno de simulación y tal y como vimos en la sección 4.4.3.3, los puntos óptimos de clasificación ofrecen los mejores ratios de verdaderos positivos y falsos positivos de forma combinada, pero estas medidas computan valores relativos. Sin embargo, en términos de valores absolutos, el punto óptimo de clasificación ofrece unos errores importantes en cuanto a la cantidad de FP que se obtienen. En esta ocasión, el número de FP es bastante menor que en el entorno de simulación, pero aun así, tal y como se ve en la Tabla 14, los errores implícitos van desde un 130.44% en el mejor de los casos (DTW) hasta un 469.16% en el peor de ellos (HP). Esto significa que los errores producidos en el proceso de identificación son, como poco, del mismo orden de magnitud que los aciertos (y en general, superiores), y por tanto la efectividad de la re-identificación es muy baja (se produce al menos un error por cada acierto en el mejor de los casos).

Método	Similitud	VP	FP	ERROR
COS	0.60	716	3331	465.22%
XCOR	0.65	720	2007	278.75%
DEN	0.55	714	3521	493.14%
AvB	0.62	716	2966	414.25%
HP	0.30	668	3134	469.16%
DTW	0.74	854	1114	130.44%

*Tabla 14. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para cada método de similitud en el entorno de pruebas controlado*

Estas tasas de error siguen siendo inaceptables en un método de re-identificación como el que se está investigando, donde el número de FP debería ser pequeño en comparación con el de VP.

Recurriendo a la medida de precisión planteada en el escenario de simulación a través de la Ecuación ( 13 ), se procedió a calcular de manera más precisa un punto óptimo de clasificación, donde la diferencia entre VP y FP se maximizase de forma relativa con respecto al total de casos tratados.

Los resultados que se obtuvieron a través del cálculo de la ecuación de la precisión para todos los métodos de similitud se pueden ver reflejados en las gráficas que van de la Figura 68 a la Figura 73.

El punto óptimo en las gráficas es de nuevo el máximo absoluto. En este punto, el valor de las abscisas ofrece una idea de la capacidad diferenciadora del método en cada medida. Además, la forma del máximo indica la capacidad de discriminación, puesto que cuanto más abrupto sea el pico más fácil será discriminar aciertos y fallos.

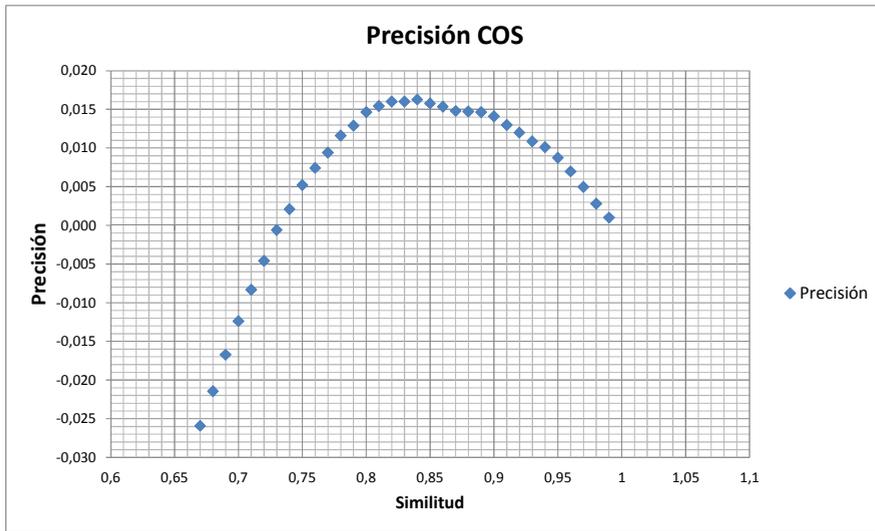


Figura 68. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado

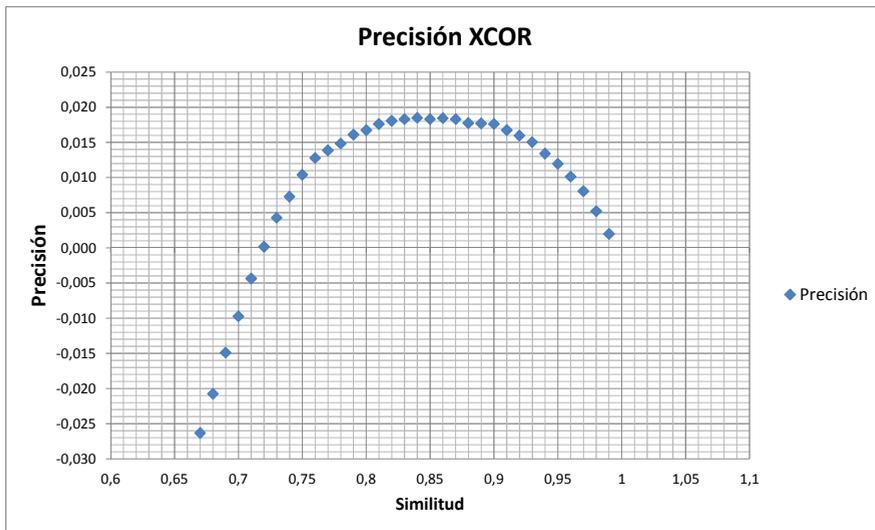


Figura 69. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Correlación Cruzada en el entorno de pruebas controlado

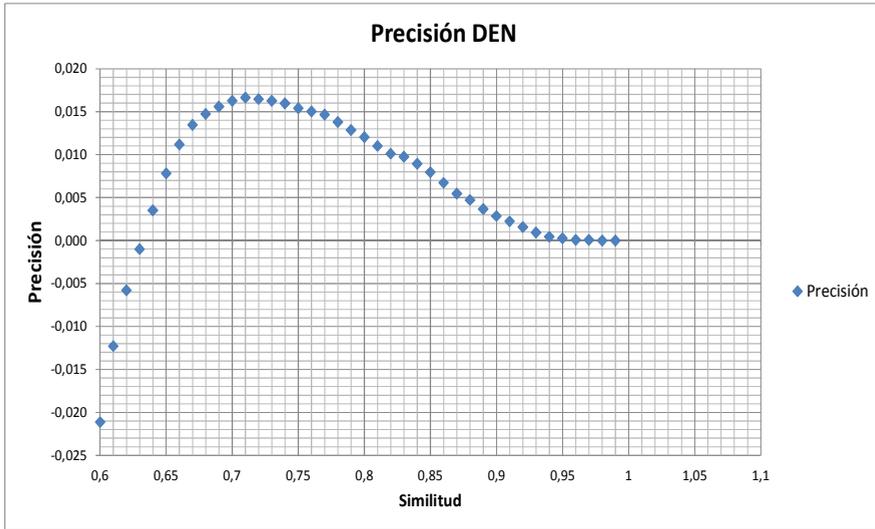


Figura 70. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo de la Distancia Euclídea en el entorno de pruebas controlado

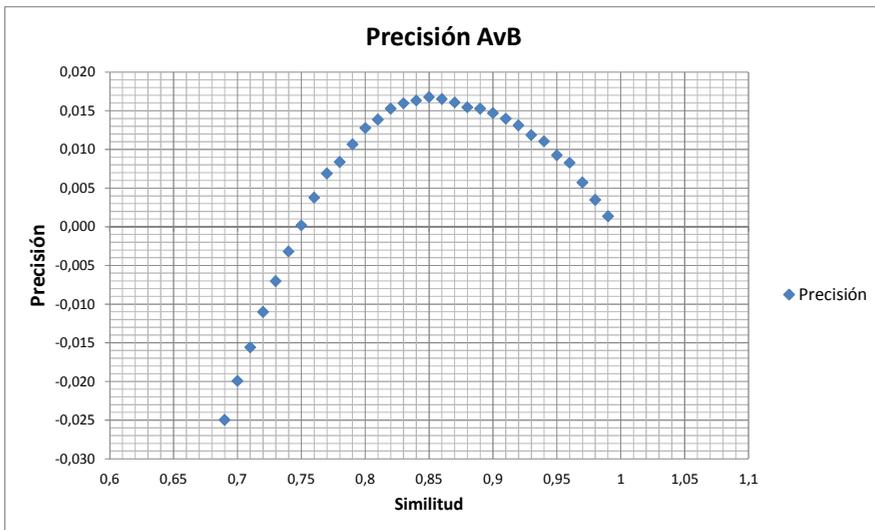


Figura 71. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Average Bar en el entorno de pruebas controlado

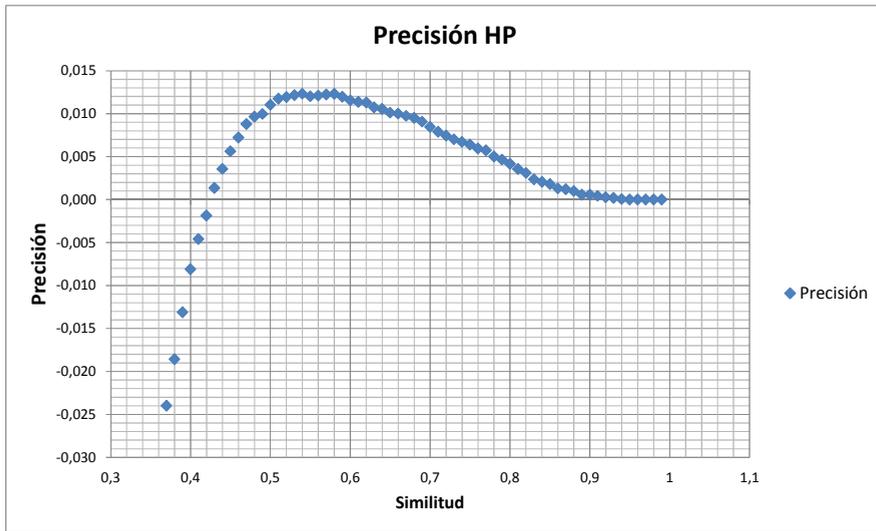


Figura 72. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo Hill Pattern en el entorno de pruebas controlado

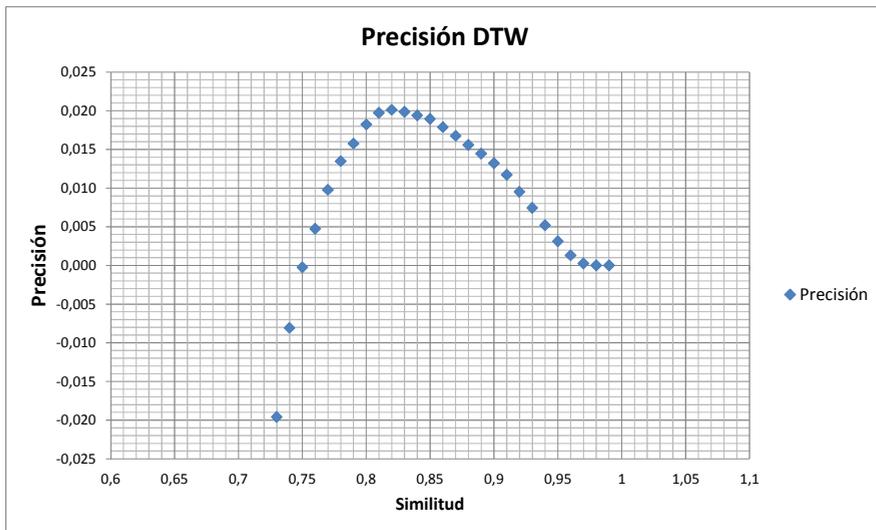


Figura 73. Gráfico de precisión de la similitud para el modelo DTW en el entorno de pruebas controlado

Atendiendo a estas condiciones, observamos que el método DTW ofrece en el punto de similitud 0.82 un máximo absoluto que es el más abrupto de los generados por todos los métodos. En este caso, el valor de la precisión se sitúa en 0.02. A diferencia de él, los peores métodos son el HP, el DEN y el XCOR, por tener unos máximos muy suaves. Además, en el peor de los casos (HP), existen muchísimos puntos por encima del umbral de similitud, lo que ofrece una relación de VP frente a FP muy baja.

Los métodos basados en la fórmula del coseno (COS, AvB) ofrecen buenos resultados por la forma abrupta del máximo, que se sitúa alrededor del valor 0.85 de similitud. En estos casos, además, el valor de la precisión supera el 0.025, lo que los hace más eficaces que el método DTW en este aspecto.

Por último, se analizaron los costes de computación de cada método, y al igual que en el entorno de simulación, se analizó el tiempo empleado por cada uno en calcular la matriz cruzada de similitudes. En la Tabla 15 se han reflejado estos tiempos.

	COS	XCOR	DEN	AvB	HP	DTW
Tiempo (h:min:s)	0:15:14	0:22:52	0:14:55	0:21:49	0:33:29	3:27:21

*Tabla 15. Tiempos de ejecución de cada algoritmo en el entorno de pruebas controlado.*

El método basado en el algoritmo DTW es desmesuradamente costoso frente al resto. El método computacionalmente más económico es el DEN, seguido muy de cerca por el COS, y el resto de métodos varían en un rango de coste superior al DEN entre un 50% y un 110%.

Esta medida de tiempo, frente a las otras, es la única que claramente no apoya la selección del algoritmo DTW como el mejor para su aplicación a la resolución del problema, puesto que su coste computacional es inaceptable.

En estas condiciones, y teniendo presentes los resultados de la efectividad de cada método, se puede afirmar que, si el tiempo no es un valor crítico pero si importante para el proceso de trabajo, el método XCOR es el más adecuado porque presenta

mejores valores de similitud y porcentajes de acierto, y el coste temporal con respecto al método más rápido es un 50% superior. Los mejores resultados de este método sobre los demás se deben a su capacidad de adaptar la posición de las muestras en el proceso de comparación de señales y realizar múltiples comparaciones en diferentes alineados de la señal. No obstante, lo ideal sería disponer de un método de alineado menos costoso que el que utiliza el XCOR y usarlo en combinación con alguno de los métodos de comparación menos costosos, como el DEN o el COS.

#### 4.4.5. Análisis de resultados y conclusiones

En este capítulo se han planteado dos objetivos: primero, la definición de una metodología de extracción de señales de sensores AMR de una forma justificada, en contraste con los métodos propuestos en la literatura que se ha analizado a lo largo del capítulo; segundo, el estudio de la capacidad de re-identificación de vehículos con los datos de los sensores AMR utilizando diferentes medidas de similitud, para contrastar las distintas alternativas propuestas en la literatura y que no se habían comparado hasta el momento.

Para cubrir estos objetivos, se ha realizado un estudio de los datos que se pueden obtener de un sensor AMR para la detección de objetos metálicos y/o magnéticos en movimiento, y de la capacidad de estos datos para ser utilizados en un proceso de re-identificación de objetos.

Se ha comprobado que cuando un objeto metálico se mueve en las inmediaciones de un sensor AMR se puede extraer información en forma de una serie temporal de datos que representan los valores del campo magnético medido en 3 ejes ortogonales con origen en la posición del sensor. Por tanto, cada objeto puede ser representado por 3 señales componentes ligadas en el tiempo.

Para estudiar el comportamiento de los sensores se han definido dos escenarios experimentales, un entorno de simulación y un entorno de pruebas con vehículos reales controlado, con el fin de validar los procedimientos y métodos propuestos para la extracción y uso de los datos relevantes que pueden aportar los sensores AMR. En ambos escenarios se han realizado los mismos experimentos para poder comparar los resultados y analizar la validez de los métodos en su futura aplicación al caso de re-identificación de vehículos circulando por autopistas.

La obtención de datos significativos de los sensores durante la medición de un objeto se ha abordado como un proceso de extracción o segmentación de la señal temporal. Tras un análisis de los métodos propuestos en la literatura, se ha decidido utilizar una aproximación basada en la energía de la señal, lo que permite identificar el principio y el final de la misma. En ambos casos, es necesario realizar un pre-procesamiento de la señal, establecer un número de muestras para calcular la energía acumulada de la señal y definir un valor umbral de energía que actúe de límite o disparador del proceso de detección.

Los procedimientos de pre-procesamiento han consistido en realizar un suavizado de la señal, una alineación de la línea base y una normalización en amplitud y número de muestras. El suavizado se ha realizado de forma distinta en los 2 entornos experimentales. En el entorno de simulación se ha descubierto que existe un punto óptimo de suavizado a través de la comparación de la señal original con la señal a la que se le aplican diferentes niveles de suavizado. Se ha comprobado que el parámetro de suavizado no afecta a la forma de la señal, puesto que proporciona una similitud entre la señal original y la suavizada superior al 95% en todos los casos, utilizando la medida de similitud del coseno. En el entorno de pruebas controlado, sin embargo, no se ha encontrado un punto óptimo de suavizado de manera tan clara, por lo que se ha seguido un criterio de selección del nivel de suavizado basado en garantizar un mínimo de similitud entre la señal original y la suavizada. Se ha comprobado que las variaciones de similitud entre la señal original y la suavizada de la componente Z son superiores al de las componentes X e Y, y se ha fijado un valor del 99% como límite de similitud entre la señal original y la suavizada en la componente Z, lo que ha permitido definir un nivel de suavizado que garantice este valor en promedio, manteniendo así la forma de la señal.

La determinación de la línea base se ha realizado a través de un proceso experimental en ambos entornos. Se ha buscado un valor de equilibrio en las señales componentes en los momentos en los que no había interferencia en las mediciones, y se ha determinado el número de muestras mínimo necesario para calcular el valor de la línea base que ofreciese una variación inferior a un umbral a partir de ese número de muestras.

La normalización de la señal en tamaño de muestras se ha realizado a través de un re-muestreado de la señal, teniendo en cuenta el promedio de muestras en cada entorno experimental. Este proceso es necesario para poder aplicar medidas de similitud que requieren considerar las señales como vectores de la misma

dimensión. La normalización en amplitud se ha realizado para hacer comparables los resultados de los métodos de cálculo de similitud testeados. Esta normalización se ha realizado de dos formas distintas: por un lado, de manera independiente para cada señal componente, y por otro lado de forma combinada para las 3 señales componentes. De este modo se garantiza que los métodos de similitud a los que les afecta la amplitud de la señal sigan siendo comparables con el resto al mismo tiempo que se conserva la dependencia que existe entre las 3 componentes de la señal correspondiente a un objeto.

La definición de los parámetros de segmentación se ha abordado como un proceso de calibración del sensor a través de un proceso experimental, en los 2 entornos propuestos. En el entorno de simulación, y trabajando por separado con cada señal componente, los parámetros de detección de inicio y final son iguales. En el entorno de pruebas controlado se han obtenido resultados similares durante la calibración; sin embargo, al aplicar el método de segmentación con los parámetros obtenidos al conjunto completo de señales, se ha constatado que se producen errores de detección del final de la señal. Para resolver este problema se han propuesto dos alternativas. Una de ellas ha consistido en cambiar los parámetros de detección de final de la señal, haciéndolos más restrictivos que para la detección del principio, lo que permite concluir que es necesario ser más preciso en la detección del límite final de la señal que en la detección del comienzo. Esta alternativa es aplicable al caso de la detección de las componentes individuales. La segunda alternativa que se ha propuesto para detectar el final de la señal sin errores cuando no es necesario distinguir entre las señales componentes ha consistido en calcular la energía acumulada de todas las componentes al mismo tiempo, disminuyendo de esta manera la probabilidad de que se produzcan las situaciones que provocan las falsas detecciones del final de la señal. En los siguientes trabajos de esta tesis y en función de las necesidades de uso de los datos obtenidos de los sensores, se utilizará la aproximación más adecuada.

Por tanto, este primer trabajo experimental basado en dos entornos controlados ha permitido **definir una metodología para la extracción de señales de los sensores AMR** correspondientes a objetos metálicos que se mueven dentro de su campo de sensorización. Estas señales pueden ser características propias de cada objeto y pueden permitir su re-identificación, lo cual se ha analizado en un segundo experimento realizado.

El segundo objetivo propuesto al inicio del capítulo era **analizar la capacidad de re-identificación de las señales extraídas de los sensores AMR correspondientes a determinados objetos metálicos**. Para ello se ha planteado un segundo experimento sobre los 2 entornos orientado a obtener capacidades de emparejamiento y de discriminación de las señales obtenidas del sensor.

El experimento ha consistido en obtener varias señales correspondientes a un mismo objeto y compararlas entre ellas y con el resto de señales a través de diferentes métodos de cálculo de similitud de señales. Algunos de métodos utilizados son ampliamente conocidos, como la similitud del coseno, la correlación cruzada, la distancia euclídea y la DTW. Se han utilizado también otros métodos menos frecuentes ya que aparecen en la literatura y se han aplicado a la re-identificación y a la clasificación de vehículos, como son el Average Bar y el Hill Pattern.

Este segundo experimento ha tenido dos partes importantes: una primera parte en la que se ha realizado un análisis directo de la capacidad de cada medida de similitud para re-identificar objetos dentro de un conjunto de candidatos, y una segunda parte en la que se ha analizado la capacidad de discriminación de cada medida de similitud a través de un criterio de clasificación binario.

En la primera parte del experimento se han obtenido valores de similitud muy variados, lo que se ha reflejado en los histogramas presentados. También se ha observado que la capacidad de re-identificar objetos con todos los métodos es realmente baja en el entorno de simulación, y mejora un poco en el entorno de pruebas con vehículos reales. Aun así, se han obtenido resultados extremadamente bajos en comparación con los que se muestran en la literatura. Es necesario mencionar que el método DTW ha destacado por encima del resto en cuanto la efectividad, aunque en términos de coste temporal ha sido el peor de todos con una diferencia notable, de tal manera que estos resultados lo hacen descartable para unas condiciones de trabajo que se requieren en un entorno real de trabajo.

Respecto a la capacidad de discriminación, los resultados no han sido mucho mejores. Se han utilizado tablas de contingencia y curvas ROC para analizar el comportamiento de las medidas de similitud como clasificadores binarios, y los resultados que se han obtenido en los dos entornos experimentales son muy pesimistas, puesto que cuando se pretende obtener un ratio relativamente alto de

aciertos, el número de falsos positivos crece de forma muy abrupta llegando a superar rápidamente en número a los verdaderos positivos.

Este hecho se debe a que en el proceso de re-identificación se plantea en un entorno de trabajo en el que el número de verdaderos negativos es superior en varios órdenes de magnitud al número de verdaderos positivos. Para mejorar el criterio de clasificación en estas condiciones se ha propuesto el uso de una medida de *Precisión* que permita tener en cuenta la distribución de los datos, y aporte un dato objetivo para valorar la capacidad de acierto relativa en base a un valor determinado de similitud. Esta medida ofrece un criterio de selección basado en la localización de un máximo absoluto del valor de *Precisión*, que permite fijar el valor de similitud que hace de frontera para la clasificación binaria. Se ha verificado que tanto en el entorno de simulación como el de pruebas controlado existe ese pico y se puede usar el valor de la similitud asociado como valor umbral de re-identificación.

La realización de estos experimentos ha permitido obtener varias conclusiones sobre los datos que proporcionan los sensores AMR y sobre los procedimientos estudiados para su extracción y aplicación a la re-identificación de objetos. En primer lugar, se ha podido comprobar que el proceso de extracción de la señal es intrínsecamente poco preciso respecto a la localización del comienzo y el final de la misma. Esta falta de precisión afecta de forma negativa al proceso de comparación de señales para la re-identificación, lo cual plantea una necesidad de mejorar el método de segmentación o investigar un método de comparación que ofrezca cierta independencia con respecto al nivel de precisión de la segmentación. De estas dos opciones, la segunda de ellas se plantea como parte de los objetivos de esta tesis y se desarrolla en el Capítulo 5.

También se ha constatado que el método de segmentación depende de las características de la señal, tanto de su tamaño en número de muestras como en la amplitud de las medidas. De hecho, la parametrización del método de segmentación se ha realizado en base a un procedimiento de calibrado, con unos resultados diferentes para distintos tipos de objetos. Se ha podido concluir que es posible extraer la señal de forma completa, sin errores de detección en los límites inicial y final, aunque estos límites varíen en función del calibrado del método.

Las señales obtenidas se han sometido a un proceso de normalización para ser utilizadas en el experimento de cálculo de similitudes. Este proceso, que es

obligatorio para poder comparar señales y comparar métodos de cálculos de similitud, no ha contemplado ningún procedimiento de mejora de la calidad de la señal en cuanto a la delimitación de las fronteras. En la literatura que se ha revisado a lo largo del capítulo tampoco se sugiere que sea necesario realizar un procedimiento de estas características para poder obtener buenos resultados en los cálculos de similitud, y por tanto ha sido descartado.

En cualquier caso, los valores de similitud obtenidos con algunas medidas al comparar los mismos objetos han sido muy buenos en algunos casos, con valores por encima del 99%, pero muy bajos en otros casos. Es necesario preguntarse por el motivo de que dos señales del mismo objeto no ofrezcan resultados de similitud altos. Durante la realización de los experimentos se ha podido comprobar que en algunos casos en los que esto sucede no es porque las señales sean diferentes en su forma, sino porque no han sido segmentadas del mismo modo, y presentan un desplazamiento temporal relativo que se refleja en una falta de alineación. Esto hace que el valor de similitud entre las dos señales que dan los métodos utilizados sea inferior al obtenido en la comparación de señales de objetos distintos que presentaban un alineado temporal mejor. Además, los métodos de similitud que son capaces de obviar la falta de alineación, como el DTW, ha permitido ofrecer resultados de aciertos con un grado bastante elevado, del 90% en el caso de trabajar con vehículos reales.

También se ha constatado que la forma de las señales obtenidas para un mismo objeto, especialmente en el caso de vehículos reales, presentaban a la vista formas de onda ligeramente diferentes. Esto, lógicamente, se ha traducido en valores de similitud bajos cuando han sido comparadas. Cabe también preguntarse por los motivos por los que las formas de las señales son diferentes. Una hipótesis que explicaría este efecto sería la influencia de algún elemento externo. Sin embargo, las condiciones experimentales y la sensibilidad del sensor hacen descartar esta hipótesis porque se produce en repetidas ocasiones y en algunas componentes, en particular en la componente Y de las señales.

No obstante, existen otras explicaciones más razonables. La primera tiene que ver con la posición de paso relativa del vehículo con respecto al sensor. Una variación ligera en la posición relativa de paso puede generar diferencias notables en la forma de la señal. No obstante, esta variabilidad no ha sido estudiada hasta el momento con exhaustividad, por lo que ha sido un elemento que se han investigado en esta tesis para lograr el objetivo de obtener ratios de re-identificación elevados, y cuyos

resultados se presentan en el Capítulo 6. Por otro lado, la velocidad de paso de los vehículos genera señales diferentes en número de muestras. Como ya hemos constatado, la precisión del método de segmentación es dependiente de las características de las señales con las que se está trabajando. Así pues, obtener señales idénticas para un mismo vehículo a diferentes velocidades puede ser una tarea imposible de conseguir.

Por tanto, debemos ser capaces de trabajar con las señales recogidas y definir un nuevo método del cálculo de la similitud que mejore los actuales y sea independiente de la calidad de segmentación de las señales, puesto que actuar sobre el método de segmentación es una tarea más compleja y que, aunque se consiga perfeccionar, no aporta garantías sobre la mejora de los resultados de cálculos de similitud posteriores.

Finalmente, si pensamos en el problema de la detección y re-identificación de vehículos en autopistas, debemos analizar las condiciones de trabajo con las que nos vamos a encontrar. Por un lado, los vehículos circulan a velocidades elevadas. Los sensores AMR que existen en el mercado tienen una frecuencia de muestreo máxima que condiciona su uso para detectar objetos a altas velocidades. Investigaremos si los sensores se adaptan a las condiciones y necesidades que presentan las autopistas, y si fuese necesario, se construirá un sensor adecuado a estas condiciones de trabajo. Todo esto lo analizaremos en el Capítulo 7.

Hay que tener en cuenta que la anchura de los carriles en una autopista es superior al de una carretera convencional o al de una vía urbana. En estas condiciones, la posición de circulación relativa de un vehículo dentro de un carril es mucho más variable y conseguir una idéntica posición de paso relativa del vehículo por encima de un único sensor en distintos puntos o momentos es muy improbable. Por tanto, es necesario plantearse que la detección de vehículos debe ser un proceso basado en el uso de varios sensores dispuestos en un carril, de manera que la combinación de señales que capturen todos los sensores sean usadas selectivamente y de la mejor forma posible en el proceso de re-identificación. El número de sensores que se utilizarán y su disposición en la autopista son dos cuestiones que serán resueltas y comparadas con otras soluciones propuestas en la literatura para contrastar su eficacia. Este aspecto también será tratado en esta tesis en el Capítulo 7, donde se propondrá un **nuevo modelo de distribución de sensores** para la adquisición de datos y un **procedimiento de selección de datos** para su uso en los procesos de re-identificación.

## 5. MEDIDAS DE SIMILITUD MEJORADAS

---

En el Capítulo 4 se ha analizado el rendimiento de diversas medidas de similitud aplicadas sobre las señales obtenidas de sensores AMR de 3 ejes en cuanto a su capacidad de re-identificación y de discriminación. En todas las medidas empleadas, los valores de similitud que se han obtenido cuando se han comparado distintas señales del mismo objeto han resultado ser muy bajas con respecto a los valores que se podía esperar obtener. Tan sólo aquellas medidas de similitud que no utilizan exclusivamente la forma de onda de las señales y son capaces de realizar una adaptación de la forma y/o posición de la señal (XCOR, DTW) han ofrecido resultados mejores.

El estudio de los datos generados por los sensores AMR para la detección y re-identificación de objetos ferromagnéticos, y en particular vehículos, ha mostrado la factibilidad del proceso de obtención y comparación de señales magnéticas que permiten caracterizar dichos objetos. Sin embargo, este estudio también ha constatado la complejidad de establecer un procedimiento de extracción de señales preciso, que evite que las señales magnéticas que se obtienen para un mismo objeto sensorizado varias veces no sean idénticas.

Ante esta situación, la re-identificación de vehículos basada en las formas de las señales obtenidas de los sensores AMR se hace muy dependiente de los procesos de extracción de datos y de comparación de señales.

La re-identificación de un objeto en base a los datos extraídos de los sensores AMR está fundamentada en la aplicación de un método de comparación de las señales magnéticas a través del uso de una medida de similitud. El estudio de los sensores AMR ha puesto de manifiesto que las medidas de similitud aplicadas directamente sobre las señales magnéticas obtenidas no ofrecen resultados óptimos, lo que refleja de algún modo el hecho de que las huellas magnéticas de un mismo objeto no coincidan con exactitud.

Ante la imposibilidad de obtener señales idénticas para el mismo objeto, se plantea la hipótesis de que **un post-procesamiento condicionado de la señal en combinación con el uso de una medida de similitud adecuada puede mejorar los resultados de emparejamiento de señales**. En este capítulo se describe la mejora propuesta y los resultados obtenidos, centrando el problema de re-identificación de objetos al caso de vehículos.

## 5.1. Selección de componentes para la medida de similitud

Los sensores AMR miden el campo magnético en el que se encuentran situados en una determinada dirección. Comercialmente se han desarrollado sensores que permiten medir el campo magnético en 3 direcciones ortogonales (sensores AMR de 3 ejes). Esto implica que cuando se está midiendo la perturbación que un objeto genera en el campo magnético de La Tierra con estos sensores se dispone de 3 series de datos que caracterizan dicho objeto. A partir de ahora se hará referencia a estas series temporales como los datos de los ejes (o señales) X, Y y Z.

La primera cuestión que se debe resolver para encontrar una medida de similitud óptima es si las 3 series temporales son útiles para el proceso de re-identificación o no. En este apartado se presenta el análisis que se ha realizado de las similitudes entre vehículos en base a los datos obtenidos del sensor AMR de 3 ejes, utilizando los datos de cada eje por separado y combinaciones lineales de ellos.

Se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento de una medida de similitud en función de los datos extraídos de un sensor AMR de 3 ejes que se utilicen (uno, dos o tres ejes). En el Capítulo 4 se valoraba el rendimiento de las medidas de similitud utilizando los datos de los 3 ejes de los sensores; sin embargo, lo que ahora se pretende es determinar la necesidad o no de utilizar toda esta información, y la manera de combinarla. Para ello es necesario utilizar una medida de similitud como método de comparación básico, y en ese sentido cualquiera de los métodos de similitud estudiados en el Capítulo 4 serviría para realizar este estudio. Por tanto se ha seleccionado el método que tiene un coste computacional no muy elevado y ha ofrecido mejores resultados que el resto de métodos con un coste similar: la correlación cruzada.

El fin que se persigue es encontrar la medida de similitud que maximice las capacidades de re-identificación y discriminación de objetos usando las señales independientes correspondientes a las variaciones del campo magnético medidas por un sensor AMR en los ejes X, Y y Z, siendo X la dirección de movimiento del objeto. Para ello, se ha diseñado un proceso experimental que ha aportado la información necesaria para determinar la mejor combinación de los datos de los ejes que debe ser utilizada en la medida de similitud, el cual se describe en la siguiente sección.

### 5.1.1. Descripción del proceso experimental

El objetivo del proceso experimental que se describe en este apartado es encontrar una medida de similitud que proporcione la máxima capacidad de re-identificación de vehículos, pero usando exclusivamente los datos que se extraen del sensor AMR. Se ha establecido esta premisa porque, aunque es posible utilizar otra información para mejorar el resultado del emparejamiento de señales (como el tiempo de recorrido entre dos sensores considerando la distancia entre ellos ((Sanchez et al. 2011a), (Kwong et al. 2009a)) y la velocidad de los vehículos, o las formas de onda que caracterizan las señales (Kwong et al. 2009a)), se ha pretendido abordar el problema de la selección de la mejor medida de similitud independientemente de otros factores y/o del uso que se vaya a realizar de los sensores. Se ha tratado, por tanto, de abordar el problema desde la perspectiva de la naturaleza intrínseca de las señales y de manera independiente.

Para realizar los cálculos necesarios, se han aprovechado los resultados obtenidos previamente en el entorno experimental de pruebas controlado descrito en el Capítulo 4. En este caso, se han utilizado los datos de las 3 señales componentes para los ejes X, Y y Z obtenidos en todos los pasos de los vehículos. Se han seleccionado varias medidas de similitud  $M_i$  donde los valores de entrada son las señales componentes X, Y y Z, y se ha contrastado el resultado que ofrece cada una de ellas respecto a la capacidad de re-identificación y a la capacidad de discriminación.

Se entiende que la capacidad de re-identificación de vehículos que aporta una medida de similitud es la capacidad para ofrecer los valores más altos cuando se comparan señales pertenecientes al mismo vehículo; la capacidad de discriminación, a su vez, es la capacidad de ofrecer valores bajos de similitud en la comparación de señales pertenecientes a vehículos distintos.

Las medidas de similitud  $M_i$  se han definido utilizando la correlación cruzada como la métrica de comparación básica y seleccionando las componentes de las señales magnéticas que intervienen en su valoración. Con esta idea, se han definido las siguientes medidas, utilizando para su notación la forma de la expresión ( 11 ) del apartado 4.4.1.2 en la página 108 y definiendo las componentes de la señales que se han comparado como  $S_1 = \{X_1, Y_1, Z_1\}$  y  $S_2 = \{X_2, Y_2, Z_2\}$ :

- $M_1, M_2, M_3$  usan la correlación cruzada normalizada de las señales X, Y y Z respectivamente, evaluada como el máximo de cada una de ellas.

$$M_1 = \max\left(\bar{\phi}_{M_1}(j)\right), \quad \bar{\phi}_{M_1}(j) = \bar{\phi}_{X_1X_2}(j) \quad (14)$$

$$M_2 = \max\left(\bar{\phi}_{M_2}(j)\right), \quad \bar{\phi}_{M_2}(j) = \bar{\phi}_{Y_1Y_2}(j) \quad (15)$$

$$M_3 = \max\left(\bar{\phi}_{M_3}(j)\right), \quad \bar{\phi}_{M_3}(j) = \bar{\phi}_{Z_1Z_2}(j) \quad (16)$$

- $M_4, M_5, M_6$  usan la correlación cruzada normalizada de las señales X, Y Z combinadas de dos en dos, (X e Y), (X y Z) e (Y y Z) respectivamente, evaluada como el máximo de la media de la correlación cruzada de cada componente en cada punto.

$$M_4 = \max(\bar{\varphi}_{M_4}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_4}(j) = \frac{1}{2}(\bar{\varphi}_{X_1X_2}(j) + \bar{\varphi}_{Y_1Y_2}(j)) \quad (17)$$

$$M_5 = \max(\bar{\varphi}_{M_5}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_5}(j) = \frac{1}{2}(\bar{\varphi}_{x_1x_2}(j) + \bar{\varphi}_{z_1z_2}(j)) \quad (18)$$

$$M_6 = \max(\bar{\varphi}_{M_6}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_6}(j) = \frac{1}{2}(\bar{\varphi}_{Y_1Y_2}(j) + \bar{\varphi}_{z_1z_2}(j)) \quad (19)$$

- $M_7$ , usa la correlación cruzada normalizada de la combinación de las señales (X, Y, Z), evaluada como el máximo de la media de la correlación cruzada de las tres componentes en cada punto.

$$M_7 = \max(\bar{\varphi}_{M_7}(j)),$$

$$\bar{\varphi}_{M_7}(j) = \frac{1}{3}(\bar{\varphi}_{X_1X_2}(j) + \bar{\varphi}_{Y_1Y_2}(j) + \bar{\varphi}_{z_1z_2}(j)) \quad (20)$$

- $M_8, M_9, M_{10}$  usan la correlación cruzada normalizada de las señales X, Y Z combinadas de dos en dos, (X e Y), (X y Z) e (Y y Z) respectivamente, evaluada como el máximo del producto de las correlaciones cruzadas de cada componente en cada punto.

$$M_8 = \max(\bar{\varphi}_{M_8}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_8}(j) = \bar{\varphi}_{X_1X_2}(j)\bar{\varphi}_{Y_1Y_2}(j) \quad (21)$$

$$M_9 = \max(\bar{\varphi}_{M_9}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_9}(j) = \bar{\varphi}_{x_1x_2}(j)\bar{\varphi}_{z_1z_2}(j) \quad (22)$$

$$M_{10} = \max(\bar{\varphi}_{M_{10}}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_{10}}(j) = \bar{\varphi}_{Y_1Y_2}(j)\bar{\varphi}_{z_1z_2}(j) \quad (23)$$

- $M_{11}$ , es la correlación cruzada de la combinación de las señales (X, Y, Z), evaluada como el máximo del producto de las correlaciones cruzadas de las tres componentes en cada punto.

$$M_{11} = \max(\bar{\varphi}_{M_{11}}(j)), \quad \bar{\varphi}_{M_{11}}(j) = \bar{\varphi}_{X_1X_2}(j)\bar{\varphi}_{Y_1Y_2}(j)\bar{\varphi}_{z_1z_2}(j) \quad (24)$$

Es necesario hacer notar que se han tratado las señales tanto de manera independiente como de manera dependiente, según el caso. La consideración de las señales de forma individual (independiente) ha permitido analizar las capacidades buscadas en cada una de las señales componentes por sí mismas. Sin embargo, cuando se han usado combinaciones de señales, no se ha podido obviar la dependencia temporal que existe entre ellas. Por ejemplo, si se comparan dos señales completas correspondientes a 2 vehículos, se realiza una comparación componente a componente, y luego se combinan los resultados. Pero el índice correspondiente al máximo de la correlación en una componente no tiene por qué coincidir con el de las otras componentes. Por tanto, si se hiciese la media de los valores máximos, se estaría pervirtiendo la medida porque se habría aplicado un criterio distinto para cada componente. Se debe buscar, por consiguiente, el punto de correlación máxima que ofrecen en conjunto las señales que intervienen en la medida de similitud, garantizando de esta manera la dependencia temporal que existe entre las componentes.

Tal y como vimos en el apartado anterior, en el experimento se han utilizado 30 vehículos, con 6 medidas consecutivas para cada uno, lo que da un total de 180 medidas. Se han comparado los pasos de los vehículos en base a las señales obtenidas para cada medida  $M_i$ , obteniéndose de esta forma una matriz cuadrada, simétrica y de diagonal unitaria con 32.400 valores de similitud para cada una de las medidas. De esta cantidad, 900 medidas corresponden a comparaciones de señales pertenecientes al mismo vehículo, y 31.500 corresponden a comparaciones entre distintos vehículos.

Se ha realizado un análisis conjunto de los datos de similitud para determinar tanto la capacidad de re-identificación como la de discriminación. Para cada medida de similitud  $M_i$  se ha analizado el solapamiento que existe en los valores de similitud de los aciertos y los fallos. Se ha definido de esta manera el criterio de optimización como la cardinalidad del conjunto que contiene los valores de similitud solapados, de manera que la función de similitud que proporcione un valor menor para esta cardinalidad será la mejor medida de similitud.

Con el fin de que el análisis sea más completo, se ha propuesto la introducción de un parámetro adicional en la valoración del solapamiento que puede aportar un control sobre la tolerancia de la medida: el percentil de aciertos y de errores. De este modo, los límites de los valores de similitud para los casos de

emparejamientos del mismo vehículo o de diferentes vehículos son variables, y se puede analizar la tendencia de la disminución de la cardinalidad del conjunto solapado en función de estos percentiles.

De manera formal, este criterio se ha definido del siguiente modo. Se definen los conjuntos  $S$  y  $R$  para cada  $M_i$ , de manera que  $S$  contiene los valores de similitud correspondientes a las comparaciones de un mismo vehículo, y  $R$  contiene los valores de similitud de las comparaciones de vehículos distintos. A continuación se define la cuádrupla  $\{SM_i, Sm_i, RM_i, Rm_i\}$  para cada medida de similitud del siguiente modo:

- $SM_i$  es el valor de máxima similitud para los emparejamientos del mismo vehículo y para la medida de similitud  $M_i$
- $Sm_i$  es el valor de mínima similitud para los emparejamientos del mismo vehículo y para la medida de similitud  $M_i$
- $RM_i$  es el valor de máxima similitud para los emparejamientos de distintos vehículos y para la medida de similitud  $M_i$
- $Rm_i$  es el valor de mínima similitud para los emparejamientos de distintos vehículos y para la medida de similitud  $M_i$

De esta manera, el número de errores asociados con cada función de similitud se puede calcular en base al cardinal de los siguientes conjuntos:

$$Ep_i = \{x \in S / Sm_i \leq x \leq RM_i\} \quad (25)$$

$$Ea_i = \{y \in R / Sm_i \leq y \leq RM_i\} \quad (26)$$

El conjunto  $Ep_i$  contiene los valores de similitud obtenidos con la medida  $M_i$  para emparejamientos del mismo vehículo que se solapan con valores de similitud correspondientes emparejamientos de vehículos distintos. A su vez, el conjunto  $Ea_i$  contiene los valores de similitud obtenidos con la medida  $M_i$  para emparejamientos de vehículos distintos que se solapan con valores de similitud correspondientes a emparejamientos del mismo vehículo. De esta forma, se ha determinado que la mejor medida de similitud es la que proporciona menor cardinalidad para ambos conjuntos simultáneamente.

Adicionalmente, se han definido los siguientes conjuntos para cada medida de similitud que utilizan percentiles para evaluar la evolución de la cardinalidad de los conjuntos  $Ep_i$  y  $Ea_i$  según la precisión que se desee obtener.

$$Ep_{i,j} = \{x \in S / Sm_i \leq x \leq prctl(R_i, j)\} \quad (27)$$

$$Ea_{i,j} = \{y \in R / Sm_i \leq y \leq prctl(R_i, j)\} \quad (28)$$

siendo  $R_i$  el conjunto  $R$  para cada medida  $M_i$ . La particularización de estas expresiones para el percentil cien ( $j=100$ ) y cero ( $j=0$ ) en  $E_p$  y  $E_a$  cumplen las siguientes condiciones:

$$|Ep_{i,100}| = |Ep_i| \quad (29)$$

$$|Ea_{i,0}| = |Ea_i| \quad (30)$$

Finalmente, se han realizado los cálculos de similitud y se han obtenido los valores correspondientes a cada uno de los conjuntos. Los resultados completos del experimento se muestran en el siguiente apartado.

## 5.1.2. Resultados experimentales

En primer lugar, se han analizado los valores de similitud que ofrecen cada una de las medidas  $M_i$  propuestas. Para ello, se han representado inicialmente estos valores en unos diagramas de cajas y en unos histogramas. Los diagramas de cajas permiten observar las tendencias en el comportamiento de la capacidad de re-identificación de cada medida (Figura 74 a Figura 77). Los histogramas, por otro lado, permiten observar la capacidad de discriminación de cada una de las medidas. En ambos casos se representan por separado los valores de similitud para emparejamientos del mismo vehículo y de distintos vehículos, lo que ha permitido apreciar mejor las diferencias en el comportamiento de las medidas.

Los histogramas correspondientes a los valores de similitud de todas las medidas se han situado en el **Anexo III. Histogramas de los valores obtenidos de las medidas de similitud.**

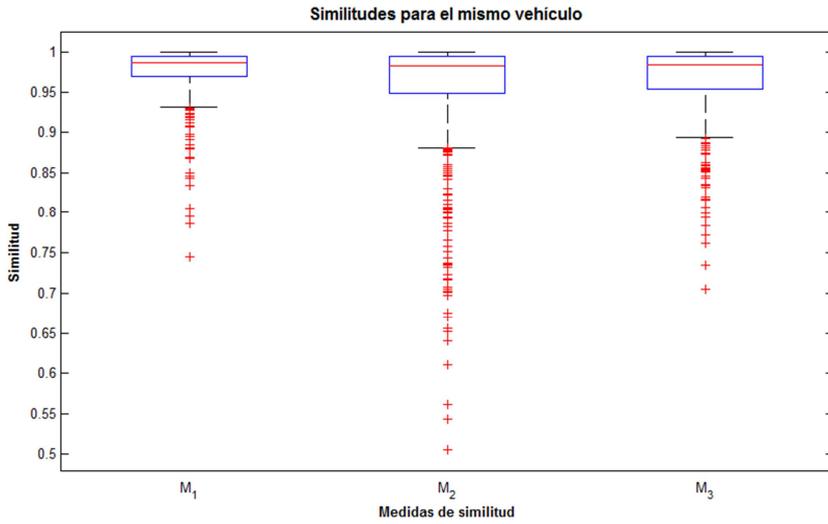


Figura 74. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a los mismos vehículos para las medidas  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$

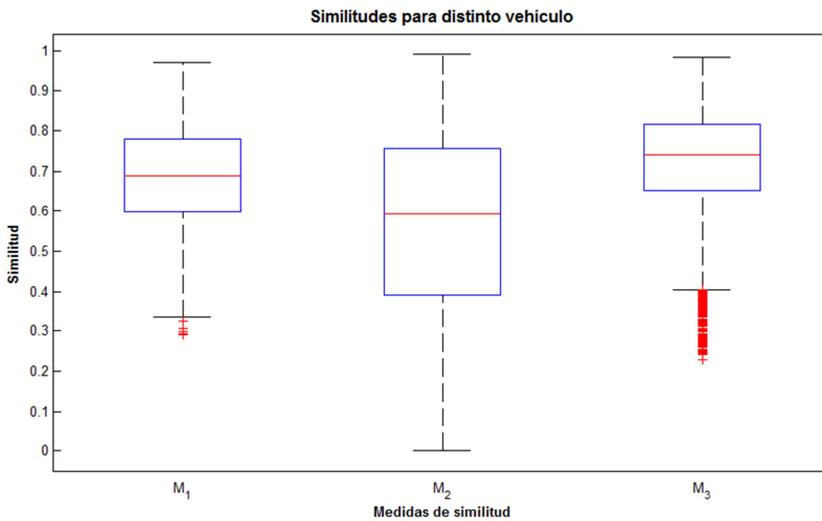


Figura 75. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a distintos vehículos para las medidas  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$

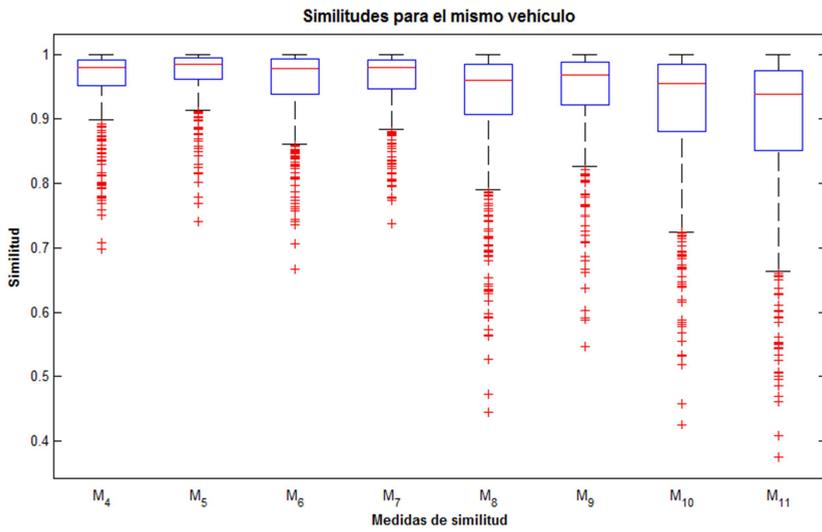


Figura 76. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a los mismos vehículos para las medidas  $M_4$  a  $M_{11}$

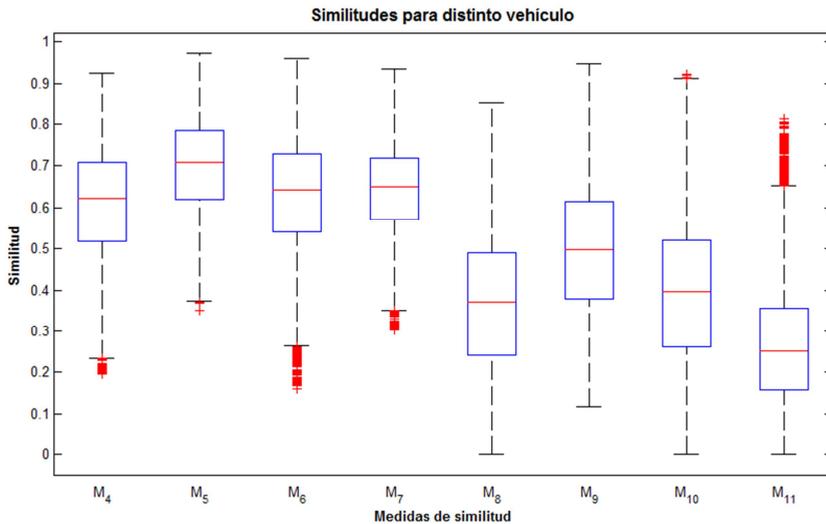


Figura 77. Diagrama de cajas para los valores de similitud correspondientes a distintos vehículos para las medidas  $M_4$  a  $M_{11}$

Método	Prctl 100	Prctl 75	Prctl 50	Prctl 25	Prctl 0
$M_1$	0.9998	0.9948	0.9871	0.9693	0.7454
$M_2$	0.9998	0.9940	0.9823	0.9485	0.5047
$M_3$	0.9998	0.9949	0.9834	0.9542	0.7047
$M_4$	0.9997	0.9919	0.9803	0.9522	0.6977
$M_5$	0.9998	0.9940	0.9841	0.9611	0.7396
$M_6$	0.9995	0.9920	0.9776	0.9389	0.6661
$M_7$	0.9996	0.9918	0.9789	0.9479	0.7369
$M_8$	0.9994	0.9838	0.9607	0.9061	0.4453
$M_9$	0.9996	0.9879	0.9684	0.9233	0.5463
$M_{10}$	0.9990	0.9840	0.9557	0.8800	0.4256
$M_{11}$	0.9988	0.9756	0.9381	0.8508	0.3743

*Tabla 16. Percentiles de los valores de similitud de las medidas  $M_i$  para las comparaciones de los mismos vehículos*

Método	Prctl 100	Prctl 75	Prctl 50	Prctl 25	Prctl 0
$M_1$	0.9716	0.7786	0.6876	0.5984	0.2907
$M_2$	0.9920	0.7552	0.5921	0.3901	0
$M_3$	0.9825	0.8166	0.7398	0.6514	0.2278
$M_4$	0.9253	0.7075	0.6212	0.5185	0.1965
$M_5$	0.9731	0.7853	0.7080	0.6203	0.3509
$M_6$	0.9596	0.7283	0.6421	0.5422	0.1619
$M_7$	0.9335	0.7183	0.6499	0.5716	0.3021
$M_8$	0.8523	0.4895	0.3716	0.2418	0
$M_9$	0.9470	0.6140	0.4976	0.3795	0.1167
$M_{10}$	0.9204	0.5211	0.3960	0.2611	0
$M_{11}$	0.8128	0.3555	0.2524	0.1576	0

*Tabla 17. Percentiles de los valores de similitud de las medidas  $M_i$  para las comparaciones de los distintos vehículos*

Los valores de similitud correspondientes a los percentiles 100, 75, 50, 25 y 0 de cada medida para el caso de comparaciones de los mismos vehículos se pueden ver en la Tabla 16. Estos percentiles indican el valor mínimo de similitud que se puede encontrar en el porcentaje correspondiente del conjunto de los mejores valores de similitud para cada medida al comparar señales que pertenecen al mismo vehículo. Los valores de similitud correspondientes a los percentiles 100, 75, 50, 25 y 0 de cada medida para el caso de comparaciones de distintos vehículos se pueden ver en la Tabla 17.

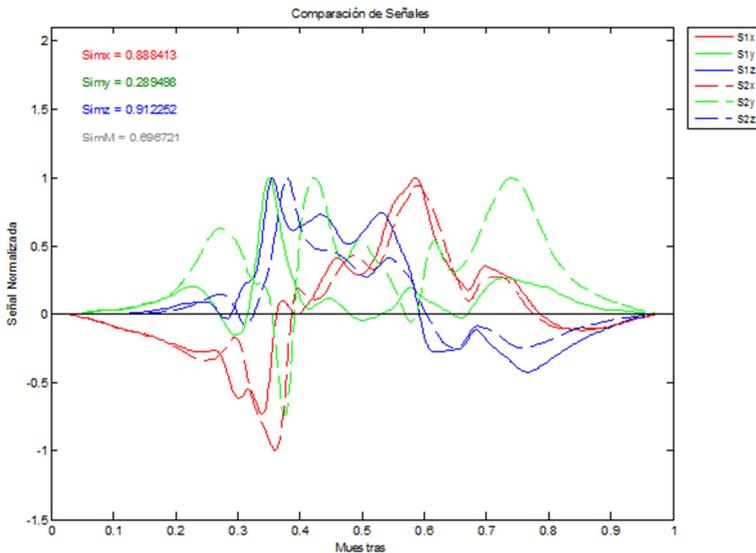


Figura 78. Ejemplo de comparación de 2 señales

En el análisis de estos datos, uno de los primeros hechos que han destacado al observar las medidas de similitud que utilizan un solo eje es que la componente X es la que ofrece mejores resultados en las comparaciones de los mismos vehículos, frente a la componente Y que es la que peor rendimiento presenta. En la Figura 78 se puede ver un ejemplo de que al comparar 2 señales pertenecientes al mismo vehículo la forma de la señal de la componente Y es la que más varía entre los dos casos, y por tanto el valor de similitud para la componente Y es inferior al de las otras componentes. Esto se basa en la dispersión de los valores de similitud de cada medida y que se observan con claridad en los diagramas de cajas, y en la diferencia entre los valores máximo y mínimo de similitud. El eje Z es ligeramente inferior en eficiencia al eje X por los mismos motivos. Estos hechos se han

confirmado en la observación de los valores de similitud para vehículos distintos (Figura 75). La dispersión de los valores para los ejes Z e Y son mayores que para el eje X. Además, los valores de similitud del eje Z para un determinado percentil son superiores a los correspondientes al eje Y, lo que significa que la capacidad discriminante del eje Z es menor que la del eje Y.

En las medidas que utilizan la similitud de varios ejes combinados (Figura 76 y Figura 77) se ha podido apreciar que, como consecuencia del comportamiento del eje Y, aquellas que contienen una combinación con los datos de similitud de este eje son peores que el resto, puesto que sus valores de similitud están más dispersos que el resto, a excepción de la medida  $M_7$ . Esta medida ha aportado una de las menores dispersiones en las comparaciones de los mismos vehículos, si bien su valor de percentil 25, 50 o 75 no ha sido el mejor de todos. En cualquier caso, su eficiencia con respecto a la comparación de los mismos vehículos es menor que la que ofrecen los ejes X y Z de forma independiente.

También se ha apreciado una diferencia notable entre las medidas que utilizan medias aritméticas y las que utilizan productos como método de combinación de las similitudes de las señales componentes. Las segundas tienen un espectro de valores superior a las primeras en el caso de similitudes correspondientes a los mismos vehículos.

Se han observado los datos de similitud para estas medidas combinadas correspondientes a diferentes vehículos y, dado que la dispersión de los valores es menos importante, debe considerarse la distancia que existe con los valores de similitud correspondientes a la comparación de los mismos vehículos. El objetivo es que los solapamientos entre los dos conjuntos, para cada medida, sea el mínimo. En los diagramas de cajas se ha podido apreciar que en este caso las medidas que incorporan la componente Y aportan un mayor valor discriminante, es decir, tienen valores de similitud que se alejan más de la similitud máxima. Esto sucede tanto para medidas combinadas con media aritmética como con producto de componentes, aunque es más notable en estas últimas.

Por tanto, si se decide trabajar con señales con una única componente, es la señal correspondiente al eje X la que se debe utilizar para la re-identificación de vehículos. Sin embargo, si se tiene la posibilidad de trabajar con varias componentes, la componente Y, que es la que peor comportamiento individual tiene, puede resultar de mucha importancia como elemento discriminante si se

combina con el resto. Teniendo en cuenta los criterios de dispersión de valores de similitud para comparaciones de los mismos vehículos, y las distancias entre valores de similitud para los conjuntos  $S$  y  $R$  con los datos experimentales que se han obtenido, se puede afirmar que las mejores medidas que usan combinación de componentes son la  $M_4$ ,  $M_7$ ,  $M_8$  y  $M_{11}$ , es decir, las medidas que combinan X-Y y X-Y-Z.

En cualquier caso, con los datos presentados no se dispone de suficiente información para poder valorar cuál de estas cuatro medidas es la mejor, y si es mejor que la medida que utiliza solamente la componente X. Con el fin de obtener más datos que puedan ayudar en la toma de decisiones se ha calculado el grado de solapamiento entre los conjuntos  $S$  y  $R$  para cada una de las medidas, y se ha estudiado cuál de todas las medidas aporta un grado de solapamiento menor. Los resultados se han reflejado en la Tabla 18.

	Ep	% Ep	Ea	% Ea
$M_1$	254	27,31	11.174	33,38
$M_2$	620	66,67	20.976	62,65
$M_3$	452	48,60	20.346	60,77
$M_4$	144	15,48	9.190	27,45
$M_5$	324	34,84	13.180	39,37
$M_6$	314	33,76	14.438	43,12
$M_7$	116	17,85	6.476	19,34
$M_8$	144	15,48	11.364	33,94
$M_9$	324	34,84	12.992	38,81
$M_{10}$	314	33,76	14.718	43,96
$M_{11}$	168	18,06	7.114	21,25

Tabla 18. Valores de  $Ep$  y  $Ea$  para las medidas de similitud estudiadas, en valor absoluto y en porcentaje

Además, se han construido histogramas correspondientes a las medidas de similitud para los conjuntos  $S$  y  $R$  de forma separada y conjunta y se han representado en las figuras del **Anexo III. Histogramas de los valores obtenidos de las medidas de similitud** con el fin de poder identificar visualmente el comportamiento de cada una de las medidas de similitud en sus dos aspectos: el de similitud y el discriminante.

Los datos de la Tabla 18 muestran dos aspectos distintos de cada medida de similitud. Por un lado,  $E_p$  indica la cantidad de valores de similitud correspondientes a emparejamientos de los mismos vehículos (emparejamientos correctos) que se pueden interpretar como incorrectos por estar por debajo del máximo valor de similitud del conjunto  $R$ , para cada medida de similitud.  $E_a$  indica la cantidad de valores de similitud correspondientes a emparejamientos de vehículos diferentes (emparejamientos incorrectos) que pueden ser considerados como correctos por tener un valor de similitud superior al mínimo del conjunto  $S$ . La mejor medida es aquella que aporta un valor mínimo en ambas medidas.

Tal y como se había deducido del análisis de los diagramas de cajas, las medidas  $M_1$ ,  $M_4$ ,  $M_7$ ,  $M_8$  y  $M_{11}$ , son las que han aportado mejores resultados en ambas medidas, dado que han presentado los menores porcentajes. Sin embargo, no han obtenido el mismo resultado con respecto a cada una de ellas, es decir, no existe ninguna medida para la cual tanto  $E_a$  como  $E_p$  sean mínimos al mismo tiempo. En el caso de  $E_p$ , las medidas  $M_4$  y  $M_8$  son las que mejores resultados han ofrecido (15,48%), siendo  $M_7$  la siguiente mejor medida (17,85%). Pero por otro lado, los valores relativos de  $E_a$  han mostrado que la mejor medida es  $M_7$  (19,34%) seguida de  $M_{11}$  (21,25%),  $M_4$  (27,45%) y  $M_1$  (33,38%).

El uso del criterio de minimización de  $E_p$  y  $E_a$ , por tanto, ha aportado tres medidas distintas como óptimas, por lo que ha sido necesario investigar más sobre ellas para encontrar otro criterio que permita la selección de la mejor medida de similitud. Se ha recurrido al uso de las expresiones ( 27 ) y ( 28 ) (pag. 178) para estudiar la tendencia en la disminución de los cardinales de los conjuntos  $E_p$  y  $E_a$  si se introduce una tolerancia a fallos, es decir, para analizar la evolución de las medidas cuando se permiten errores que se producen cuando se solapan de algún modo ambos conjuntos.

Para analizar la evolución de  $E_p$  para cada una de las medidas de similitud en base a una tolerancia a fallos se ha aplicado la expresión ( 27 ). Se han utilizado diferentes percentiles (en el intervalo [50,100]) y se ha calculado el cardinal de  $E_p$  para cada uno de ellos. Con esto se ha obtenido una medida de los falsos positivos que se pueden permitir hasta que el cardinal de  $E_p$  alcanza un valor de cero (es decir, se han identificado todos los verdaderos positivos a costa de admitir como correctos algunos falsos positivos), y al mismo tiempo se ha observado el comportamiento de este cardinal cuando se aproxima a cero para cada una de las medidas evaluadas. Este comportamiento queda reflejado en la Figura 79, donde se pueden apreciar las tendencias en el descenso de la cardinalidad de cada una de las medidas consideradas según se disminuye el percentil (es decir, según se aumenta la tolerancia a fallos a través de los falsos positivos). En esta gráfica se aprecia con claridad que la aproximación a cero más pronunciada tiene lugar para las medidas  $M_7$  y  $M_{11}$ .

También se ha analizado la evolución de  $E_a$  para cada una de las medidas de similitud en base a una tolerancia a fallos usando la expresión ( 28 ). En este caso se ha aplicado un percentil en el rango [0,50] para determinar cómo disminuyen los falsos positivos cuando se incrementa el valor mínimo de  $S$  según cada percentil, a costa de perder verdaderos positivos. Se ha podido apreciar de esta forma cuál es la medida que tolera mejor estos fallos y los comportamientos en las aproximaciones a cero de cada una de las medidas de similitud. Todo ello queda reflejado en la Figura 80. En este caso, es  $M_7$  la medida que ofrece una aproximación más rápida a cero, aunque es muy similar a la que presentan las medidas  $M_4$ ,  $M_8$  y  $M_{11}$ .

Con el fin de que se pueda observar con mayor nivel de detalle la evolución de las medidas que se han analizado, se ha realizado una representación gráfica del cardinal de  $E_p$  y  $E_a$  para distintos percentiles y se han plasmado en la Figura 81 y la Figura 82.

Los datos detallados que han sido utilizados en este análisis pueden encontrarse en el **“Anexo IV. Datos de evolución de la cardinalidad de  $E_{p_i}$  y  $E_{a_i}$  por percentiles”**.

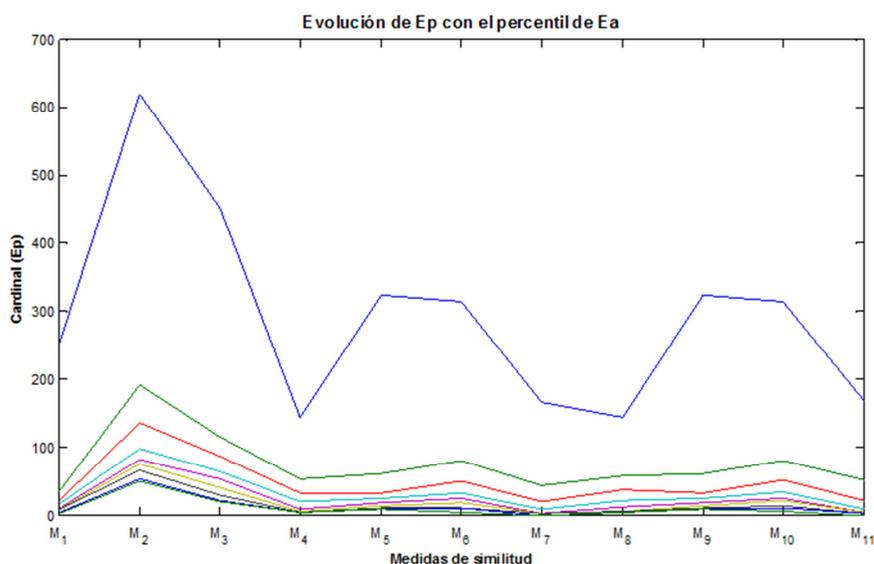


Figura 79. Gráfico de evolución del cardinal de  $E_p$  en función de los percentiles sobre  $E_a$  para cada medida de similitud  $M_i$

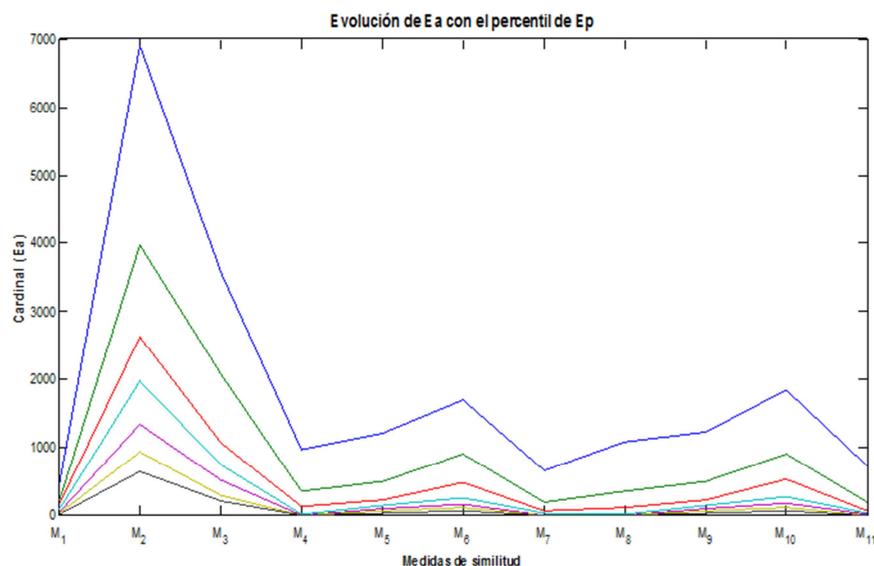


Figura 80. Gráfico de evolución del cardinal de  $E_a$  en función de los percentiles sobre  $E_p$  para cada medida de similitud  $M_i$

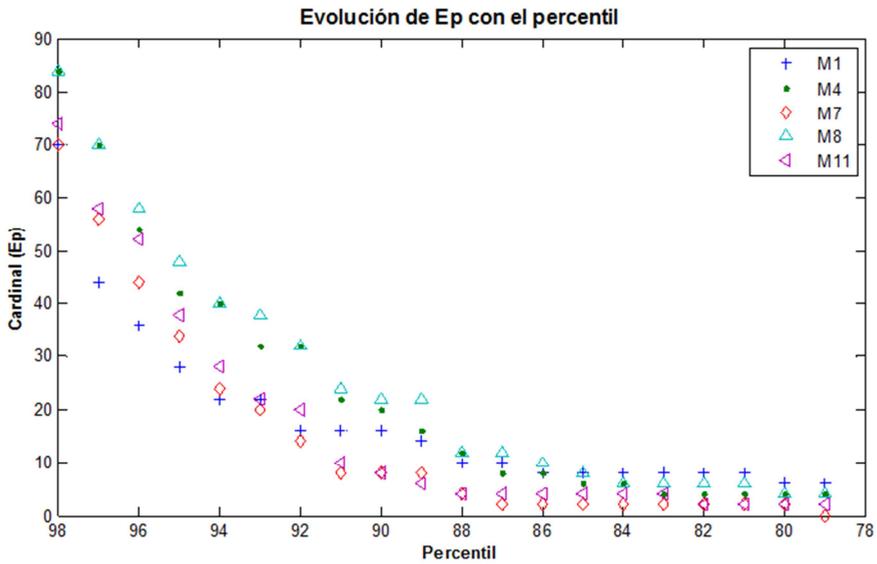


Figura 81. Detalle de la evolución del cardinal de  $E_p$  en función del percentil

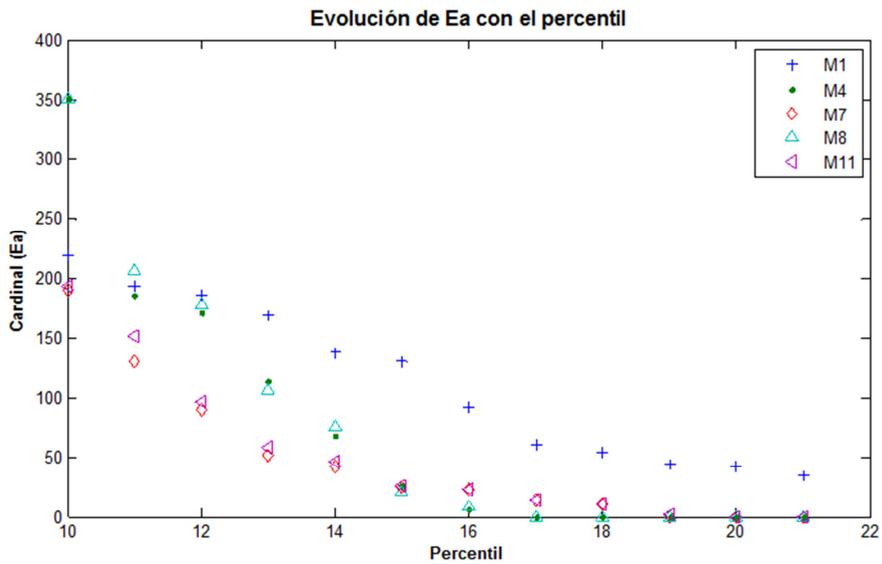


Figura 82. Detalle de la evolución del cardinal de  $E_a$  en función del percentil

### 5.1.3. Conclusiones

Con toda esta información y teniendo en cuenta el análisis de los datos de evolución de  $E_p$  y  $E_a$ , se puede concluir que la mejor medida de similitud es la  $M_7$ , es decir, la que computa la media aritmética de las similitudes que aportan los 3 ejes ortogonales del sensor AMR.

La medida  $M_7$  consigue aportar una capacidad de re-identificación combinada con una capacidad de discriminación elevada, puesto que los valores de similitud para las comparaciones de los mismos vehículos son elevados y los valores de similitud para comparaciones de vehículos distintos son bajos. Además, en comparación con otras medidas que también presentan estas características, es la que tiene una mayor tolerancia a fallos, puesto que el solapamiento de los valores de similitud correspondientes a los mismos vehículos y los correspondientes a vehículos distintos es el más bajo. Por tanto, **esta será la medida que se utilizará en esta tesis de ahora en adelante para evaluar la similitud entre objetos con sensores AMR de 3 ejes.**

## 5.2. Alineación de las señales para el proceso de comparación

En el Capítulo 4 se ha probado (en base a las referencias de la literatura y de los experimentos realizados) que obtener señales idénticas para un mismo objeto en distintas mediciones del sensor es muy improbable debido a 2 motivos. El primero es la posición relativa de paso del objeto con respecto al sensor y el segundo es la velocidad del objeto cuando va a ser detectado. En el primer caso, diferentes posiciones de paso generan distintas formas de onda en las señales captadas por el sensor AMR debido a la distribución de la masa ferromagnética del objeto. En el segundo caso, las distintas velocidades del objeto generan señales con diferente número de muestras, lo cual provoca la necesidad de aplicar un proceso de normalización en tamaño de muestras de la señal para que puedan compararse datos de distintas mediciones. No obstante, y aunque el proceso de normalización permite que se conserve la forma de onda de las señales, puede generar un desplazamiento temporal con respecto a otras señales obtenidas por el sensor para el mismo objeto.

Además, tal y como se ha demostrado también en dicho capítulo, aun cuando se consiguiese obtener dos señales completamente idénticas para distintas mediciones, el proceso de segmentación de la señal podría provocar una variación en la forma de la señal si los límites no se calculan con extrema precisión, lo cual también es una tarea difícil de conseguir.

En este capítulo se presentan los resultados del estudio de las diferencias que existen entre señales obtenidas del mismo objeto en diferentes mediciones con posiciones relativas de paso similares. También se propone un método para mejorar las similitudes obtenidas en la comparación de señales que presentan este problema.

### 5.2.1. Descripción y estudio del problema de alineación de señales

El efecto que tiene la velocidad de los objetos cuando son detectados por un sensor magnético en la forma de las señales se ha descrito detalladamente en la literatura en el ámbito de la re-identificación de vehículos. En esta sección, entre otras cosas, se van a revisar las aportaciones y estudios más destacados. Básicamente el problema que se ha detectado es que la velocidad del vehículo que capta el sensor hace que el tiempo de presencia en el campo de detección del sensor sea inversamente proporcional a ésta (en condiciones de movimiento uniforme). La consecuencia directa sobre las señales que se obtienen es que están formadas por menos muestras cuanto mayor es la velocidad del vehículo.

Si se pretende comparar 2 señales pertenecientes a sendos vehículos a través de medidas de similitud simples, o si se pretende extraer características físicas del vehículo en su paso por el sensor, es importante que las señales estén normalizadas en el dominio temporal (es decir, que tengan el mismo número de muestras), o bien transformarlas al dominio espacial donde la velocidad no interviene en la forma de la señal.

Es importante destacar que el problema de la velocidad de los vehículos para su detección con sensores magnéticos ha sido abordado en la literatura tanto para el caso de espiras magnéticas como para sensores AMR. La diferencia en complejidad de la señal en ambos tipos de sensores no afecta a la naturaleza del

problema. Por este motivo, consideraremos las distintas aproximaciones que se han presentado en ambos casos.

Una de las primeras referencias al problema de la detección para vehículos con distintas velocidades se encuentra en (Sun et al. 1999), donde se propone paliar su efecto a través de normalización de las señales. El procedimiento de normalización se realiza a través de una conversión de los datos del dominio temporal al espacial. Para ello los autores utilizan la velocidad calculada para el vehículo como factor de conversión, y posteriormente realizan una interpolación basada en *splines* para obtener la señal definitiva.

Más recientemente, el problema ha sido considerado por muchos autores en diversos trabajos, con diferentes aproximaciones para la corrección del efecto negativo de la velocidad. En (Tawfik et al. 2002) los autores aplican un proceso de normalización de las señales de una espira magnética para obtener un número idéntico de muestras y poder hacer una comparación de señales punto a punto utilizando una interpolación de tipo *spline*. A pesar de realizar las normalizaciones en amplitud y en muestras, se destaca que existen diferencias entre las señales debido a los ángulos de entrada de los vehículos en las espiras, el punto relativo de paso del vehículo con respecto al centro de la espira, la altura de paso del vehículo por motivos de suspensiones, imprecisión en el cálculo de la velocidad para la normalización, y errores de interpolación.

En el trabajo de (Oh & Ritchie 2003) se realiza una normalización de la señal obtenida de una espira magnética en amplitud y en muestras. La normalización en muestras se realiza en base al tiempo que el vehículo está siendo detectado, de forma que lo convierten en longitud multiplicándolo por la velocidad detectada. En este caso no se pretende obtener un conjunto de muestras único, sino que se desea obtener una característica del vehículo (longitud) que se utilizará posteriormente para la re-identificación. El factor de normalización que se utiliza en el estudio (Tok et al. 2009) realizado con espiras magnéticas también es el tiempo que el vehículo se encuentra sobre el sensor. Los autores destacan los problemas que se derivan de las mediciones en distintas espiras magnéticas y muestran que la extracción de características de las señales para su comparación debe basarse en una normalización en muestras a través de la cuantificación del tiempo que el vehículo se encuentra sobre el sensor.

En (Abdulhai & Tabib 2003) los autores trabajan también con señales obtenidas de espiras magnéticas y constatan las diferencias que existen en las formas de onda para diferentes velocidades. Consideran necesaria, al igual que otros autores, una normalización de las mismas tanto en amplitud como en número de muestras. La normalización en número de muestras la realizan utilizando de nuevo la velocidad del vehículo para obtener un factor de escalado del espacio temporal de la señal, y posteriormente aplican un re-muestreo con el que obtienen una señal normalizada gracias a una interpolación de tipo *spline*. En conjunto, realizan una transformación lineal con un escalado de la señal y un desplazamiento temporal para conseguir alinear dos señales para su comparación.

Como ya se ha mencionado, el problema también se produce en las señales que se obtiene de sensores AMR. Los autores de (Cheung, Coleri & Varaiya 2005) utilizan la velocidad de los vehículos para normalizar las señales obtenidas de estos sensores. Los datos de velocidad se obtienen gracias a la configuración de los sensores en forma de T, disponiendo 4 sensores en cada punto de sensorización. Los autores destacan que no realizan una alineación de la señal, aunque son conscientes de que hay una problemática añadida con respecto a las espiras, que consiste en la posición relativa de paso del vehículo por los sensores que hay que tener en cuenta. A pesar de ello, Cheung no aborda esta problemática en su trabajo.

Algunos autores, como (Haoui et al. 2008), dejan constancia de que con sensores AMR el efecto de la velocidad también afecta negativamente a la detección de vehículos, de manera que se pueden cometer errores de dos tipos: interpretar que hay 2 vehículos donde sólo hay uno, o interpretar que hay un vehículo donde hay varios vehículos. Sin embargo, en dicho trabajo no se realiza una comparación de las formas de las señales y no se aborda el problema de la velocidad como un efecto negativo en la re-identificación.

En (Krogmeier & Bullock 2008) los autores aplican un procedimiento de normalización de señales de espiras magnéticas para corregir efectos de la velocidad, de forma que todas las señales se contrastan con una velocidad nominal de referencia. Los autores van más allá de la simple normalización y afirman que se puede demostrar que es posible convertir una señal perteneciente a un vehículo que viaja a una velocidad en otra señal que pertenece al mismo vehículo viajando a otra velocidad a través de un simple procedimiento de re-muestreo fraccional.

Este mismo procedimiento también lo aplican los autores del estudio (Park & Ritchie 2010), consiguiendo así señales con el mismo número de muestras pero aplicando un procedimiento más fino analizando algunas características de las formas de las señales (valor máximo, pendiente inicial de la curva, posiciones de extremos relativos, etc.). El estudio de (Ndoye et al. 2011) justifica también un problema para la comparación de señales si no están normalizadas con respecto a la velocidad. El procedimiento de normalización en este caso se realiza en base a la velocidad de los vehículos, usando de nuevo una velocidad de referencia que sirve como factor de cálculo para re-muestrear las señales. En (Jeng & Chu 2014) también queda constancia de la necesidad de realizar una normalización en amplitud y muestras de las señales procedentes de espiras magnéticas.

La aproximación de la transformación del dominio temporal al dominio espacial aplicado en las espiras también queda reflejada en (Pitton et al. 2012) para sensores AMR, usando la velocidad calculada de paso de los vehículos gracias a varios sensores dispuestos a una distancia muy cercana.

Pero el análisis más detallado de los efectos de la velocidad de los vehículos en los sensores magnéticos se encuentra en (Karpis 2012). El autor realiza un estudio del efecto de la velocidad de los vehículos que circulan sobre el sensor en la forma de onda generada, distinguiendo si la posición del sensor está bajo el vehículo o en la parte externa (0.3 m.) del mismo. Se constatan las variaciones que suponen velocidades de 20 km/h, 40 km/h y 60 km/h en las formas de las señales. A través de la correlación cruzada se evalúa la similitud de las señales obtenidas en cada caso, con una normalización previa de las señales para ajustar al mismo número de muestras utilizando una interpolación lineal. Cuando el sensor está situado en la parte externa del vehículo, la menor similitud obtenida entre las señales corresponde al eje X (0.9408) y el eje Z (0.9415) cuando se comparan las señales de 20-60 km/h, y el eje Y ofrece los mejores resultados (por encima de 0.98 para todos los casos). Si el sensor se sitúa bajo el vehículo, la mayor diferencia de similitud corresponde al eje Z (0.9017) en la comparación 20-40 km/h, y la menor corresponde al eje X (0.9888) en la comparación 40-60 km/h. En el estudio también se analiza el efecto que tiene el ángulo de incidencia del vehículo en movimiento sobre el sensor, y se destaca que no existe prácticamente diferencia en la forma de las señales en los ejes X e Y, siendo Z el eje que más se ve afectado por esta situación.

Todo lo que muestran los estudios existentes en la literatura mencionados hasta ahora se puede resumir en que el resultado del efecto de la velocidad en el problema de re-identificación de vehículos es que, cuando se obtienen señales para un mismo vehículo y se comparan con alguno de los métodos de similitud que se han propuesto en la sección 4.4.1, no proporcionan el máximo valor de similitud posible que se podría esperar, es decir, valores muy próximos a 1. Esto, ocasiona que no se puedan re-identificar correctamente todos los vehículos (se producen falsos negativos) y que se identifiquen como idénticos vehículos que no lo son (se producen falsos positivos). Como conclusión, la diferencia entre los valores de similitud de verdaderos positivos y verdaderos negativos no existe, con lo que no es posible establecer una frontera que permita realizar la clasificación binaria que se precisa para re-identificar correctamente un vehículo en base a los valores de similitud obtenidos en las comparaciones de las señales de los sensores AMR.

Hemos visto que los efectos de la velocidad pueden ser parcialmente corregidos con un simple proceso de normalización de los datos en el espacio de muestras temporal, aunque ello no resuelva completamente el problema porque está relacionado con otras condiciones de la medición en los sensores. En particular, si se combina el problema de la velocidad con los problemas derivados de la dificultad de segmentar con precisión las señales, aparecen otros efectos negativos que afectan también al proceso de re-identificación y que no pueden ser corregidos con una simple normalización de las señales. Según la literatura que se han analizado hasta el momento, los problemas de la falta de precisión en la segmentación y el efecto de la velocidad en las señales obtenidas no se han abordado de forma conjunta para mejorar los ratios de re-identificación de vehículos.

Para definir mejor este problema, hemos estudiado en detalle las señales que se han utilizado en el experimento del entorno de pruebas controlado con vehículos reales descrito en el Capítulo 4 y hemos clasificado las alteraciones observadas en las formas de dos señales que deberían ser idénticas en dos tipos: desplazamiento de la señal y escalado de la señal. El desplazamiento de la señal consiste en una simple traslación de la señal en la escala de tiempo, manteniéndose la proporción que existe en las formas de las señales. Este problema se genera cuando no se han identificado con precisión los límites iniciales y finales de las señales, y es muy raro que suceda de forma aislada. El escalado de la señal se produce cuando una de las señales se ha transformado con respecto a la otra, manteniéndose la forma de la señal pero en una proporción de escala distinta de 1, lo cual puede ser

entendido como una transformación lineal del espacio de muestras temporal de la señal. De nuevo, es difícil que aparezca un efecto de escalado exclusivamente cuando se comparan dos señales. De hecho, cuando se comparan dos señales de un mismo objeto que no proporcionan un valor elevado de similitud, lo habitual es que exista al mismo tiempo un desplazamiento y un escalado de la señal. En la Figura 83 puede observarse una representación de los problemas que se mencionan.

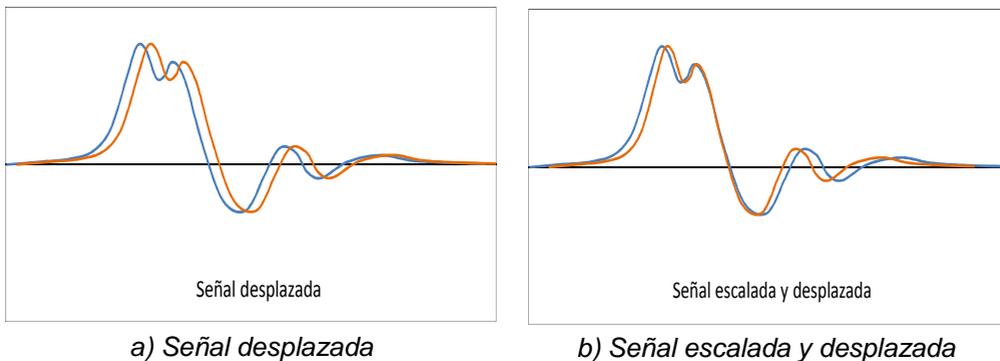


Figura 83. Alteraciones de las formas de las señales de un mismo objeto.

A la unión de estos problemas la hemos denominado *falta de alineación*. Cuantitativamente, es posible valorar las diferencias que los efectos de estas alteraciones suponen al comparar señales. Para ilustrarlo se han tomado algunas señales utilizadas en los experimentos en el entorno de simulación correspondientes al tetraedro magnético del Capítulo 4 y se han comparado dos señales que presentan muy pocas alteraciones y otras dos señales que aparecen ligeramente desplazadas y escaladas, todas ellas pertenecientes al mismo objeto.

Los resultados de los cálculos de similitud para ambos casos se pueden observar en la Figura 84 y la Figura 85. Como puede apreciarse, cuando las señales están alineadas, los valores de similitud que se obtienen para cada una de las componentes y para la similitud total superan el 99%; sin embargo, si las señales no están alineadas, las similitudes de las componentes y la similitud total descienden incluso por debajo del 95%. Esta diferencia de 4 puntos porcentuales es muy significativa en el proceso de re-identificación.

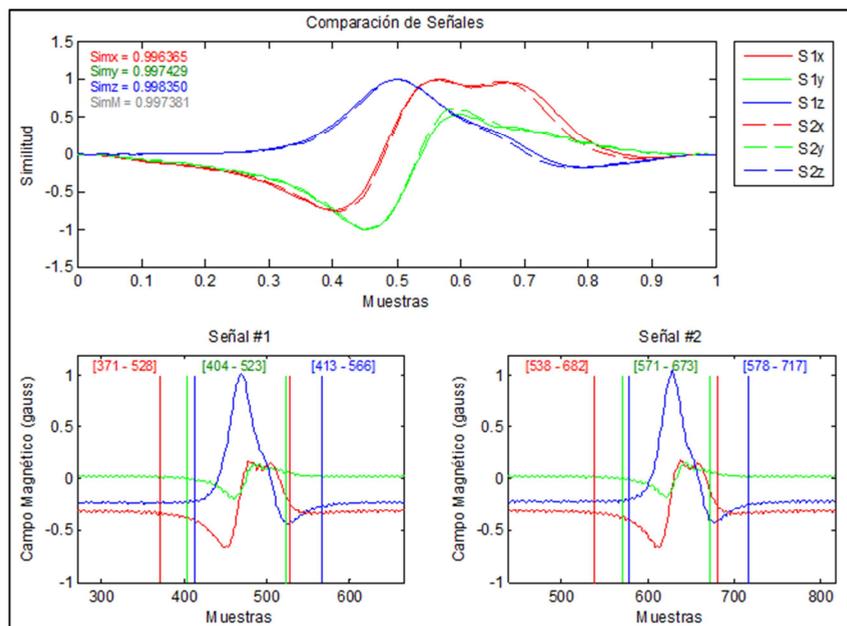


Figura 84. Comparación de señales alineadas

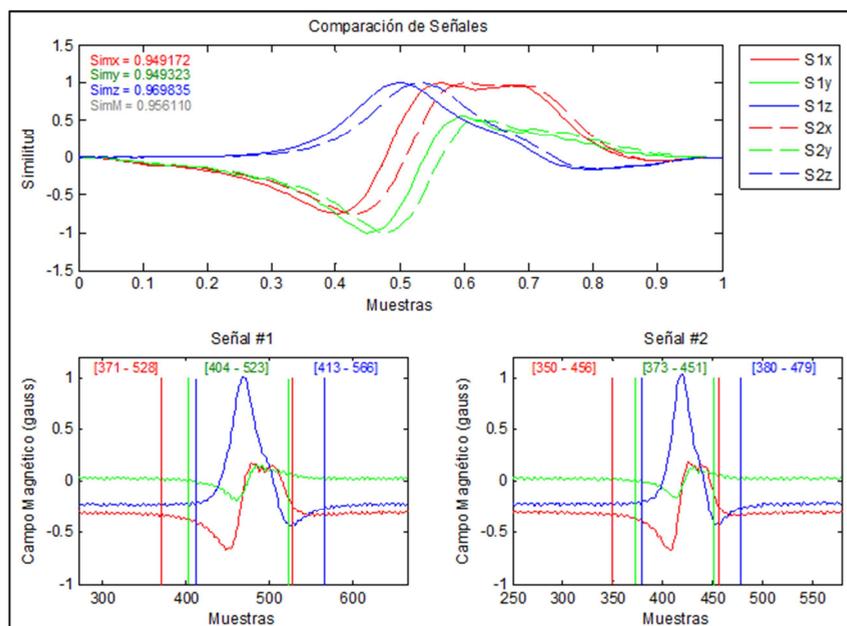


Figura 85. Comparación de señales no alineadas

A la vista de este ejemplo, podemos suponer que los problemas derivados de una falta de alineación en las señales que se están comparando tienen una consecuencia directa en el proceso de re-identificación. **En esta tesis se plantea la hipótesis de que, si se consiguiese un alineamiento óptimo, los resultados de las medidas de similitud mejorarían notablemente y el proceso de re-identificación sería más efectivo.** Abordaremos esta cuestión a lo largo de este capítulo, proponiendo un método de alineación de señales y demostrando que los ratios de re-identificación correcta de vehículos mejoran con su aplicación.

El problema de la falta de alineación de las señales se ha tratado de resolver en la literatura de diversas maneras. En casi todos los casos, las señales con las que se está trabajando se han sometido a un proceso de normalización debido a la diferencia de velocidad del vehículo en su paso por cada sensor. Una vez que las señales han sido normalizadas, se ha observado que no presentan una alineación perfecta para que puedan ser comparadas punto a punto, y los investigadores han propuesto distintas aproximaciones para resolver este problema. Son pocos los estudios que han optado por buscar una alineación de las señales, puesto que muchas medidas de similitud están basadas en la extracción de características de las señales, y sólo en los casos en los que se realiza una comparación de la forma de onda de la señal es cuando esta alineación tiene sentido. A continuación se destacan las principales contribuciones que aparecen en la literatura.

La primera aproximación y más básica la proponen (Abdulhai & Tabib 2003), donde se aplica una transformación de las señales en el tiempo para conseguir un número de muestras equivalente, lo cual permite realizar una alineación muy básica, basada en la detección correcta de las fronteras de la señal. Este procedimiento básico tiene sentido cuando se trabaja con datos de espiras magnéticas por la forma de la señal, pero no es fácilmente extrapolable al caso de los sensores AMR donde las señales son más complejas y la detección de las fronteras, como hemos visto, no es un procedimiento demasiado preciso.

Otros estudios, como (Kwong et al. 2009b), tratan de paliar el efecto de la alineación utilizando datos para comparar señales que no dependan de la variable temporal. En este caso, los autores proponen extraer una secuencia de picos (máximos y mínimos relativos) para cada señal, sin almacenar los tiempos en los que ocurren estos picos. Se incluyen como picos los valores inicial y final de la señal. Esto sucede para cada uno de los 7 nodos (sensores AMR) que utilizan en cada punto de sensorización, y en cada nodo se toman los picos de los 3 ejes.

Posteriormente se computa la distancia entre los picos, pero al no registrarse el momento en el que ocurre el máximo, no se realiza ningún alineamiento de señal. Esta aproximación queda rebatida por (Sanchez 2012) cuando propone utilizar los valores de los extremos relativos referenciados con respecto al tiempo para conseguir un mejor alineamiento de las señales. Sin embargo, el autor no propone ningún método de alineación, sino que utiliza una medida de similitud (DTW) que intrínsecamente evita el problema de la alineación. El trabajo de (Lan et al. 2011) también propone una aproximación similar basada en la extracción de puntos clave para obtener características que le permitan clasificar el vehículo. De igual forma, los puntos elegidos son el inicio, el máximo absoluto, el mínimo absoluto y el final de la señal. En este caso se usan señales tomadas de sensores situados en posiciones externas a los vehículos, utilizando un sensor AMR de 1 eje, con lo que la simplicidad de la forma de la señal ayuda a que esta aproximación tenga sentido.

Otra propuesta de alineación la realizan (Krogmeier & Bullock 2008), quienes utilizan una medida de similitud basada en la correlación cruzada como un mecanismo para alinear señales una vez han sido normalizadas. Parten de la ventaja de que conocen la velocidad de los vehículos, con lo que la normalización aproxima con bastante precisión el número de muestras de las señales, y tan solo es necesario realizar una alineación temporal consistente en un desplazamiento para encontrar un máximo de similitud. A pesar de que obtienen resultados razonables, los autores reconocen que sería mejor trabajar con *microloops*, que proporcionan una forma de onda más rica (equivalente a la de los sensores AMR).

En otros trabajos, como el de (Liu et al. 2009), los autores utilizan un método más rudimentario basado en el uso de más de un dispositivo sensor. En particular, en este estudio utilizan un *array* de 7 sensores AMR inalámbricos dispuestos de forma transversal en un carril y un octavo sensor alineado con el central en el sentido de circulación del tráfico a una cierta distancia de la línea de 7. Los autores utilizan un método de alineación de fuerza bruta, basado en encontrar la mínima distancia acumulada entre todas las muestras de las señales para determinar la posición más correcta para alinear señales (un método que sería equivalente a aplicar una correlación cruzada). El objetivo en este caso es corregir problemas en los sensores (*Sensys Networks*) que quedan bloqueados en algunos intervalos de tiempo para restaurar las tramas de la señal perdidas por estos fallos. La falta de alineación se debe, en este caso, a que los errores de los sensores impiden determinar las fronteras de la señal con precisión. En este caso no se da la circunstancia de que

exista diferencia de velocidades que generen cambios en el número de muestras de la señal, pero la alineación es necesaria para recuperar los datos que proporcionan las señales.

La idea de probar múltiples alineaciones de la señal para obtener la alineación óptima también la llevan a la práctica los autores de (Ernst et al. 2009). En este caso buscan una alineación de señales de espiras para determinar la velocidad de paso de un vehículo. Utilizan un umbral para detectar las fronteras de la señal, pero esto genera diferencias en las señales capturadas, es decir, se pone de manifiesto la problemática de la precisión en la segmentación de las señales. De esta forma, se constata que una alineación basada en las fronteras de la señal proporciona una alineación incorrecta. Por este motivo, aplican un cálculo de correlación para determinar el mayor grado de proximidad entre las señales, y determinar de esta forma la distancia temporal entre ellas.

Esta misma idea se aplica en (Pitton et al. 2012). Para poder calcular la similitud entre señales tienen que alinearlas previamente, a pesar de haber hecho una normalización del espacio de muestras temporal ya que la función de similitud que utilizan (distancia euclídea) exige una alineación perfecta de las señales para obtener el máximo valor de similitud. La alineación se lleva a cabo a través del uso de la correlación cruzada, para posteriormente aplicar la distancia euclídea y así calcular la similitud.

En todos estos casos, la alineación de señales está basada en la suposición de que la velocidad de paso de los vehículos por los sensores es constante. En este caso, la alineación se realiza como un proceso de desplazamiento de una de las señales frente a la otra en el eje temporal, habiéndose realizado una normalización previa de una o de las dos señales. En entornos interurbanos, como las autopistas, esta hipótesis sobre la velocidad se puede asumir con cierto grado de certidumbre. Sin embargo, en entornos urbanos, las situaciones de aceleración y deceleración suelen ser habituales, y no siempre es posible garantizar que no existen variaciones de velocidad en el preciso momento en el que el vehículo está pasando sobre el sensor. Esta situación hace que el proceso de alineación no sea tan sencillo, y sus efectos han sido estudiados por algunos autores.

En el estudio de (Blokpoel 2009) se constata que la aceleración puede tener efectos negativos para la re-identificación, más allá de los problemas generados por la velocidad. Sin embargo, el autor no propone ninguna medida de paliación de estos

efectos, excepto la instalación de dobles espiras para calcular la aceleración con cierto grado de exactitud.

Sin embargo, (Ernst et al. 2010) ha analizado los efectos de las aceleraciones en las señales obtenidas en los sensores magnéticos (espiras) e indica que es posible usar una función de correlación en la que se introduce el efecto de una aceleración constante para alinear señales. En concreto, en este trabajo se muestra que es posible hacer una alineación de señales a través de una transformación no lineal.

A pesar de ello, en esta tesis no se considerarán los efectos derivados de las aceleraciones puesto que no son habituales en los entornos interurbanos donde las velocidades de los vehículos son elevadas y los efectos de las aceleraciones en los sensores que ocupan unos pocos metros son mínimos. Además, a grandes velocidades los efectos de la aceleración son menos apreciables. Por ejemplo, utilizando las ecuaciones de movimiento clásicas de Newton, suponiendo una zona de sensorización de 10 metros y un vehículo con una velocidad relativamente baja para una autopista de 20 m/s, un incremento de velocidad de 1 m/s desde el inicio al final del sensor implicaría una aceleración de  $2 \text{ m/s}^2$ , lo cual representa una aceleración muy elevada para unos cambios de velocidad mínimos.

En resumen, hemos visto que en la literatura se ha abordado el problema que ocasiona la velocidad de un vehículo para su re-identificación cuando tiene que ser detectado por sensores magnéticos en dos puntos distintos o por el mismo sensor en dos momentos distintos. La forma habitual de corregir los efectos negativos de las diferencias de velocidades en las formas de las señales se realiza a través de un proceso de normalización y de un procedimiento de alineación.

El proceso de normalización se ha llevado a cabo en la mayoría de los casos utilizando la velocidad como elemento de cálculo del factor de re-muestreo, de manera que se han obtenido señales con distintos números de muestras en función de la longitud del vehículo. La dificultad de este procedimiento consiste en determinar con relativa precisión la velocidad del vehículo. La alineación se ha llevado a cabo a través de procedimientos de ajuste dinámico de señales, bien a través de un proceso de fuerza bruta o a través de la correlación cruzada, lo que supone un coste de computación importante que depende del número de muestras de las señales.

En esta tesis se propone una alternativa distinta para abordar esta problemática. Por una parte, se pretende desligar la normalización de la señal de la velocidad de los vehículos, de manera que se obtengan señales que sean tanto independientes de la velocidad como de la longitud del vehículo. Esta simplificación permite evitar errores derivados de estimaciones incorrectas de la velocidad, pero también puede suponer la introducción de un elemento que afecte negativamente al cálculo de similitud de señales. Este efecto negativo se puede compensar a su vez con una buena alineación de la señal, lo que permitirá tener un método de comparación de señales de vehículos independiente de la velocidad y la longitud de los vehículos sensorizados, lo cual supondrá un avance con respecto a los métodos propuestos en la literatura hasta el momento.

Para ello, se ha propuesto una normalización única para todas las señales, de manera que el número de muestras obtenido sea el mismo para cualquier vehículo, independientemente de su velocidad de paso por el sensor o su longitud. Por otro lado, se ha propuesto una técnica de alineación de señales más directa que evita los costes computacionales de la correlación cruzada o la fuerza bruta. Este método de alineación está basado en la localización de puntos de referencia de las señales y en una transformación lineal del espacio de muestras de una de las señales que se comparan, de forma que los puntos de referencia sean coincidentes en el eje temporal. Este método de alineación se detalla en la sección 5.2.2.

Una vez las señales se han alineado, no tiene sentido utilizar medidas de similitud complejas o computacionalmente costosas, es decir, se pueden usar medidas de similitud que comparan señales muestra a muestra, aprovechando la disposición óptima de las señales que se comparan. En particular, la medida del coseno, que es la más fácil y simple de implementar, es suficiente para valorar la similitud entre dos señales. Los métodos como XCOR y DTW no tienen sentido a partir de este momento, pues estamos utilizando un modelo de cálculo de similitud computacionalmente más simple y más rápido.

## 5.2.2. Método de alineación de señales

En la sección 5.2.1 se ha visto que existen casos de señales correspondientes a un mismo objeto y que cuando se comparan a través del cálculo de la similitud no se obtienen los valores elevados que cabría esperar y que corresponderían a la comparación de dos instancias de un mismo objeto. Este problema se ha

identificado como causado por una falta de alineación de las señales que se comparan, debido sobre todo a la falta de precisión en el proceso de acotación de las señales y las velocidades de paso de los objetos por el sensor.

Tal y como se ha planteado en la sección 5.2.1, para solucionar este problema se ha diseñado un nuevo algoritmo que permita alinear las señales utilizando una técnica de identificación y alineado de puntos de referencia (extremos relativos o picos de las señales) basada en un re-muestreo de la señal. A este algoritmo lo hemos denominado *Método de Alineación de Picos*.

De manera resumida, el método que se propone se define a través de los siguientes pasos:

- Para cada una de las señales, localizar los extremos relativos de las mismas que sean significativos (más adelante se ampliará el concepto de "significativo").
- Para cada una de las señales, tomar dos extremos del mismo tipo (máximos o mínimos): el más cercano al principio y el más cercano al final de la señal.
- Realizar una transformación lineal (escalado y desplazamiento) de una de las señales para conseguir que los extremos identificados de una señal coincidan con los de la otra señal en la escala temporal.
- Ajustar la señal transformada para que tenga el mismo número de muestras que la señal original.

Por tanto, en el método que se ha diseñado para realizar la alineación de las señales es necesario disponer de 2 pares de puntos de referencia pertenecientes cada uno a una señal distinta, de manera que tras una transformación lineal de una de las señales los pares de puntos serán coincidentes en el eje temporal. Como se muestra en la Figura 86, se pretende encontrar dos pares de puntos característicos de la señal, correspondientes a los valores del espacio de muestras ( $M1$ ,  $M2$ ) y ( $Z1$ ,  $Z2$ ), pertenecientes respectivamente a las señales  $S1$  y  $S2$  (de  $K$  muestras), de manera que tras la transformación de una de las 2 señales haga que los puntos coincidan dos a dos, es decir, que se cumpla la condición de que  $M1=Z1$  y que  $M2=Z2$ .

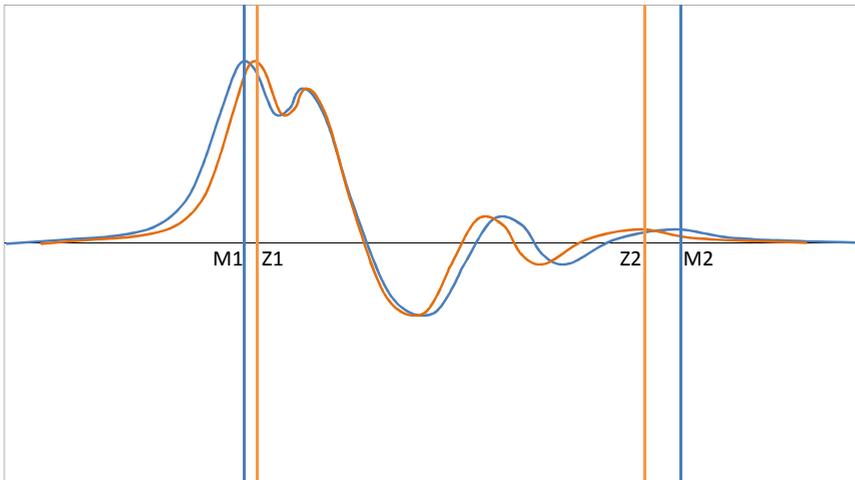


Figura 86. Puntos de referencia en señales no alineadas

A continuación se describen los detalles del método propuesto.

### ***Determinación de los puntos de referencia***

La localización de los puntos de referencia se realiza sobre las señales normalizadas en amplitud y en muestras. Los puntos más significativos que se pueden encontrar en las señales son los extremos relativos.

El método más habitual para localizar extremos relativos en una señal es buscar los cruces por cero de la primera derivada (los puntos donde se anula la primera derivada). Sin embargo, cuando la señal contiene ruido, se pueden localizar muchos extremos relativos que en realidad no lo son. Para evitar esta situación se recurre a un suavizado de la señal. En nuestro caso, dado que partimos de señales normalizadas y suavizadas, no es previsible encontrar este problema.

Por otro lado, una señal puede contener muchos extremos relativos, pero no todos son igualmente significativos. Los picos o valles que tienen pendientes más elevadas son más significativos que los que tienen pendientes más suaves.

El cálculo de los extremos relativos de las señales que se propone no es excesivamente restrictivo. Aprovechando que la señal está normalizada a un número de muestras constante, establecer criterios de selección en base a la

pendiente o a la anchura de los extremos es sencillo, aunque nos hemos basado en un proceso experimental que garantice que se seleccionan los extremos relevantes para el método de alineación. En principio, y dado que la señal ha sido suavizada, se ha considerado que todos los extremos relativos encontrados en la señal son válidos para aplicar el algoritmo de alineación.

Una vez encontrados los extremos para cada una de las 3 señales componentes hay que determinar los dos pares de puntos que se van a utilizar como referencia para realizar la alineación. A este método lo hemos denominado *Algoritmo de Selección de Picos*. Hemos considerado que las condiciones iniciales que deben cumplir los puntos de referencia, a los cuales nos referiremos a partir de ahora como picos, para que exista una mínima consistencia para su emparejamiento, son las siguientes:

- Los picos deben pertenecer en las 2 señales al mismo eje, es decir,  $[M1, M2]$  deben pertenecer a la señal del mismo eje que  $[Z1, Z2]$ .
- La tipología del pico M1 debe ser igual a la del pico Z1, es decir, ambos deben ser máximos o mínimos.
- La tipología del pico M2 debe ser igual a la del pico Z2, es decir, ambos deben ser máximos o mínimos.

Estas condiciones hacen que existan varios pares de puntos en las señales que las satisfagan. Ha sido necesario establecer alguna condición adicional que permita identificar los pares de puntos que mejores resultados ofrezcan para la aplicación del método de alineación.

Dado que el objetivo es conseguir afinar la alineación de señales que pertenecen al mismo objeto, no es lógico buscar puntos de referencia en dos señales que estén muy alejados el uno del otro. Por otro lado, la precisión de la transformación será mayor cuanto más alejados estén los puntos que pertenecen a la misma señal. Con esto, se han establecido dos condiciones adicionales:

- La distancia máxima entre los puntos M1-Z1 y entre los puntos M2-Z2 no debe superar un 15% del número de muestras de la señal.
- La selección del eje que aporte los puntos  $[M1, M2]$  y  $[Z1, Z2]$  será aquel que tenga una mayor distancia entre los puntos M1-M2 o Z1-Z2.

En caso de que no se cumpla ninguna de estas últimas condiciones, se ha establecido un criterio por defecto que consiste en obtener los puntos correspondientes a los máximos relativos más alejados, independientemente de la componente a la que pertenezcan.

### ***Alineación de las señales***

La alineación de las señales se ha conseguido a través de una transformación lineal de una de ellas, de manera que el resultado de la transformación ha permitido hacer coincidir los puntos  $M1-Z1$  y  $M2-Z2$  pertenecientes a dos señales  $S1$  y  $S2$  de  $K$  muestras. La transformación lineal viene definida por una simple ecuación definida en la expresión ( 31 ).

$$y = mx + c \quad ( 31 )$$

En esta ecuación,  $m$  es el factor de escalado del espacio de muestras de la señal y  $c$  es su desplazamiento. La idea es transformar el espacio de muestras de manera que una posición  $x$  se transforme en la posición  $y$ , manteniendo el valor de la señal en los puntos transformados.

Por tanto, resolviendo el sistema de ecuaciones planteado para los puntos  $(x, y) = (M1, Z1)$  y  $(x, y) = (M2, Z2)$ , se obtiene un factor de escalado  $m$  y un factor de desplazamiento  $c$  para la señal  $S1$ . A continuación ha sido necesario re-muestrear la señal  $S1$  para que la distancia  $M1-M2$  fuese idéntica a la distancia  $Z1-Z2$ , y desplazarla en el eje de las abscisas una distancia  $c$  para hacer que los puntos coincidiesen. Finalmente, ha sido necesario ajustar la nueva señal transformada de  $S1$  en número de muestras a la original. Para ello, se ha considerado la situación de los extremos de la nueva señal. Se han dado dos casos:

- Que la nueva señal excediese alguno de los límites, con lo que ha sido necesario recortarla en los puntos 0 y/o  $K$ .
- Que la nueva señal dejase sin valor algunos puntos del inicio o del final del espacio de muestras, con lo que ha sido necesario rellenarlo con valores 0 para la señal.

Este problema se ha replanteado con otra formulación equivalente para evitar realizar en la práctica el desplazamiento de la señal y la evaluación de la situación en los extremos del espacio de muestras. El método equivalente ha consistido en

realizar dos escalados consecutivos de la señal, de manera que cada uno de los escalados tuviese en consideración, además, los efectos producidos en las zonas próximas a los límites de la señal, unificando los procedimientos en un único algoritmo.

El método equivalente se compone de la siguiente secuencia de pasos:

- Realizar una transformación lineal del espacio de muestras de la señal, de manera que se conserve la posición del punto  $K$  y el punto  $x_1$  se transforme en el punto 0.
- Ajustar la señal transformada a  $K$  muestras, recortando o rellenando con ceros.
- Realizar una transformación lineal del espacio de muestras de la señal, de manera que se conserve la posición del punto 0 y el punto  $(K-x_2)$  se transforme en el punto  $K$ .
- Ajustar la señal transformada a  $K$  muestras, recortando o rellenando con ceros.

De esta manera, los puntos  $x_1$  y  $x_2$  definen los segmentos de la señal que se van a re-muestrear. Además, en función de que sean positivos o negativos, habrá que recortar la señal o rellenarla con ceros, respectivamente. La primera de las transformaciones viene dada por la ecuación de la expresión ( 32 ). La segunda de las transformaciones, aplicada sobre el resultado de la primera transformación, viene dada por la ecuación de la expresión ( 33 ).

$$y_1 = K \frac{y - x_1}{K - x_1} \quad ( 32 )$$

$$y_2 = K \frac{y_1}{K - x_2} = \frac{K^2(y - x_1)}{(K - x_1)(K - x_2)} \quad ( 33 )$$

Siguiendo con el razonamiento, se aplican a continuación las condiciones que tiene que cumplir la expresión ( 33 ) para obtener los valores  $x_1$  y  $x_2$ . Estas condiciones vienen determinadas por los puntos de referencia ( $M1, M2$ ) y ( $Z1, Z2$ ). Si se aplica la transformación sobre la señal  $S2$ , el sistema de ecuaciones que hay que resolver es el que viene dado por la expresión ( 34 ).

$$M1 = \frac{K^2(M2-x_1)}{(K-x_1)(K-x_2)} \quad Z1 = \frac{K^2(Z2-x_1)}{(K-x_1)(K-x_2)} \quad (34)$$

La resolución de este sistema de ecuaciones permite obtener los valores de  $x_1$  y  $x_2$  según las expresiones ( 35 ) y ( 36 ).

$$x_1 = \frac{M1Z2 - Z1M2}{M1 - Z2} \quad (35)$$

$$x_2 = K - \frac{K^2(M2 - Z2)}{M1(K - Z2) + Z1(M2 - K)} \quad (36)$$

La ventaja de utilizar esta expresión reside en la forma de realizar las transformaciones. Los valores  $x_1$  y  $x_2$  se utilizarán para seleccionar la cantidad muestras de la señal sobre la que se va a hacer el re-muestreo. De esta manera, la señal original  $S1$  normalizada a  $K$  muestras se someterá a un re-muestreo de  $[x_1, K]$  muestras a  $[0, K]$  muestras, y la señal resultante se someterá a un segundo re-muestreo de  $[0, K-x_2]$  muestras a  $[0, K]$  muestras. Con ello se simplifica la implementación del procedimiento de alineación.

### ***Ejemplo de aplicación del Método de Alineación de Picos***

Se puede ilustrar el funcionamiento del *Método de Alineación de Picos* con un ejemplo. Tomando las señales de la Figura 85 que aparecen en la sección 5.2.1 correspondientes al mismo vehículo y que tienen una clara falta de alineación, se aplica el método propuesto y se calcula la similitud entre las nuevas señales, usando de nuevo la medida del coseno. El resultado de la alineación se puede observar en la Figura 87.

En esta Figura 87 las dos gráficas inferiores representan las dos señales correspondientes al mismo objeto y obtenidas en momentos y condiciones diferentes. Puede apreciarse que la acotación de la señal es diferente para cada señal y que cada señal tiene un número de muestras distinto. Una vez normalizadas, se sitúan de forma solapada y se comparan con la medida del coseno, obteniendo así la información que se ha representado en la gráfica superior izquierda. En ella observamos que las similitudes de las componentes y la similitud media se sitúan en torno al valor de 0.95. Estos valores son pequeños para tratarse

de una señal correspondiente a un mismo objeto, especialmente si observamos que la forma de las señales en los 3 ejes es muy parecida. En la misma gráfica se han situado las posiciones de los extremos relativos obtenidos para cada señal componente con el algoritmo propuesto anteriormente en esta sección, y se han marcado sobre cada una de las señales.

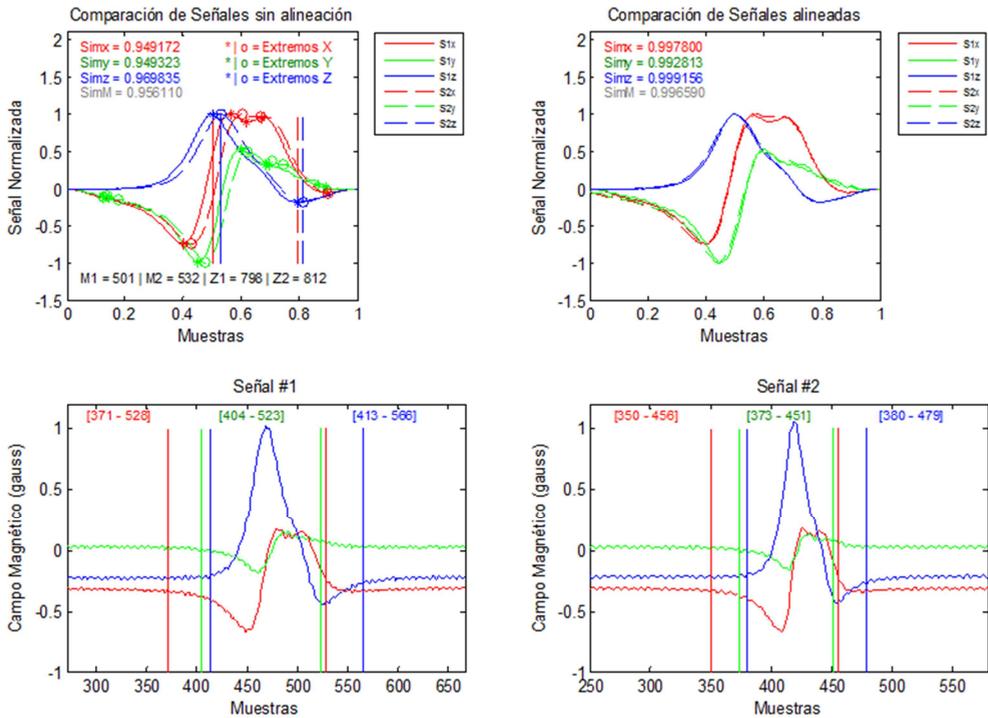


Figura 87. Comparación de similitudes de señales alineadas y no alineadas pertenecientes al mismo objeto

A continuación se han seleccionado los dos extremos que pertenecen a la misma señal y que cumplen los criterios del *Algoritmo de Selección de Picos*. Los valores obtenidos en este ejemplo son  $Z1=798$ ,  $Z2=812$ ,  $M1=501$  y  $M2=532$ , que se han marcado sobre en la gráfica como líneas verticales en dichas posiciones (en color rojo se han marcado los puntos pertenecientes a una señal, y en color azul los puntos pertenecientes a la otra señal). Seguidamente se aplica el *Método de Alineación de Picos* transformando la señal  $S2$ , lo que da como resultado otra señal que se ha comparado con  $S1$  en la gráfica superior derecha. En ella se ha plasmado también el cálculo de similitud con la medida del coseno para las 2

señales. Puede apreciarse con claridad que la alineación de las señales ha mejorado considerablemente, y así se refleja en los nuevos valores de similitud obtenidos, que se encuentran por encima de 0.99 para todas las señales componentes y la para la similitud media. Por tanto, en este caso particular, se aprecia claramente una mejora de los resultados del cálculo de similitud para dos señales que pertenecen al mismo objeto y que no estaban originalmente correctamente alineadas.

También se ha planteado el comportamiento del *Método de Alineación de Picos* para señales que pertenecen a objetos distintos, para descartar un efecto negativo en la re-identificación a través de la capacidad discriminante de la medida de similitud. Utilizando el mismo tipo de gráfico que se ha usado para comparar señales pertenecientes al mismo objeto, se han comparado dos señales seleccionadas arbitrariamente entre las obtenidas en el entorno de simulación y pertenecientes a objetos distintos. El resultado puede verse en la Figura 88.

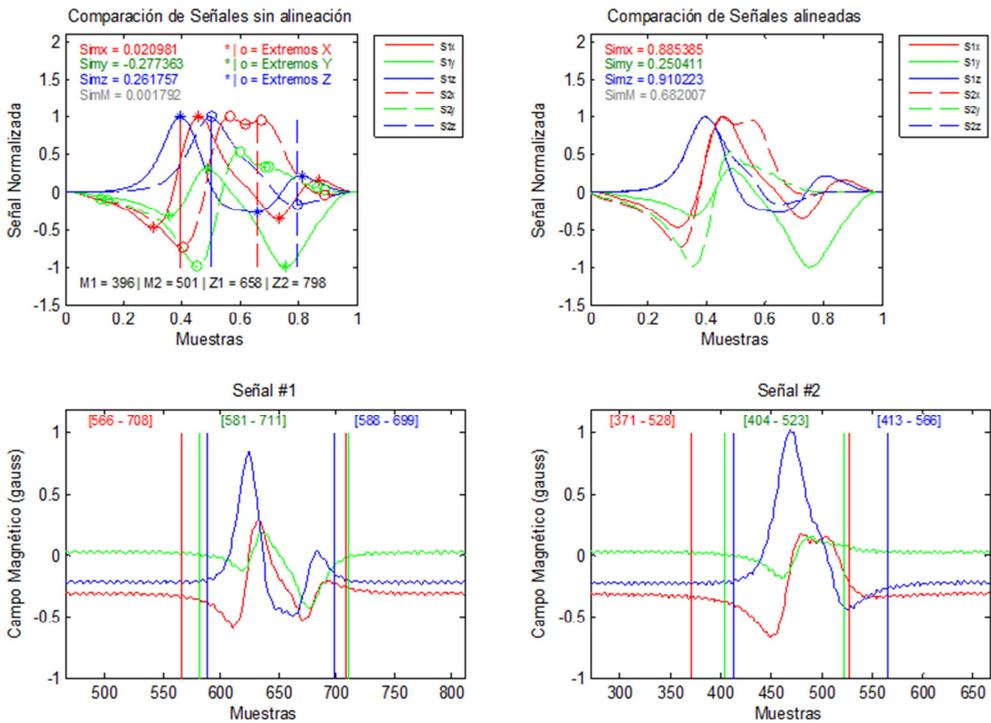


Figura 88. Comparación de similitudes de señales alineadas y no alineadas pertenecientes a distintos objetos

En este caso se puede apreciar visualmente que las formas de las señales componentes son claramente distintas. Los valores de similitud que se obtienen al compararlas son realmente bajos (entre 0.02 y 0.27), lo cual indica que pertenecen a objetos distintos. La cuestión que se plantea es si la aplicación del Método de Alineación puede hacer cambiar los valores de similitud lo suficiente como para que ambas señales puedan ser consideradas del mismo objeto.

En el ejemplo propuesto se constata que el *Método de Alineación de Picos* incrementa los valores de similitud entre las señales componentes y la similitud media. El incremento en este caso es notable, aunque el valor de similitud completa obtenido para las señales alineadas (0.68) no es lo suficientemente elevado como para llevar a la generación de un error de identificación de falso positivo. No obstante, no debe descartarse que esta situación pueda darse.

Por tanto, el *Método de Alineación de Picos* puede mejorar la similitud de señales que pertenecen tanto al mismo objeto como a objetos distintos. Su aplicación en los cálculos de similitud puede hacer crecer el valor medio de similitudes, lo que provocará un efecto de concentración de valores que puede perjudicar la capacidad de discriminación de las medidas de similitud; pero también es posible que este efecto se compense con la mejora de los valores de similitud obtenidos para los mismos objetos.

Para comprobar el efecto que tiene el método en el problema de la re-identificación se ha realizado un experimento de aplicación sobre los mismos entornos experimentales del Capítulo 4.

### 5.2.3. Resultados experimentales

La validación del *Método de Alineación de Picos* se ha llevado a cabo a través de un experimento que compara los resultados obtenidos para una medida de similitud en los entornos de simulación y controlado del Capítulo 4 con los que se obtienen para la misma medida tras la aplicación del *Método de Alineación de Picos* propuesto. Como ya se ha argumentado en este capítulo, la alineación de las señales aplicada previamente al cálculo de una medida de similitud hace que las medidas que se basan en el uso de alineación dinámica de las señales (como la correlación cruzada y la DTW) no aporten ningún valor añadido con respecto a las que usan una comparación directa muestra a muestra.

En base a esto, y dado que el experimento pretende demostrar la mejora que supone la alienación de las señales, se ha decidido utilizar exclusivamente una única medida de similitud: la medida del coseno. De esta manera, si el experimento muestra una mejora clara de los resultados previos, podemos afirmar que hemos encontrado una algoritmia y un método de comparación de señales de objetos, y en particular de vehículos, obtenidas con sensores AMR para su re-identificación y que mejora a los mencionados en la literatura.

En este experimento se ha seguido la misma metodología que en los entornos experimentales del Capítulo 4. Por tanto, se han tomado las señales extraídas en cada uno de los entornos experimentales y se ha calculado la similitud entre todas las señales obtenidas aplicando el *Método de Alineación de Picos*. A continuación se han analizado los resultados obtenidos y se han obtenido los ratios de acierto y de error que ofrece el método. A través de un histograma se presentarán las distribuciones de los valores de similitud obtenidos. Se han creado tablas de contingencia para todos los valores de similitud y se ha representado esta información en curvas ROC. Por último se ha calculado la precisión del método en base a la expresión ( 13 ) de la página 134 y se han analizado los resultados.

Todo este proceso se ha llevado a cabo de forma independiente para el entorno de simulación y el entorno de pruebas controlado, de manera que los resultados obtenidos puedan compararse con los que se han obtenido previamente y así verificar que el *Método de Alineación de Picos* mejora la metodología propuesta.

### ***Entorno de Simulación***

A continuación veremos que la aplicación del *Método de Alineación de Picos* en el entorno de simulación incrementa de manera notable los valores de similitud obtenidos en todas las comparaciones. En la Figura 89 se ha representado un histograma de los valores de similitud que se han obtenido comparados con los del método que no utiliza la alineación. En esta Figura se puede apreciar un desplazamiento de los valores de similitud hacia el 1 y una acumulación de los valores de similitud muy próximos a 1. En concreto, la cantidad valores que sobrepasan 0.95 está en torno a 4.000. Esto hace que sea más complicado establecer un valor umbral que permita diferenciar los aciertos de los errores en la re-identificación, puesto que el margen de valores para la discriminación disminuye.

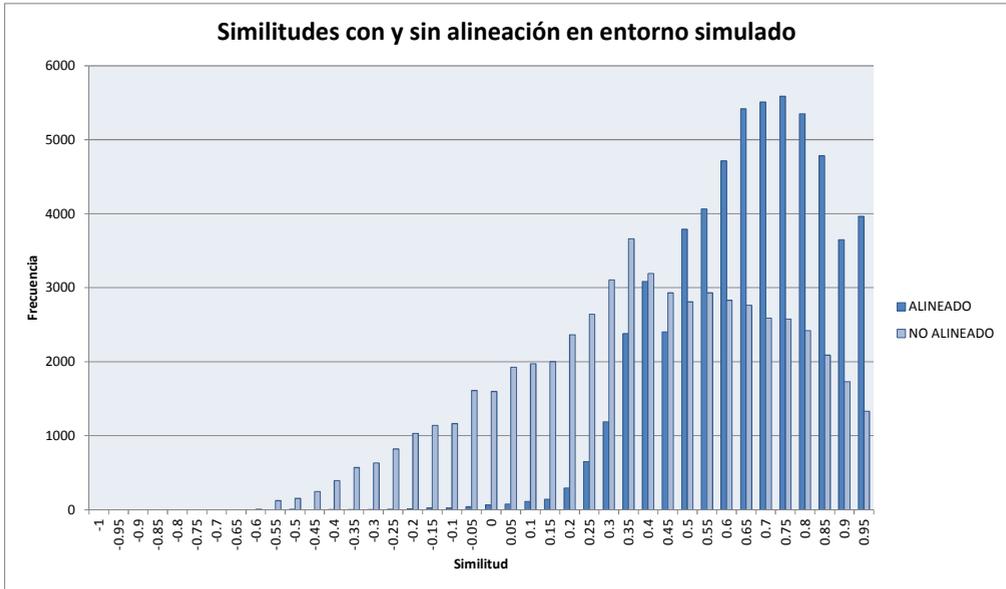


Figura 89. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno con y sin alineación en el entorno de simulación

Sin embargo, tras analizar los resultados de los aciertos y los errores, se puede comprobar (de forma comparada en la Tabla 19) que se ha producido un aumento muy importante en la capacidad de re-identificación, puesto que se ha llegado a alcanzar un valor del 83.75% de acierto frente al 36.04% (Tabla 5, página 121) que se obtenía sin alineación de señales. Por tanto, el efecto negativo que aparentemente podía provocar la acumulación de valores de similitud en torno al valor de similitud máximo de 1 queda compensado con una mejora en la capacidad de re-identificación.

Método	Similitud Máxima	Similitud Mínima	Porcentaje de Acierto	Porcentaje de Error
COS Alineado	1.000000	-0.4897	83.75%	16.25%
COS	0.999729	-0.5582	36.04%	63.96%

Tabla 19. Resumen de datos de similitud para el método del coseno con alineación en el entorno de simulación.

Un análisis más detallado de la capacidad de discriminación a través de la curva ROC, que puede verse en la Figura 90, muestra que el comportamiento de la nueva medida de similitud también mejora. De hecho, se puede apreciar que el RFP se separa de cero para valores de RVP superiores al 85%, lo cual indica un comportamiento muy bueno de la medida de similitud.

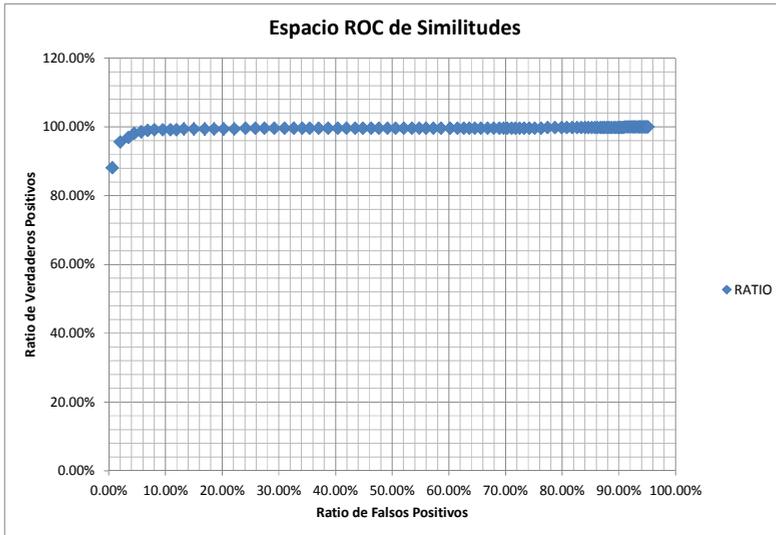


Figura 90. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes con Alineación para el modelo del Coseno en el entorno de simulación

No obstante, el punto óptimo de clasificación, cuyas características se han plasmado en la Tabla 20 contrastadas con el método sin alineación, fijan el valor de similitud de clasificación en 0.97, y de nuevo, al igual que sucedía en el caso de la medida sin alineación (Tabla 7, página 132), el número de FP es muy grande para que se pueda considerar un buen punto de clasificación

Método	Similitud	VP	FP	$\frac{VP+FP}{P}$	RVP	RFP	Distancia
COS Alineado	0.97	930	1954	2884	0.97	0.03	0.0467
COS	0.73	796	10372	11168	0.83	0.18	0.2510

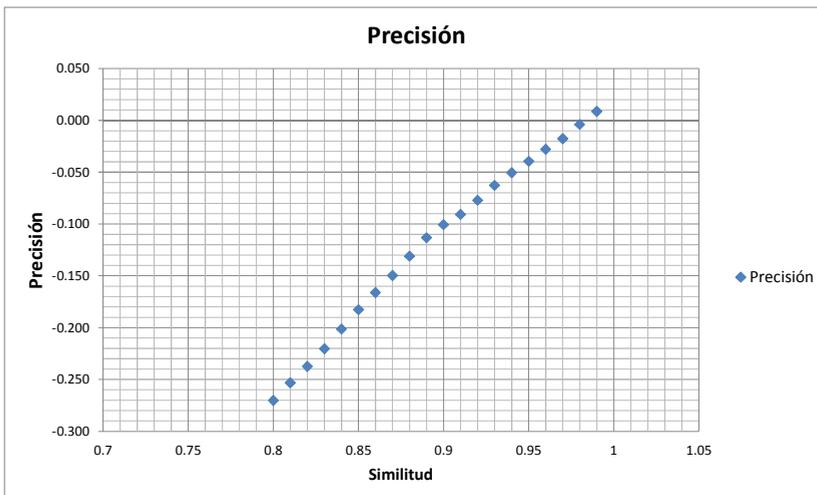
Tabla 20. Detalle de los valores de similitud para el punto óptimo de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de simulación

Se ha calculado cuánto representa el número de FP con respecto al número de VP (Tabla 21, junto con los datos del método sin alineación) y se ha obtenido un valor de más del 210%, que de nuevo no es un valor aceptable para la clasificación.

Método	Similitud	VP	FP	ERROR
COS Alineado	0.97	930	1954	210.11%
COS	0.73	796	10372	1303.02%

*Tabla 21. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de simulación*

Por último, se ha calculado la precisión de la nueva medida para encontrar un valor de similitud que permita aportar un criterio de clasificación mejor. El comportamiento que tiene la precisión con respecto a los valores de similitud se muestra en la Figura 91. En esta ocasión no se aprecia ningún máximo relativo en la gráfica en puntos intermedios de similitud, sino que el máximo se halla en 0.99. Este dato confirma la hipótesis planteada de que, en este caso, no es posible definir un valor umbral claro para realizar una buena clasificación para la re-identificación.



*Figura 91. Gráfico de precisión de la similitud con alineación para el modelo del Coseno en el entorno de simulación*

### Entorno de Pruebas Controlado

Como veremos a continuación, la aplicación del *Método de Alineación de Picos* en el entorno de pruebas controlado, a diferencia del entorno de simulación, sí que ha presentado mejoras notables y no ha tenido efectos negativos para la re-identificación. La aplicación de la alineación también ha provocado en este caso un incremento de los valores de similitud para muchos casos en comparación con el método que no aplica la alineación, tal y como se puede apreciar en el histograma de la Figura 92. En este caso, a diferencia del entorno de simulación, la acumulación de valores en torno al 1 no ha sido tan pronunciada. De hecho, se aprecia que existe una acumulación importante de valores de similitud superiores a 0.9, pero existe una cantidad reducida de casos en los que la similitud se encuentra entre 0.8 y 0.9. Esto es un síntoma de que la capacidad de discriminación de este método de similitud se mantiene e incluso mejora al método sin alineación.



Figura 92. Histograma de Similitudes para el modelo del Coseno con y sin alineación en el entorno de pruebas controlado

Al analizar los resultados de re-identificación obtenidos con este método, cuyo resumen se puede ver en la Tabla 22 contrastados con los datos correspondientes al método sin alineación, se puede observar como el porcentaje de acierto ha

mejorado enormemente, dado que se llega a alcanzar un 92.78% de éxito en la re-identificación, frente al 72.78% de la medida del coseno sin alineación (los datos correspondientes a las medidas sin alineación se encuentran en la Tabla 11, página 147). Los valores de similitud máxima y mínima no han variado prácticamente con respecto al caso en el que no hay alineación.

Método	Similitud Máxima	Similitud Mínima	Porcentaje de Acierto	Porcentaje de Error
COS Alineado	0.998883	-0.4549	92.78%	7.22%
COS	0.998477	-0.5019	72.78%	27.22%

*Tabla 22. Resumen de datos de similitud para el método del coseno con alineación en el entorno de pruebas controlado.*

Estos valores, además, son superiores al mejor método con alineación dinámica aplicado en el Capítulo 4 (el DTW con un 90.11% de acierto), superándolo en más de 2 puntos porcentuales. La ventaja que supone esto es que con un coste computacional mucho menor, el nuevo método de similitud permite obtener resultados mejores.

Con respecto a la capacidad discriminante del método, se ha realizado de nuevo un análisis a través de una curva ROC, representada en la Figura 93. En ella se puede apreciar que se consiguen valores de cero en el RFP para valores de RVP cercanos al 90%. Esta curva es muy similar a la obtenida con el método DTW (Figura 67, página 157), siendo mejor en el comportamiento en cero de RFP (casi un 90% frente a un 80% de RVP máximo) y ligeramente peor en la tendencia a alcanzar el 100% del RVP (un 30% frente a un 20% de RFP).

A pesar de que la curva ROC también mejora al caso sin alineación, el punto de clasificación óptimo que ofrece (Tabla 23, con datos contrastados con el método sin alineación) sitúa el valor de similitud en 0.69, generando un gran número de FP que no son aceptables para la re-identificación (más del 160% de error como se muestra en la Tabla 24, con datos contrastados con el método sin alineación).

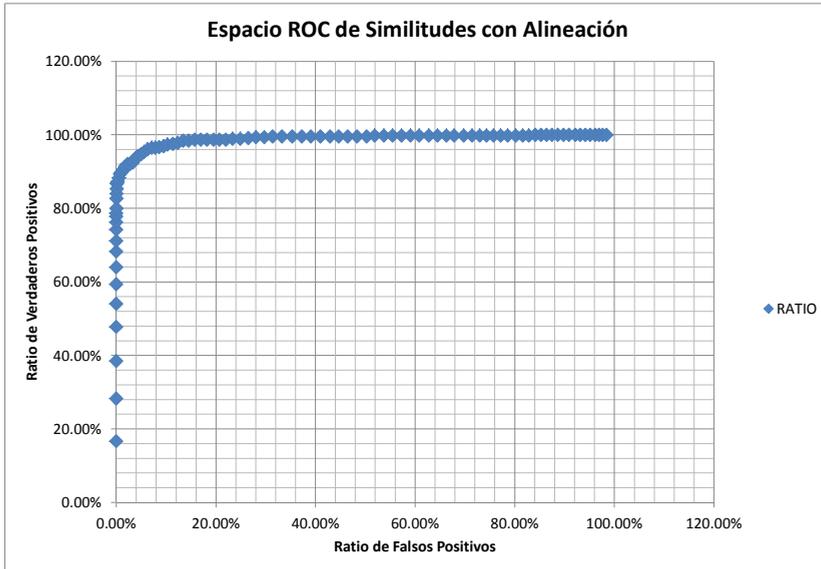


Figura 93. Gráfico del Espacio ROC de Similitudes con Alineación para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado

Método	Similitud	VP	FP	VP+FP	RVP	RFP	Distancia
COS Alineado	0.69	848	1364	2212	0.94	0.04	0.0724
COS	0.60	716	3331	4047	0.80	0.11	0.2510

Tabla 23. Detalle de los valores de similitud para el punto óptimo de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de pruebas controlado

Método	Similitud	VP	FP	ERROR
COS Alineado	0.69	848	1364	160.85%
COS	0.60	716	3331	465.22%

Tabla 24. Error de identificación por falsos positivos en los puntos de clasificación óptimos de la Curva ROC para el método del coseno con alineación en el entorno de pruebas controlado

Por este motivo, se ha recurrido de nuevo al cálculo de la precisión para los valores de similitud, cuyo resultado se ha representado en la gráfica de la Figura 94. La tendencia de los valores de la precisión es muy similar al método de similitud sin alineación, pero con valores más altos, lo que indica que el número de FP respecto al de VP es menor para cualquier valor de similitud.

En la gráfica de la Figura 94 se observa que el valor de similitud 0.83 es el que ofrece un máximo absoluto, y este es que se debe seleccionar como valor de corte para determinar si un objeto es el mismo o no. Para el valor de similitud de 0.83, el RVP es del 85.33% (lo que corresponde a 768 vehículos re-identificados correctamente), y el RFP es de tan sólo un 0.10% (lo que corresponde a 30 vehículos re-identificados incorrectamente). Esta misma situación para el algoritmo DTW suponía un valor umbral de similitud de 0.82, con un RVP de 79.11% (correspondientes a 712 vehículos re-identificados correctamente) y un RFP de 0.20% (correspondientes a 64 vehículos re-identificados incorrectamente). Por tanto, el método del coseno con alineación de señales mejora también en este aspecto al DTW.

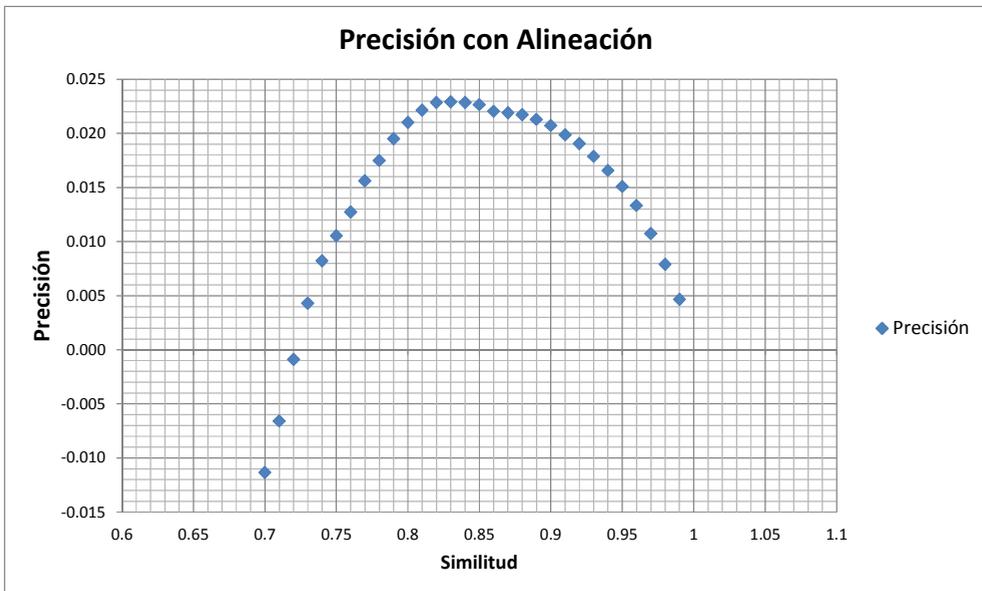


Figura 94. Gráfico de precisión de la similitud con alineación para el modelo del Coseno en el entorno de pruebas controlado

### ***Validación de la medida de similitud óptima***

Los resultados experimentales del entorno de pruebas controlado se han utilizado también para validar la elección de la medida de similitud óptima que se ha tratado en la sección 5.1 de este capítulo. Las pruebas realizadas para determinar la necesidad del uso de las tres componentes de las señales que ofrece un sensor AMR de 3 ejes habían mostrado que la mejor medida posible era la  $M_7$ , y que las medidas  $M_4$ ,  $M_8$  y  $M_{11}$  eran también buenas candidatas.

Este último experimento ha permitido validar la selección realizada en base a una ampliación de los resultados obtenidos. En particular, se han tomado las mismas medidas de similitud definidas para la selección de la medida de similitud óptima, pero tomando esta vez como métrica base la fórmula del coseno, es decir, que las  $M_i$  se han calculado como combinaciones lineales de las similitudes sobre los datos de los ejes X, Y y Z, usando como medida base la fórmula del coseno en lugar de la correlación cruzada. Para cada una de las medidas se ha calculado el porcentaje de acierto en el proceso de re-identificación, de la misma manera que en la sección anterior, y los resultados obtenidos se han presentado en la Tabla 25.

<b>MEDIDAS DE SIMILITUD</b>											
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$	$M_{11}$
%	86.44	84.00	81.22	92.00	85.78	91.56	92.78	91.44	85.78	91.22	91.89

*Tabla 25. Porcentaje de acierto en la re-identificación de vehículos en el entorno de pruebas para las medidas de similitud con alineación de señales*

Estos resultados muestran que, efectivamente, la medida  $M_7$  es la que ofrece un porcentaje de acierto mayor, lo cual confirma y justifica la selección de la medida de similitud óptima realizada en la sección 5.1. No obstante, y como también se mencionaba en dicha sección, se puede confirmar que las medidas  $M_4$ ,  $M_8$  y  $M_{11}$  ofrecen unos resultados muy semejantes y perfectamente comparables con  $M_7$ , aunque también lo son  $M_6$  y  $M_{10}$ . Es particularmente destacable el hecho de que los resultados obtenidos con el uso de datos de 2 ejes (X-Y, o Y-Z) sean casi igual de buenos que la medida que utiliza los 3 ejes, por lo que el uso de sensores de 2 ejes estaría justificado en entornos donde el bajo coste sea un requisito.

### **Comparación con otros estudios**

En la Tabla 2 (página 25) se ha mostrado un resumen de los ratios de re-identificación obtenidos por otros investigadores en trabajos previos. Algunos de esos trabajos se llevaban a cabo en entornos experimentales controlados, similares al que se ha utilizado en esta tesis, mientras que otros se desarrollaban en entornos de trabajo real.

Tras aplicar las medidas de similitud mejoradas propuestas en esta tesis, se han comparado los resultados que hemos obtenido con los de otros investigadores, pero exclusivamente en experimentos controlados. El resumen de los datos de la comparativa se ha plasmado en la Tabla 26, siendo los identificadores de los experimentos los que figuran a continuación:

1. (Cheung & Varaiya 2007), experimento 1
7. (Ndoye et al. 2011), experimento 1
12. (Charbonnier et al. 2012)
13. (Pitton et al. 2012)
14. Experimento propio en entorno controlado

<b>COMPARACIÓN DE RATIOS DE RE-IDENTIFICACION</b>					
Estudio	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
Tipo de experimento	C	C	C	C	C
Número de Sensores	7	2	1	2/4	1
Puntos de sensorización	1	1	1	1	1
Número de vehículos	7	--	25	25	30
Ratio de re-identificación (%)	98.9	95.6	78	90/100	92.78

*Tabla 26. Comparación del ratio de re-identificación con el de otros estudios en entornos de prueba controlados*

En la tabla comparativa se puede apreciar que el valor de re-identificación que se obtiene con el método propuesto en esta tesis es del mismo orden que el de la mayoría de los otros trabajos. Sin embargo, las condiciones experimentales no son las mismas, y marcan una diferencia apreciable que hay que destacar.

Si tenemos en cuenta el número de sensores utilizados en cada experimento, en nuestro caso se ha trabajado con un sensor. Del resto de trabajos, tan solo el (12) se ha desarrollado en las mismas condiciones. Si comparamos el ratio de re-identificación de nuestro experimento con el del trabajo (12) se aprecia un incremento considerable a nuestro favor, de alrededor de un 15%.

En los trabajos en los que se han utilizado varios sensores, los resultados de nuestro experimento son inferiores. Aun así, hay que considerar otras condiciones experimentales que justifican esto. En el experimento (1) se trabaja con 7 sensores y 7 vehículos, lo que representa una diferencia considerable en comparación con nuestro trabajo. El número reducido de vehículos facilita, lógicamente, la probabilidad de re-identificación porque se disminuye la casuística de las señales. Trabajar con 7 sensores, además, permite realizar una selección óptima de las señales de cada vehículo que en nuestro caso no es posible. Estos motivos justifican claramente la diferencia entre los ratios de re-identificación.

En el estudio (7), la configuración de los 2 sensores conlleva unas condiciones en la adquisición de las señales muy favorables para la re-identificación, puesto que los sensores están dispuestos longitudinalmente separados unos pocos metros y se comparan las señales obtenidas por uno y otro sensor para todos los vehículos. La diferencia en las condiciones de adquisición de los datos entre ambos sensores para un vehículo son mínimas, por lo que es esperable obtener señales casi idénticas para un mismo vehículo en ambos sensores. A pesar de esta diferencia con nuestro experimento, solo hay una distancia de un 3% en nuestra contra en el ratio de re-identificación.

En el experimento (13) se utilizan 2 y 4 sensores. En el caso de 2 sensores, nuestro método ofrece mejores resultados. Sin embargo, cuando se utilizan los 4 sensores, la diferencia es notable porque obtienen un 100% de ratio de re-identificación. En este último caso la disposición transversal de los sensores es la que aporta el valor añadido (que de nuevo permite seleccionar los datos del sensor óptimo), junto con una aplicación combinada de una técnica de ajuste de señales con una medida de similitud normalizada.

## 5.3. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado una técnica que permite mejorar los resultados de los cálculos de similitud entre señales procedentes de sensores AMR de 3 ejes para la re-identificación de vehículos.

En primer lugar se ha justificado la necesidad de utilizar las 3 componentes de cada señal capturada por un sensor AMR para re-identificar un objeto. En el mercado se pueden encontrar sensores AMR de 1, 2 y 3 ejes, y todos ellos se han aplicado de un modo u otro en el campo de los ITS o en la re-identificación de vehículos. Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura ningún estudio que demuestre que el uso de un sensor de 3 ejes es más eficiente que otro con menos ejes. Por este motivo, se ha diseñado y desarrollado un experimento orientado a determinar de manera justificada cuáles son los ejes que deben formar parte de una medida de similitud óptima.

El experimento permite obtener varias conclusiones. Por una parte, la utilización de un solo eje en las medidas de similitud ofrece en general peores resultados que las medidas que combinan varios ejes. A nivel individual, es el eje X el que proporciona mayor capacidad de re-identificación. Esto contrasta con algunos estudios previos en los que se ha usado únicamente el eje Z, como (Tian et al. 2014), (Coleri et al. 2004) (que indica explícitamente que el eje Z es el mejor), o (Haoui et al. 2008), que si bien no ofrece un rendimiento mucho peor, no es la mejor de las opciones cuando se trabaja con un solo eje. También se ha mostrado que el eje Y es el que peores resultados ofrece cuando se utiliza de forma aislada en las medidas de similitud.

Por otro lado se ha observado que las medidas que utilizan combinaciones de varios ejes ofrecen mejores resultados. Curiosamente, aquellas en las que interviene el eje Y (que es el peor a nivel individual) son las que mejores resultados ofrece. Esto permite concluir que, si bien el eje Y no debe utilizarse de forma aislada como medida de similitud, cuando se combina con otro eje ofrece una capacidad discriminante importante que ayuda a clasificar y re-identificar con mayor precisión los vehículos.

Finalmente se ha justificado que la mejor medida de similitud es la que utiliza los tres ejes, y en particular combinando sus similitudes a través de la media aritmética.

No obstante, a pesar de ser esta la mejor elección, las medidas que combinan las señales X-Y e Y-Z ofrecen resultados ligeramente inferiores en eficiencia y pueden ser utilizados en determinados contextos. Estas conclusiones han sido avaladas por un experimento final en el que se ha utilizado una medida de similitud mejorada.

En segundo lugar, se ha estudiado el motivo por el cual las señales pertenecientes al mismo objeto no ofrecían valores de similitud elevados. Se ha llegado a la conclusión de que la causa principal es la falta de alineación que existe entre las señales que se comparan. Esta falta de alineación se debe a las diferencias de velocidad de paso de los objetos por el sensor, y a la precisión del método de segmentación de las señales, que en función de la velocidad del vehículo y de la posición del sensor calcula los límites de la señal de forma distinta.

Se ha planteado la posibilidad de mejorar este aspecto en el proceso del cálculo de similitud. Para ello se ha diseñado un *Método de Alineación de Picos* que realiza un ajuste de las señales de manera previa al cálculo de la similitud. La alineación de las señales se consigue a través de la identificación de unos puntos de referencia en las señales y la aplicación de una transformación lineal sobre el espacio de muestras de las señales (la misma transformación para las 3 componentes, para garantizar la dependencia temporal existente entre ellas).

Con la alineación de las señales, los métodos de cálculo de similitud que se estudiaron en el Capítulo 4 que usan intrínsecamente procesos de alineación dinámicos pierden su ventaja con respecto a los que realizan una comparación estática muestra a muestra. Estos últimos son computacionalmente menos costosos que los dinámicos, y pueden ser utilizados en combinación con el *Método de Alineación de Picos* propuesto ofreciendo resultados mejores. Esto se ha demostrado a través de la realización de un experimento en el entorno de simulación y el entorno de pruebas controlado, de manera que se han obtenido porcentajes de acierto de re-identificación de objetos superiores a los que ofrecían los algoritmos dinámicos.

También se ha constatado que la mejora que ha aportado el *Método de Alineación de Picos* se ha producido de manera muy clara en el entorno de pruebas controlado, es decir, cuando se trabaja con señales pertenecientes a vehículos reales. Para el entorno de simulación, aunque se han incrementado los valores de similitud y la precisión de la re-identificación, la capacidad de discriminación de señales se ha visto afectada negativamente. La explicación a este hecho reside en

la forma de las señales en cada entorno. Las que corresponden a los vehículos reales son más complejas y variadas, mientras que las del entorno de simulación son más simples y parecidas entre ellas. Por tanto, el *Método de Alineación de Picos* tiene sentido aplicarlo cuando se trabaja con objetos que tienen una carga ferromagnética considerable como para generar formas de ondas complejas en un sensor AMR, como en el caso de los vehículos.

Finalmente se ha comparado el resultado del ratio de re-identificación que hemos obtenido con las medidas de similitud mejoradas en el entorno de pruebas controlado con los trabajos previos de otros investigadores. Se ha constatado que, cuando se utiliza un único sensor para la re-identificación, nuestro método ofrece mejores resultados que el resto, incluso es mejor que alguno de los métodos propuestos que utilizan 2 sensores. Sin embargo, los trabajos que han utilizado varios sensores, ofrecen mejores resultados que los de nuestro método, debido sobre todo a la posibilidad de selección de la señal óptima del sensor de la que carece nuestro método. Este hecho induce a pensar que los resultados de la re-identificación son muy sensibles a la posición de los sensores con respecto al paso de los vehículos.

En conclusión, en este capítulo se ha definido y probado un método de cálculo de similitudes de señales obtenidas de un único sensor AMR para la re-identificación de vehículos que ofrece valores de similitud más elevados, haciendo que sea más eficiente el emparejamiento de los mismos objetos sin perder capacidad de discriminación con objetos distintos. Se ha obtenido, pues, una medida de similitud mejorada para el caso de uso de un único sensor. La comparación de los resultados que hemos obtenido con otros experimentos que utilizan más de un sensor nos han conducido a la siguiente fase de esta tesis que consiste en estudiar cómo afecta la posición del sensor con respecto al vehículo en la re-identificación y cuyos resultados se presentan en el siguiente capítulo.

## 6. EFECTO DE LA POSICION VEHICULO-SENSOR

---

En los estudios que hemos realizado y presentado en los capítulos anteriores hemos mostrado que las señales obtenidas de sensores AMR permiten comparar vehículos utilizando diversas medidas de similitud. Si se utilizan las señales directamente extraídas de los sensores, los ratios de re-identificación de vehículos no son muy elevados si no se utiliza una medida de similitud que se adapte a las posibles variaciones de las formas de la señal.

Gracias a los experimentos desarrollados hemos conseguido determinar la forma de utilizar las componentes de las señales que ofrecen los sensores AMR de 3 ejes para obtener una medida de similitud idónea. También hemos definido un algoritmo de pre-procesamiento para garantizar una comparación óptima entre las señales, independientemente de la forma de onda que posean debido a las condiciones de monitorización de los vehículos y de extracción de las señales. Con todo ello hemos conseguido obtener valores de similitud superiores y mejorar de esta forma los ratios de re-identificación de vehículos.

Estos experimentos se han basado en la utilización de señales obtenidas en condiciones de trabajo similares para todos los vehículos, lo que en la práctica supone obtener señales muy similares para un mismo vehículo cada vez que es

sensorizado. Sin embargo, las señales que se obtienen de un sensor AMR cuando se monitoriza un vehículo en condiciones de circulación reales van a ser dependientes de la posición del sensor con respecto al vehículo. Si se comparan 2 señales de un mismo vehículo tomadas por sensores en diferentes posiciones se pueden obtener valores de similitud que indiquen que no se trata del mismo vehículo, siguiendo los procedimientos de re-identificación que hemos utilizado hasta el momento. Además, En los entornos urbanos es más sencillo controlar las posiciones de paso que en los entornos interurbanos, sobre todo por las dimensiones de las vías y la forma en la que circulan los vehículos.

En este capítulo se presenta un análisis de la variación de las señales obtenidas de un vehículo por un sensor AMR en función de su posición con respecto al vehículo. El objetivo final es disponer de suficiente información como para poder diseñar una configuración de sensores que permita obtener las mejores señales para comparar vehículos y que a su vez garantice una mínima variabilidad entre ellas para lograr los máximos valores de similitud, independientemente de las posiciones relativas de paso de los vehículos respecto a los sensores. Para ello se han analizado las características de los vehículos a través de un modelado magnético y se han determinado las condiciones de ubicación de los sensores idóneas para poder re-identificar vehículos con mayor precisión.

## 6.1. Introducción

La perturbación el Campo Magnético de la Tierra (CMT) que genera un objeto ferromagnético en una posición depende del momento magnético de dicho objeto (Ma et al. 2014). Esta perturbación tiene una naturaleza tridimensional de manera que en cada punto del espacio cercano al lugar donde se produce la perturbación, el CMT puede ver modificada su amplitud y su dirección con respecto a su situación de referencia (es decir, cuando no existen elementos que lo perturben). En este contexto, la medición de la perturbación que genera un vehículo detenido o en movimiento puede ser medida por un sensor AMR a través de la diferencia de los valores de magnitud del CMT medidos con y sin la presencia del vehículo. En el caso de un vehículo en posición estática, la perturbación que medirá el sensor AMR desde una posición fija será constante. Si el vehículo está en movimiento, la perturbación será variable y se podrá valorar indirectamente la composición ferromagnética del vehículo en base a la perturbación medida, es decir, se podrá caracterizar magnéticamente el vehículo.

En los capítulos y secciones anteriores de esta tesis nos hemos centrado en la obtención de las características magnéticas de un vehículo con un sensor AMR y los métodos de comparación de estas características para poder realizar una re-identificación. Se han tenido en consideración los parámetros que pueden afectar a la forma de una señal y los métodos de comparación de señales y se han propuesto mejoras para optimizar tanto la extracción de datos como los métodos de comparación. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta cómo afecta la posición del sensor con respecto al paso del vehículo en cuanto a las señales obtenidas. En el caso del entorno de simulación, la posición relativa del sensor con el objeto sensorizado no afecta a los resultados porque no se pueden producir variaciones considerables. Sin embargo, en el entorno experimental controlado con vehículos reales, las dimensiones de los objetos sensorizados en comparación con las dimensiones del sensor hacen que tenga sentido considerar las posiciones relativas vehículo-sensor.

En este capítulo se mostrará el resultado del estudio realizado como parte de esta tesis sobre la variación de la perturbación del CMT que genera un vehículo en movimiento en función de la posición del sensor y sobre el efecto que esto puede tener en la obtención de las huellas magnéticas de los vehículos con fines de re-identificación. También se mostrarán las conclusiones sobre la problemática del uso de uno o varios sensores para la obtención de señales que permitan realizar una re-identificación y que ha sido identificada en el estudio de la literatura.

## 6.2. Caracterización magnética de un vehículo

Vamos a definir la caracterización magnética de un vehículo como el comportamiento del mismo con respecto a la perturbación que ocasiona su presencia sobre el CMT debido a su composición ferromagnética particular. Hemos visto en los capítulos 4 y 5 que diferentes vehículos y objetos magnéticos generan perturbaciones distintas para medidas realizadas con una posición relativa del sensor AMR con respecto al objeto muy similar (casi idéntica en el caso del entorno de simulación, y con pocas variaciones en el entorno de pruebas controlado). Estas diferencias se deben exclusivamente a la composición y distribución ferromagnética del objeto y sirven para poderlos diferenciar y re-identificar.

En los experimentos que hemos realizado en el entorno de pruebas controlado, el proceso de comparación de las huellas magnéticas obtenidas para los mismos

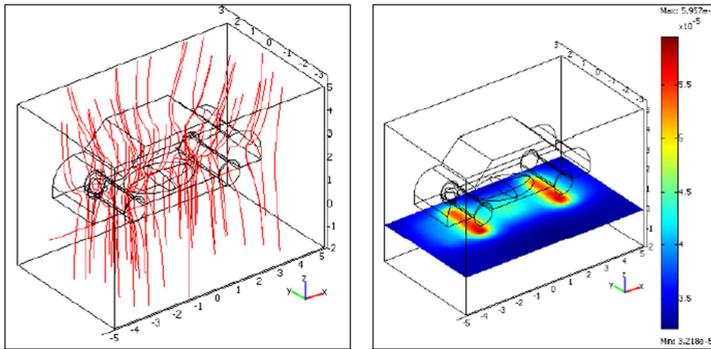
objetos en posiciones relativas de medición similares ha mostrado que existen diferencias en las formas de las señales. Este hecho se ha reflejado en los valores de similitud obtenidos en la comparación de señales pertenecientes al mismo vehículo, incluso después de aplicar el *Algoritmo de Alineación de Picos* propuesto en esta tesis como mejora. Algunos autores (Tawfik et al. 2002) han descrito en sus trabajos con sensores magnéticos, en particular sobre espiras magnéticas, que a pesar de realizar un tratamiento sistemático de las señales del mismo vehículo obtenidas de diferentes sensores no es posible llegar a obtener una comparación perfecta entre ellas debido a varios motivos, siendo uno de ellos la posición relativa de paso del vehículo sobre el sensor. En (Taghvaeeyan & Rajamani 2014a) también se destaca que las señales que se toman con sensores AMR cuando éste se encuentra bajo el vehículo tienen más fluctuaciones que las señales tomadas por sensores situados en la parte exterior del vehículo, que suelen ser más suaves. La conclusión a la que llegan los autores es que la distribución de la carga ferromagnética del vehículo y la posición del sensor afecta a las mediciones realizadas sobre el vehículo.

Este comportamiento presenta un problema añadido al proceso de re-identificación. Si la posición relativa de paso del vehículo sobre el sensor genera señales con formas distintas, es necesario redefinir el procedimiento de re-identificación para garantizar que se están comparando señales con sentido, es decir, que las señales que se comparan han sido obtenidas para posiciones relativas de paso vehículo-sensor compatibles. En este contexto, compatibles significa que el grado de similitud que ofrezcan dos señales del mismo vehículo obtenidas en posiciones relativas de paso distintas aportan un grado de similitud elevado, por encima del valor umbral que hemos determinado en el Capítulo 4 que permite re-identificar o discriminar vehículos.

Este problema se ha hecho históricamente más notable cuando las formas de las señales han mejorado y han ganado en complejidad, es decir, cuando se ha comenzado a trabajar con sensores magnéticos de alta sensibilidad, como los sensores AMR. De hecho, esta problemática ha sido denominada *desplazamiento lateral* (lateral offset in inglés), y ha sido tenido en cuenta en varios estudios, en especial en (Cheung & Varaiya 2007), (Burns 2009), (Taghvaeeyan & Rajamani 2014a) y (Karpis 2012).

Para comprender mejor este problema, algunos autores han tratado de modelar el comportamiento magnético del vehículo, bien como la percepción de la perturbación

magnética del vehículo medida desde sensores situados en un plano (lo que proporciona un mapa bi-dimensional del vehículo, mucho más frecuente en los estudios que veremos más adelante) o bien como la percepción de la perturbación magnética que genera el vehículo en cualquier punto del espacio (lo que proporciona un mapa tri-dimensional, mucho más teórico y menos frecuente en la literatura). Una de las aproximaciones que se han adoptado para ello ha sido a través de la simulación. En esta línea se puede destacar el trabajo de (Sifuentes de la Hoya et al. 2013), donde se propone un modelo de distribución de masa férrea de un vehículo en base a objetos geoméricamente simples, y a través de una herramienta software se obtiene un mapa de la distorsión del CMT en presencia del vehículo (Figura 95). Esta aproximación tiene la ventaja de que permite realizar el análisis de la perturbación en tres dimensiones, aunque los resultados reflejan comportamientos muy simples en comparación con otros estudios que mencionaremos a continuación que se restringen a una percepción bi-dimensional. Los autores de este trabajo utilizaron los resultados de la simulación para construir un sensor orientado a la detección de vehículos en zonas de aparcamiento pero no lo utilizaron con fines de re-identificación.

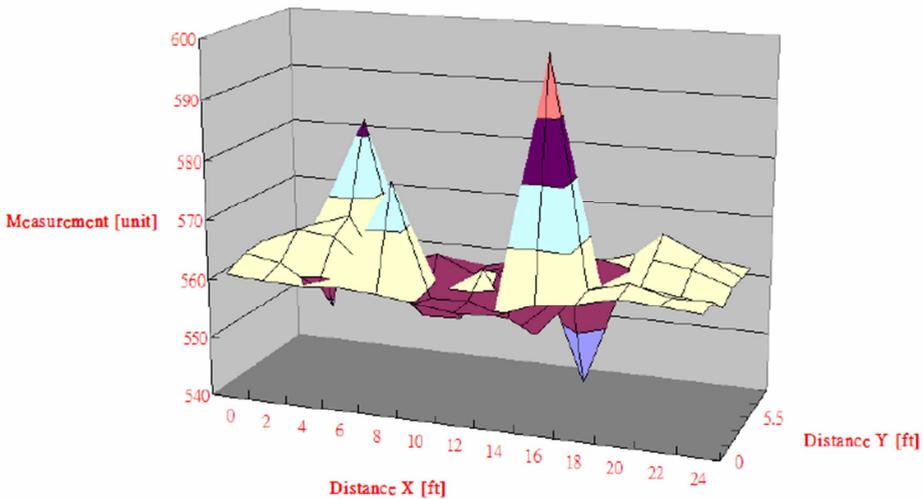


*Figura 95. Modelado magnético de un vehículo con herramientas de simulación (Sifuentes de la Hoya et al. 2013)*

En el trabajo de (Cheung & Varaiya 2007), el efecto del desplazamiento lateral se describe con detalle utilizando un conjunto de 7 sensores AMR en línea, dispuestos de forma transversal al sentido de circulación del vehículo, separados a una distancia que les permita estar situados todos al mismo tiempo debajo del vehículo cuando se realiza la medición. Con los datos obtenidos en sus experimentos

obtienen modelos magnéticos de los vehículos de prueba como el representado en la Figura 96.

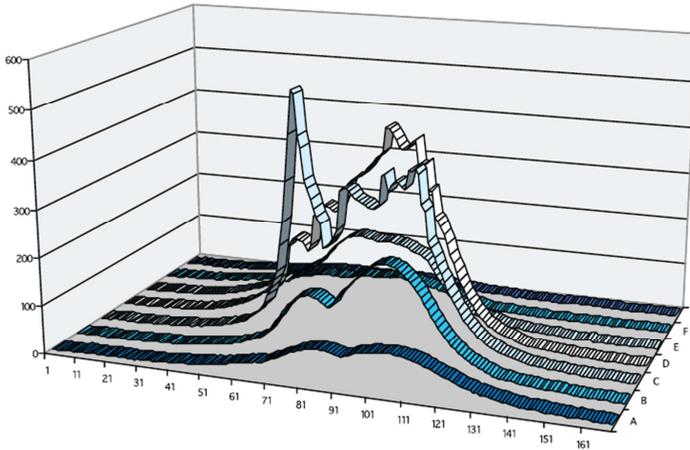
Estos modelos son muy simplificados y sólo permiten hacerse una idea del comportamiento magnético del vehículo en líneas generales. En el mismo estudio, los autores muestran las diferencias que existen entre las señales de un sensor para el mismo vehículo tomadas en posiciones relativas de 10, 20 y 30 cm de distancia respecto a la señal de referencia, pero no realizan una cuantificación de estas diferencias. A pesar de ello, los autores reconocen la importancia que tiene el desplazamiento lateral en el proceso de re-identificación y justifican la necesidad de utilizar un conjunto de sensores para realizar las mediciones con el fin de tener el suficiente número de datos como para poder seleccionar aquellos sensores que aporten mayores valores de similitud.



*Figura 96. Modelado magnético de un vehículo sobre los datos del eje X de un conjunto de 7 sensores AMR situados bajo el vehículo (Cheung & Varaiya 2007)*

En el trabajo de (Burns 2009) se comparan el comportamiento de los sensores AMR y las espiras magnéticas. Uno de los parámetros que se estudian es la capacidad de sensorización magnética en términos de la magnitud de las señales obtenidas. El autor constata y refleja en su estudio la diferencia de las señales obtenidas por sensores AMR situados en diferentes posiciones debajo del vehículo, tal y como se muestra en la Figura 97. Sin embargo, aparte de dejar constancia del efecto del

desplazamiento lateral, no proporciona ningún dato sobre la cuantificación de este efecto sobre las señales y sus componentes en los ejes X, Y, Z.

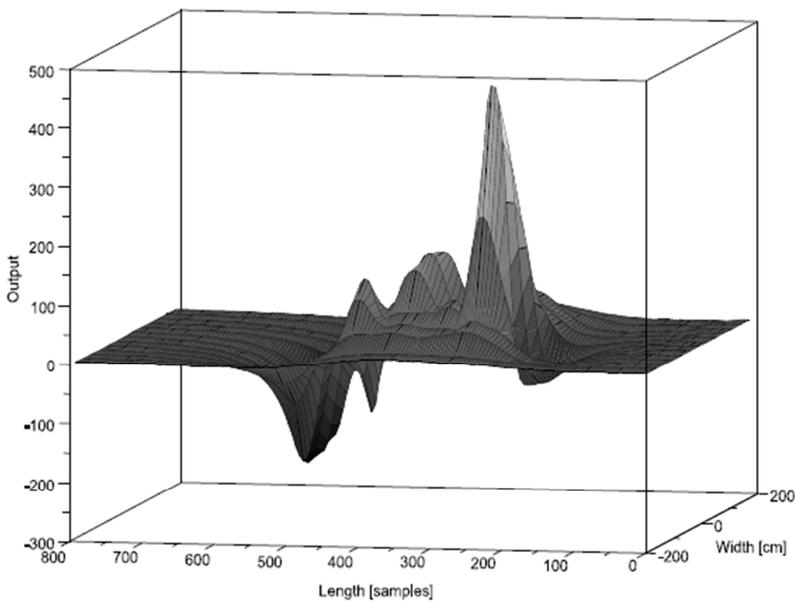


*Figura 97. Modelado magnético de un vehículo sobre los datos de la magnitud absoluta de sensores AMR situados bajo el vehículo (Burns 2009)*

En (Karpis 2012) se puede encontrar también una descripción detallada del efecto del desplazamiento lateral. El autor desarrolla un sensor AMR de 3 ejes y realiza distintos experimentos para comprobar su rendimiento. Uno de los experimentos consiste en medir la variación del campo magnético en la dirección X según la posición relativa del sensor. Se realizan 13 medidas en posiciones del sensor que van desde -1.8 a +1.8 m. del centro del vehículo, circulando el vehículo a 10 km/h, y trabajando con una frecuencia de muestreo de 220 Hz. Con ello genera un mapa magnético del vehículo (Figura 98). El autor observa que la forma de la onda es muy dependiente de la posición del sensor, destacando que pequeños cambios en la posición pueden generar grandes cambios en la forma de la señal, en particular cuando el sensor se sitúa debajo del vehículo en lugar de en un lateral, y afecta especialmente a las señales de los ejes Y y Z. Si el sensor se sitúa en los laterales del vehículo, el autor destaca que los principales cambios se producen en el eje Y, afectando especialmente la amplitud, pero no la forma de la onda.

En los trabajos que se han mencionado (a excepción de (Karpis 2012)), sólo se han estudiado los efectos del desplazamiento lateral cuando los sensores se encuentran en una posición de paso bajo el vehículo. Pero los efectos del desplazamiento

lateral también se constatan en los experimentos en los que los sensores quedan situados en la parte externa del vehículo. Por ejemplo, en (Taghvaeeyan & Rajamani 2014a) se muestra la diferencia en las formas de las señales que ofrecen los sensores situados bajo el vehículo y los sensores situados en la zona exterior. Las señales externas presentan unas formas de onda más simples debido a la distancia que existe con el objeto que están monitorizando. También se pone de manifiesto la posible interferencia de vehículos que circulan por un carril en los sensores situados en otro carril debido, precisamente, a este efecto de desplazamiento lateral.



*Figura 98. Perfil magnético de un vehículo en el eje X (Karpis 2012)*

En el trabajo de (Caruso & Withanawasam 1999) se estudia el efecto de la distancia de medición en la magnitud de la señal obtenida. Las conclusiones de este trabajo son muy claras: la distancia del sensor al vehículo hace decrecer muy rápidamente el valor de la amplitud magnética de las señales. A distancias de más de 1.5 metros, la señal que percibe un sensor es muy débil en comparación con la que percibiría si el sensor estuviese situado bajo el automóvil. Este efecto puede ser negativo para detectar vehículos en determinados puntos de paso, pero también puede ser un aspecto positivo en las situaciones en las que se esté monitorizando

varios carriles y los vehículos que circulan por un carril puedan generar perturbaciones medidas por un sensor de otro carril (que serán mínimas si la distancia es suficientemente grande).

El análisis de estos trabajos desde el enfoque de la re-identificación de vehículos no ha permitido determinar de forma cuantitativa el efecto que tiene la posición relativa del sensor con respecto al vehículo en los cálculos de similitud. Las consecuencias de no contemplar objetivamente el efecto de desplazamiento lateral y las posiciones relativas vehículo-sensor pueden llevar a la definición de estructuras de sensorización basadas en sensores AMR absolutamente inefectivas para re-identificar vehículos.

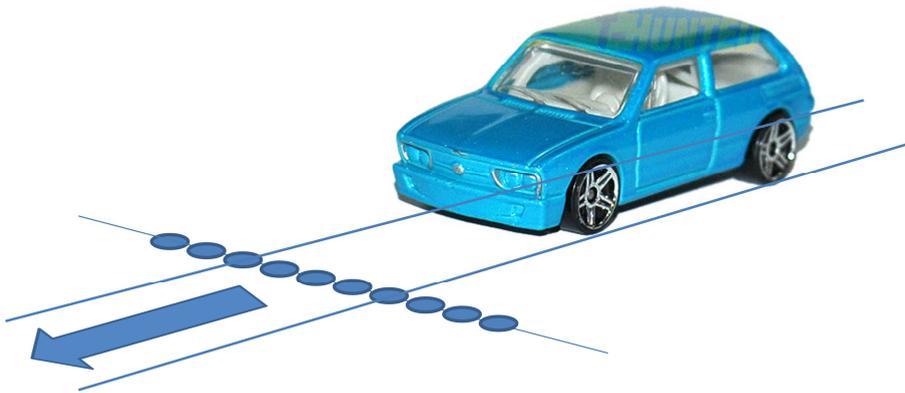
Este hecho nos ha conducido en esta tesis a realizar un estudio detallado de un vehículo que nos permita determinar su caracterización magnética. Los datos obtenidos de dicha caracterización serán analizados con el fin de determinar la necesidad de utilizar uno o varios sensores magnéticos para re-identificar vehículos en condiciones de circulación reales, así como para determinar la configuración de los sensores en caso de que sea necesario utilizar más de uno, teniendo en cuenta que el entorno de trabajo al que va enfocado el proceso de re-identificación son las autopistas.

### ***Configuración Experimental***

La creación del mapa magnético de un vehículo precisa de la obtención de huellas magnéticas correspondientes a varias secciones longitudinales del mismo, para seguir el mismo método que los descritos en la literatura expuesta anteriormente. Estas huellas magnéticas deben ser capturadas con un sensor AMR y referenciadas con respecto a un origen en el vehículo, que en nuestro caso será el eje central.

La forma de realizar la adquisición de las huellas puede hacerse haciendo pasar un vehículo repetidas veces sobre un único sensor colocado en distintas posiciones en cada uno de los pasos, como en (Karpis 2012), o haciendo pasar el vehículo una única vez por una red de sensores configurados longitudinalmente de forma transversal al sentido de circulación del vehículo, como en (Cheung & Varaiya 2007) y en (Burns 2009). En nuestro caso, se diseñó un nuevo experimento que consistía en utilizar una combinación de ambas aproximaciones, es decir, disponer un conjunto de sensores en una fila horizontal en sentido transversal al sentido de

circulación del vehículo y hacer pasar el vehículo varias veces sobre el mismo con distintas posiciones de paso para tratar de tener un conjunto mayor de muestras que permitan definir con más precisión el modelo magnético. El esquema de la configuración del nuevo experimento se muestra en la Figura 99.



*Figura 99. Esquema de la configuración experimental para la extracción de datos y la elaboración del modelo magnético de un vehículo.*

En el experimento se utilizaron 10 sensores AMR dispuestos horizontalmente y se realizaron 14 pasos de un vehículo por encima de ellos. Los sensores estaban separados a una distancia aproximada de 30 cm., siendo la distancia real entre ellos (medida respectivamente de izquierda a derecha en el sentido del movimiento) las siguientes:  $D = \{31, 34, 34, 36, 34, 32, 36, 37, 38\}$ . El vehículo utilizado para realizar el experimento fue un Volkswagen Passat CC de 2009, que tiene unas dimensiones que se presentan en la Tabla 27. El conjunto de señales obtenidas para el experimento se pueden consultar en el **Anexo V. Señales para la creación del modelo magnético de un vehículo.**

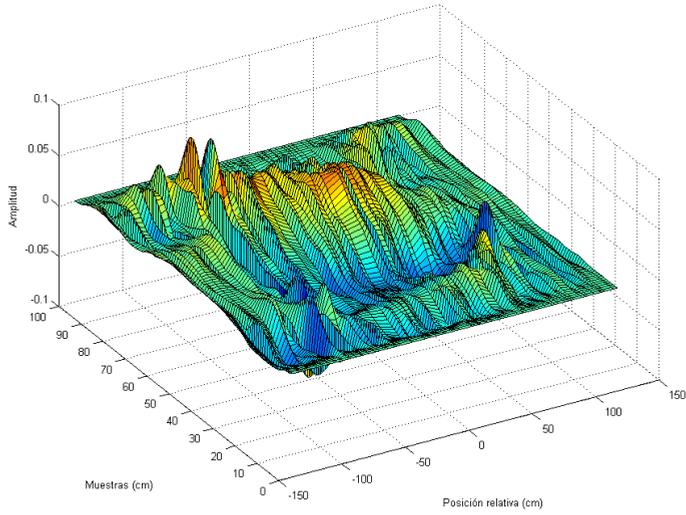
Cada paso del vehículo quedó registrado con una posición relativa con respecto al primer sensor, de manera que fue posible calcular la posición relativa de cada uno de los sensores con respecto al eje central del vehículo. De esta manera, cada una de las señales recogidas por cada sensor en cada paso se marcó con la posición relativa de paso calculada del vehículo sobre el sensor. Con ello fue posible referenciar cada señal con una posición longitudinal del vehículo para la construcción del modelo magnético.

Parámetro	Dato
Altura del vehículo	1,417 m.
Anchura del vehículo entre las ruedas	1,552 m. delante 1,559 m. detrás
Anchura total del vehículo	1,855 m.
Longitud total	4,799 m.
Longitud entre ejes	2,711 m.
Distancia frontal a eje delantero	0,982 m.
Distancia eje trasero a final	1,106 m.

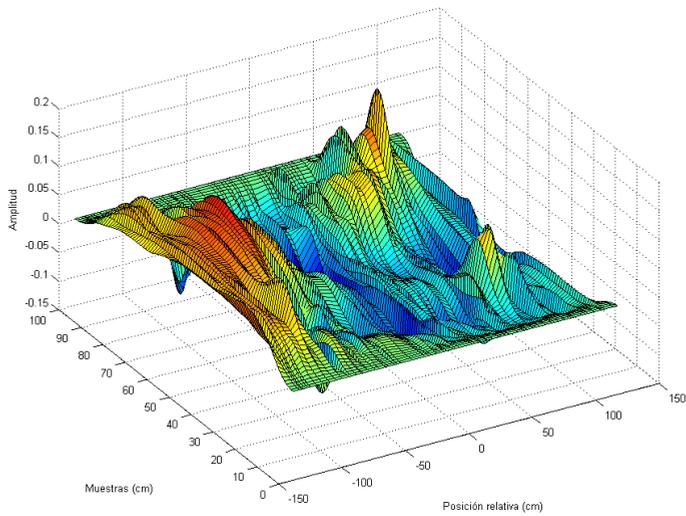
*Tabla 27. Dimensiones del vehículo utilizado para la creación del modelo magnético.*

Del conjunto total de señales recogidas por los sensores, se realizó un descarte de las que no aportaron información relevante para la construcción del mapa porque no tenían suficiente amplitud o porque presentaban alguna anomalía. El conjunto de señales resultantes ordenadas por posición relativa de paso con respecto al eje central del vehículo se pueden consultar en el **Anexo V. Señales para la creación del modelo magnético de un vehículo.**

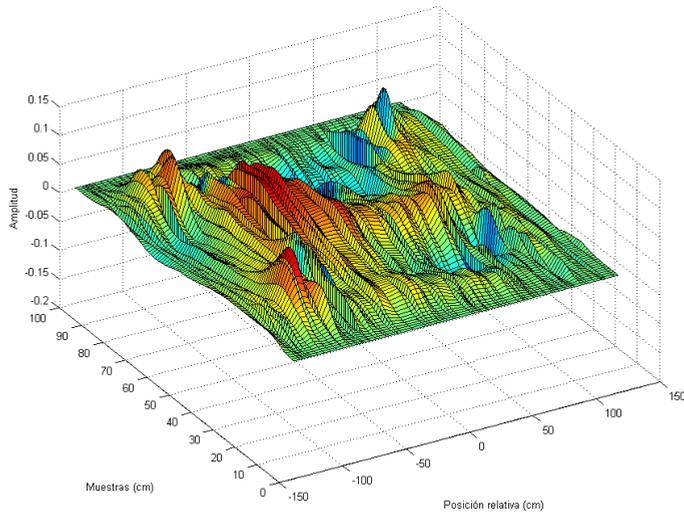
La construcción del modelo magnético se realizó con el conjunto de muestras válidas y sus referencias de localización en el vehículo. Los mapas magnéticos obtenidos para los ejes X, Y y Z se muestran en la Figura 100, la Figura 101 y la Figura 102. Adicionalmente se realizó una proyección del modelo magnético sobre el espacio definido por los ejes de *Muestras* y de *Posición Relativa* en un mapa de color. El objetivo era poder visualizar a través de este mapa de color el modelo magnético desde una perspectiva perpendicular, es decir, obtener la proyección superior del modelo magnético del vehículo para cada uno de los 3 ejes de la señal. Estas proyecciones pueden observarse en la Figura 103.



*Figura 100. Modelo magnético del vehículo estudiado para la componente X de la señal*



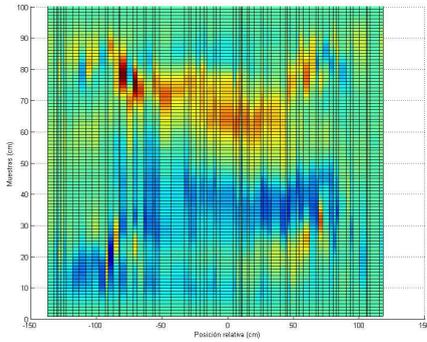
*Figura 101. Modelo magnético del vehículo estudiado para la componente Y de la señal*



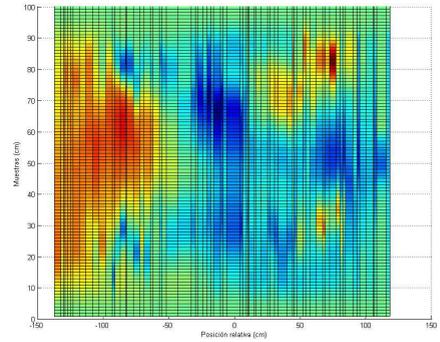
*Figura 102. Modelo magnético del vehículo estudiado para la componente Z de la señal*

Los modelos magnéticos obtenidos para los ejes X, Y y Z muestran de manera muy clara la variación de la magnitud del campo magnético medido por los sensores respecto a la posición de medida. Se puede confirmar, a la vista de los mapas obtenidos, que pequeñas variaciones en la posición de sensorización pueden ocasionar grandes diferencias en los valores obtenidos.

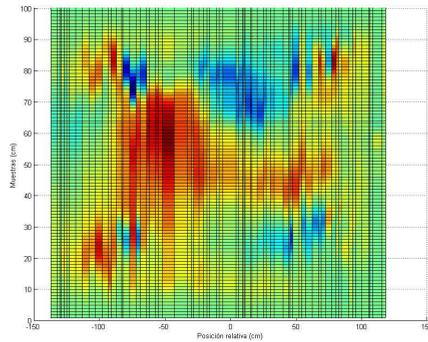
Además, se constató que cada uno de los ejes tiene un comportamiento distinto en este aspecto. El modelo correspondiente al eje X refleja las variaciones de carga ferromagnética del vehículo desde una perspectiva longitudinal. La zona del mapa que representa la parte delantera del vehículo tiene una magnitud destacada con respecto a la parte central y trasera del vehículo.



a)



b)



c)

*Figura 103. Mapa de color del vehículo estudiado para las componentes de las señales*

*a) X, b) Y y c) Z*

En cambio, el mapa correspondiente al eje Z parece que representa mejor la distribución ferromagnética del vehículo porque presenta las variaciones más significativas en los puntos del vehículo donde se supone que hay mayor carga ferromagnética. El mapa permite ver a través de los valores positivos de la magnitud medida las zonas que poseen mayor carga ferromagnética. En concreto, es muy clara la posición de las ruedas y el canal de distribución de entre el eje delantero y el trasero que se encuentra situado en la zona izquierda del vehículo, que están marcados en la figura con tonos amarillos y rojos.

El mapa del eje Y permite observar las variaciones de distribución de carga ferromagnética en sentido transversal al vehículo. Tanto en el modelo magnético como en el mapa de color se puede apreciar como existe una variación más importante en la parte izquierda del vehículo, lo que denota la distribución de carga que se podía apreciar también con el eje Z.

En los 3 mapas se puede apreciar la posición de las ruedas de los vehículos, que quedan marcadas como puntos o pequeñas áreas en las que la amplitud de la señal es positiva y bastante grande. El mapa correspondiente al eje X es el que mejor permite apreciar esta característica del vehículo, si bien las diferencias de magnitud en señales de las zonas donde se encuentran las ruedas son muy grandes en pequeñas distancias, y cuesta apreciarlas en las imágenes.

### 6.3. Análisis del modelo magnético

Una vez que se obtuvo el modelo magnético del modelo se dispuso de datos objetivos que permitieron realizar un análisis de la variación de las señales en función de la posición de los sensores. En esta sección se describe el modo en el que se han utilizado los datos obtenidos para determinar los requisitos que debe tener una configuración de sensores AMR para poder realizar re-identificaciones de vehículos con ciertas garantías de éxito.

La información más importante que proporciona el modelo magnético de un vehículo es la forma en la que varían las intensidades de los campos magnéticos medidos por los sensores AMR en función de la posición. Teniendo en cuenta que la detección de los vehículos se realiza cuando estos se desplazan en la dirección del eje X, y que las huellas magnéticas que va a obtener un sensor del paso de un vehículo son distintas secciones longitudinales del modelo (según la situación del sensor), lo más importante va a ser analizar la forma en la que cambian las huellas magnéticas en sentido transversal en el modelo magnético (a lo largo del eje Y).

Esta información se ha obtenido a través de 2 análisis. Por una parte, se ha analizado la similitud que existe entre señales adyacentes, con el objetivo de evaluar si los cambios que se producen en las señales tienen el mismo comportamiento en todas las partes del vehículo. Por otra parte, se ha analizado la distribución de las similitudes entre todas las señales obtenidas en función de la distancia entre los sensores que las han generado y la distancia media de los

sensores al eje central del vehículo, de manera que se han obtenido unos parámetros de fiabilidad sobre la posición relativa de los sensores con respecto al vehículo. Con estos análisis se han establecido las condiciones espaciales que deben cumplir los puntos de sensorización para obtener las mejores señales que se puedan comparar de forma efectiva.

Para facilitar la descripción de los análisis, consideraremos a partir de este momento que cada una de las señales que componen el modelo magnético ha sido obtenida por un sensor situado en una posición concreta. Aunque realmente no se han utilizado tantos sensores como señales obtenidas, esta notación simplificará la descripción de los resultados y su comprensión.

### ***Análisis de la similitud entre señales de sensores próximos***

El primer análisis se ha realizado a través del cálculo de la similitud media vecinal de cada sensor. Para ello se ha tomado la señal de un sensor y se ha calculado la similitud existente con la señal de los sensores que se encuentran en su vecindad. En este análisis consideramos la vecindad de un sensor como el conjunto de sensores que se encuentran situados en sus proximidades, y se ha restringido en primera instancia a los sensores situados a la izquierda y a la derecha del sensor objetivo. Para cada sensor se ha obtenido la media de la similitud de las señales de su vecindad, y los resultados se han representado en la Figura 104.

La interpretación de estos datos requiere tener en cuenta las dimensiones del vehículo que se ha estudiado, y que se han detallado en la Tabla 27. En el vehículo de estudio, las ruedas se encuentran situadas a unos 80 cm del eje central del vehículo (en dirección transversal). Las ruedas del vehículo y los mecanismos que forman el conglomerado de la dirección y transmisión de un vehículo tienen una carga ferromagnética muy importante, y además son la parte del vehículo más cercana a los sensores cuando se toma una huella magnética. Por este motivo, los modelos magnéticos reflejaban claramente en la distribución ferromagnética la posición de las ruedas.

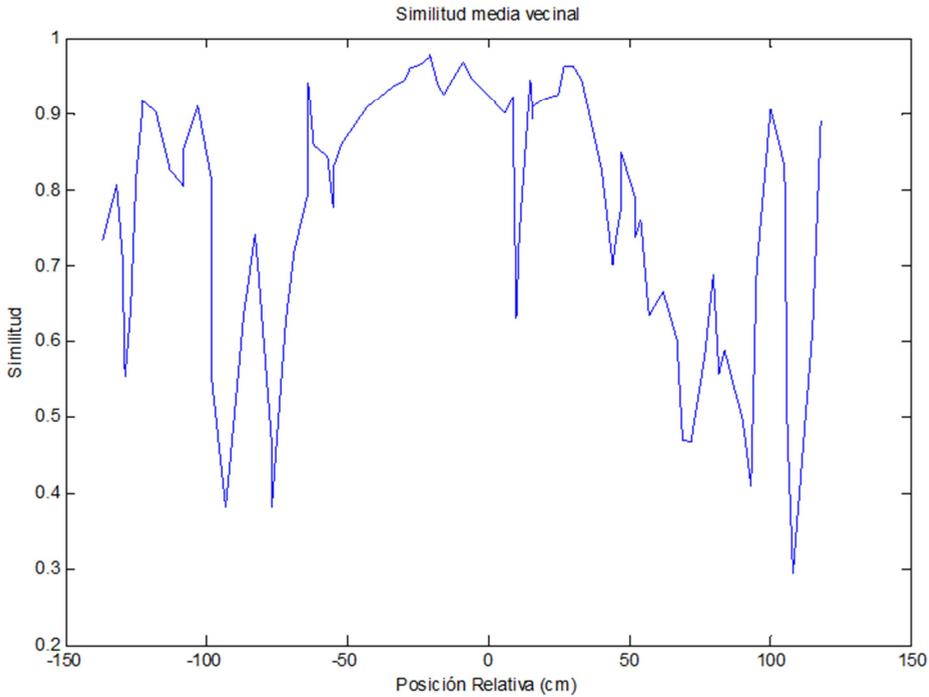


Figura 104. Similitud media vecinal

Si se analiza la información de la Figura 104 con esta perspectiva, se puede observar que las similitudes que se obtienen son muy variadas, con valores que oscilan entre 0.3 y 0.95. La distribución de estos valores de similitud no es arbitraria, sino que sigue un patrón. En la zona central del vehículo (tomando como referencia el eje central), aproximadamente en el intervalo  $[-50,+50]$ , los valores de similitud son los más altos que se pueden encontrar; en la zona externa del vehículo, aproximadamente en los intervalos  $[-130,-100]$  y  $[100,130]$ , también se pueden encontrar valores altos de similitud, pero inferiores a los de la zona central y con algunos casos de similitud muy baja; y en las zonas que corresponden a las ruedas, aproximadamente en los intervalos  $[-100,-50]$  y  $[50,100]$ , los valores de similitud son los más bajos de todos, quizás con alguna excepción debida probablemente a la cercanía de los sensores que se están comparando.

Esta interpretación de los datos ofrece un primer resultado destacable: no todas las zonas del vehículo son igualmente importantes para obtener señales que se puedan utilizar en la re-identificación. Las señales que se obtienen de la zona central del

vehículo son mejores que el resto, y las señales que se obtienen de las zonas próximas a las ruedas no son útiles en absoluto para la re-identificación, incluso pueden generar casos de falsos negativos. La explicación de este hecho hay que buscarla en la forma que en la que varían las señales ante desplazamientos pequeños. En el centro del vehículo, los valores altos de similitud indican que aunque exista un desplazamiento entre las señales que se comparan, las señales son bastante similares. Por tanto, el efecto del desplazamiento lateral en esta zona del vehículo es pequeño comparado con el resto.

Sin embargo, en la zona externa del vehículo, pero especialmente en las zonas cercanas a las ruedas, los valores extremadamente bajos de similitud están indicando que pequeñas variaciones de distancia en la posición de los sensores generan huellas que tienen poca similitud, esto es, pequeñas distancias entre los sensores generan grandes diferencias en las señales. En estos casos, el efecto del desplazamiento lateral es muy pronunciado.

En un contexto de aplicación del problema de la re-identificación en el que se están tomando huellas magnéticas de un vehículo en distintos lugares en un entorno interurbano, si se utiliza un único sensor en cada punto de control es muy improbable que la posición relativa de paso del vehículo sobre el sensor sea la misma. Por tanto, es muy esperable que el efecto del desplazamiento lateral actúe y no genere valores altos de similitud entre las señales de cada sensor.

Una forma de resolver esta situación, y al mismo tiempo una primera conclusión, es utilizar más de un sensor para capturar las huellas magnéticas. Aun así, es necesario asegurar que al menos uno de ellos queda debajo del vehículo en una posición próxima al eje central, por lo que los sensores deberán distribuirse adecuadamente a lo ancho del carril. Por otro lado, la utilización de un único sensor para la re-identificación no es la mejor opción. La configuración ideal sería poder utilizar varios sensores de manera que proporcionasen varias huellas magnéticas para comparar. En la literatura que se ha analizado no se contempla el uso de sensores independientes para combinar las similitudes de las señales que capturen en una medida global de similitud. En este sentido, **esta tesis plantea la hipótesis del uso 2 o más sensores para aumentar la fiabilidad del procedimiento de re-identificación** y se desarrolla en el Capítulo 7, donde se proporcionan los resultados del uso de uno o varios sensores para la re-identificación de una forma comparada.

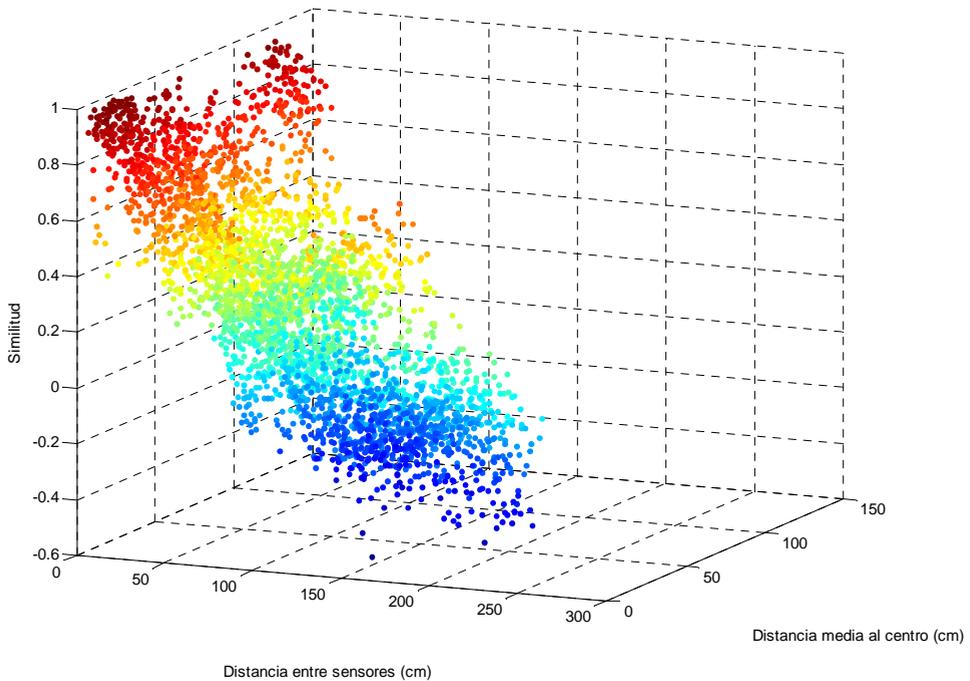
### ***Análisis de la variación de la similitud entre señales***

El segundo análisis que se ha realizado se ha orientado a cuantificar los efectos del desplazamiento lateral que ha confirmado el primer análisis. Una vez que se ha determinado que existen zonas del vehículo óptimas para capturar las huellas magnéticas que se deben usar en la re-identificación, es importante cuantificar los límites de posicionamiento relativo de los sensores que las van a capturar para garantizar la selección de la mejor información.

Así pues, el segundo análisis ha utilizado los valores de similitud calculados entre todas las huellas magnéticas usadas en la creación del modelo magnético del vehículo. Cada una de las similitudes ha sido referenciada con respecto a 2 datos: la distancia entre los sensores de las huellas que han generado el valor de similitud, y la distancia media de los dos sensores respecto al eje central del vehículo. La combinación de estos datos ha permitido valorar las condiciones en las que se producen los valores más elevados de similitud. Estas condiciones, expresadas en términos de distancias entre sensores y distancias con respecto al centro del vehículo, han servido para definir los límites espaciales que debe cumplir la distribución de sensores para la captura de señales para la re-identificación.

El conjunto de valores de similitud obtenidos en el experimento corresponden a un total de 3486 emparejamientos. Estos valores se han representado en la Figura 105, donde queda reflejado el valor de la similitud en función de la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo.

En la gráfica de la Figura 105 se ha utilizado un código de colores para indicar el valor de la similitud en cada punto y facilitar así su visualización. Los colores marrones y rojos indican valores altos de similitud, y los colores azules indican valores bajos de similitud. En esta gráfica puede apreciarse que los valores de similitud disminuyen cuando aumenta la distancia entre los sensores. Los valores más altos de similitud se encuentran en la zona correspondiente a una separación entre sensores inferior a 50 cm. La gráfica también muestra que los valores más altos de similitud se encuentran situados en la zona correspondiente a una distancia media al centro del vehículo inferior a 50 cm. Se aprecia un hueco importante de valores de similitud elevados en la zona comprendida entre 50 cm y 100 cm correspondiente a la distancia media al centro del vehículo y que corresponde a la zona en la que se encuentran las ruedas.

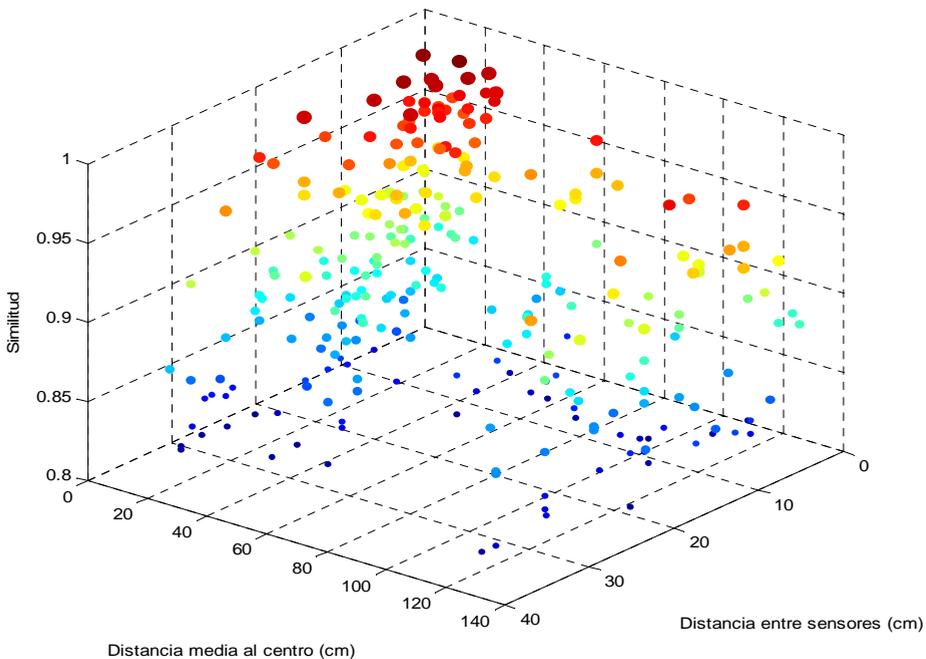


*Figura 105. Similitudes entre señales según la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo*

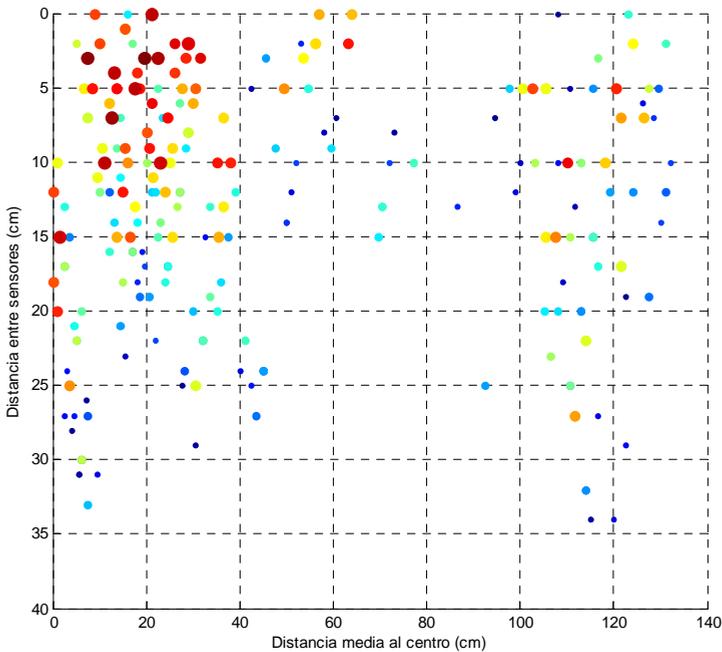
Estos datos confirman el resultado del primer análisis, de manera que las similitudes que se obtienen cuando se comparan señales cercanas pertenecientes al centro del vehículo, junto con algunas señales del exterior del vehículo, son elevadas. Sin embargo, si las señales que se comparan pertenecen a la zona de las ruedas, aunque la distancia entre los sensores sea pequeña, los valores de similitud son más bajos. Dado que el objetivo que tenemos con este segundo análisis es cuantificar espacialmente las zonas de disposición de los sensores para obtener las mejores señales, se ha reducido el conjunto de datos a una zona de interés más concreta para poder precisar mejor los límites. Para ello, se han seleccionado aquellos valores de similitud que se encuentran por encima de un valor de 0.8. Este valor se ha seleccionado en base a los resultados experimentales para las medidas de similitud mejoradas que se han propuesto en esta tesis y se han descrito en la sección 5.2.3. El análisis del comportamiento de los valores de similitud a través de la expresión de la *Precisión* ( 13 ) (página 134) para el método de similitud propuesto establece un valor de similitud de 0.83 (máximo absoluto, Figura 94,

página 218) como valor de corte para determinar si dos señales pertenecen al mismo vehículo o no. En este caso se ha ampliado el margen hasta un valor de 0.8 para observar mejor el comportamiento de la similitud en función de las distancia entre sensores y la distancia media al eje central.

La reducción de los datos ha permitido representar los datos de similitud de forma más detallada en una gráfica en la que sólo se localizan emparejamientos que aportan valores altos de similitud. La gráfica resultante se puede ver en la Figura 106. En esta gráfica, del total de 3486 emparejamientos iniciales, se han representado sólo 268, que son los que aportan la similitud superior a 0.8. Además del código de colores utilizado para indicar la mayor o menor similitud, también se ha utilizado un dimensionamiento de los puntos, de forma que los más pequeños son los que menos similitud aportan. Para apreciar mejor estos datos, se ha realizado una proyección de los datos tridimensionales sobre el plano definido por los ejes de las distancias, la cual puede verse en la Figura 107.



*Figura 106. Detalle de similitudes entre señales según la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo*



*Figura 107. Proyección en altura del detalle de similitudes entre señales según la distancia entre sensores y la distancia media al eje central del vehículo*

Con la visión reducida de los datos que ofrecen ambas figuras se puede apreciar con más claridad las zonas que ofrecen mayores valores de similitud. La concentración más importante de valores se produce en la zona central del vehículo, por lo que se puede descartar la utilización de sensores ubicados en la zona externa del vehículo.

Si nos restringimos a la parte central del vehículo, se puede apreciar que las similitudes más altas se dan para aquellos sensores que están a una distancia media del centro del vehículo entre 30 y 40 cm. Si analizamos la otra dimensión, los valores más altos de similitud se encuentran en sensores que están a una distancia de separación de entre 20 y 25 cm. Esta primera aproximación visual permite definir unas fronteras iniciales donde realizar un análisis más detallado de los datos.

Para valorar con más detalle el comportamiento de la similitud en estas zonas, se ha calculado el número total de valores de similitud que quedan por encima y por debajo del umbral definido, para las 4 combinaciones de distancias determinadas

visualmente. Estos 4 casos corresponden a las posibles combinaciones de los 2 rangos de distancia entre sensores ([0,20] y [0,25]) y los 2 rangos de distancia media al eje central establecidos ([0,30] y [0,40]). Los resultados de este contaje se han plasmado en la Tabla 28.

	Similitud $\geq 0.8$		Similitud $< 0.8$	
	Distancia entre sensores			
Distancia media al eje central	[0,20]	[0,25]	[0,20]	[0,25]
[0,30]	121	134	21	41
[0,40]	136	153	31	57

*Tabla 28. Número de emparejamientos en función de condiciones de similitud, distancia entre sensores y distancia media al eje central del vehículo.*

Los datos de contaje permiten determinar el error cometido para cada una de las consideraciones de los límites. De las 4 combinaciones posibles, se ha valorado el ratio de aciertos y errores cometidos en base al número de valores que se encuentran en los límites. Los resultados se pueden ver en la Tabla 29.

Caso	Aciertos	Fallos	Total	Ratio Error	Ratio Acierto
[0,20] / [0,30]	121	21	142	14.79%	85.21%
[0,25] / [0,30]	134	41	175	23.43%	76.57%
[0,20] / [0,40]	136	31	167	18.56%	81.44%
[0,25] / [0,40]	153	57	210	27.14%	72.86%

*Tabla 29. Ratio de aciertos y errores de re-identificación según los límites de distribución espacial de sensores.*

Los datos que aporta la Tabla 29 son cualitativamente evidentes: cuanto más limitada es la zona de detección, mayor es el ratio de acierto y menor el ratio de fallo. Lo interesante de esta tabla, sin embargo, está en la cuantificación de la diferencia de los ratios en función de la distancia de los sensores y la distancia

media al eje central del vehículo. Se puede apreciar que aumentar 5 cm la distancia entre sensores o la distancia al eje central tiene las mismas consecuencias en términos de ratio de acierto o fallo. No obstante, entre el caso más restrictivo y el menos restrictivo hay una diferencia de un 13% en los ratios de acierto y fallo.

Estos datos permiten, pues, ayudar a definir la densidad de sensores que se deben utilizar en una instalación para la obtención de señales adecuadas para re-identificar vehículos. Obviamente, cuanto mayor sea la densidad, mejores serán los resultados. No obstante, en las instalaciones reales hay que tener en cuenta más parámetros (como los económicos) que pueden hacer decantarse por la elección de una distribución sub-óptima en términos de rendimiento. Los datos obtenidos en este experimento permiten hacer una aproximación de la disminución del ratio de re-identificación en función de la distribución de los sensores que se seleccione. Esta información se utilizará para establecer la configuración de los sensores en el experimento final de esta tesis, en un entorno de trabajo real, en el Capítulo 7.

## 6.4. Conclusiones

En este capítulo se han mostrado los resultados del estudio realizado sobre las diferencias que existen en las mediciones realizadas por un sensor AMR sobre un vehículo en movimiento en función de la posición relativa entre ambos.

En primer lugar, tras realizar un análisis de los trabajos más importantes de la literatura, se ha constatado que la distancia que existe entre el sensor magnético y el objeto que monitoriza afecta a la amplitud de la señal obtenida, de manera que la amplitud de la señal es menor cuanto mayor es la distancia entre el objeto y el sensor, tal y como cabría esperar.

También se han constatado que, en el proceso de obtención de huellas magnéticas con sensores AMR, la posición relativa del sensor con respecto al vehículo afecta a la forma de onda de las señales que se obtienen. Esto ocasiona un efecto referenciado en la literatura como *desplazamiento lateral* que influye negativamente en los procesos de re-identificación porque genera distintas huellas magnéticas para un mismo vehículo según la posición en la que se encuentre el sensor que las captura.

En la literatura se ha dejado constancia del efecto del desplazamiento lateral a través de la elaboración de mapas o modelos magnéticos de vehículos, que han

permitido valorar cualitativamente las diferencias que existen en las señales tomadas en distintos puntos del vehículo. Sin embargo, no se ha encontrado ningún estudio que cuantificase el efecto del desplazamiento lateral para poder tomar decisiones sobre la arquitectura de un punto de sensorización para obtener huellas magnéticas de vehículos orientadas a la re-identificación.

En consecuencia, se ha planteado un experimento para poder construir el modelo magnético de un vehículo y poder realizar un análisis objetivo de las variaciones que presentan las huellas magnéticas obtenidas para secciones longitudinales de los vehículos. Se ha utilizado para ello una aproximación basada en el uso de varios sensores AMR dispuestos en una línea horizontal en sentido transversal a la dirección de paso del vehículo, con los sensores separados a una distancia de unos 30 cm entre sí; posteriormente se han realizado varios pasos del vehículo a una velocidad constante y se han obtenido todas las huellas magnéticas generadas por los sensores en todas las pasadas. De ellas, se han descartado las que no aportaban información o eran defectuosas.

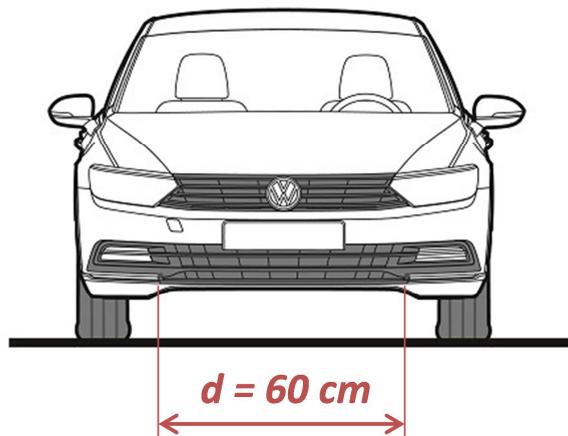
Estos datos han permitido construir un modelo magnético del vehículo con más detalle de los que se han encontrado hasta el momento en la literatura. El modelo se ha construido para las señales obtenidas de los 3 ejes que ofrece el sensor AMR utilizado en el experimento. Los modelos correspondientes a cada eje son diferentes y representan distintas características de los vehículos. Los modelos correspondientes a los ejes X e Y representan las variaciones de la distribución de la carga ferromagnética del vehículo en dichos sentidos, mientras que el modelo correspondiente al eje Z representa la distribución de carga ferromagnética del vehículo. En los 3 modelos, sin embargo, se ha podido encontrar una característica común del vehículo que consiste en la localización de los 4 complejos de las ruedas. Este dato es significativo porque, como se ha podido comprobar, la posición de las ruedas aumenta considerablemente el efecto del desplazamiento lateral.

Después de la obtención del modelo detallado del vehículo, se ha realizado un análisis de los datos con el fin de cuantificar los efectos del desplazamiento lateral. Para ello se ha calculado la similitud de todas las huellas magnéticas obtenidas en el experimento con sus vecinas inmediatas a izquierda y derecha. El objetivo ha sido valorar la diferencia que puede existir entre dos señales que estén espacialmente muy próximas entre sí (o dicho de otro modo, que correspondan a secciones longitudinales próximas del vehículo). Se ha descubierto que la zona central del vehículo es la que proporciona mayores valores de similitud, la zona

exterior del vehículo también proporciona valores altos de similitud pero inferiores a los de la zona central (y con algún valor relativamente bajo), y la zona de las ruedas es la que aporta los valores de similitud más bajos. Este hecho indica que la variabilidad de las señales capturadas por sensores en la zona de las ruedas es muy grande, y estos datos no deben ser utilizados con fines de re-identificación.

Tras la constatación de este hecho, se ha realizado un análisis más detallado para poder cuantificar objetivamente las zonas de confianza del vehículo, es decir, las zonas en las que se pueden obtener señales que presenten poca respuesta al efecto negativo del desplazamiento lateral. Para ello se han calculado las similitudes existentes entre todas las señales, y se han valorado desde 2 perspectivas: la distancia entre los sensores que las generan, y la distancia media de estos sensores al eje central del vehículo.

Este análisis ha permitido mostrar que los valores de similitud que permiten re-identificar un vehículo con más precisión son los que se obtienen de los sensores que están situados a una distancia de entre 20 cm. y 25 cm. entre sí, y cuando la distancia media de los sensores al eje central se encuentra entre 30 cm. y 40 cm. También se ha comprobado el ratio de acierto que se obtendría con los sensores situados en los límites establecidos y se ha concluido que los mejores resultados se obtienen para las condiciones más restrictivas, esto es, cuando los sensores se encuentran a 20 cm. de distancia entre sí y a una distancia media de 30 cm. con respecto al eje central del vehículo (Figura 108).



*Figura 108. Posición recomendada para la ubicación del sensor*

Estos resultados indican que la utilización de un único sensor para re-identificar vehículos no es una buena opción cuando el vehículo tiene libertad de movimiento lateral y puede cambiar con facilidad su posición relativa de paso sobre el sensor en distintos puntos de medida, como sucede en el caso de vías interurbanas. Para este fin se hace necesario el uso de varios sensores distribuidos con una densidad marcada por los límites espaciales que se han encontrado experimentalmente.

Finalmente, no se ha proporcionado ningún valor absoluto en cuanto a los límites que se deben fijar para el uso de señales de sensores para re-identificación puesto que los límites determinan una densidad de sensores en la instalación de los puntos de medición o control, y existen otros parámetros que pueden afectar a la instalación y la configuración de la red de sensores, como los factores económicos. En cualquier caso, los datos obtenidos pueden ser utilizados como un modelo de referencia para analizar la variación de la efectividad de la re-identificación en función de la disposición de los sensores.



# 7. APLICACIÓN A LA SENSORIZACIÓN DE UN ENTORNO INTERURBANO

---

En los capítulos anteriores se han propuesto una serie de mejoras sobre los procedimientos de re-identificación de vehículos basados en los datos que proporcionan los sensores AMR, tanto a nivel de algoritmos de emparejamiento de señales como en la configuración de los puntos de sensorización y el uso de los datos que proporcionan los sensores. Todas estas mejoras han sido probadas de manera independiente y se ha demostrado su funcionamiento en entornos de laboratorio (simulación) y en entornos de pruebas controlados con vehículos reales.

En este capítulo se presenta el resultado de la aplicación conjunta de las novedades aportadas en la tesis a un entorno de trabajo real, y más concretamente a una vía interurbana, objetivo último hacia el que se enfocaron los trabajos. Con ello se pretende validar la metodología propuesta y obtener unos datos de efectividad que puedan ser comparados con otros sistemas y metodologías descritas en la literatura. También se presenta el experimento final con el que concluye el trabajo realizado en esta tesis, que está basado en la definición, configuración e instalación de sensores en un único punto de sensorización por el que han circulado de forma repetida unos vehículos de prueba, embebidos dentro del tráfico habitual de la autopista, que han sido el objetivo de la re-identificación.

Es necesario destacar que, según la literatura, los sensores AMR se han utilizado habitualmente en entornos urbanos y que su aplicación al caso de vías interurbanas plantea alguna problemática adicional. En concreto, las velocidades de los vehículos, las características de los carriles y el comportamiento en las trayectorias de los vehículos han hecho imprescindible plantear un entorno de sensorización diferente que amplíe la capacidad de re-identificación, eliminando las restricciones que se producen en un entorno urbano. El nuevo entorno de sensorización propuesto se describe en este capítulo junto con los resultados de la experimentación llevada a cabo en él.

También ha sido necesario construir un sensor ad-hoc para los experimentos que ha proporcionado un rendimiento adecuado a las velocidades de los vehículos en el entorno interurbano. La construcción del sensor no es uno de los objetivos de esta tesis, pero se presentan también en este capítulo las características funcionales básicas y su configuración y adaptación para una instalación en una autopista de la red viaria española (donde se ha realizado el experimento final) para que cumpla con los requisitos legales y no suponga un riesgo para la seguridad vial.

## 7.1. Dispositivo de sensorización AMR para vías interurbanas.

### 7.1.1. Dispositivos existentes

El uso de sensores AMR para la gestión del tráfico no está muy implantado en las administraciones y organismos responsables de ello. A pesar de las ventajas que pueden aportar estos sensores frente a las tradicionales espiras magnéticas, la inercia en el uso de los sensores magnéticos clásicos junto con la enorme cantidad de puntos de sensorización que existen a nivel mundial hace muy complicada su penetración en el mercado. A esto hay que añadir que los sistemas de información de los centros de gestión de tráfico están preparados para trabajar con datos y entornos de instalación basados en espiras, por lo que realizar un cambio de tecnología sería económicamente muy costoso.

Todo esto hace que existan muy pocos dispositivos de monitorización comerciales basados en sensores AMR preparados para su instalación en entornos de trabajo

reales. Por ejemplo, la empresa Sensys Networks<sup>9</sup>, una spin-off norteamericana creada a partir de los trabajos del profesor P. Varaiya en la Universidad de Berkeley y fundada por él junto con A. Ahoui y R. Kavalier (Sensys Networks 2015), ha desarrollado una solución propietaria basada en redes de sensores AMR inalámbricos para entornos urbanos. En Europa, la empresa Siemens<sup>10</sup> ha desarrollado un sensor (Siemens 2015) de similares características al de la empresa Sensys Networks, enfocado a la detección y clasificación de vehículos como sustituto de las espiras magnéticas.

En ambos casos, el uso de estos dispositivos con fines de investigación no es viable debido a las limitaciones que presentan para trabajar con ellos a bajo nivel. Esto significa que los sensores no se comercializan de forma independiente, sino que las empresas venden soluciones completas y cerradas para su instalación directa en el punto de monitorización deseado, incluyendo hardware y software. En estas condiciones, no se puede acceder a los datos en bruto que ofrecen los sensores y que permitirían realizar trabajos de investigación con ellos, sino que se obtienen directamente los datos procesados para los que están preparados los sistemas (contaje de vehículos, tiempos de viaje, etc.).

La mayoría de los trabajos y estudios descritos en la literatura han utilizado dispositivos creados ad-hoc para su investigación, y no han sido diseñados para su instalación en entornos y condiciones de trabajo reales, como veremos a continuación. Por este motivo, los datos y resultados que se describen en la literatura están restringidos a condiciones de sensorización en las que los dispositivos se encuentran situados fuera de la carretera (en la parte externa o el arcén), o a condiciones experimentales controladas en una zona restringida al tráfico. Solamente los experimentos que han utilizado los dispositivos creados por la empresa Sensys Networks han aportado datos en condiciones de trabajo reales, si bien algunos autores han reportado en sus trabajos algunos problemas de funcionamiento de los dispositivos (Liu et al. 2009).

Las características de los dispositivos desarrollados para dar soporte a los trabajos de investigación en la literatura son muy variadas. En particular, para el trabajo de esta tesis es interesante conocer las frecuencias de trabajo y el encapsulamiento

---

<sup>9</sup> <http://www.sensysnetworks.com>. Última consulta: 30 de junio 2015

<sup>10</sup> <http://www.siemens.co.uk>. Última consulta: 30 de junio de 2015

que se ha proporcionado para soportar el trabajo en un entorno de tráfico real. A modo de resumen, en la Tabla 30 se muestran las características básicas de los dispositivos de sensorización que se han descrito en la literatura.

Autor	Características
(Zhang, Huang & Cui 2007)	Dispositivo propio denominado TICoN compuesto por un módulo de captura de señal, un módulo de pre-procesamiento, un módulo de comunicaciones inalámbrico, y un módulo de potencia. El sensor AMR es un HMC1021Z, de un eje. No se especifica la frecuencia de trabajo. No se proporciona contenedor porque el dispositivo se sitúa fuera del carril.
(Yoo et al. 2007) (Yoo et al. 2010)	Prototipo de placa base junto con placa controladora de sensores AMR. Uso de sensores HMC1021 y HMC1022 de un eje y dos ejes respectivamente. No hay detalles sobre contenedores ni frecuencias de muestreo.
(Wilder et al. 2008)	Prototipo basado en una placa de desarrollo DZ161 de Softbaugh conectada a un módulo de sensorización magnética MicroMag2, y trabajando a una frecuencia de 50 Hz. Utiliza un sistema de comunicaciones inalámbrico y no dispone de contenedor porque los sensores se sitúan fuera del carril.
(Zhang et al. 2008) (Zhang et al. 2010)	Prototipo de dispositivo que utiliza un sensor AMR HMC1002 de dos ejes. No utiliza contenedor porque se sitúa fuera de la calzada (sobre la línea divisoria del arcén). Trabaja a una frecuencia de 128 Hz.
(Bai-gen et al. 2009)	Prototipo basado en la utilización de 2 sensores AMR HMC1052 de 2 ejes sobre la misma placa base, separados 10 cm. entre sí. Trabajan a una frecuencia de 100 Hz. La comunicación se lleva a cabo a través de un módulo ZigBee. No se especifican las dimensiones de los sensores ni las características de los contenedores.
(Zou et al. 2009)	Prototipo basado en un microcontrolador, unidad de potencia, sistema de comunicaciones y sistema de sensorización magnética. El sistema de comunicaciones es inalámbrico y basado en ZigBee. No se especifica el tipo de sensor AMR utilizado, pero se indica que la frecuencia de muestreo es de 128 Hz. No existe contenedor ni se especifican las dimensiones del dispositivo.

(Ng et al. 2009)	Prototipo con varios tipos de sensores, con un sensor AMR HMC1002 de 2 ejes. No se especifica la frecuencia de muestreo. No dispone de contenedor porque se posiciona fuera del carril. Se alimenta con baterías.
(Kaewkamnerd et al. 2010)	Prototipo con carcasa de aluminio que contiene 2 sensores AMR, cuadrada, de 8x8 pulgadas. Alimentado por baterías. Comunicación inalámbrica o vía RS232. Frecuencia de muestreo de 40 Hz.
(Cardell Bilbao et al. 2010)	Prototipo basado en una mota Tmote sky sobre la que se sitúan 2 sensores AMR HMC1052L alineados y separados una distancia de 10 cm. No se especifica frecuencia de muestreo, alimentación ni contenedor.
(Wang et al. 2011)	Sensor propio denominado EZ210, compuesto de un módulo de captura de señal, un módulo de pre-procesamiento, un microcontrolador, un sistema de comunicaciones, un módulo de control de potencia. El sensor AMR utilizado es un HMC1021, del que se extraen muestras con una frecuencia de 100 Hz. No hay detalles sobre el contenedor.
(Li et al. 2011)	Prototipo que sitúa 2 sensores AMR sobre la misma placa base, y el dispositivo se introduce en un contenedor cilíndrico metálico. No se mencionan detalles de los sensores, alimentación, características del contenedor ni dimensiones.
(Karpis 2012)	Prototipo basado en un microcontrolador de 32 bits, con un magnetómetro LSM303. Sistema de comunicación inalámbrica. Las dimensiones de la placa son 49 x 33 mm. La frecuencia de muestreo es de 220 Hz.
(Pitton et al. 2012)	Prototipo de un dispositivo que incorpora 10 sensores AMR Honeywell de 3 ejes sin especificar el tipo. El dispositivo se introduce en un contenedor cuadrado de plástico de 0.6 m. de lado, separados a una distancia de 0.25 cm. La frecuencia de muestreo es de 200 Hz.
(Koszteczyk & Simon 2013)	Prototipo basado en un sensor AMR HMC1002, con un módulo de comunicación inalámbrica, sin ningún contenedor. No se especifica la frecuencia de muestreo.
(Taghvaeeyan & Rajamani 2014a)	Prototipo basado en el diseño de un PCB sobre el que se instala uno o dos sensores AMR HMC2003 de 3 ejes, y que trabajan a una frecuencia de 1 KHz. No se proporcionan datos sobre las dimensiones y características del contenedor o sobre la alimentación.

(Ma et al. 2014)	Prototipo con una placa base de 67 x 57 mm, protegido con un contenedor de plástico circular, y compuesto por varios sensores, un módulo de comunicaciones inalámbricas, una batería y un sensor magnético HMC5883L que proporciona una frecuencia de muestreo máxima de 160 Hz.
(Tian et al. 2014)	Prototipo con contenedor cilíndrico de 10 cm de diámetro y 6,4 cm de alto, con una placa base, un sensor AMR, una batería y una antena, relleno con epoxi. Frecuencia de muestreo de 300 Hz, y aunque dispone de 3 ejes sólo utiliza el eje Z. Comunicación a través de ZigBee.

*Tabla 30. Resumen de dispositivos de sensorización magnética creados para la realización de experimentos citados en la literatura.*

Existen varios detalles que hay que destacar de este listado de dispositivos de sensorización. La mayor parte de ellos utilizan sensores AMR de la empresa Honeywell, y suelen ser sensores de 3 ejes, aunque en algunos casos se trabaja con sensores de uno o de dos ejes. En todos los casos existe una comunicación inalámbrica entre el sensor y un punto de acceso, dado que los dispositivos se han pensado para trabajar como parte de redes de sensores inalámbricas (más conocidas por las siglas en inglés WSN – Wireless Sensor Network). En este tipo de sensores prima el bajo consumo, y el rendimiento que se obtiene de los sensores en términos de frecuencia de muestreo en raras ocasiones supera los 200 Hz.

En muchos de los estudios, los dispositivos se han diseñado para ser ubicados en la parte externa del carril por el que circulan los vehículos, por lo que no se ha considerado necesario la creación de un contenedor para su protección. Sólo en el caso en el que el sensor ha sido concebido para ser situado en una posición bajo el vehículo se ha proporcionado un contenedor con ciertas garantías de protección. El hecho de situar los sensores en la parte externa del carril afecta a la calidad de la señal capturada por cada sensor, puesto que la intensidad de la perturbación del campo magnético que puede medir el sensor disminuye con la distancia. Esto hace que las señales sean mucho más simples y aporten menos información que si los sensores se sitúan en una zona de paso debajo del vehículo. Por otro lado, es comprensible que muchos experimentos se hayan realizado en estas condiciones, puesto que realizar una instalación de sensores dentro de un carril de una calle o una carretera acarrea unos costes económicos considerables y la investigación debe estar apoyada por los organismos responsables de la gestión del tráfico.

Dado que estos dispositivos han sido creados con fines de investigación, y se han diseñado principalmente para su uso en entornos urbanos, no tienen unos requisitos técnicos y funcionales muy exigentes. Por ejemplo, la protección del dispositivo para su instalación en una vía a través de un contenedor adecuado, o la forma de alimentar los dispositivos no han sido aspectos que se hayan tenido en consideración en los trabajos de investigación de la literatura. Los dos parámetros más relevantes que se han tenido en cuenta y que influyen en el rendimiento de los sensores son el consumo energético y la frecuencia de muestreo. La importancia del consumo energético radica en el hecho de que la mayoría de sensores que se han desarrollado son inalámbricos. En estos casos, un consumo energético reducido es fundamental para dotar de independencia funcional a los sensores; como contrapartida, el rendimiento que pueden aportar en cuanto a la calidad de los datos capturados por el sensor disminuye junto con la reducción del consumo.

La frecuencia de muestreo tiene relevancia con respecto a la calidad de las señales obtenidas. Si la frecuencia es alta el sensor va a proporcionar señales con mucho nivel de detalle en su forma de onda. Por el contrario, si la frecuencia es baja, la forma de onda de las señales se simplifica y puede perder alguna de sus características. En la Figura 109 puede apreciarse la variación de la forma de una señal recogida por uno de los ejes de un sensor AMR según distintos niveles de muestreo, en comparación con la señal original.

En general, los dispositivos que se mencionan en la literatura trabajan a bajas frecuencias (entre 30 Hz y 200 Hz, salvo en 2 estudios aislados en los que se trabaja a 300Hz y 1KHz). Esto puede apreciarse, por ejemplo, en los modelos magnéticos de los vehículos generados en distintos estudios (ver la sección 6.1), contruidos con pocas muestras y proporcionando poco nivel de detalle.

Por otro lado, los objetivos para los que se construyeron los sensores no precisaban a priori frecuencias de muestreo muy elevadas. Utilizar una frecuencia de muestreo elevada sólo tiene sentido si se pretende extraer información de vehículos que circulan a altas velocidades y que van a estar poco tiempo en la zona de detección del sensor. El número de muestras obtenido será menor cuanto mayor sea la velocidad del vehículo. En entornos urbanos o de vías principales no es esperable que los vehículos circulen a velocidades elevadas, y por este motivo, aunque la frecuencia de muestreo con la que se diseñan los sensores es baja, las señales obtenidas tienen suficiente calidad en términos de número de muestras.

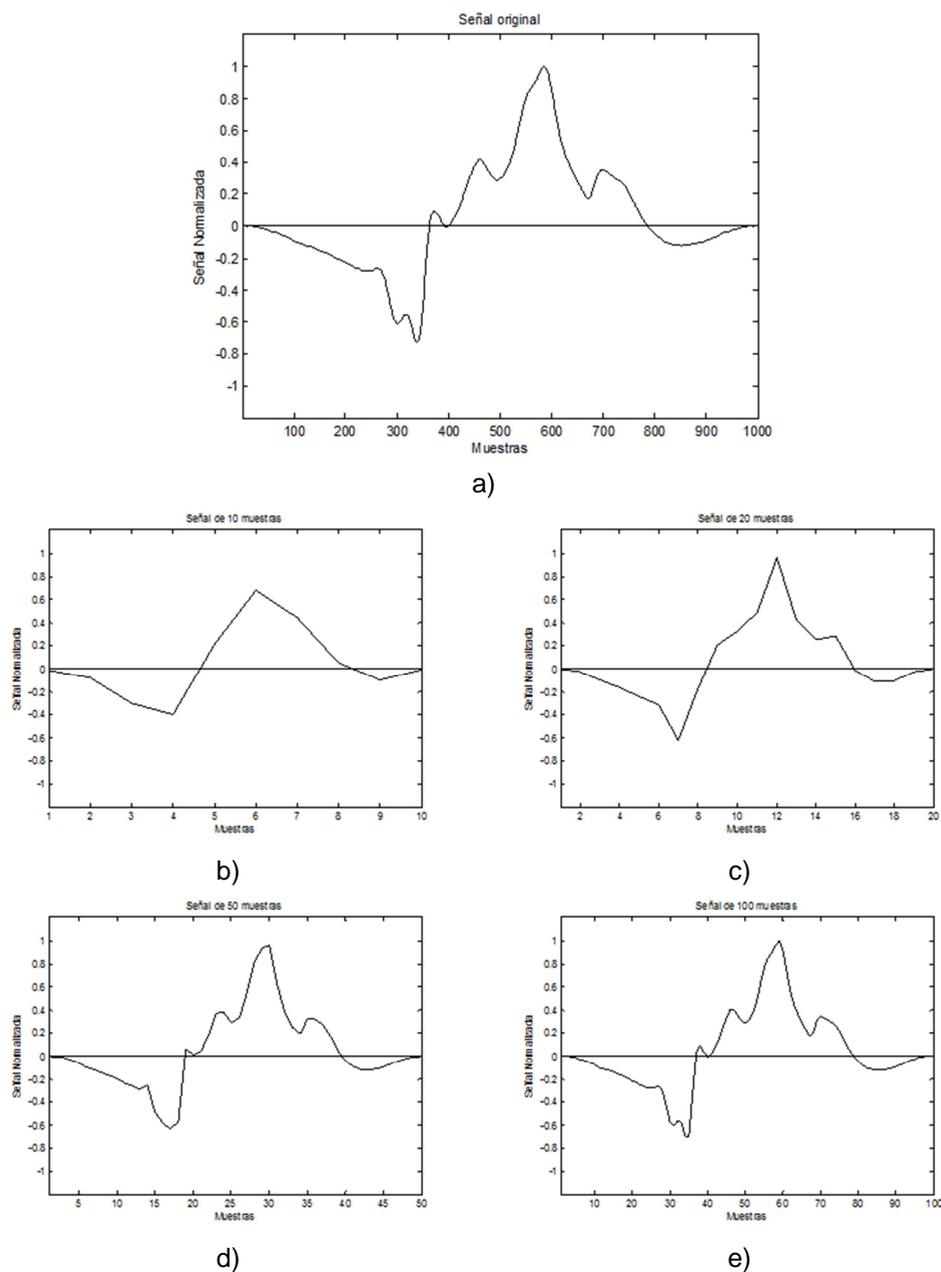


Figura 109. Señal con diferentes niveles de muestreo: a) original, b) 10 muestras, c) 20 muestras, d) 50 muestras, e) 100 muestras

Para la realización del estudio final que se propone en esta tesis el requisito del consumo energético no es relevante, puesto que no hay ninguna restricción sobre el sistema de comunicación con los sensores, es decir, los sensores pueden ser cableados y no es necesario que sean inalámbricos. Sin embargo, la calidad de la señal sí que es un requisito importante, y en ese sentido la frecuencia de muestreo del sensor tiene que ser elevada para proporcionar esta calidad, debido a la velocidad que se espera en los vehículos que se van a monitorizar.

La frecuencia de muestreo y la velocidad del vehículo están intrínsecamente relacionadas con la calidad de la señal. En una vía interurbana, las velocidades de los vehículos pueden ser muy elevadas. Cuando un sensor AMR detecta un vehículo y obtiene su huella magnética, la frecuencia de muestreo y la velocidad del vehículo van a determinar el número de muestras que conforman la señal. Por ejemplo, un turismo de gama media, con una longitud aproximada de 4 metros, viajando a 100 km/h, estará aproximadamente 0.14 segundos sobre el sensor. Si la frecuencia de trabajo es de 100 Hz, sólo se obtendrán señales que tengan alrededor de 14 muestras cuando el vehículo se encuentra sobre el sensor. Estas señales no tienen calidad suficiente como para ser utilizadas con garantías en un proceso de re-identificación. Este es otro motivo más por el cual no se pueden utilizar los sensores comerciales en el estudio, y es necesario desarrollar un sensor ad-hoc que proporcione señales con suficiente número de muestras.

### 7.1.2. Requisitos y características del dispositivo sensor

Ya hemos visto que para conseguir unos resultados adecuados de re-identificación de vehículos en un entorno de tráfico real es necesario disponer de un dispositivo de sensorización basado en tecnología AMR que pueda ser instalado en una vía interurbana y que pueda recoger huellas magnéticas de vehículos con suficiente calidad.

Ante la falta de un sensor comercial que pueda satisfacer las necesidades del experimento, hemos encargado el diseño y construcción de un conjunto de prototipos de sensores que cumplan las condiciones necesarias para poder llevar a cabo el experimento. A continuación se describen las características del dispositivo de sensorización que se ha desarrollado.

El dispositivo está equipado con un sensor AMR HMC2003 de Honeywell de 3 ejes de alta sensibilidad (Honeywell 2011). El sensor AMR es capaz de trabajar en condiciones ambientales adversas, como las que se pueden producir en una autopista o una autovía, por ejemplo, soportando temperaturas que oscilan entre los  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $+60^{\circ}\text{C}$ .

La sensibilidad del sensor es elevada para permitir la medición de pequeñas variaciones del campo magnético terrestre. Por ejemplo, para poder detectar a un vehículo a una distancia de 1.5m, el sensor con que se ha dotado al dispositivo es capaz de medir variaciones de 1 mili-gauss, tal y como se requiere según el análisis del efecto de desplazamiento lateral descrito en la sección 6.3.

El tamaño del sensor es reducido, para que pueda incorporarse en una placa de un tamaño inferior a 20 x 20 cm. Como ya hemos explicado, el consumo y la alimentación no son unos aspectos relevantes, por eso se permite que el dispositivo opere en el rango de 5 a 15 voltios y el consumo sea hasta de 50 mA.

La fiabilidad del sensor también es un aspecto importante. En este sentido, la experiencia de los investigadores mencionados en la literatura sobre utilización y aplicación de sensores para la monitorización de vehículos es un dato relevante. Muchos de los trabajos que hemos analizado de la literatura hacen uso de sensores Honeywell, y en particular del HMC2003 (o de sus componentes HMC1001 y HMC1002). Este sensor es fácilmente integrable en un PCB y dispone de una documentación adecuada para los fines de investigación que se persiguen.

### ***Frecuencia de muestreo***

En los experimentos previos que hemos realizado y que se han documentado en los capítulos anteriores, hemos supuesto que las señales obtenidas por los sensores tenían un número de muestras superior a 100. Para conseguir este número de muestras en las señales de un sensor en una vía interurbana, como una autopista, debemos definir una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta como para poder obtener al menos dicha cantidad de muestras en la mayoría de los casos. Esta frecuencia dependerá de las velocidades y tamaños de los vehículos considerados.

Para definir una frecuencia de muestreo adecuada hemos considerado una longitud mínima de un vehículo de 3.8 metros. Este tamaño corresponde a vehículos de

gama baja, como un Opel Corsa, Toyota Yaris, Suzuki Swift, etc. También hemos considerado que el vehículo puede circular a una velocidad máxima de 140 km/h (aunque el límite de velocidad está fijado en 120 km/h por las normativas (Dirección General de Tráfico 2014b) y (Dirección General de Tráfico 2003), hemos establecido un rango mayor para garantizar el mínimo número de muestras deseado). En estas condiciones, para obtener más de 100 muestras del vehículo cuando se encuentra circulando sobre el sensor, la frecuencia de muestreo debe ser aproximadamente 1 KHz. En el **Anexo VI. Muestras por velocidad y frecuencia** se puede ver una tabla con el número de muestras que obtendría un sensor trabajando a una frecuencia de 1 KHz para distintas velocidades y longitudes de vehículos.

### ***Otras características***

El dispositivo de sensorización está concebido para que se instale en el asfalto. En principio, cualquier posición en el interior del carril es candidata para albergar el sensor. Por tanto, el dispositivo va a estar sometido a condiciones de temperatura extremas, de humedad elevada en las épocas lluviosas del año, y a condiciones de presión elevadas debido a la posibilidad del paso de vehículos (especialmente los pesados) directamente sobre él.

Respecto a las condiciones térmicas, se han seleccionado todos los componentes del dispositivo para que puedan operar en un rango de -20°C y +60°C, que son las condiciones que cabe esperar en una vía interurbana en España.

Para acondicionar el dispositivo a la humedad se ha protegido a través de una cobertura aislante que garantiza su funcionamiento incluso en condiciones de inmersión en agua. Esta cobertura se ha proporcionado a través de un procedimiento de recubrimiento del dispositivo con un material aislante de tipo resina epoxi.

Finalmente, para garantizar la capacidad del sensor para soportar la presión, se ha tenido en cuenta el Reglamento General de Vehículos (Dirección General de Tráfico 1998) que establece en el artículo 14 y el anexo IX la prohibición de circulación de vehículos que ejerzan una presión sobre el asfalto superior a 9 Kg/cm<sup>2</sup>. El dispositivo por sí solo no puede soportar esta presión, por lo que se ha diseñado y construido un sistema de encapsulado que puede albergarlo y protegerlo, sin interferir en las capacidades de medición del sensor AMR, y permitiendo la

alimentación y la comunicación externa con el dispositivo. De esta forma, se ha diseñado y construido una caja metálica de aluminio con protección al polvo y la entrada de agua, y con una estructura cilíndrica de unas dimensiones que la hacen resistente a la presión que viene marcada por la normativa.

Con respecto a la alimentación se ha decidido utilizar la forma más simple y autónoma para la construcción del mismo, es decir, diseñar un dispositivo cableado que permita al mismo tiempo la alimentación y la comunicación. Se ha adoptado, siguiendo esta premisa, una solución basada en una alimentación de tipo PoE (Power over Ethernet) y que utiliza de esta forma el mismo conector para comunicarse con el sensor a través de un protocolo de comunicaciones simple sobre TCP/IP.

### 7.1.3. Prototipo de dispositivo sensor

El prototipo del dispositivo de sensorización consta de 4 elementos: una placa PCB (Printed Circuit Board) montada con el sensor AMR HMC2003, una placa base para el acoplamiento de la PCB y el control del sensor, un sistema de recubrimiento del dispositivo y un sistema de encapsulación del sistema para su protección. Los detalles técnicos de las características del hardware utilizado para la construcción del dispositivo se pueden consultar en el **Anexo VII. Datos técnicos del dispositivo sensor.**

Además del desarrollo hardware, ha sido necesario instalar un sistema operativo para la placa base, crear un software de control del sensor y un software de comunicaciones para extraer los datos recogidos por el mismo. Los datos, por su parte, siguen un formato diseñado ad-hoc que permite identificar y referenciar en el tiempo las magnitudes físicas que está midiendo cada uno de los ejes el sensor AMR. Además se ha integrado este formato con el protocolo de comunicaciones diseñado. Los detalles del formato de los datos y las tramas se pueden consultar en el **Anexo VIII. Definición de la trama de red del sensor.**

El objetivo de la PCB es obtener un conversor A/D para la extracción de la información que proporciona el sensor AMR. En el diseño del circuito se han tenido en consideración las especificaciones proporcionadas por el fabricante del sensor, en particular las que hacen referencia a su estabilidad para las mediciones. La PCB diseñada para la construcción del dispositivo puede verse en la Figura 110.

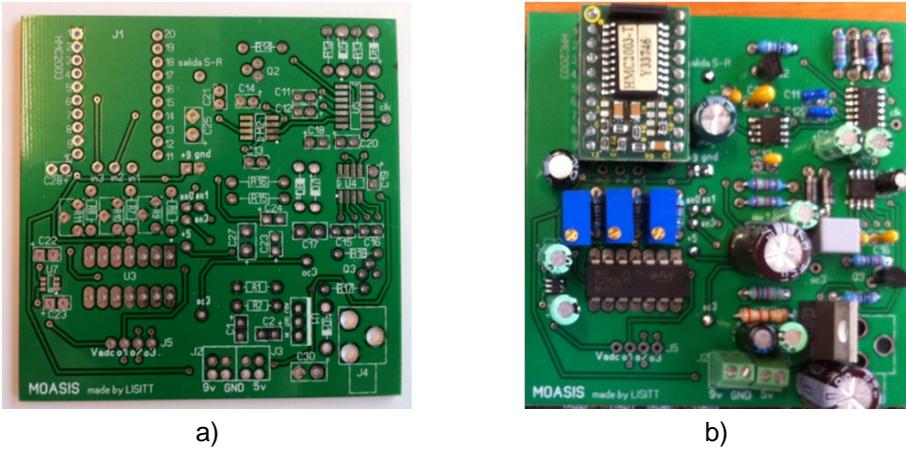


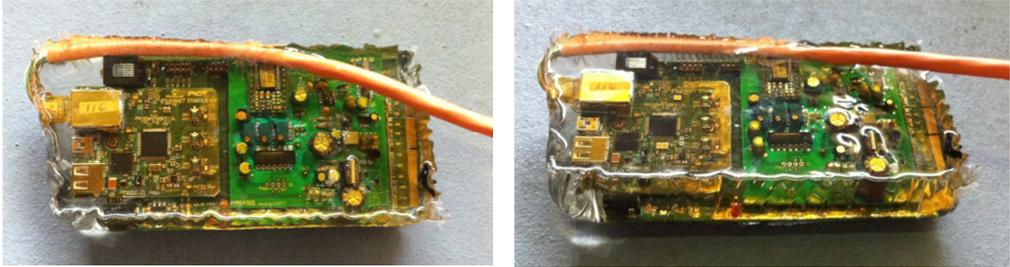
Figura 110. a) Imagen de la PCB para hospedar el sensor AMR HMC2003.  
b) Imagen de la PCB montada con el sensor AMR HMC2003 y los componentes.

La PCB va montada sobre un dispositivo modular PIC 32 formado por un MICROCHIP DM320002 PIC32 I/O Expansion Board (Microchip DM320002 2015) y un kit de expansión para conexión Ethernet MICROCHIP DM320004 PIC32 Ethernet Starter Kit (Microchip DM320004 2015). Este montaje permite acceder a los datos que proporciona el sensor HMC2003 a través del puerto Ethernet. El resultado del montaje puede verse en la Figura 111.



Figura 111. Dispositivo formado por el sensor AMR sobre una PCB acoplada a un dispositivo modular PIC 32.

El dispositivo electrónico completamente montado se ha pasado a la fase de protección para aislarlo de condiciones ambientales adversas, especialmente del polvo y de la humedad. Para ello se le ha conectado el cable PoE y se ha colocado en un recipiente sobre el que se ha vertido una resina epoxi. El resultado de la protección de los dispositivos con la resina epoxi puede apreciarse en la Figura 112.



*Figura 112. Dispositivo sensor encriptado con resina epoxi*

En la última fase del montaje se ha encapsulado el dispositivo en una caja metálica de aluminio para aumentar su protección frente a las condiciones medioambientales adversas, pero sobre todo para que lo proteja de la presión que pueden ejercer los neumáticos de los vehículos cuando pasen por encima de él.

Se ha diseñado para ello un contenedor de forma cilíndrica, de 21,5 cm de diámetro y una profundidad de 7,0 cm, y con unas paredes de 0,5 cm de grosor, con una tapa desmontable de 1,0 cm de grosor y protegida con elásticos para asegurar la estanqueidad (Figura 113). La caja dispone de una abertura lateral por donde se ha pasado el cable de red y de alimentación, que a su vez está protegida con un dispositivo protector que consiste en una prensaestopa de poliamida M20x1.5 con un índice de protección IP68 (Figura 114).

El material elegido para la construcción de la caja contenedora es el aluminio, puesto que es un material con unas propiedades ferromagnéticas que interfieren muy poco con el CMT. De esta manera, el sensor AMR montado en el dispositivo percibe un apantallamiento mínimo y puede realizar mediciones muy similares a unas condiciones de trabajo “al aire”. Este material y configuración del contenedor le dotan de una capacidad de soporte de presión de más de 17 kilogramos por centímetro cuadrado.

La caja está diseñada para ser insertada en el asfalto, de manera que la tapa quede al mismo nivel que la superficie del carril. Por las dimensiones de la caja y el material del que está formada, una superficie lisa es potencialmente peligrosa para los vehículos, puesto que puede provocar deslizamientos en los neumáticos; esto es especialmente peligroso para el caso de las motocicletas. Para evitar este efecto la tapa se ha diseñado con unas hendiduras circulares concéntricas que aumentan el rozamiento con los neumáticos si pasan por encima de la caja. El aspecto final de la a caja de protección que se ha construido puede verse en la Figura 113.



*Figura 113. Caja de protección para el dispositivo sensor.*



*Figura 114. Distintos tipos de prensaestopa de poliamida*

El prototipo de dispositivo sensor ha quedado finalmente listo para su instalación en el entorno experimental real. Para la realización del experimento que se presenta más adelante en este capítulo se han construido 7 sensores de idénticas características.

## 7.2. Configuración del entorno experimental

En el apartado anterior hemos mostrado que gran parte de los estudios realizados con sensores AMR para la detección y re-identificación de vehículos han utilizado configuraciones y distribuciones de sensores localizados fuera de los carriles por donde circulan los vehículos. En la literatura también ha quedado de manifiesto que las señales obtenidas en estos casos son más pobres respecto a la forma de onda (Taghvaeeyan & Rajamani 2014a) y ofrecen peores resultados en el proceso de re-identificación. Los mejores resultados en re-identificación se han obtenido cuando los sensores se han ubicado en las zonas de las vías que quedan bajo el vehículo a su paso por la zona de sensorización, tal y como se ha mostrado en el análisis descrito en la sección 3.3.

En este apartado se describe el diseño y la configuración del entorno experimental final, basandonos en un análisis de las configuraciones que aparecen en la literatura en estudios previos y en los resultados que se han obtenido en esta tesis hasta el momento. Para ello se han revisado las configuraciones de sensores que se han utilizado en la literatura para re-identificar vehículos cuando se han dispuesto dentro del carril y se describe el lugar seleccionado para el desarrollo del experimento final y los criterios de selección que han permitido una ubicación adecuada de los sensores.

### 7.2.1. Ubicación del experimento

Dado que este trabajo de investigación se enmarca dentro del proyecto CENIT-OASIS, se ha buscado una ubicación para el experimento final en un entorno de tráfico real que pueda proporcionar alguno de los socios del proyecto y que permita trabajar con cierta libertad, considerando tanto la instalación de los dispositivos como la monitorización de los mismos.

Bajo esta premisa, se ha considerado que el punto más adecuado se encuentra en una autopista, en el eje Madrid-Barajas (M-12), donde hay instalado un pódico dotado de cámaras que permite observar perfectamente la ubicación de los sensores y el paso de los vehículos sobre los mismos. Además, las cámaras permiten identificar los vehículos que circulan por esta zona a través de un software de reconocimiento automático de matrículas.

La elección de esta vía también proporciona una condición ventajosa para el experimento puesto que aporta un flujo reducido de vehículos. Esto que se traduce en una simplificación del problema de aislamiento de los datos de un vehículo, tanto de señales como de imágenes y matrículas, y una disminución de las interferencias que pueden ocasionar varios vehículos circulando con mucha proximidad o por dos carriles al mismo tiempo (lo que generaría una perturbación de señales que afectarían negativamente a los resultados). En este sentido, la M-12 posee una Intensidad Media Diaria (IMD) inferior a 20.000 vehículos, según datos oficiales del año 2012 que se pueden encontrar en la página 82 de (Ministerio de Fomento 2014c). Esto supone una intensidad relativamente baja y que puede proporcionar las condiciones de flujo deseadas.

El experimento que se ha diseñado en este estudio final consta de un único punto de sensorización. Al igual que se describe en el estudio de (Ndoye et al. 2011), donde la validación del método de re-identificación se hace con los datos obtenidos en un único punto de sensorización, el objetivo de este experimento es también validar la capacidad de re-identificación de vehículos con la metodología y los algoritmos propuestos en los capítulos anteriores. En este sentido, es conveniente eliminar cualquier elemento externo que pueda afectar a las medidas tomadas para cada uno de los vehículos monitorizados. A diferencia del estudio de Ndoye et al., la capacidad de la re-identificación se ha realizado a través de la detección de un mismo vehículo que pasa de forma repetida por el punto de sensorización embebido dentro del tráfico normal que tiene esta vía

El punto concreto seleccionado para la instalación de los sensores se encuentra situado en el Km. 2,5 de la M-12 (Autopista Eje-Aeropuerto en Madrid, operada por la empresa OHL Concesiones), en sentido creciente del kilometraje. Se puede observar gráficamente esta ubicación con una vista aérea en la Figura 115 y la Figura 116. Como puede apreciarse, el punto de sensorización consta de dos carriles y está situado en un nudo, pero que no interfiere con el tráfico de la M-12 puesto que no existen vías de incorporación ni de salida.

También se proporciona una vista desde la propia carretera en el sentido de la circulación en la Figura 117, donde se aprecia el pórtico que contiene las cámaras que se utilizarán para la detección de matrículas. Un poco más adelante, tal y como muestra la Figura 118, se puede apreciar el detalle del punto de instalación con los sensores situados sobre la calzada.



Figura 115. Ubicación del punto de sensorización del experimento final en la M-12.  
Vista 1<sup>11</sup>.



Figura 116. Ubicación del punto de sensorización del experimento final en la M-12.  
Vista 2<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> Imagen obtenida de <http://maps.google.com>. Consultado en Junio 2015.



Figura 117. Ubicación del punto de sensorización del experimento final en la M-12. Vista 3<sup>13</sup>.



Figura 118. Detalle del punto de instalación de los sensores en la M-12<sup>14</sup>

<sup>12</sup> Imagen obtenida de <http://www.bing.com/maps>. Consultado en Julio de 2015

<sup>13</sup> Imagen obtenida de <http://www.bing.com/maps>. Consultado en Julio de 2015

<sup>14</sup> Imagen obtenida de <http://www.bing.com/maps>. Consultado en Julio de 2015

De los dos carriles situados en este punto, se ha seleccionado el carril derecho para realizar la instalación de los sensores. Como puede observarse, desde el pórtico que contiene las cámaras preparadas para extraer datos de matrículas se tiene una visión de campo suficientemente amplia como para registrar los pasos de vehículos, sus trayectorias y sus posiciones de paso respecto a los sensores.

## 7.2.2. Configuración del punto de sensorización.

### **Configuraciones de estudios previos**

En este apartado nos centraremos en la descripción de las configuraciones de sensores que se han descrito en la literatura cuando se desea detectar y clasificar o re-identificar vehículos y los sensores se encuentran situados dentro el carril, de forma que los sensores queden situados debajo del vehículo cuando es sensorizado.

En la literatura se han propuesto varias configuraciones de sensores, tanto en número como en la forma de su ubicación. Los casos mejor descritos y documentados se muestran a continuación, ordenados por el número de sensores que han utilizado.

Los casos en los que se utiliza un solo sensor no son frecuentes, excepto cuando el objetivo es la detección, aunque también se aplica a experimentos de clasificación. Por ejemplo, en (Kaewkamnerd et al. 2010) se realiza un estudio de clasificación de vehículos para el cual se sitúa un único sensor en el centro del carril en un punto de acceso a un recinto universitario, a una distancia de 5 metros del punto desde donde el vehículo accede al recinto partiendo desde una posición de detención. En el experimento de (Ma et al. 2014) también se utiliza un único sensor situado en el centro del carril, esta vez con el único objetivo de detectar los pasos de vehículos. El trabajo de (Tian et al. 2014) también se basa en el uso de un único sensor situado en el centro del carril, pero se utilizan varios puntos de sensorización para obtener una fusión de datos que permita realizar una clasificación mejorada de los tipos de vehículos.

Es más habitual utilizar 2 sensores, especialmente cuando el objetivo es obtener características de los vehículos, que suelen ser la velocidad y la longitud del vehículo. Así, podemos encontrar estudios como el de (Kang et al. 2005), donde se

presenta un experimento de detección de vehículos, pero con una configuración de sensores preparada para calcular la velocidad de paso. Por este motivo se utilizan 2 sensores AMR dispuestos de forma longitudinal en el centro del carril y enterrados en el pavimento.

También en (Yoo et al. 2010) se sitúan 2 sensores en el centro del carril, en dirección longitudinal, con una separación de 3 metros entre ellos, en un entorno de pruebas, con el fin de obtener la velocidad de los vehículos. Cuando los autores trasladan la configuración a un entorno de trabajo real, el objetivo es detectar el paso de vehículos. En esta ocasión utilizan un único sensor localizado en el centro del carril, pero los autores destacan que son necesarios más sensores de los previstos inicialmente y distribuyen varios sensores en la zona de detección.

En (Cardell Bilbao et al. 2010) se utiliza una configuración de un único dispositivo por carril, pero en este caso el dispositivo dispone de 2 sensores magnéticos, con lo que los autores pueden obtener datos para clasificar el vehículo y calcular su velocidad. En (Li et al. 2011) también se utiliza un dispositivo con 2 sensores magnéticos con el fin de detectar vehículos y obtener su velocidad. La distribución en este caso coincide también con el trabajo de (Cardell Bilbao et al. 2010), situando un único sensor en el centro del carril que se está monitorizando.

Sin embargo, cuando el objetivo es realizar una re-identificación de vehículos con cierta precisión, se aumenta el número de sensores utilizados en los puntos de detección. En este caso existe más variedad en la selección del número de sensores y su distribución.

En (Kwong et al. 2009b), donde el objetivo del estudio es la re-identificación de vehículos, se utiliza una distribución de 7 sensores en línea introducidos en el pavimento, con una distancia de 30 cm entre ellos. Los sensores están alineados con el pavimento y posicionados en el centro del carril, son inalámbricos y se comunican con un nodo central situado a escasos metros de su ubicación. Este experimento se realiza en un entorno real urbano.

El estudio de (Sanchez et al. 2011a) propone el uso de 5 sensores magnéticos en línea en cada punto de sensorización, en dirección transversal en el carril. Los sensores se sitúan en el centro del carril monitorizado, y el experimento tiene lugar en un entorno urbano (Figura 119).

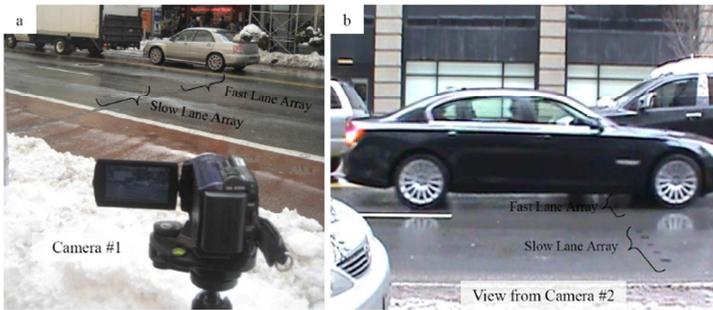


Figura 119. Disposición de sensores en el trabajo de (Sanchez et al. 2011a)

En (Cheung & Varaiya 2007) se realizan varios experimentos. Uno de los experimentos pretende detectar el paso de vehículos, para lo cual se utiliza un único sensor situado en el centro del carril de detección. Otro experimento consiste en medir la velocidad de los vehículos. Para ello los autores sitúan 2 sensores separados a una distancia de 1,83 metros en el centro del carril que se está monitorizando. Esta misma configuración la utilizan para realizar el experimento de clasificación de vehículos, basándose en la velocidad y la longitud de los vehículos y la forma de las señales obtenidas. Sin embargo, para el experimento de la re-identificación utilizan una configuración de 7 sensores situados sobre el pavimento y alineados en dirección transversal al sentido de circulación de los vehículos, en la parte central del carril que se va a monitorizar, con una separación de tan solo 15 cm. entre ellos (Figura 120).

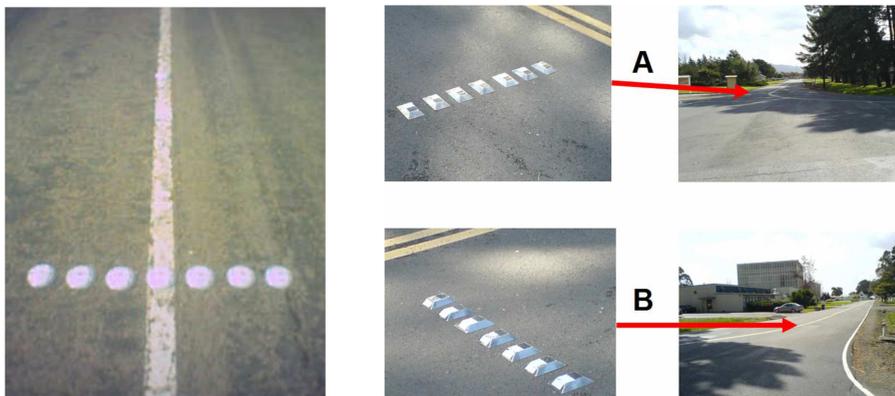


Figura 120. Disposición de sensores en el trabajo de (Cheung & Varaiya 2007)

Los autores de (Pitton et al. 2012) realizan un estudio de la re-identificación de vehículos con un dispositivo sensor que está compuesto de 9 sensores AMR separados una distancia de 25 cm. dispuestos en las esquinas, el centro y el centro de los lados de un cuadrado 0,5 metros de lado, y un décimo dispositivo situado en línea con la dirección del movimiento de los vehículos. Este dispositivo se utiliza en un entorno de pruebas y se ubica en una posición de forma que los vehículos pasan su parte central por encima de él.

En (Cheung, Coleri & Varaiya 2005) se usan 4 sensores para abordar la re-identificación de vehículos. El experimento se realiza en una zona de tráfico real pero de manera controlada para un conjunto reducido de vehículos. Los sensores se disponen en forma de T, con 3 sensores situados en el centro del carril y alineados en sentido transversal al de la circulación, separados una distancia de 46 cm. Un cuarto sensor se sitúa alineado y a una distancia de 1,83 metros del sensor central, en una posición anterior a la línea de 3 en sentido de la circulación.

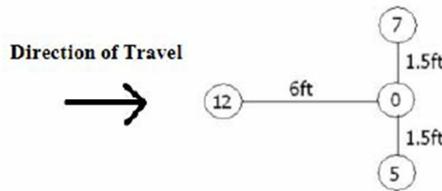


Figura 121. Disposición de sensores en el trabajo de (Cheung, Coleri & Varaiya 2005)

La configuración de sensores en forma de T se repite en otros estudios. El experimento de (Kavaler et al. 2011) utiliza una disposición de 5 sensores magnéticos en línea embebidos en el pavimento, de forma transversal al sentido de la circulación. El objetivo es re-identificar vehículos para calcular tiempos de viaje entre dos puntos. Los autores no ofrecen información detallada sobre la disposición exacta de los sensores, pero indican que utilizan un sensor adicional dispuesto en sentido longitudinal de la circulación en línea con otro de los sensores, a una distancia 1,83 metros, para calcular la velocidad de paso. En resumen, la configuración de los sensores es en forma de T, con cinco sensores en una línea transversal a la dirección de circulación y un sexto sensor en línea con el sensor central en sentido longitudinal con respecto a la dirección del tráfico.

La misma configuración en T, pero con 7 sensores magnéticos alineados transversalmente y separados 30 cm. entre sí, es la que se utiliza en (Liu et al. 2009). El sensor previo alineado con el sensor central de los 7 transversales está situado a una distancia de 1.83 metros (Figura 122). El experimento se realiza en condiciones de tráfico reales, con vehículos que alcanzan velocidades de hasta 90 Km/h.

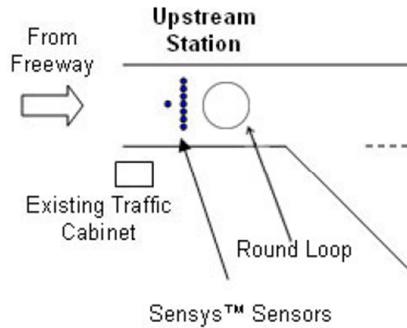


Figura 122. Disposición de sensores en el trabajo de (Liu et al. 2009)

La configuración de sensores más compleja descrita en la literatura se encuentra en el trabajo de (Sanchez 2012), donde se utilizan 11 sensores para re-identificar vehículos en un enlace entre dos vías de alta capacidad. Los autores sitúan 7 sensores alineados en sentido transversal en el carril, y 2 grupos de 2 sensores alienados en sentido transversal situados antes y después de la línea de 7, alineados entre ellos de forma longitudinal para conseguir obtener la velocidad de paso de los vehículos en esos puntos (Figura 123).

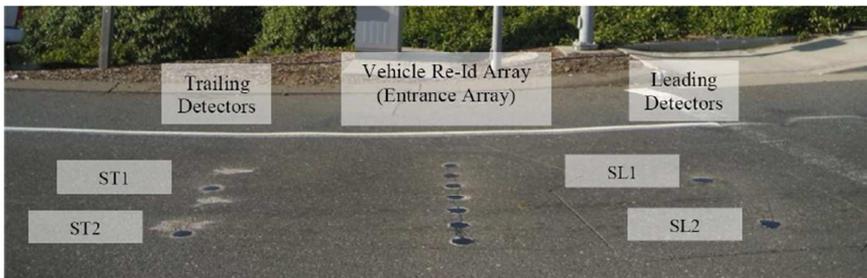


Figura 123. Disposición de sensores en el trabajo de (Sanchez 2012)

Sin embargo, no todos los estudios de re-identificación optan por la opción de utilizar un elevado número de sensores. En este sentido, el trabajo más relevante que aparece en la literatura es el de (Ndoye et al. 2011), donde se simplifica la configuración de sensores utilizando tan sólo 2 microloops situados en el centro del carril. De esta manera se obtienen las señales para determinar tiempos de viaje entre dos puntos basados en el emparejamiento de las señales obtenidas. En este caso, los ratios de re-identificación son bajos, pero suficientes para obtener tiempos de viaje con buena precisión.

De estos estudios se puede concluir que cuando el objetivo final es la detección de vehículos es suficiente con utilizar un único sensor situado en el centro del carril monitorizado. Si el objetivo que se pretende alcanzar es la clasificación de vehículos, es necesario utilizar 2 sensores para poder extraer características básicas de los mismos. Cuando el objetivo es la re-identificación, lo habitual es utilizar una configuración de sensores en línea o en forma de T, lo que permite obtener una cantidad suficiente de información de cada vehículo. Los autores de estos estudios que acabamos de mencionar justifican la utilización de varios sensores en línea para paliar el efecto del *desplazamiento lateral* de las señales que hemos descrito en la sección 6.3.

La característica común de los estudios que utilizan varios sensores es la situación de los mismos muy próximos entre sí y centrados en el carril. Esto se debe a que los entornos experimentales que utilizan son zonas urbanas donde lo previsible es que el vehículo circule por el centro del carril. De esta manera, es muy probable que los datos que se obtengan de cada vehículo pertenezcan a su parte central, que como hemos visto en la en la sección 6.3 son los idóneos para realizar una re-identificación. Cuando estas condiciones no se cumplen, los resultados de la re-identificación no son tan buenos como los obtenidos en los entornos urbanos.

Como ya hemos comentado anteriormente, en nuestro experimento hemos situado los sensores en una autopista, donde los carriles tienen una anchura superior a la de los carriles de una zona urbana. Además, la posición de circulación del vehículo por el carril no tiene por qué estar ajustada al centro del mismo ya que las dimensiones de un vehículo comparadas con la anchura del carril permiten que el vehículo pueda pasar por distintas posiciones dentro del carril. Indudablemente, esto afecta a la posición relativa de paso del vehículo con respecto al sensor, por lo que ha sido necesario diseñar una configuración de sensores que tenga en cuenta este aspecto.

### ***Propuesta de configuración del punto de sensorización***

La configuración del punto de sensorización ha tenido en cuenta 2 elementos: el número de sensores que se deben utilizar, y la disposición de los sensores en el carril. Para determinar el número de sensores necesarios hemos utilizado el análisis del modelo magnético de un vehículo que se realizó en la sección 6.3 y las características físicas del punto de sensorización. Para definir la disposición de los sensores hemos utilizado el análisis de estudios previos de la literatura y algunos requisitos adicionales del proyecto CENIT-OASIS en el que se enmarca la investigación de esta tesis.

Uno de los resultados más importantes obtenidos en el Capítulo 6 tiene que ver con la posición idónea de los sensores para que puedan obtener las mejores señales en la re-identificación de vehículos. Recordando los resultados obtenidos, hemos concluido que las señales deben provenir de sensores situados en posiciones que disten entre 20 cm. y 25 cm. entre sí, y que las posiciones de los sensores con respecto al vehículo deben cumplir la condición de que su distancia media al centro del vehículo debe estar entre 30 y 40 cm.

Estas condiciones ofrecen mejores señales para la re-identificación cuanto más restrictivas son. Por ese motivo, hemos determinado que lo ideal es poder utilizar, en un proceso de re-identificación, señales que correspondan a secciones longitudinales del vehículo que se encuentren a 20 cm. de distancia, y que las secciones se encuentren a una distancia media al eje central del vehículo de 30 cm.

Para poder re-identificar un vehículo, éste deberá pasar al menos 2 veces por la zona sensorizada. Su posición relativa de paso con respecto a los sensores en cada paso puede ser diferente. Para garantizar que la distribución de los sensores permita obtener señales correspondientes a secciones longitudinales del vehículo que se encuentren como máximo a 20 cm. de distancia hemos planteado el caso más desfavorable posible en las 2 pasadas, es decir, que la menor distancia entre un sensor de la primera pasada y un sensor de la segunda pasada sea la máxima posible. En la Figura 124 se puede apreciar dos configuraciones de paso sobre los sensores: una óptima (a), en la que un sensor queda en la parte central del vehículo y hay 3 sensores que quedan en la zona inferior del vehículo que no se ven afectados por el complejo de las ruedas (y que pueden ofrecer señales útiles, y otra pésima (b), en la que dos sensores quedan alejados del centro del vehículo

igualmente, y donde sólo hay 2 sensores que puedan aportar información útil. Para garantizar que al menos 2 sensores quedan en la zona de confianza de paso del vehículo se ha aplicado el *principio de Dirichlet* (Hazewinkel 2001).

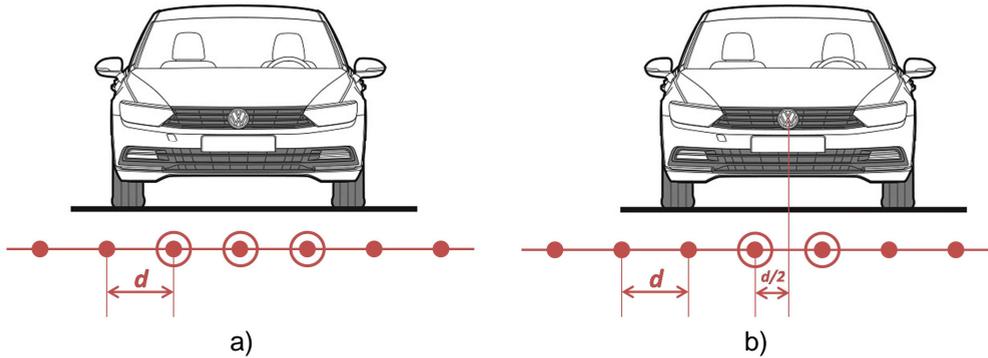


Figura 124. a) Paso ideal del vehículo sobre los sensores; b) peor paso posible del vehículo sobre los sensores

Supongamos que los sensores están distribuidos uniformemente en una línea transversal con respecto al sentido de circulación del vehículo, con una distancia entre sensores que llamaremos  $d$ . Los 2 pasos del vehículo sobre la zona sensorizada los denominaremos  $p_1$  y  $p_2$ . Tomando como restricción que el vehículo debe circular obligatoriamente dentro del carril, y que todo el carril está sensorizado, llamaremos  $d_1$  a la posición relativa respecto al eje central del vehículo del sensor que se encuentre más cercano a dicho eje central en el paso  $p_1$ . En el paso  $p_2$ , tomando como referencia la posición  $d_1$ , seleccionamos el sensor que se encuentra a la mínima distancia de la posición  $d_1$ , y a esa posición relativa con respecto al eje central del vehículo la denominaremos  $d_2$ . Según el *principio de Dirichlet*, en estas condiciones la distancia  $|d_2 - d_1|$  será, como máximo, la mitad de la distancia que separa a los sensores, es decir  $d/2$ . Por tanto, si el objetivo es obtener señales que estén a una distancia máxima de 20 cm. lo sensores deberán estar dispuestos de forma uniforme en el carril a una distancia máxima  $d = 40$  cm. entre ellos. En la Figura 125 se ha representado la posición relativa del vehículo con los sensores en los 2 pasos y la selección de los sensores siguiendo el criterio que se ha establecido.

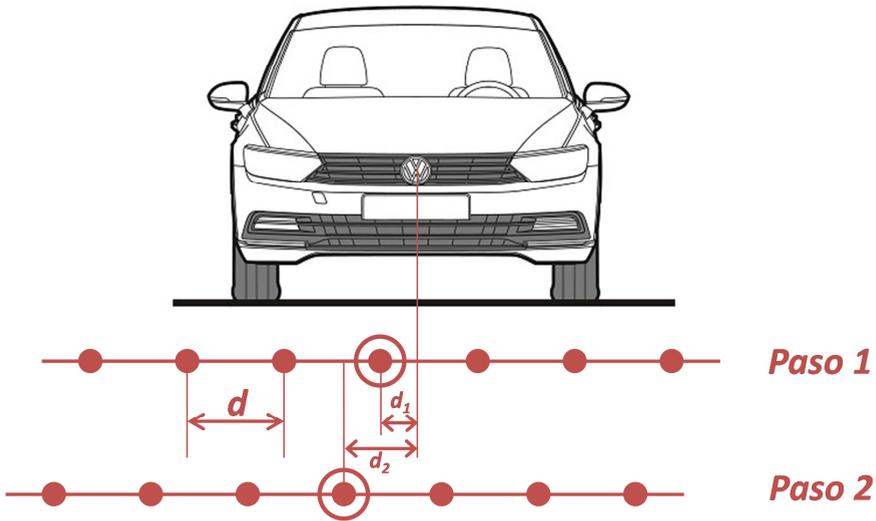


Figura 125. Esquema de la situación relativa de los sensores con respecto al centro del vehículo en diferentes pasos por la zona de sensorización

Además, con esta configuración, la selección de las huellas de los sensores más adecuados para la re-identificación cumplirá el requisito establecido de estas se encuentren a una distancia media de menos de 30 cm. En el peor de los casos la posición del sensor de la primera pasada  $A_1$  se encontrará a una distancia de 20 cm. del eje central del vehículo, y la distancia del sensor de la segunda pasada más cercano a este será como máximo 20 cm. y en el peor de los casos la posición del sensor de la segunda pasada  $B_1$  sería 40 cm. respecto al eje central del vehículo. En este caso, que es el peor, la media de la distancia al eje central del vehículo es de 30 cm., lo cual cumple la condición establecida. Pero esta situación de los sensores implica que existe otro sensor en la segunda pasada  $B_2$  que está situado en la posición relativa de 0 cm. con respecto al eje central. Si se toman los sensores  $A_1$  y  $B_2$ , se sigue cumpliendo que se encuentran a una distancia entre ellos de 20 cm., pero la distancia media al eje central del vehículo es de 10 cm.

Este hecho proporciona una flexibilidad importante en el proceso de selección de huellas magnéticas para el proceso de re-identificación. Con esta configuración de

sensores, y con los resultados del Capítulo 6 que permiten trabajar con sensores que se encuentren a una distancia máxima de 60 cm.<sup>15</sup> del eje central del vehículo, se puede llegar a tener en cada una de las pasadas 3 sensores candidatos a que sus huellas sean utilizadas para el cálculo de la similitud. Este aspecto de la selección de los datos para el cálculo de la similitud se aborda posteriormente en este capítulo en la descripción del proceso experimental.

Teniendo en cuenta las dimensiones del carril en el que se va a realizar la instalación (3,5 metros de ancho), y partiendo desde una distancia 0,5 metros del arcén (sobre el que no se va a situar ningún sensor) hacia el centro del carril, han sido necesarios 7 sensores distribuidos uniformemente cada 40 cm. para cubrir completamente la anchura del carril. Aunque en los trabajos de la literatura los sensores se sitúan en el centro del carril, en nuestro caso hemos situado los sensores de forma que abarquen completamente la anchura del carril para poder contemplar diferentes posiciones de paso del vehículo, como ya hemos explicado anteriormente.

Por otro lado, hay que determinar la forma de la distribución de los sensores sobre el carril. En todos los estudios en los que se han utilizado múltiples sensores para re-identificar vehículos en entornos de trabajo reales, los sensores se han dispuesto en una línea transversal y se han situado en el centro del carril, muy próximos unos de otros, por las condiciones de circulación de los vehículos.

En el caso de zonas interurbanas, ya hemos determinado que los sensores deben distribuirse uniformemente en la transversal del carril abarcándolo completamente. Esta distribución, además de contemplar la posición de paso del vehículo dentro del carril, permite también extender la distribución de sensorización a varios carriles. Hay que tener en cuenta que en una autopista de 2 carriles, como la que estamos proponiendo para el experimento, los vehículos pueden cambiar de carril por diversos motivos en el punto de sensorización.

Ya se ha constatado en la literatura que algunos errores de re-identificación son debidos a cambios de carril de los vehículos, y a la falta de sensores que puedan detectar esta situación. En nuestro caso, si se extiende la configuración uniforme de

---

<sup>15</sup> Este valor se obtiene como combinación de que la distancia media entre sensores sea como máximo de 40 cm. y la distancia entre sensores sea de 20 cm.

sensores al carril o los carriles adyacentes se consigue tener siempre una configuración equivalente de sensores bajo el vehículo, por lo que se puede detectar al vehículo independientemente de que circule por cualquier carril o incluso en plena maniobra de cambio de carril.

Sin embargo, la distribución en línea de los sensores que se menciona en la literatura se ha tenido que completar en varios casos, como hemos visto, con un sensor adicional situado de forma previa a la línea de sensores para poder obtener datos de velocidad. Aunque no es objeto de esta tesis, en el proyecto CENIT-OASIS se planteó la posibilidad de obtener datos de velocidad de vehículos con sensores magnéticos que no estuviesen alineados, analizando las características de las señales obtenidas en distintos puntos del vehículo. Este requisito no entra en contradicción con las condiciones de distribución de los sensores que hemos determinado si en lugar de situar los sensores en una línea transversal se disponen en forma de diente de sierra. La distancia entre los extremos de los dientes de sierra debe ser relativamente pequeña para que la posición de paso de los vehículos no varíe mucho entre ellos (considerando la trayectoria de los vehículos y las velocidades de paso, que deben ser superiores a los 60 Km/h y que en la práctica son bastante más elevadas), pero lo suficientemente grande como para poder medir diferencias de tiempos de paso entre sensores que sean relevantes.

Considerando la frecuencia de muestreo del sensor (1 kHz) y una velocidad máxima de 140 Km/h de los vehículos, un vehículo tarda 0,0257 segundos en recorrer 1 metro, lo que supone obtener aproximadamente 26 muestras con el sensor. Si el sistema de detección fuese perfecto con dos sensores situados a una distancia de 1 metro, el error esperado sería de una muestra de cada 26, lo que equivale aproximadamente a un 4% de error en la estimación de la velocidad. Para disminuir este error es necesario incrementar la distancia. Si los sensores estuviesen a 2 metros, el error sería aproximadamente del 2% y si estuviesen a 4 metros el error sería del 1%.

Con estos cálculos se ha tomado la decisión de realizar una configuración de sensores basada en una forma de dientes de sierra. Los sensores se han distribuido uniformemente en el sentido transversal del carril, pero se han situado con separaciones de 2 metros entre ellos en sentido longitudinal, con una separación máxima de 4 metros. El resultado de esta configuración puede apreciarse en la Figura 126.

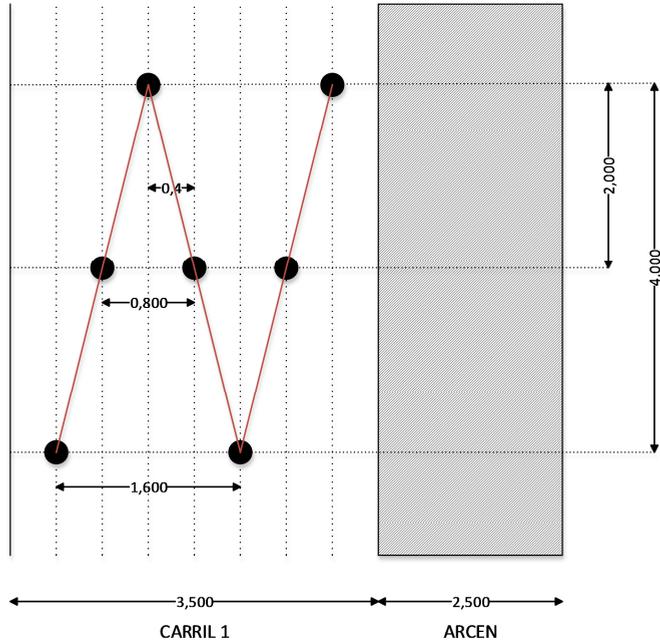


Figura 126. Configuración de los sensores en un solo carril.

Esta configuración también permite extenderse a más de un carril cuando se desea monitorizar completamente una vía de varios carriles. Para ello sólo es necesario replicar la estructura en todos los carriles y añadir un nodo sensor que permita la unión entre ellos y que se debe situar en las líneas divisorias de los carriles. En la Figura 127 se puede apreciar cómo sería la configuración del grupo de sensores si se pretendiese monitorizar completamente dos carriles adyacentes. La extensión a más carriles es obvia si se sigue este procedimiento.

Con esta configuración se procedió a la instalación de los dispositivos en el punto determinado. Los resultados pueden apreciarse en la Figura 128, donde se observa el estado de la carretera mientras se estaban realizando las tareas de instalación, y en la Figura 129, donde puede apreciarse en la fotografía el estado de los dispositivos tras haber sido instalados en el punto fijado.

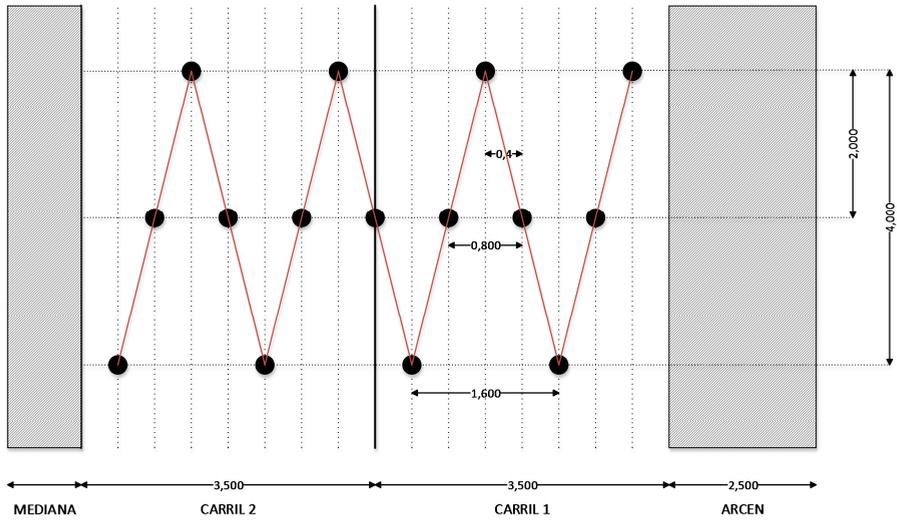


Figura 127. Configuración de los sensores en dos carriles.



Figura 128. Fotografía del carril durante la instalación de los dispositivos.



*Figura 129. Fotografía de la zona sensorizada tras la instalación.*

## 7.3. Proceso experimental y resultados

En esta sección se describe el experimento final que permite validar la metodología presentada en los capítulos anteriores de esta memoria de tesis y los resultados obtenidos tras la realización del experimento.

### 7.3.1. Descripción del experimento

El experimento final se ha diseñado para su realización en el entorno de pruebas definido en la sección anterior. En este entorno existe un tráfico real de vehículos que circulan a velocidades más elevadas que en una vía urbana.

El experimento final pretende validar la capacidad de re-identificación de los sensores AMR dispuestos sobre el asfalto en un carril, aplicando todas las técnicas, algoritmos, procesos y métodos que han sido definidos con anterioridad en esta memoria.

Utilizando un único punto de sensorización, la forma de validar la capacidad de re-identificación del sistema de sensores propuesto ha consistido en hacer que un mismo vehículo (llamado *objetivo*) pase de forma repetida sobre la zona de sensorización, de forma que el vehículo ha quedado incluido dentro del flujo normal de vehículos que circulan por esa vía. De esta manera, al comparar las señales de

todos los vehículos que han circulado en un determinado periodo de tiempo, incluyendo las pasadas repetidas del vehículo *objetivo*, los mayores valores de similitud deben corresponder precisamente a las señales de dicho vehículo.

Con esta perspectiva, se ha fijado un periodo de tiempo de 1 hora de duración, y se han utilizado 2 vehículos objetivo que deben ser re-identificados en el experimento. Cada vehículo ha pasado 10 veces por la zona de sensorización, y se han obtenido en cada paso las señales que aportan los sensores. El procedimiento establecido para valorar la capacidad de re-identificación del método propuesto es el siguiente:

1. Extracción de las huellas magnéticas que generan todos los sensores a los pasos del vehículos, aplicando los procedimientos de segmentación, suavizado y normalización establecidos.
2. Agrupación de las huellas magnéticas por paso de vehículo, etiquetadas con el identificador del sensor que las ha generado, y ordenadas por tiempo de paso de cada vehículo.
3. Extracción del vídeo de las cámaras de tráfico de las secuencias correspondientes a los pasos de los vehículos.
4. Extracción de los datos de las matrículas de cada paso de un vehículo desde la secuencia de video a través de un software de reconocimiento automático de matrículas, y almacenamiento de la imagen de cada paso del vehículo junto con su matrícula.
5. Obtención de los datos del análisis del video los momentos de paso de los vehículos objetivo del experimento (fotografía y tiempo de paso).
6. Determinación para cada grupo de huellas magnéticas que corresponden a un vehículo de aquellas que se encuentran en la zona de confianza, es decir, en la zona central del vehículo o entre las dos ruedas.
7. Determinación para cada vehículo de la huella magnética que se encuentra más próxima al centro del mismo (huella central).
8. Realización de un cálculo de similitudes entre todas las huellas centrales de los vehículos que han circulado durante el periodo establecido.
9. Para cada paso de cada uno de los vehículos objetivo, ordenación de forma descendente las similitudes de su huella con las huellas del resto pasos de los vehículos.
10. Identificación, para cada paso de los vehículos objetivo, de los primeros 9 pasos que más similitud ofrecen con él, y marcado de aquellos que corresponden a pasos del mismo vehículo (aciertos).

11. Obtención de un ratio de re-identificación para cada vehículo objetivo dividiendo el número de pasos que corresponden a aciertos entre el número máximo de aciertos posibles (en este caso, el número máximo de aciertos es de 90, que corresponden a los 10 pasos de cada vehículo).

Los datos del vídeo se han utilizado como información de contraste para validar los pasos de los vehículos *objetivo*, y no forman parte de los algoritmos que se proponen para la selección de los sensores ni para la re-identificación de vehículos. El proceso de selección de los sensores que quedan en la zona de confianza del vehículo se ha realizado a través de un algoritmo basado en la energía media de cada señal, calculada como la media de las energías por muestra de todas las señales componentes, de la misma manera que se calculaba en las secciones 4.4.3 y 4.4.4 para determinar las condiciones de segmentación.

El objetivo del algoritmo es determinar que 2 o 3 sensores quedan en la zona de confianza del vehículo en cada paso. A estos sensores se les asigna un identificador perteneciente a uno de los valores del conjunto {S\_I, S\_C, S\_D}, donde cada identificador corresponde a una posición relativa de paso: Izquierda, Centro y Derecha respectivamente. Para lograr el objetivo, el algoritmo toma una decisión de identificación en función de los sensores activados. Los parámetros que utiliza el algoritmo son, además de la energía media de las señales, el número de sensores activados y su posición en el carril.

El algoritmo que se ha diseñado en esta tesis con el fin de determinar los sensores que quedan en la zona de confianza es el que se describe a continuación.

1. En cada paso de un vehículo, se obtiene la energía media de cada una de las señales que recogen los sensores.
2. Se seleccionan los sensores que generan una señal con una energía media por encima de un valor umbral.
  - a. Se consideran como *sensores válidos* no sólo los que cumplan esta condición, sino los que se encuentren situados entre dos sensores que la cumplan, y se numeran ordenadamente de 1 a n según su posición de izquierda a derecha.
3. Dependiendo del número de *sensores válidos* (los que cumplen la condición anterior), se realizan las siguientes selecciones:
  - a. Si el número de sensores es inferior a 3, el paso del vehículo se considera fuera del rango de monitorización.

- b. Si el número de sensores es 3:
  - i. Si los sensores están situados en la zona izquierda del carril, el sensor 1 se identifica con S\_C, el sensor 2 se identifica con S\_D, y el sensor 3 se descarta (porque se considera cercano a la rueda)
  - ii. Si los sensores están situados en la zona derecha del carril, el sensor 1 se descarta, el sensor 2 se identifica con S\_I y el sensor 3 se identifica con S\_C.
  - iii. Si los sensores están situados en el centro del carril, el sensor 1 se identifica con S\_I, el sensor 2 se identifica con S\_C y el sensor 3 se identifica con S\_D.
- c. Si el número de sensores es 4:
  - i. Si los sensores están situados en la zona izquierda del carril, el sensor 1 se identifica con S\_I, el sensor 2 se identifica con S\_C, el sensor 3 se identifica con S\_D y el sensor 4 se descarta.
  - ii. Si los sensores están situados en la zona derecha del carril, el sensor 1 se descarta, el sensor 2 se identifica con S\_I, el sensor 3 se identifica con S\_C y el sensor 3 se identifica con S\_D.
  - iii. Si los sensores están situados en el centro del carril, se comparan las energías de los dos sensores activados situados en los extremos del conjunto y se descarta el que mayor energía media posea (por considerarse que se trata de un sensor próximo a una rueda). Los 3 sensores restantes se identifican ordenadamente como S\_I, S\_C y S\_D.
- d. Si el número de sensores es 5, los sensores 1 y 5 se descartan, el sensor 2 se identifica con S\_I, el sensor 3 se identifica con S\_C y el sensor 4 se identifica con S\_D
- e. Si el número de sensores es mayor que 5:
  - i. Se comparan las energías de los dos sensores activados situados en los extremos del conjunto y se descarta el que menor energía media posea.
  - ii. Si al aplicar el proceso anterior quedan 5 sensores, se aplica el criterio d. En caso contrario, se repite el proceso anterior (e.i).

4. De los sensores seleccionados e identificados como S\_I y S\_D se realiza una comprobación sobre la forma de la señal, para determinar si el sensor se encuentra situado en las proximidades de una rueda. Para cada una de las señales normalizadas correspondientes a los sensores se calcula el gradiente máximo de cada una de las componentes. Si ese gradiente supera un determinado umbral, se considera que el sensor al que pertenece la señal está muy próximo a la rueda, y se descarta.

Se considera que los sensores activados están situados en la zona izquierda del carril cuando el primer sensor activado es el sensor situado en el extremo izquierdo del carril. Del mismo modo, se considera que los sensores activados están situados en la zona derecha del carril cuando el último sensor activado es el sensor situado en el extremo derecho del carril. En cualquier otro caso, se considera que los sensores están situados en el centro del carril.

Con este experimento se ha comprobado la validez de la configuración de sensores diseñada, de los métodos de extracción y comparación de señales, y por tanto de las hipótesis que han conducido al diseño del sistema que se está experimentando.

### 7.3.2. Resultados

Los vehículos utilizados para la re-identificación en el experimento han sido los siguientes:

- **Vehículo A:** Toyota Corolla diésel de 1.4 litros (90 CV)  
Dimensiones (largo / ancho / alto): 4180 / 1710 / 1475 mm.
- **Vehículo B:** Seat León diésel de 1.6 litros (90 CV)  
Dimensiones (largo / ancho / alto): 4315 / 1770 / 1460 mm.

En el tiempo establecido para la realización del experimento se han detectado 95 pasos de vehículos por el carril sensorizado. De ellos, 20 pasos corresponden a los dos vehículos *objetivo* que se pretenden re-identificar. Las imágenes recogidas por las cámaras de tráfico junto con las huellas magnéticas correspondientes a cada paso de estos vehículos pueden consultarse en el **Anexo IX. Secuencias de paso de vehículos objetivo en el experimento final.**

Los dos vehículos *objetivo* han realizado sus pasos por distintas zonas del carril sensorizado. El vehículo A ha realizado todos sus pasos por dentro del carril, mostrando un comportamiento más frecuente en los conductores. El vehículo B ha realizado sus pasos con menos uniformidad, llegando a realizar algunos de ellos por fuera del carril, por una zona donde no existe sensorización. En este caso se ha pretendido forzar en el vehículo un comportamiento que, aunque no es habitual, es posible que se produzca en algunas ocasiones.

Siguiendo el método propuesto en esta tesis, el emparejamiento de vehículos se ha llevado a cabo comparando las huellas que se encuentran situadas en la parte más central del vehículo. Para determinar los sensores que se encuentran en la zona de confianza de los vehículos se ha aplicado el algoritmo descrito en la sección 7.3.1. Los parámetros que se han usado en el algoritmo se han obtenido de forma empírica usando los datos de los 10 primeros vehículos del experimento y se han aplicado al resto de los casos:

- Umbral de detección de señal válida: energía media  $> 0,05$ .
- Umbral de detección de señal perteneciente a una de las ruedas: gradiente  $> 0,025$ .

La aplicación del algoritmo ha permitido determinar que el número de sensores que se encuentran en la zona de confianza del vehículo es 2 o 3, esto es, en 11 de los 95 casos se han seleccionado 2 sensores y en los 84 restantes se han seleccionado 3 sensores (que se denominan a partir de ahora *izquierdo*, *central* y *derecho* según su posición relativa al vehículo).

Por las dimensiones de los vehículos y la configuración de los sensores, se esperaba obtener siempre 3 sensores con señales válidas en cada paso; sin embargo, el experimento ha mostrado que en algunos casos el paso del vehículo ha llevado las ruedas a una posición muy próxima a dos sensores distintos, lo que ha generado sólo 2 señales apropiadas para la re-identificación.

En cualquier caso, esta situación no afecta al método que se está aplicando, puesto que siempre quedan al menos 2 sensores bajo el vehículo de los cuales se puede seleccionar el que queda en una posición más centrada para realizar los cálculos de similitud. Numerando los sensores del 1 al 7 de izquierda a derecha en la instalación, los sensores seleccionados para los pasos de los vehículos *objetivo* se pueden consultar en la Tabla 31 y la Tabla 32.

Paso	#Sensor Izquierdo	#Sensor Central	#Sensor Derecho
1	3	4	5
2	3	4	5
3	1	2	3
4	2	3	4
5	4	5	6
6	4	5	6
7	1	2	3
8	5	6	7
9	1	2	---
10	2	3	4

Tabla 31. Sensores en la zona de confianza del vehículo para cada uno de los pasos del Vehículo A

Paso	#Sensor Izquierdo	#Sensor Central	#Sensor Derecho
1	3	4	5
2	---	2	3
3	6	7	---
4	3	4	5
5	3	4	---
6	4	5	6
7	4	5	6
8	3	4	5
9	2	3	4
10	3	4	5

Tabla 32. Sensores en la zona de confianza del vehículo para cada uno de los pasos del Vehículo B

En estas tablas puede apreciarse que el vehículo A sólo ha realizado un paso en el que se han seleccionado 2 sensores. Si se consulta el anexo con las imágenes de los pasos (**Anexo IX. Secuencias de paso de vehículos objetivo en el experimento final**), se puede apreciar que este paso corresponde a un desplazamiento del vehículo hacia la izquierda, con una invasión del carril contrario, y con la rueda derecha muy próxima a un sensor, lo que hace que se pierda un dato relevante.

En el paso del vehículo B se dan 3 casos en los que sólo son válidos 2 sensores. Esto se puede interpretar como que las dimensiones y características del vehículo B hacen que la probabilidad de que todas las ruedas pasen cerca de algún sensor sea mayor que para el vehículo A. También puede ocurrir que la zona de influencia magnética de las ruedas sea mayor, lo que provoca este resultado.

Una vez se han identificado los sensores centrales de cada paso, se ha calculado la similitud entre todas las huellas obtenidas por ellos de 2 en 2. Para cada paso de los vehículos *objetivo*, se han ordenado las similitudes en orden decreciente, y se han tomado los pasos correspondientes a los 9 primeros valores, es decir, los que corresponden a los vehículos candidatos a re-identificación (los que más se asemejan al del paso que se está analizando). A continuación se ha marcado cada vehículo candidato como correcto o incorrecto, según se trate del mismo vehículo *objetivo* o no, y se han contado los aciertos y los errores. También se han tomado todos los valores de similitud para los aciertos y se ha calculado la similitud media, máxima, mínima y la desviación estándar (ver Tabla 33 y Tabla 34).

Vehículo A – Sensor central			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
90	82	91,11%	8,8%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9757	0,9980	0,8934	0,0230

Tabla 33. Datos de paso del Vehículo A recogidos por el sensor central.

Vehículo B – Sensor central			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
90	68	75,56%	24,44%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9194	0,9867	0,7810	0,0509

*Tabla 34. Datos de paso del Vehículo B recogidos por el sensor central.*

En el caso del vehículo A se han detectado correctamente 82 de los 90 posibles pasos como pertenecientes al mismo vehículo. Esto representa una tasa de acierto del 91,11%. También se puede apreciar que los valores de similitud obtenidos son muy elevados, puesto que en todos los casos están por encima de 0,89. En el caso del vehículo B, sin embargo, sólo se han detectado correctamente 68 de los 90 pasos posibles, lo que proporciona una tasa de acierto del 75,56%. Los valores de similitud son más dispersos, y la similitud mínima se sitúa en 0,7810, que es un valor relativamente bajo, especialmente si se compara con el vehículo A.

Este resultado se interpreta, al igual que en el caso del número de sensores válidos, como una consecuencia de las dimensiones y la distribución ferro-magnética del vehículo, es decir, la densidad de sensores en la configuración propuesta no ha sido lo suficientemente grande como para poder recoger huellas muy similares de posiciones próximas en el vehículo.

También es necesario observar lo que sucede con el resto de huellas que corresponden a la zona de confianza del vehículo. Recordemos que en la mayor parte de los casos se han obtenido 3 huellas en cada paso. Se han comparado también las huellas correspondientes a la zona izquierda y derecha del vehículo, y los resultados se muestran de la Tabla 35 a la Tabla 38. Los resultados de esta comparación ayudarán a interpretar el motivo por el cual los resultados del vehículo A son mejores que los del vehículo B, en tanto en cuanto una disminución de los ratios de acierto significará que la densidad de los sensores no es la adecuada para ese tipo de vehículos.

<b>Vehículo A – Sensor izquierdo</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
90	76	84,44%	15,56%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9401	0,9942	0,7971	0,0510

*Tabla 35. Datos de paso del Vehículo A recogidos por el sensor izquierdo.*

<b>Vehículo A – Sensor derecho</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	72	100%	0%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9520	0,9933	0,8786	0,0304

*Tabla 36. Datos de paso del Vehículo A recogidos por el sensor derecho.*

<b>Vehículo B – Sensor izquierdo</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	43	59,72%	40,28%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8934	0,9796	0,7087	0,0698

*Tabla 37. Datos de paso del Vehículo B recogidos por el sensor izquierdo.*

Vehículo B – Sensor derecho			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
56	29	51,79%	48,21%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8252	0,9297	0,6292	0,0978

Tabla 38. Datos de paso del Vehículo B recogidos por el sensor derecho.

Los resultados obtenidos para el vehículo A vuelven a mostrar que las señales se han tomado en la zona de confianza del vehículo, y que la configuración de los sensores era la adecuada. Es destacable el hecho de que con los datos del sensor derecho se llegue a obtener un ratio de re-identificación del 100%. En el caso del vehículo B se confirma la hipótesis de que la distribución de los sensores es poco densa, puesto que se observa como los ratios de acierto disminuyen considerablemente con respecto al sensor central. Esto es un claro indicador de que las señales que se están comparando corresponden a las zonas de las ruedas del vehículo, donde pequeñas variaciones en la distancia entre sensores producen cambios sustanciales en la señal.

Este análisis se ha realizado utilizando las similitudes ofrecidas por los sensores de forma individual. Se ha comprobado que en un caso es suficiente para re-identificar con éxito un vehículo, pero en otro caso, aunque el ratio de re-identificación es alto, no alcanza el nivel deseado. Sin embargo, la configuración de sensores propuesta permite utilizar un criterio de re-identificación basado en la combinación de las medidas de similitud correspondientes a los sensores de la zona de confianza.

Para aplicar esta idea se ha realizado el cálculo de la media aritmética de las similitudes de los sensores por pares (izquierda / centro y centro / derecha) y de los tres sensores (izquierda / centro / derecha) de la zona de confianza para todos los pasos, de forma ordenada entre los sensores. El objetivo es disminuir el nivel de error agregando más datos en el proceso de cálculo. Esta comparación de sensores en pareja y en trío ha ofrecido mejores resultados de similitud, puesto que disminuye la casuística de los valores de similitud altos obtenidos al comparar únicamente una señal de cada vehículo. Los resultados de estas comparaciones se han plasmado de la Tabla 39 a la Tabla 44.

<b>Vehículo A – Sensores central / izquierdo</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
90	86	95,56%	4,44%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9502	0,9947	0,8690	0,385

*Tabla 39. Datos de paso del Vehículo A recogidos por los sensores central e izquierdo.*

<b>Vehículo A – Sensores central / derecho</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	72	100%	0%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9674	0,9951	0,9177	0,0207

*Tabla 40. Datos de paso del Vehículo A recogidos por los sensores central y derecho.*

<b>Vehículo A – Sensores izquierdo / central / derecho</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	72	100%	0%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9550	0,9902	0,8828	0,0328

*Tabla 41. Datos de paso del Vehículo A recogidos por los sensores central, izquierdo y derecho.*

<b>Vehículo B – Sensores central / izquierdo</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	56	77,78%	22,22%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8982	0,9704	0,7760	0,0542

*Tabla 42. Datos de paso del Vehículo B recogidos por los sensores central e izquierdo.*

<b>Vehículo B – Sensores central / derecho</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
56	39	69,64%	30,36%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8303	0,9570	0,6724	0,0877

*Tabla 43. Datos de paso del Vehículo B recogidos por los sensores central y derecho.*

<b>Vehículo B – Sensores izquierdo / central / derecho</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
42	33	78,57%	21,43%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8457	0,9551	0,7072	0,0626

*Tabla 44. Datos de paso del Vehículo B recogidos por los sensores central, izquierdo y derecho.*

El número de pasos obtenido depende de la existencia de datos para los sensores considerados. Por ejemplo, en el caso de la combinación central / derecho del vehículo A, hay un paso en el que no existe señal para el sensor derecho, por tanto se trabaja con 9 pasos del vehículo *objetivo*, lo que ofrece un total de 72 casos de comparación correcta. Esto mismo es aplicable al resto de casos.

En estas tablas, los valores de similitud aumentan con respecto al caso en el que se usa un único sensor. Tanto en el caso del vehículo A como del vehículo B el uso de los 3 sensores genera los valores más altos de similitud, mejorando el caso del sensor central. También hay que destacar que el comportamiento de la parte izquierda y derecha de los vehículos *objetivo* es diferente. Se puede observar que en el vehículo A los valores de similitud que integran los datos correspondientes a la parte derecha del vehículo son mejores que los que integran tan solo la parte izquierda.

Este hecho se debe a que la complejidad del modelo magnético de la parte izquierda es mayor que la de la derecha, como hemos visto en el Capítulo 6, y por tanto variará más con intervalos de distancia menores. Sin embargo, este hecho no se produce en el vehículo B, donde la similitud que incorpora los datos de la parte izquierda del vehículo es mejor que la que incorpora los datos de la parte derecha, lo que parece contradecir el argumento anterior. Para resolver este dilema hemos analizado en detalle el caso particular del vehículo B, y los resultados los mostramos a continuación.

### ***Vehículos del mismo modelo***

Una de las cuestiones que no se ha planteado (por considerarse demasiado simple) a lo largo de este trabajo es que dos vehículos que tengan la misma configuración ferro-magnética deben generar las mismas huellas magnéticas. En este sentido, dos vehículos distintos de la misma marca y el mismo modelo, y con configuraciones de motor y montaje similares o idénticas, deberían generar las mismas huellas.

Al analizar detalladamente los resultados de este experimento para el vehículo B se ha encontrado un caso de re-identificación incorrecta recurrente. En todas las comparaciones ha aparecido un vehículo que ofrecía valores de similitud muy elevados, lo que conducía a re-identificarlo erróneamente como vehículo B. El vehículo en cuestión ha sido identificado gracias a los datos del vídeo (datos de

control) como de la misma marca y modelo que el vehículo B. Las huellas obtenidas para dicho vehículo, en comparación con el vehículo B, pueden consultarse en el **Anexo X. Comparación de señales de vehículos de la misma marca y modelo.**

La aparición de este vehículo en el experimento ha alterado los resultados del ratio de identificación del vehículo B, aunque en situaciones de tráfico reales hay que considerar que esta posibilidad se puede dar con cierta frecuencia. No obstante, y con el fin de independizar los resultados del experimento de la re-identificación con otros factores externos (tanto negativos como positivos), se han realizado los cálculos de similitud para el caso del vehículo B filtrando la ocurrencia del vehículo de la misma marca y modelo. Los resultados que se han obtenido para todos los casos se han reflejado de la Tabla 45 a la Tabla 50.

Vehículo B – Sensor central – Filtrado			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
90	72	80,00%	20,00%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,9132	0,9867	0,7585	0,0562

Tabla 45. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por el sensor central.

Vehículo B – Sensor izquierdo – Filtrado			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	46	63,89%	36,11%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8862	0,9796	0,6935	0,0750

Tabla 46. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por el sensor izquierdo.

<b>Vehículo B – Sensor derecho – Filtrado</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
56	30	53,57%	46,43%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8186	0,9297	0,6275	0,1027

*Tabla 47. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por el sensor derecho.*

<b>Vehículo B – Sensores central / izquierdo – Filtrado</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
72	58	80,56%	19,44%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8944	0,9704	0,7121	0,0588

*Tabla 48. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por los sensores central e izquierdo.*

<b>Vehículo B – Sensores central / derecho – Filtrado</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
56	49	87,50%	12,50%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8137	0,9570	0,6406	0,0941

*Tabla 49. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por los sensores central y derecho.*

<b>Vehículo B – Sensores izquierdo / central / derecho – Filtrado</b>			
Pasos	Identificaciones	% Acierto	% Error
42	38	90,48%	9,52%
Similitud media	Similitud máxima	Similitud mínima	Desviación estándar
0,8322	0,9551	0,7006	0,0692

*Tabla 50. Datos de paso filtrado del Vehículo B recogidos por los sensores central, izquierdo y derecho.*

En estas condiciones, los datos de similitud obtenidos son ligeramente mejores que en el caso en el que no se ha realizado el filtro del falso positivo, pero los ratios de re-identificación mejoran considerablemente, especialmente en el caso del uso de los 3 sensores para el proceso de decisión de la re-identificación. En concreto se llega a obtener un valor del 90,48% de acierto, que es un valor muy elevado considerando las circunstancias y condiciones del vehículo B con respecto a la distribución de la red de sensores propuesta.

También hay que destacar que la eliminación del vehículo que genera un falso positivo en la re-identificación hace que se pueda validar la hipótesis sobre los grupos de dos sensores que ofrecen mejores valores de similitud. Ahora se puede apreciar que tanto para el vehículo A como para el B la combinación de sensores central-derecho ofrece mejores similitudes que la combinación central-izquierdo.

### **Comparación con otros estudios**

Al igual que se hizo en el Capítulo 5, se han comparado los resultados experimentales de nuestro trabajo con el de otros estudios de la literatura revisados en la Sección 3.3 y se han plasmado en la Tabla 51. En esta ocasión se han seleccionado aquellos experimentos que se han desarrollado en entornos de trabajo reales, en unas condiciones comparables al experimento que hemos descrito en este capítulo. Por tanto, del conjunto total de experimentos, hemos seleccionado los siguientes:

2. (Cheung & Varaiya 2007), experimento 2
3. (Kwong et al. 2009a) y (Kwong et al. 2009b)

4. (Kwong et al. 2010)
5. (Volling 2009)
6. (Ernst et al. 2010)
8. (Ndoye et al. 2011), experimento 2
9. (Sanchez et al. 2011a)
10. (Sanchez et al. 2011b)
11. (Sanchez 2012)
15. Experimento propio en entorno real

COMPARACIÓN DE RATIOS DE RE-IDENTIFICACION										
Estudio	2	3	4	5	6	8	9	10	11	15
Tipo de experimento	R	R	R	R	R	R	R/F	R/F	R	R
Número de Sensores	7	7	7	5	2	2	5	7	7	7
Puntos de sensorización	2	4	2	2	2	2	2	2	2	1
Número de vehículos	80	--	--	347	--	--	15	23	--	95
Ratio de re-identificación (%)	72.5	74	75	69	68.3	45	69	90	83	100 / 90.48

*Tabla 51. Comparación del ratio de re-identificación con el de otros estudios en entornos de prueba reales*

Lo más destacable de esta comparativa es que los resultados que hemos obtenido en un entorno de trabajo real son superiores al de los obtenidos por los otros estudios analizados en la revisión de la literatura. Por un lado, la diferencia que existe con los experimentos que utilizan menos de 7 sensores es considerable, variando entre el 45% y el 20% si los comparamos con nuestro peor resultado.

En comparación con el resto de experimentos, los resultados que hemos obtenido son claramente mejores, a excepción de los trabajos (10) y (11), cuyos ratios de re-identificación se aproximan a nuestro peor resultado. En el caso del experimento (10), los datos ofrecidos por los autores son de un conjunto reducido de vehículos seleccionado del total de los contemplados en el experimento, con lo que la baja

variabilidad de las señales favorecería la obtención de un ratio elevado. En el caso del experimento (11) las condiciones de trabajo son muy similares a las que planteamos en nuestro entorno real, con lo que la comparación de resultados es más ecuánime. Podemos considerar que el experimento (11) es el que mejores resultados ofrece en condiciones de trabajo similares a las planteadas en nuestro entorno de trabajo real. Tomando como referencia sus resultados, podemos observar que el ratio de re-identificación que ofrece el método que hemos presentado en esta tesis lo mejora entre un 8% y un 17% en el peor y en el mejor de los casos respectivamente.

Por último, hay que destacar que los experimentos que ofrecían mejores resultados que el nuestro en un entorno controlado y que se han trasladado a un entorno real (trabajos 2 y 8) han ofrecido unos ratios de re-identificación bastante alejados de los que hemos obtenido en nuestro experimento, lo que confirma que la base del método de re-identificación propuesto en esta tesis (las medidas de similitud mejoradas) es eficaz e independiente de las condiciones de trabajo.

## 7.4. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el diseño y los resultados de un experimento en un entorno de trabajo real en el que se ha realizado la aplicación completa del método de re-identificación de vehículos basado en sensores AMR propuesto en los capítulos anteriores. El objetivo del experimento ha sido la validación del método que ha resultado de los trabajos de investigación realizados en esta tesis.

El diseño del experimento ha tenido en consideración varios aspectos: la elección del tipo de sensor AMR para las mediciones, la definición de una configuración de sensorización para la extracción de la información relevante de cada vehículo, la selección de los datos de los sensores para obtener una re-identificación positiva, y la aplicación del método de re-identificación propuesto en esta tesis.

En cuanto a la selección del sensor, se ha constatado que los dispositivos comerciales no ofrecen un rendimiento adecuado a las condiciones de trabajo del entorno real. El motivo fundamental radica en la frecuencia de muestreo de los sensores, que ofrecen pocas muestras para un vehículo que circula a grandes velocidades, tal y como sucede en las vías interurbanas, especialmente en

autopistas y autovías. Por este motivo, ha sido necesario desarrollar un nuevo dispositivo ad-hoc para la realización de los experimentos.

El desarrollo del sensor ha sido realizado de forma paralela a esta tesis, y no se debe considerar como resultado del trabajo de investigación, si bien se ha realizado un estudio de las características de los sensores que han utilizado otros investigadores en sus experimentos y se han definido las características funcionales con las que se ha diseñado y construido el nuevo dispositivo de sensorización.

Adicionalmente, y dado que el experimento se ha realizado en un entorno de tráfico real, concretamente en el kilómetro 2,5 de la autopista M-12 Eje Aeropuerto (Madrid), se ha diseñado y construido un sistema de encapsulamiento para albergar el sensor y poderlo instalar en la carretera. Este sistema se ha encargado de proteger el dispositivo frente a condiciones ambientales adversas, como la humedad, el polvo y la suciedad, y frente a condiciones de presión originadas por las ruedas de los vehículos que circulan por la zona de sensorización y que pueden pasar directamente por encima del sensor. Este sistema cumple con la normativa española de seguridad requerida para instalación de detectores en carretera.

El dispositivo final de sensorización, compuesto por el dispositivo electrónico y el sistema de encapsulamiento, representa una propuesta novedosa con respecto a los sistemas utilizados en la literatura por otros autores en sus trabajos. Hay que destacar que muchos de estos trabajos realizados por otros autores y anteriores a esta tesis se han realizado ubicando los sensores fuera de la carretera, en zonas donde no se ven afectados por el paso de vehículos. En algún caso, los sensores se han situado de forma que los vehículos pudiesen circular por encima de ellos, pero no disponían de ningún tipo de protección y los experimentos se realizaban de forma controlada en lugares sin paso de vehículos. El dispositivo propuesto en esta tesis permite la inserción del sensor directamente en el asfalto y en los resultados experimentales se ha probado su validez.

En relación con el lugar de la ubicación del experimento, se ha seleccionado un punto que permitiese obtener tanto los datos de los sensores como datos de contraste para la re-identificación. En este caso, los datos de contraste se han basado en un video que ha captado el paso de los vehículos mientras eran sensorizados por los dispositivos.

La parte más importante de la instalación ha sido la definición de la configuración de los sensores para la obtención de huellas magnéticas relevantes para la re-identificación. El método de re-identificación que se ha propuesto determina una distancia máxima entre sensores, que ha sido respetada en el diseño de la configuración. Siguiendo estas limitaciones, los sensores se han distribuido a una distancia uniforme entre ellos y en sentido transversal sobre el carril, con una separación de 40 cm.

Este diseño se ha realizado para un único carril, en el que se ha desarrollado por completo el experimento. No obstante, se ha contemplado la posibilidad de extender la configuración a otros carriles adyacentes manteniendo la disposición de los sensores. En el caso de tener sensorizados varios carriles, esta configuración permite la recogida de datos del paso del vehículo, independientemente de su posición de paso. Esto significa que aunque un vehículo circule por dentro de su carril o entre dos carriles, el sistema de sensorización permite obtener la misma información del vehículo.

En consecuencia, y para unas condiciones habituales en una autopista, se ha determinado que cada carril debe ser sensorizado con 7 dispositivos, lo cual permite obtener al menos una señal de una zona próxima al centro del vehículo, que es la que se utilizará posteriormente en la re-identificación.

La configuración propuesta también presenta una novedad con respecto a las configuraciones propuestas por otros autores en sus trabajos. Mientras que la tendencia en la literatura ha sido situar los dispositivos en los centros de los carriles, de forma individual o en conjuntos de varios dispositivos en línea, la propuesta de distribuir los sensores uniformemente a lo ancho del carril es completamente novedosa, dado que la intención es utilizar un único sensor para la re-identificación (el mejor situado según el paso del vehículo).

Finalmente se ha diseñado y realizado el experimento en el entorno real. Se ha dispuesto de un único punto de sensorización, por lo que el experimento de re-identificación ha consistido en introducir 2 vehículos conocidos de forma repetida (10 veces cada uno) entre el tráfico normal de la autopista. Se han tomado muestras de los pasos de todos los vehículos durante una hora, y se han comparado las señales obtenidas con el propósito de evaluar los ratios de re-identificación.

La comparación de señales se ha realizado utilizando el sensor de cada paso que ha quedado localizado en la zona más próxima al centro de del vehículo. En todos los pasos ha sucedido que 2 o 3 sensores han quedado ubicados bajo el vehículo en la zona de confianza, es decir, de forma relativamente cercana al centro del vehículo. La diferencia entre obtener 2 señales o 3 depende de la posición de paso del vehículo. En el mejor de los casos, la posición relativa de algún sensor ha sido muy próxima al centro del vehículo, con lo que ha sido posible extraer 2 señales más (a izquierda y derecha, si había sensores) que aportan más datos al experimento. En el peor de los casos, las ruedas de la parte izquierda y derecha han pasado en posiciones muy próximas a 2 sensores, por lo que debido a la distribución, sólo se han podido utilizar las señales correspondientes a los 2 sensores que han quedado en la zona central del vehículo. Este hecho nos aporta la primera conclusión del experimento, en referencia a la configuración de los sensores. La densidad de sensores que se ha definido es buena si se pretende obtener un dato de un sensor en una posición próxima al centro del vehículo; sin embargo, si se pretende usar los datos de más sensores (por ejemplo, asegurar que se toman 3 señales), sería necesario incrementar la densidad de sensores.

Para obtener una medida de similitud entre 2 pasos (vehículos) se han aplicado las técnicas propuestas en los capítulos 4, 5 y 6 de esta tesis, y se ha obtenido una matriz con todos los valores de similitud entre los vehículos que han participado en el experimento.

Para calcular el ratio de re-identificación se han utilizado los pasos de los vehículos objetivo, seleccionando en cada uno de ellos los valores mayores que ofrece el método de similitud junto con el vehículo al que pertenecían las señales correspondientes. Se han considerado aciertos o re-identificaciones correctas los casos en los que la similitud corresponde al mismo vehículo objetivo, y se ha calculado el ratio de re-identificación como el cociente entre aciertos y casos posibles de acierto.

Se han agrupado los datos de todos pasos de un mismo vehículo objetivo, con el fin de obtener un único valor de re-identificación para cada vehículo en lugar de obtenerlo para cada paso. En un caso ideal, los mejores valores de similitud deberían corresponder a distintos pasos del mismo vehículo, lo que equivaldría a un ratio de re-identificación del 100%.

El comportamiento que ha tenido cada uno de los vehículos en el experimento ha sido diferente. En el caso más favorable se ha obtenido un ratio de re-identificación del 91,11% y en el menos favorable de un 75,56%. Estos datos se han obtenido, como ya hemos comentado, utilizando únicamente el sensor más próximo al centro del vehículo.

La configuración de los dispositivos nos ha permitido utilizar los datos del resto de sensores de la zona de confianza de cada paso para extraer más conclusiones del experimento. Por una parte, utilizando el mismo procedimiento de cálculo de la re-identificación con el sensor central, se han calculado los ratios correspondientes a los sensores que quedan situados en lado izquierdo y el lado derecho del vehículo en su paso por la zona sensorizada. De esta forma, se ha podido comprobar como los ratios obtenidos con los sensores de la zona izquierda son menores que los obtenidos con los sensores de la zona derecha. Estos datos nos conducen a una segunda conclusión, dado que confirman los resultados del estudio de la estructura ferro-magnética de un vehículo a través del modelado magnético: la parte izquierda del vehículo es estructuralmente más compleja que la parte central y la parte derecha.

Por otro lado, se ha valorado la posibilidad de utilizar más de un sensor en el método de la re-identificación. De este modo, al comparar más señales de un vehículo, se incrementa la probabilidad de que los valores altos de similitud correspondan a señales del mismo vehículo, es decir, se aumenta la capacidad de discriminación del método.

Esta idea se ha aplicado con los datos de los dos vehículos *objetivo* utilizados en el experimento, y se ha comprobado como en casi todos los casos se mejora el ratio de similitud. En el caso del vehículo que ofrece mejores resultados, el resultado es especialmente bueno (llegando a un 100% de re-identificaciones) cuando se utilizan los dos sensores situados en la posición central y derecha del vehículo y al utilizar los datos de los 3 sensores. Podemos concluir, por tanto, que aunque el uso de un sensor puede ser suficiente para obtener buenos resultados de re-identificación, es recomendable trabajar con más sensores, puesto que se incrementa la eficacia del método.

Aun así, en el caso del vehículo que ofrece peores resultados, el comportamiento de la mejora de la similitud no es el mismo que para el otro vehículo, es decir, no se ha mejorado el ratio de re-identificación de la misma manera. Un estudio detallado

de los datos ha mostrado que entre los vehículos de prueba se encontraba uno de la misma marca y modelo que el vehículo *objetivo*. Esto ha provocado que los valores de similitud de este vehículo comparado con el vehículo *objetivo* hayan sido muy altos, y en todas las comparaciones han situado este falso positivo entre los candidatos a la re-identificación, generando de esta forma unos valores más bajos del ratio de los que cabría esperar. Dada esta circunstancia, se ha eliminado el vehículo que genera el falso positivo del conjunto de pruebas, y se han realizado nuevos cálculos que muestran que no sólo aumenta el ratio de re-identificación sino que el comportamiento de la mejora al utilizar combinaciones de sensores es similar al caso del otro vehículo *objetivo*. Se confirma de esta forma la conclusión con respecto al número de sensores a utilizar en el método de re-identificación.

Pero este caso plantea una cuestión adicional en el problema de la re-identificación. Existen vehículos que, aun siendo distintos, van a generar huellas magnéticas muy parecidas debido a que su distribución de masa ferro-magnética es muy similar o idéntica. En particular, los vehículos de la misma marca y modelo, con configuraciones similares de motorización y equipamiento, estarán dentro de este supuesto. Por tanto, la aplicación de este método en un entorno de trabajo en el que exista un elevado número de vehículos, habrá que considerar las posibles situaciones de falsos positivos ocasionadas por este motivo.

Finalmente, se han comparado los resultados del experimento con los realizados por otros autores en la literatura. Teniendo como referencia los datos presentados en la sección 3.3, se ha comprobado que los resultados de re-identificación de nuestro experimento mejoran los que ofrecen los estudios de otros autores.

Hay que destacar que, además, estos datos se han conseguido en un entorno de trabajo real, con vehículos que circulan a altas velocidades, frente a gran parte de los estudios de otros autores que se han realizado en entornos controlados y con condiciones de paso absolutamente controladas.

En nuestro experimento, además, no se han tenido en consideración otros datos añadidos (como ventanas temporales o técnicas de fusión de datos de distintos tipos de sensores) que facilitan la re-identificación puesto que aportan criterios adicionales para discriminar vehículos que no son candidatos a re-identificación que van más allá de la evaluación de las huellas magnéticas de los vehículos. No obstante, el uso de otras técnicas o tecnologías puede complementar este método para mejorarlo, y es una cuestión a valorar para futuros trabajos.

Finalmente, aunque las condiciones de este experimento han sido diferentes a las de otros estudios de la literatura realizados en entornos reales, porque sólo se ha utilizado un único punto de sensorización frente a los puntos de control dobles de otros casos, los resultados son comparables y permiten validar el método de re-identificación propuesto en esta tesis en base a los ratios obtenidos en el experimento.



## 8. CONCLUSIONES FINALES

---

En este capítulo se presentan las principales conclusiones del trabajo realizado en esta tesis doctoral, tanto en referencia la consecución de los objetivos como en las aportaciones científicas y el trabajo futuro.

### 8.1. Consecución de los objetivos

El trabajo que se ha realizado en esta tesis ha permitido definir un nuevo método de re-identificación de vehículos para su aplicación en zonas interurbanas utilizando sensores AMR. Este método es el elemento clave que permite la consecución del objetivo principal planteado al comienzo de la tesis, es decir, se ha conseguido definir, desarrollar y evaluar un sistema de apoyo para la monitorización de vehículos en zonas interurbanas basado en la re-identificación de vehículos con los datos recogidos por sensores magneto-resistivos.

La consecución de este objetivo se ha logrado a través de una metodología de trabajo que nos ha permitido plantear un problema inicial y subdividirlo en partes de menor envergadura, a la vez que se han definido un conjunto de sub-objetivos enlazados con cada uno de los componentes del problema principal.

En primer lugar, en el Capítulo 4 se analizaron las características de los datos que se extraen de los sensores AMR cuando detectan objetos con estructura ferro-

magnética en su ámbito de sensorización. Estos datos permitieron definir huellas magnéticas de vehículos en movimiento como secuencias temporales de mediciones de la variación del CMT.

En el mismo Capítulo 4, utilizando 2 entornos experimentales, uno de simulación y otro de vehículos reales controlado, se construyeron algoritmos de extracción y comparación de huellas magnéticas basados en los trabajos previos citados en la literatura y que han sido utilizados para re-identificar vehículos en base a los datos extraídos de los sensores. Los experimentos iniciales no ofrecieron unos buenos resultados, lo que dio lugar a plantear una mejora de los métodos disponibles en el Capítulo 5.

Una de las principales carencias detectadas en la literatura fue la justificación en el uso de los datos que proporcionan los sensores magneto-resistivos. Trabajando con dispositivos AMR de 3 ejes, se dispone de 3 señales en cada huella magnética que pueden ser utilizadas de forma aislada o conjunta en el cálculo de la similitud. El estudio del comportamiento de las medidas de similitud utilizando una o varias señales realizadas en el Capítulo 5 permitió obtener una valoración objetiva del comportamiento de cada eje del sensor. Con esta información se diseñó una medida de similitud que utilizase la mejor información que se puede extraer de los sensores AMR de 3 ejes, aunque los resultados obtenidos también aportaron información adicional que se puede usar para tomar decisiones sobre los ejes a monitorizar cuando se trabaja con sensores de 1 o 2 ejes.

Siguiendo la misma línea de mejora de los procedimientos de comparación de huellas magnéticas, en el Capítulo 5 también se trabajó en la construcción de un algoritmo de alineación de señales para mejorar los resultados de la medida de similitud propuesta y para utilizar métricas computacionalmente poco costosas. Con este algoritmo se consiguió incrementar los valores de similitud y mantener la capacidad discriminante de la medida de similitud utilizada, es decir, que aunque los valores de similitud fuesen más altos en todas las comparaciones, no se incrementaba el grado de solapamiento entre los valores de similitud correspondientes a verdaderos positivos y verdaderos negativos en las re-identificaciones. La combinación de estos procedimientos y sus mejoras sirvieron para construir una metodología de tratamiento de señales orientadas a la re-identificación de vehículos que ha ofrecido mejores resultados que los obtenidos hasta la fecha por otros autores.

Para abordar el objetivo de la definición de un modelo de implantación de sensores AMR en una vía interurbana se comenzó estudiando la caracterización magnética de un vehículo en el Capítulo 6. El estudio permitió descubrir el comportamiento de los sensores cuando detectan al vehículo en distintas posiciones relativas de paso y obtener un modelo magnético del vehículo capaz de reflejar su distribución de masa ferro-magnética.

Gracias a este modelo magnético se pudo determinar y cuantificar el efecto que tiene la posición del sensor con respecto al vehículo en el cálculo de similitud. Los resultados de este análisis determinaron las zonas de confianza del vehículo, es decir, las posiciones del vehículo en las que se deben obtener las huellas magnéticas para garantizar los mejores resultados en el cálculo de la similitud.

La cuantificación de las zonas de confianza de los vehículos sirvió, a su vez, para determinar en el Capítulo 6 las condiciones que debe cumplir un punto de sensorización. En particular, se pudo establecer una densidad mínima de sensores en sentido transversal del carril monitorizado para obtener al menos una huella de la parte central del vehículo, que es la mejor zona de sensorización. Con todo, en el Capítulo 7 se definió una configuración de sensores para un entorno interurbano teniendo en cuenta las dimensiones de los carriles y las velocidades y posiciones de paso que se pueden esperar en la circulación de los vehículos por la zona interurbana sensorizada, utilizando el mínimo número de sensores que permitían cumplir con las condiciones establecidas para la obtención de huellas.

Se ha probado que la velocidad de los vehículos que circulan por una vía interurbana es un elemento determinante a la hora de utilizar un sensor adecuado para registrar los datos de cada vehículo. En concreto, la frecuencia de muestreo del sensor es un factor crítico para la selección del sensor, es decir, para poder obtener el suficiente número de muestras de cada señal cuando los vehículos circulan a velocidades elevadas. Durante de desarrollo del trabajo de esta tesis no existían en el mercado dispositivos que cumpliesen con unos criterios de frecuencia mínimo, por lo que se construyó un dispositivo específico para poder llevar a cabo los experimentos de validación en un entorno de trabajo real, el cual ha sido descrito en el Capítulo 7. El desarrollo del sensor no ha formado parte del trabajo de esta tesis, pero sí la definición de los requisitos del sensor y su preparación para la instalación dentro del asfalto en una autopista, de manera que el dispositivo no se viera afectado por factores ambientales adversos ni por efectos de la presión del paso de los vehículos sobre el sensor.

Finalmente, en el Capítulo 7 se consiguió validar el método propuesto para la re-identificación de vehículos en un entorno de trabajo real. Se seleccionó un punto de sensorización en la autopista M-12 en Madrid, y se realizó la instalación de los sensores en dicho punto, donde además se dispuso de información de contraste (cámaras de vídeo) para confirmar los resultados.

Se diseñó un experimento que permitió re-identificar 2 vehículos embebidos en el tráfico normal de la autopista, llegando a obtenerse unos ratios de re-identificación muy elevados, dependiendo del número de sensores utilizados en el método de comparación de vehículos. Los valores de este ratio obtenidos para los mejores casos en cada vehículo y presentados en el Capítulo 7 han sido de un 100% y un 90,48%, lo que representa una mejora considerable con respecto a otros trabajos de investigación, incluso con la complejidad añadida de trabajar en un entorno real.

Se puede concluir, por tanto, que los objetivos planteados en esta tesis se han cubierto completamente, y que los resultados obtenidos son muy buenos, si bien aún existe un margen de mejora en algunos problemas que han quedado por resolver, tal y como se expone más adelante en la sección 8.3.

## 8.2. Resultados de Investigación

En esta sección se enumerarán los logros científicos más relevantes que se han conseguido en el ámbito de la re-identificación de vehículos con el uso de dispositivos de monitorización basados en sensores AMR.

### 8.2.1. Análisis del comportamiento de los ejes de un sensor AMR y justificación de una medida de similitud óptima

La investigación realizada con sensores AMR de 3 ejes cuando se utiliza con fines de re-identificación de vehículos ha permitido determinar cuál es el comportamiento de cada eje con respecto a las medidas de similitud utilizadas. Todo este trabajo se ha plasmado en el Capítulo 5.

Se ha realizado un estudio con datos obtenidos de vehículos reales en un entorno controlado y se ha llegado a la conclusión de que el eje del sensor situado en el

sentido de circulación del vehículo (eje X) es el que mejores resultados de similitud ofrece, frente a los ejes situados en las posiciones transversal (eje Y) y vertical (eje Z).

También se ha probado que el uso de los datos de varios ejes mejora los ratios de re-identificación. En concreto, se ha determinado que en combinaciones de 2 ejes, los datos de los ejes X-Y son los que mejor resultado ofrecen. Curiosamente, el eje Y que se muestra muy poco fiable cuando se considera de forma aislada, proporciona una capacidad discriminante muy importante cuando se combina con otro eje.

El resultado más concluyente de los experimentos es que cuando se utilizan los 3 ejes, los resultados de re-identificación son los mejores, tanto por la capacidad de establecer similitudes entre señales como por la capacidad de discriminar señales que pertenecen a vehículos diferentes, como se muestra en la sección 5.1.

Las capacidades de re-identificación se han valorado a través del estudio de varias medidas de similitud que contemplan uno, dos y tres ejes. Las medidas analizadas han contemplado combinaciones lineales de similitudes obtenidas de cada eje de forma separada, y experimentalmente se ha llegado a la conclusión de que la mejor medida de similitud de entre las contempladas en el estudio es la que utiliza la media aritmética de las similitudes obtenidas para cada eje del sensor.

## 8.2.2. Definición de un nuevo procedimiento de pre-procesamiento de señales

Las señales obtenidas de los sensores AMR precisan de un tratamiento previo para su uso en la re-identificación de vehículos. Este tratamiento, o pre-procesamiento de las señales, está orientado a corregir problemas derivados del funcionamiento de los propios sensores y de las condiciones de detección de los vehículos.

La revisión de la literatura en este aspecto ha mostrado una dispersión importante de criterios y decisiones en cuanto al pre-procesamiento de señales. Además, no siempre se han abordado todos los problemas que hemos detectado en el trabajo con huellas magnéticas. En esta tesis hemos unificado estos criterios para proporcionar un método genérico de tratamiento de las señales como paso previo a su uso en la re-identificación, el cual queda descrito en la sección 4.3.

El pre-procesamiento de señales se ha aplicado para resolver los problemas de criterios de segmentación de la señal, falta de suavizado de la señal, diferencia en el número de muestras de las señales que se quieren comparar (por efecto de la velocidad de paso del vehículo sobre los sensores) y diferencias en las amplitudes de las señales capturadas.

El nuevo método de extracción de señales definido en la sección 4.3 establece un procedimiento y unos criterios claros para la segmentación de la señal en el dominio temporal, una técnica de suavizado convenientemente parametrizada, un criterio sobre el número de muestras al que se debe normalizar la señal en la escala temporal, y un proceso de normalización en amplitud de las señales.

### 8.2.3. Diseño de un procedimiento de Alineación de Señales

En la literatura que hemos analizado, el procedimiento de comparación de señales a través de una medida de similitud no siempre ha tenido en cuenta la precisión del método de segmentación de las señales. Durante los experimentos que se han realizado en esta tesis se ha probado que dos señales que pertenecen a un mismo vehículo pueden ofrecer valores de similitud excepcionalmente bajos por el hecho de que el proceso de la delimitación de las fronteras de las señales obtenidas en cada caso no haya ofrecido el mismo resultado.

Esta problemática es prácticamente inevitable por las diferentes condiciones que se pueden dar en el momento de la detección del vehículo. El efecto que esto produce en las señales, a pesar de que hayan sido conveniente pre-procesadas y normalizadas, es un desplazamiento y un escalado sobre el eje temporal, es decir, una falta de alineación. Hemos estudiado medidas de similitud que pueden trabajar con señales que no están alineadas, pero son computacionalmente más costosas que las que no lo hacen, aunque ofrezcan mejores resultados.

En la sección 5.2 de esta tesis se ha diseñado un nuevo algoritmo de *alineación de señales* que permite utilizar medidas de similitud menos costosas y que a su vez hace que los valores de similitud obtenidos sean más elevados. El algoritmo está basado en la identificación de unos puntos característicos de las señales que se quieren alinear y la aplicación de una transformación lineal en el espacio de muestras temporal sobre una de ellas para conseguir que coincidan los puntos

clave. El uso de este algoritmo ha contribuido a mejorar los ratios de re-identificación de vehículos, tal y como se ha demostrado en los experimentos llevados a cabo en esta misma sección 5.2.

## 8.2.4. Descripción del modelo magnético de un vehículo

Un resultado especialmente interesante y novedoso que aporta esta tesis es el estudio de la estructura ferro-magnética de un vehículo. En la literatura se ha descrito el problema del efecto del desplazamiento lateral en la obtención de huellas magnéticas de un vehículo. Este efecto consiste en que la posición del sensor con respecto al vehículo afecta a la forma de las señales que se capturan. Desde el punto de vista de la re-identificación, este efecto es absolutamente nocivo puesto que se pueden obtener huellas completamente distintas de un mismo vehículo en dos puntos de sensorización diferentes.

En el Capítulo 6 esta tesis se ha realizado un estudio de la estructura ferro-magnética de un vehículo medida por un sensor AMR. Se ha diseñado y ejecutado un experimento que ha permitido caracterizar la variación de las huellas magnéticas obtenidas en distintos puntos del vehículo, lo que se ha plasmado en un modelo magnético del vehículo en los 3 ejes de sensorización.

Gracias a este experimento se ha podido cuantificar por primera vez la diferencia que existe entre huellas magnéticas obtenidas en distintos lugares del vehículo. Se ha encontrado que las huellas que se han tomado en una posición cercana a las ruedas presentan muchas variaciones en su forma con pequeños desplazamientos en la posición del sensor y, por tanto, no son recomendables para su uso en el proceso de re-identificación.

También se ha mostrado que la zona central del vehículo es la que permite obtener señales que varían poco con respecto a la posición del sensor. De esta manera, se ha establecido una zona de confianza en el vehículo que es la que marca la distancia desde el eje central hacia las ruedas donde se deben capturar las señales que vayan a ser utilizadas en re-identificación. Esta aportación cuantitativa es completamente novedosa y es un resultado de gran utilidad para la definición de configuraciones de sensorización.

### 8.2.5. Definición de un nuevo modelo de sensorización para vías interurbanas

A pesar de que otros trabajos de investigación han mencionado el efecto del desplazamiento lateral, sus autores no han realizado ninguna propuesta para su solución más allá de utilizar varios sensores con diferentes configuraciones de distribución. En estas distribuciones no se ha establecido un criterio claro que permita justificar la forma de la distribución, la densidad de los sensores ni la manera de utilizar los datos de estos sensores de la forma más efectiva.

Tal y como se mostró en el Capítulo 6 de esta tesis, el estudio de la caracterización magnética de un vehículo ha ofrecido unos resultados cuantitativos que permiten establecer criterios para la configuración de zonas de sensorización de dispositivos AMR con fines de re-identificación de vehículos.

La caracterización de la zona de confianza del vehículo permite establecer un criterio para calcular la densidad de sensores que se deben situar en la zona de interés. Aplicando el Principio de Dirichlet (también conocido como el Principio del Palomar), para cubrir una determinada zona de la carretera y asegurar que al menos uno de los sensores obtendrá una señal de una zona próxima al centro del vehículo se debe utilizar una distancia entre sensores cuyo valor es como máximo el doble de la distancia máxima permitida entre sensores en la zona de confianza del vehículo.

Tanto este criterio como la metodología de trabajo definida con anterioridad se han validado en un entorno experimental real. En la configuración de la red de sensores se ha tenido en cuenta tanto el criterio de densidad de sensores como un criterio de minimización en el uso de dispositivos en base a las dimensiones de la vía. Se ha diseñado un experimento que ha permitido obtener ratios de re-identificación de dos vehículos utilizando los datos de un único sensor, seleccionándolo de entre los sensores que han captado huellas magnéticas de los vehículos del experimento.

Los resultados de re-identificación con un solo sensor han sido mejores que los que se constatan en otros trabajos de investigación. Sin embargo, gracias a la configuración establecida, se han podido utilizar datos de varios sensores de forma combinada para el método de re-identificación. Tal y como se ha mostrado en el Capítulo 7, experimentalmente se ha demostrado que en los vehículos objetivos se

mejora considerablemente el ratio de re-identificación si se utilizan dos o tres sensores en lugar de un único sensor. Esta conclusión representa una aportación importante puesto que justifica empíricamente la configuración uniforme de sensores en sentido transversal en el carril frente a las aproximaciones que otros autores proponen en sus trabajos.

### 8.3. Trabajo futuro

El trabajo de investigación realizado en esta tesis ha ofrecido unos resultados interesantes, pero sobre todo novedosos, en el ámbito de la re-identificación de vehículos con sensores AMR. Sin embargo, durante el desarrollo de la misma, hay algunos aspectos que han quedado por cubrir por ser tangenciales al trabajo que se estaba realizando.

Al mismo tiempo, se han encontrado algunos detalles técnicos de procedimiento que son susceptibles de mejora, y que requieren de una investigación más profunda. A continuación se describen brevemente todos aquellos aspectos que merecen más atención y que entendemos que son necesarios para llevar a un proceso de industrialización y comercialización la tecnología que se ha estudiado.

#### ***Rendimiento del método de re-identificación***

Esta tesis se ha centrado, sobre todo, en la definición de un método de re-identificación de vehículos que ofreciese unos ratios de acierto elevados. Los algoritmos, métodos y procedimientos desarrollados llevan asociados unos costes computacionales que pueden ser reducidos si se realiza un estudio sobre la optimización de los procesos y se contempla la posibilidad de que se incorporen directamente al hardware de sensorización.

Para poder trasladar este sistema a un entorno de producción y/o comercial, es necesario realizar un estudio del rendimiento del método propuesto, y comprobar su funcionamiento en el caso en el que la densidad de tráfico sea muy elevada y requiera la realización de cálculo intensivo.

Algunas de las técnicas de pre-procesamiento y de cálculo de similitud se han realizado a través del software, pero en un desarrollo comercial sería recomendable embeber cierta funcionalidad en el hardware y asociarla a la captura de la información, con lo que se ganaría en velocidad y en rendimiento.

### ***Aplicación a situaciones de congestión de tráfico***

La hipótesis de trabajo que se ha aplicado en los experimentos planteados en esta tesis se ha basado en unas condiciones de tráfico fluido, sin congestiones. El funcionamiento de los sensores y el tratamiento de la información en caso de congestión son completamente diferentes al caso del tráfico libre.

La obtención de datos coherentes en caso de congestión incrementa considerablemente la complejidad del problema que hemos abordado en esta tesis. Aun así, aunque algunos investigadores han realizado algunos trabajos en este sentido, es un campo que debe ser investigado con más profundidad.

### ***Modelado magnético de distintas clases de vehículos***

El estudio sobre modelo magnético que se ha realizado en esta tesis ha tenido en cuenta un único vehículo genérico. La información que puede proporcionar el modelo magnético es muy interesante y tiene un potencial que está todavía por explotar. Para ello, sería importante continuar los trabajos de análisis de diferentes vehículos y comparar sus comportamientos en función de sus características técnicas y de construcción.

Adicionalmente, sería importante analizar diferentes tipos de vehículos. En el campo de la gestión del tráfico es tan importante conocer la cantidad de tráfico como su composición, puesto que la gestión depende de ambas características. Por tanto, se debería realizar un estudio en profundidad de las características ferromagnéticas de distintos tipos de vehículos para mejorar la información que se puede extraer de los sensores.

### ***Determinación automática de diferentes partes del vehículo***

Un elemento importante que esta tesis ha planteado con respecto a la configuración de los sensores AMR para la re-identificación de vehículos es la selección adecuada de los sensores para obtener la huella magnética del vehículo. Esta selección está basada en la determinación de la zona de confianza del vehículo, y por tanto, decidir si un sensor se encuentra situado en ella o no. En esta tesis este procedimiento se ha realizado con un algoritmo diseñado ad-hoc para validar las hipótesis y los métodos propuestos.

El algoritmo permite realizar una estimación de la ubicación de los complejos de las ruedas, pero no está pensado para identificarlos con precisión. Para ello sería necesario estudiar como son las formas de las señales en distintos puntos del vehículo, de manera que se pueda determinar con precisión la posición de paso de algunos puntos clave del vehículo, como el motor o las ruedas. En este procedimiento no tendrían por qué intervenir exclusivamente la forma de las señales, sino que se podrían combinar más datos, en particular las magnitudes medidas por la red de sensores o los sensores que se activan al paso de vehículos.

También es de especial interés en el ámbito de la gestión del tráfico conocer algunas características de los vehículos que están circulando, como el número de ejes de vehículos pesados. Sería interesante plantear un trabajo de investigación para poder validar si es posible extraer este tipo de información con los datos obtenidos de los sensores AMR.

### ***Clasificación de vehículos***

Los sensores magnéticos se han utilizado tradicionalmente para contaje y clasificación de vehículos. Las espiras magnéticas que llenan nuestras carreteras permiten realizar una clasificación muy simple de vehículos. En particular, en España esta clasificación se restringe a tres tipos de vehículos: ligeros, pesados #1 y pesados #2.

La capacidad de extracción de información de los vehículos que ofrecen los sensores magnéticos permite plantearse la posibilidad de obtener una clasificación mucho más detallada que la que actualmente se consigue con los sensores instalados en las carreteras. Para ello sería necesario abordar un estudio basado en la obtención de varios datos de los sensores, no sólo la forma de onda de las huellas magnéticas, sino también datos como velocidad y longitud de los vehículos que son detectados.

### ***Red de sensores inalámbrica***

La tecnología avanza hacia la miniaturización e independencia de dispositivos y su interconexión. En este trabajo hemos propuesto una red de sensores cableada, en la que el tamaño y consumo de los sensores no era relevante. No obstante, la tendencia en el desarrollo de dispositivos de sensorización va en la línea contraria.

Una línea de trabajo interesante a desarrollar consistiría en la adaptación de los sensores propuestos a una configuración de tipo red de sensores inalámbrica. El hándicap que presenta esta investigación es que, para entornos interurbanos, se debe mantener la capacidad de rendimiento de los sensores, es decir, no se puede sacrificar rendimiento por consumo. En este caso, la investigación se debería centrar más en la capacidad de mantener un consumo bajo y una fuente de alimentación sostenible para las características requeridas del sensor.

### ***Matrices Origen-Destino multi-clase***

Las matrices origen-destino son uno de los datos que, como ya hemos mencionado, más interesan a los gestores de tráfico. Hemos visto que la tecnología utilizada en esta tesis puede aplicarse a la re-identificación de vehículos en tramos relativamente cortos, o en intersecciones, desvíos y rotondas, pero no puede aplicarse en puntos separados una gran distancia entre sí debido a la elevada probabilidad de encontrar 2 vehículos que generen huellas muy similares, como en el caso de vehículos que son de la misma marca, el mismo modelo y que tienen configuraciones de motor y construcción similares o idénticas. Por tanto, dado que los procesos de construcción de matrices origen-destino está basado en la identificación de un vehículo en distintos puntos de una red viaria, y teniendo en cuenta que estos puntos pueden estar muy alejados, ésta no es una tecnología que se pueda aplicar directamente al cálculo de matrices origen-destino.

A pesar de ello, la sensorización magnética con dispositivos AMR puede ser utilizada en la construcción de matrices simplificadas origen-destino, también llamadas multi-clase, donde el objetivo no es tener registrados todos los trayectos individualizados de los vehículos, sino que se pretende contabilizar los trayectos que realizan los vehículos agrupados por clases. Para esta aplicación, sería necesario poder categorizar las señales de los vehículos y asignarles una clasificación, con un nivel de detalle que debe venir marcado por una investigación en la capacidad de discriminación de los sensores y los distintos tipos de huellas que se pueden encontrar, y en el que el número de sensores a utilizar sería un factor a tener en cuenta.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

---

### 9.1. Aportaciones propias

En este apartado se detallan las publicaciones que han resultado de los trabajos realizados en esta tesis, el proyecto en el que se ha desarrollado el trabajo y el que se está desarrollando para continuar con la línea de investigación.

#### ***Publicaciones***

Cirilo Gimeno, R. V., Pla-Castells, M., Garcia Celda, A., & Martinez Plumé, J. (2013, May). A simulation model using AMR sensors applied to vehicles classification and identification. In 11th Annual Industrial Simulation Conference (ISC'2013).

Cirilo Gimeno, R. V., Garcia Celda, A., Pla-Castells, M., & Martinez Plumé, J. (2013, December). Improving similarity measures for re-identification of vehicles using AMR sensors. In Information, Communications and Signal Processing (ICICS) 2013 9th International Conference on. IEEE.

Cirilo Gimeno, R. V., Pla-Castells, M., Garcia Celda, A., & Martinez Durá, J. J. (2015, June). Estimation of Signals Generated by AMR Sensors for the Simulation of Magnetic Models of Vehicles. In 13th Annual Industrial Simulation Conference (ISC'2015).

Cirilo Gimeno, R. V., Garcia Celda, A., Martinez Durá, J. J., & Pla-Castells, M. (2015, September). Utilización de sensores magnéticos para re-identificación de vehículos en carretera. Ed. Plataforma Tecnológica de la Carretera. ISBN: 978-84-697-2153-7. Páginas: 76.

### ***Proyectos de Investigación***

<b>Proyecto de Investigación OASIS</b>	
Título del proyecto	CENIT - OASIS (Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles)
Entidad Financiadora	CDTI
Programa	Convocatoria CENIT 2008
Referencia	CEN-2008-1016
Duración	2008-2011 (48 meses)
Coordinador	OHL Concesiones
Investigador Principal	Federico García-Linares
Investigador Principal Universidad de Valencia	Ramón Vte. Cirilo Gimeno
Presupuesto total	30.459.757,00 €
Presupuesto UV	624.729,60 €
Participantes	16 empresas y 15 centros tecnológicos

<b>Proyecto de Investigación IBEROEKA</b>	
Título del proyecto	SMARTSIT: Sensores Magnético Resistivos para Sistemas Inteligentes de Transporte
Entidad Financiadora	CONACIT y CDTI
Programa	IBEROEKA Mexico-España 2012
Referencia	IBK 13-717 & IDI-20130804 IBE-20120070 &

	C0011-CONACYT-CDTI-192100
Duración	2014-2015 (24 meses)
Coordinador	INDRA
Investigador Principal	José Luis Angoso González
Investigador Principal Universidad de Valencia	Ramón Vte. Cirilo Gimeno
Presupuesto total	1.740.017,00 USD
Presupuesto UV	102.850,00 €
Participantes	INDRA, OHL Concesiones, Universidad de Valencia, Humaniks, Operadora Concesionaria Mexiquense (OPCOM), Tecnológico de Monterrey.

## 9.2. Referencias

- Abdulhai, B. & Tabib, S.M., 2003. Spatio-temporal inductance-pattern recognition for vehicle re-identification. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 11, pp.223–239.
- Adelerhof, D.J. & Geven, W., 2000. New position detectors based on AMR sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 85, pp.48–53.
- Ahdi, F. et al., 2012. *Traffic data collection and anonymous vehicle detection using wireless sensor networks*,
- Ali, S.S.M., George, B. & Vanajakshi, L., 2012. A magnetically coupled inductive loop sensing system for less-lane disciplined traffic. *2012 IEEE I2MTC - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*, (c), pp.827–832.
- Allen, R.L. & Mills, D., 2004. *Signal Analysis: Time, Frequency, Scale, and Structure*, Wiley-IEEE Press.

- Alpizar Arteaga, E. & del Risco Sánchez, A., 2012. Diseño de un Sensor de Flujo Vehicular basado en Lazo Inductivo. *RIELAC. Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 33, pp.33–44.
- An, S., Lee, B.-H. & Shin, D.-R., 2011. A Survey of Intelligent Transportation Systems. In *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*. pp. 332–337.
- Antoniou, C., Balakrishna, R. & Koutsopoulos, H.N., 2011. A Synthesis of emerging data collection technologies and their impact on traffic management applications. *European Transport Research Review*, 3, pp.139–148.
- Arafat, A. & Hasan, K., 2009. Automatic detection of ECG wave boundaries using empirical mode decomposition. In *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. pp. 461–464.
- Aubin, S. et al., 2007. Sensor technologies to follow vehicles for ITS. In *ITST 2006 - 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications, Proceedings*. pp. 870–873.
- Bachmann, C. et al., 2013. A comparative assessment of multi-sensor data fusion techniques for freeway traffic speed estimation using microsimulation modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, pp.33–48.
- Bachu, R.G. et al., 2008. Separation of Voiced and Unvoiced using Zero crossing rate and Energy of the Speech Signal. *American Society for Engineering Education (ASEE) Zone Conference Proceedings*, pp.1–7.
- Bai-gen, C.B.C. et al., 2009. The Research and Realization of Vehicle Detection System Based on Wireless Magneto-Resistive Sensor. In *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. pp. 476–479.
- Bajwa, R. et al., 2011. In-Pavement Wireless Sensor Network for Vehicle Classification. In *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. pp. 85–96.

- Barceló, J. et al., 2014. A Practical Proposal for Using Origin-Destination Matrices in the Analysis, Modeling and Simulation for Traffic Management. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*.
- Barceló, J. et al., 2010. Travel Time Forecasting and Dynamic Origin-Destination Estimation for Freeways Based on Bluetooth Traffic Monitoring. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2175, pp.19–27.
- Bastiaans, M., 1985. On the sliding-window representation in digital signal processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 33(4), pp.868–873.
- Beritelli, F., 2000. Robust word boundary detection using fuzzy logic. *Electronics Letters*, 36(9), pp.846–848.
- Blogg, M. et al., 2010. Travel Time and Origin-Destination Data Collection using Bluetooth MAC Address Readers. In *2010 33rd Australasian Transport Research Forum (ATRF)*.
- Blokpoel, R., 2009. Vehicle reidentification using inductive loops in urban areas. In *16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*.
- Bottero, M., Dalla Chiara, B. & Deflorio, F.P., 2013. Wireless sensor networks for traffic monitoring in a logistic centre. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, pp.99–124.
- Burns, S.G., 2009. *In-Situ Vehicle Classification Using an ILD and a Magnetoresistive Sensor Array*,
- Cardell Bilbao, A.G. et al., 2010. Sensor magnético inalámbrico para la detección y medida de tráfico rodado en tiempo real. In *IX Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica*. pp. 73–78.
- Caruso, M.J. & Withanawasam, L.S., 1999. Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors. In *Sensors Expo*.
- Cascetta, E. & Nguyen, S., 1988. A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(6), pp.437–455.

- Cetin, M. & Monsere, C.M., 2012. *Exploratory Methods for Truck Re-Identification in a Statewide Network Based on Axle Weight and Axle Spacing Data to Enhance Freight Metrics: Phase II*,
- Charbonnier, S., Pitton, A.C. & Vassilev, A., 2012. Vehicle re-identification with a single magnetic sensor. In *2012 IEEE I2MTC - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings*. pp. 380–385.
- Chen, C. et al., 2003. Detecting Errors and Imputing Missing Data for Single-Loop Surveillance Systems. *Transportation Research Record*, 1855, pp.160–167.
- Cheung, S.Y., Coleri, S., Dundar, B., et al., 2005. Traffic Measurement and Vehicle Classification with Single Magnetic Sensor. *Transportation Research Record*, 1917(January), pp.173–181.
- Cheung, S.Y., Coleri, S. & Varaiya, P., 2005. Traffic Surveillance with wireless magnetic sensors. *12th ITS world congress*, 1917.
- Cheung, S.Y. & Varaiya, P., 2007. *Traffic Surveillance by Wireless Sensor Networks : Final Report*,
- Chinrungrueng, J. et al., 2010. Wireless Sensor Network : Application to Vehicular Traffic. *Advances in Wireless Sensors and Sensor Networks - Lecture Notes in Electrical Engineering*, 64, pp.199–220.
- Chinrungrueng, J. & Kaewkamnerd, S., 2009. Wireless magnetic sensor network for collecting vehicle data. In *Proceedings of IEEE Sensors*. pp. 1792–1795.
- Cohen, L., 1995. *Time Frequency Analysis: Theory and Applications*, Prentice Hall PTR.
- Coifman, B., 1998. A New Algorithm for Vehicle Reidentification and Travel Time Measurement on Freeways. In *Proc. of the 5th International Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, ASCE. pp. 167–174.
- Coifman, B. & Krishnamurthy, S., 2007. Vehicle reidentification and travel time measurement across freeway junctions using the existing detector

- infrastructure. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15, pp.135–153.
- Coleri, S., Cheung, S.Y. & Varaiya, P., 2004. Sensor Networks for Monitoring Traffic. In *Allerton conference on communication, control and computing*. pp. 32–40.
- Corredor, I. et al., 2008. Wireless Sensor Network-based system for measuring and monitoring road traffic. *COLLECTeR Iberoamérica 2008*, pp.1–11.
- Daskalov, I.K. & Christov, I.I., 1999. Electrocardiogram signal preprocessing for automatic detection of QRS boundaries. *Medical Engineering and Physics*, 21(1), pp.37–44.
- Day, C.M. et al., 2011. Operational Evaluation of Wireless Magnetometer Vehicle Detectors at Signalized Intersection. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2192, pp.11–23.
- Deng, X. et al., 2010. Vehicle Class Composition Identification Based Mean Speed Estimation Algorithm Using Single Magnetic Sensor. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 10(5), pp.35–39.
- Ding, J. et al., 2004. Signal processing of sensor node data for vehicle detection. In *Proceedings. The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE Cat. No.04TH8749)*. pp. 70–75.
- Ding, N. et al., 2011. Distributed algorithm for traffic data collection and data quality analysis based on wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2011.
- Dirección General de Tráfico, 2014a. *Anuario Estadístico General 2013*,
- Dirección General de Tráfico, 2014b. Ley 6/ 2014, de 7 de abril, por la que se modifica el texto articulado de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo (BOE núm. 85, de 8 de abril de 2014).

- Dirección General de Tráfico, 2003. Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real De.
- Dirección General de Tráfico, 1998. Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos.
- Dominguez-Morales, M. et al., 2012. Live demonstration: On the distance estimation of moving targets with a Stereo-Vision AER system. *ISCAS 2012 - 2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2, pp.721–725.
- Dooley, K., 2002. Simulation research methods. In *Companion to organizations*. pp. 829–848.
- Ernst, J.M. et al., 2009. Maximum-likelihood speed estimation using vehicle-induced magnetic signatures. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, pp.638–643.
- Ernst, J.M., Krogmeier, J. V. & Bullock, D.M., 2010. Non-linear compensation of vehicle signatures captured from electromagnetic sensors with application to vehicle re-identification. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. pp. 923–928.
- European Commission, 2012. *Draft of the Spanish National Report for the ITS actions previewed in the next 5 years period*,
- European Commission, 2014a. *EU Transport in Figures. Statistical Pocketbook 2014*,
- European Commission, 2014b. *ITS Action Plan. D5 - Final Report. Action B - EU-wide real-time traffic information services*,
- European Commission, 2014c. *Progress National Report for the State of the ITS Deployment in Spain*,
- European Parliament, 2010. DIRECTIVE 2010/40/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 7 July 2010 on the

- framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport. *Official Journal of the European Union*, pp.1–13. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:207:0001:0013:EN:PDF> [Accessed August 11, 2015].
- Everitt, B.S., 1992. *The Analysis of Contingency Tables*, Chapman & Hall/CRC.
- Expociencia, 2014. Expociencia. Jornadas de puertas abiertas del Parque Científico de la Universidad de Valencia. Available at: <http://www.pcu.v.es/es/Expociencia2014/presentacio.html> [Accessed April 13, 2015].
- Faouzi, N.-E. El, Leung, H. & Kurian, A., 2011. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges – A survey. *Information Fusion*, 12(1), pp.4–10.
- Fawcett, T., 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), pp.861–874.
- Feng, Z. & Mingzhe, W., 2009. A New SVM Algorithm and AMR Sensor Based Vehicle Classification. *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, pp.421–425.
- Figueiredo, L. et al., 2001. Towards the development of intelligent transportation systems. *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No.01TH8585)*, (81), pp.1206–1211.
- Gajda, J. et al., 2001. A vehicle classification based on inductive loop detectors. *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No.01CH 37188)*, 1, pp.460–464.
- García-Linares Fontes, F. et al., 2010. Proyecto CENIT-OASIS: la autopista del futuro. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, 170, pp.32–48.

- Guan, X. et al., 2013. A vehicle detection algorithm based on wireless magnetic sensor networks. In *2013 8th International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*. pp. 669–674.
- Guilbert, D. et al., 2014. Robust Blind Deconvolution Process for Vehicle Reidentification by an Inductive Loop Detector. *IEEE Sensors Journal*, 14(12), pp.4315–4322.
- Hadj Slimane, Z.-E. & Naït-Ali, A., 2010. QRS complex detection using Empirical Mode Decomposition. *Digital Signal Processing*, 20(4), pp.1221–1228. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2009.10.017>.
- Hajimohammadi, H.R., 2009. *Classification of Data Series at Vehicle Detection*. Uppsala Universitet. Available at: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:279559/FULLTEXT01.pdf>Oct.
- Hamra, W. El & Attallah, Y., 2011. The role of vehicles' identification techniques in transportation planning - Modeling concept. *Alexandria Engineering Journal*, 50(4), pp.391–398.
- Haoui, A., Kavalier, R. & Varaiya, P., 2008. Wireless magnetic sensors for traffic surveillance. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16, pp.294–306.
- Hautière, N. et al., 2008. Meteorological conditions processing for vision-based traffic monitoring. In *The Eight International Workshop on Visual Surveillance (VS2008)*. p. 8. Available at: <http://hal.inria.fr/inria-00325657/en/>.
- Hazewinkel, M., 2001. Dirichlet box principle. In *Encyclopedia of Mathematics*.
- He, Y., Du, Y. & Sun, L., 2012. Vehicle Classification Method Based on Single-Point Magnetic Sensor. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 43, pp.618–627.
- Herrera, J.C. et al., 2010. Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), pp.568–583.

- Honeywell, 2011. 3-Axis Magnetic Sensor Hybrid HMC2003. Available at: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HMC\\_2003.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HMC_2003.pdf).
- Honeywell, 2005. *Application Note - AN218. Vehicle Detection Using AMR Sensors*, Available at: [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense\\_Brochures-documents/Magnetic\\_Literature\\_Application\\_notes-documents/AN218\\_Vehicle\\_Detection\\_Using\\_AMR\\_Sensors.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic_Literature_Application_notes-documents/AN218_Vehicle_Detection_Using_AMR_Sensors.pdf) [Accessed May 10, 2015].
- Honeywell, 2012. Smart Digital Magnetometer HMR2300. Available at: <http://www.farnell.com/datasheets/1744119.pdf>.
- Hornby Hobbies, 2015. Scalextric. Available at: <http://www.scalextric.com> [Accessed April 25, 2015].
- Jeng, S.-T. (Cindy) & Chu, L., 2013. Vehicle Reidentification with the Inductive Loop Signature Technology. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*.
- Jeng, S.-T. & Chu, L., 2014. A high-definition traffic performance monitoring system with the Inductive Loop Detector signature technology. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.1820–1825. Available at: classification; re-identification; ILD; signature.
- Jiménez, P., Castillo, E. & Sánchez-Cambronero, S., 2008. Estimación de matrices origen-destino y flujo de caminos mediante escaneo de matrículas. In *VIII Congreso de Ingeniería del Transporte*.
- Johnson, D., 2003. White Gaussian Noise. In *White Gaussian Noise*. OpenStax CNX. Available at: <http://cnx.org/contents/8bcaef14-338b-4b1a-8951-8f32492bd296@3>.
- Junqua, J.-C., Mak, B. & Reaves, B., 1994. A robust algorithm for word boundary detection in the presence of noise. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2(3), pp.406–412.

- Kaewkamnerd, S. et al., 2009. Automatic vehicle classification using wireless magnetic sensor. In *2009 IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*. pp. 420–424.
- Kaewkamnerd, S. et al., 2010. Vehicle classification based on magnetic sensor signal. In *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*. pp. 935–939.
- Kaewkamnerd, S., Chinrungrueng, J. & Jaruchart, C., 2008. Vehicle classification with low computation magnetic sensor. In *Proceedings - 2008 8th International Conference on Intelligent Transport System Telecommunications, ITST 2008*. pp. 164–169.
- Kanathantip, P., Kumwilaisak, W. & Chinrungrueng, J., 2010. Robust vehicle detection algorithm with magnetic sensor. In *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on*. pp. 1060–1064.
- Kang, M.H. et al., 2005. Experimental study of a vehicle detector with an AMR sensor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 118, pp.278–284.
- Karpiriski, M., Senart, A. & Cahill, V., 2006. Sensor networks for smart roads. *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*, p.5 pp. –310.
- Karpis, O., 2012. Sensor for Vehicles Classification. In *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2012 Federated Conference on*. pp. 785–789.
- Kassem, N., Kosba, A.E. & Youssef, M., 2012. RF-based vehicle detection and speed estimation. In *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference*. pp. 1–5.
- Kaur, M., Singh, B. & Seema, 2011. Comparison of different approaches for removal of baseline wander from ECG signal. In *Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology - ICWET '11*. pp. 1290–1294.

- Kavaler, R. et al., 2011. *Arterial Performance Measurement System with Wireless Magnetic Sensors*, Available at: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41177\(415\)48](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41177(415)48).
- Keener, R.W., 2010. *Theoretical Statistics. Topics for a Core Course*, Springer.
- Kim, M. et al., 2008. Study on Network Architecture for Traffic Information Collection Systems Based on RFID Technology. In *2008 IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference*. pp. 63–68.
- Klein, L.A., 2001. *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*, Artech House Publishers.
- Klein, L.A., Mills, M.K. & Gibson, D.R.P., 2006. *Traffic Detector Handbook*,
- Koszteczky, B. & Simon, G., 2013. Magnetic-based vehicle detection with sensor networks. In *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. pp. 265–270.
- Kothari, C.R., 2004. *Research Methodology: Methods and Techniques*, New Age International (P) Limited.
- Kovavisaruch, L. et al., 2009. Accuracy improvement method for vehicle detection using optical sensors. *Intelligent Transport Systems Telecommunications, (ITST), 2009 9th International Conference on*, pp.218 –222.
- Krogmeier, J. V. & Bullock, D., 2008. *Inductive Loop Detection of Bicycles and Inductive Loop Signature Processing for Travel Time Estimation*,
- Kurzhanskiy, A. a. & Varaiya, P., 2015. Traffic management: An outlook. *Economics of Transportation*.
- Kwon, J. & Varaiya, P., 2005. Real-Time Estimation of Origin-Destination Matrices with Partial Trajectories from Electronic Toll Collection Tag Data. *Transportation Research Record*, 1923(January), pp.119–126.
- Kwong, K. et al., 2009a. A Practical Scheme for Arterial Travel Time Estimation Based on Vehicle Re-Identification Using Wireless Sensors. In *Transportation Research Board Annual Meeting*.

- Kwong, K. et al., 2009b. Arterial travel time estimation based on vehicle re-identification using wireless magnetic sensors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(6), pp.586–606.
- Kwong, K. et al., 2010. Real-time measurement of link vehicle count and travel time in a road network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), pp.814–825.
- Lamel, L.F. et al., 1981. An Improved Endpoint Detector for Isolated. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, ASSP-29(4), pp.777–785.
- Lan, J. et al., 2011. Vehicle detection and classification by measuring and processing magnetic signal. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44(1), pp.174–180.
- Lao, R. & Czajkowski, C., 1996. Magnetoresistors for Automobile Detection and Traffic Control. *IEEE Sensors*, 13(4), pp.70–73.
- Last, T., Nugent, C.D. & Owens, F.J., 2004. Multi-component based cross correlation beat detection in electrocardiogram analysis. *Biomedical engineering online*, 3(1), p.26. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/26>.
- Lego Group, 2015. Lego. Available at: <http://www.lego.com> [Accessed May 1, 2015].
- Lenssen, K.M.H. et al., 2000. Robust giant magnetoresistance sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 85, pp.1–8.
- Lenz, J. & Edelstein, A.S., 2006. Magnetic sensors and their applications. *IEEE Sensors Journal*, 6(3), pp.631–649.
- Li, H. et al., 2011. Some practical vehicle speed estimation methods by a single traffic magnetic sensor. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. pp. 1566–1573.
- Liepins, M. & Severdaks, A., 2013. Vehicle detection using non-invasive magnetic wireless sensor network. In *2013 21st Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*. pp. 601–604.

- Lin, W.H. & Tong, D., 2011. Vehicle re-identification with dynamic time windows for vehicle passage time estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12, pp.1057–1063.
- Liu, H. et al., 2009. Commercial Vehicle Classification Using Vehicle Signature Data. In *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*.
- Lokhande, N.N., Nehe, N.S. & Vikhe, P., 2011. Voice activity detection Algorithm for Speech Recognition Applications. In *Proceedings on International Conference in Computational Intelligence (ICCIA2011)*. pp. 5–7.
- Lopes, A.C. et al., 2007. An outdoor guidpath navigation system for AMRs based on robust detection of magnetic markers. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, pp.989–996.
- Losilla, F. et al., 2012. On the role of wireless sensor networks in intelligent transportation systems. *2012 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp.1–4.
- Ma, S. et al., 2014. Reliable Wireless Vehicle Detection using Magnetic Sensor and Distance Sensor. *International Journal of Digital Content Technology and its Applications (JDCTA)*, 8(February), pp.112–121.
- Martin, A., Marini, H. & Tosunoglu, S., 1999. Intelligent Vehicle/Highway System: A Survey—Part 1. In *Florida Conference on Recent Advances in Robotics*.
- Martínez Reynés, M.R. & Seguí Pons, J.M., 2004. Los sistemas inteligentes de transporte y sus efectos en la movilidad urbana e interurbana. *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, VI(170). Available at: <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-170-60.htm> [Accessed August 11, 2015].
- McGuire, T. & Potter, R., 1975. Anisotropic magnetoresistance in ferromagnetic 3d alloys. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(4), pp.1018–1038.

- Microchip DM320002, 2015. MICROCHIP DM320002 PIC32 I/O Expansion Board. Available at: <http://www.microchip.com/Developmenttools/ProductDetails.aspx?PartNO=DM320002> [Accessed July 14, 2015].
- Microchip DM320004, 2015. MICROCHIP DM320004 PIC32 Ethernet Starter Kit. Available at: • <http://www.microchip.com/DevelopmentTools/ProductDetails.aspx?PartNO=DM320004> [Accessed July 14, 2015].
- Mimbela, L.E.Y. et al., 2007. *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies use in Intelligent Transportation Systems*,
- Minge, E., Kotzenmacher, J. & Peterson, S., 2010. *Evaluation of Non-Intrusive Technologies for Traffic Detection*,
- Ministerio de Fomento, 2014a. *Anuario Estadístico 2013. Capítulo 8: Tráfico.*,
- Ministerio de Fomento, 2014b. *Distribuciones de tráfico en las estaciones de aforo (2013)*,
- Ministerio de Fomento, 2014c. *Informe 2012 sobre el sector de autopistas de peaje en España*,
- Ministerio de Fomento, 2014d. *Tráfico en la Red de Carreteras del Estado 2013*,
- Mitchell, H.B., 2007. *Multi-sensor data fusion: An introduction*, Springer Berlin Heidelberg.
- Mlejnek, P., Vopálenský, M. & Ripka, P., 2008. AMR current measurement device. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 141, pp.649–653.
- Myers, C., Rabiner, L. & Rosenberg, A., 1980. Performance tradeoffs in dynamic time warping algorithms for isolated word recognition. *Acoustics, Speech and Signal Processing*, 28(6), pp.623–635.
- Ndoye, M. et al., 2011. Sensing and signal processing for vehicle reidentification and travel time estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12, pp.119–131.

- Ndoye, M., 2010. *Signal Processing Methods for Road Condition Monitoring and Vehicle Signature Matching for Travel Time Estimation*. Purdue University.
- Ng, E.-H.N.E.-H., Tan, S.-L.T.S.-L. & Guzman, J.G., 2009. Road traffic monitoring using a wireless vehicle sensor network. In *2008 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems*. pp. 1–4.
- Oh, C. et al., 2002. Real-time origin-destination (OD) estimation via anonymous vehicle tracking. In *Proceedings. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. pp. 582–586.
- Oh, C. & Ritchie, S.G., 2003. Anonymous Vehicle Tracking for Real-Time Traffic Surveillance. *Propuesto para el 82nd Annual meeting of the Transportation Research Board*.
- Oh, S., Ritchie, S.G. & Oh, C., 2002. Real time traffic measurement from single loop inductive signatures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1804(1), pp.98–106.
- Padmavathi, G., 2010. A Study on Vehicle Detection and Tracking Using Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, 02(February), pp.173–185.
- Park, S. & Ritchie, S.G., 2010. Innovative single-loop speed estimation model with advanced loop data. *IET Intelligent Transport Systems*, 4(November 2009), p.232.
- Pascale, a. et al., 2012. Wireless sensor networks for traffic management and road safety. *IET Intelligent Transport Systems*, 6(May 2011), p.67.
- Phan, T., Kwan, B.W. & Tung, L.J., 1997. Magnetoresistors for vehicle detection and identification. In *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*.
- Pitton, A.C., Vassilev, A. & Charbonnier, S., 2012. Vehicle re-identification with several magnetic sensors. *Advanced Microsystems for Automotive*

- Applications 2012: Smart Systems for Safe, Sustainable and Networked Vehicles*, pp.281–290.
- Proakis, J.G., 2006. *Digital Signal Processing, 4th Ed.*, Prentice Hall.
- Rabiner, L. et al., 1979. Speaker-independent recognition of isolated words using clustering techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 27(4), pp.336–349.
- Reitz, J.R., Milford, F.J. & Christy, R.W., 1986. *Fundamentos de la Teoría Electromagnética*,
- Ripka, P. & Janošek, M., 2010. Advances in magnetic field sensors. *IEEE Sensors Journal*, 10(6), pp.1108–1116.
- Ritchie, S.G. et al., 2008. *Corridor Deployment and Investigation of Anonymous Vehicle Tracking for Real-Time Traffic Performance Measurement*,
- Ritchie, S.G. et al., 2002. *Field Investigation of Advanced Vehicle Reidentification Techniques and Detector Technologies - Phase 1*,
- Robert, K., 2009. Video-based traffic monitoring at day and night: Vehicle features detection and tracking. In *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. pp. 285–290.
- Samedap, I., Adachip, H. & Muraip, S., 2009. Traffic Characteristics for the Route Information Collecting System Using DSRC. In *16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*. pp. 6253–6259.
- Sanchez, R.O. et al., 2011a. Arterial travel time estimation based on vehicle re-identification using magnetic sensors: Performance analysis. *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.997–1002.
- Sanchez, R.O. et al., 2011b. Vehicle re-identification using wireless magnetic sensors: Algorithm revision, modifications and performance analysis. In *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES 2011*. pp. 226–231.

- Sanchez, R.O., 2012. *Wireless Magnetic Sensor Applications in Transport Infrastructure*. UC Berkeley.
- Sensys Networks, 2015. Sensys Networks Technology. Available at: <http://www.sensysnetworks.com/technology> [Accessed June 30, 2015].
- Sharp, C. et al., 2005. Design and implementation of a sensor network system for vehicle tracking and autonomous interception. *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks, EWSN 2005*, pp.93–107.
- Siemens, 2015. Siemens WiMag. Available at: <http://www.siemens.co.uk/traffic/en/index/productssolutionservices/detection/wimag.htm> [Accessed June 30, 2015].
- Sifuentes de la Hoya, E. et al., 2013. Magnetómetro de bajo costo para detectar vehículos estáticos. *Cultura científica y tecnológica*, 10(49), pp.74–84.
- Sifuentes, E., Casas, O. & Pallas-Areny, R., 2011. Wireless magnetic sensor node for vehicle detection with optical wake-up. *IEEE Sensors Journal*, 11, pp.1669–1676.
- Smith, S.W., 1997. Moving Average Filters. In *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, pp. 277–284.
- Stantic, D. & Jo, J., 2014. Selection of Optimal Parameters for ECG Signal Smoothing and Baseline Drift Removal. *Computer and Information Science*, 7(4), pp.99–110. Available at: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/cis/article/view/36399>.
- Steiner, A. & Sick, B., 2008. A new method for travel time estimation on long freeway sections. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 8(8), pp.333–354. Available at: ILD;
- Suárez, K. V. et al., 2007. ECG beat detection using a geometrical matching approach. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 54(4), pp.641–650.

- Sumner, R., 1991. Data fusion in pathfinder and TravTek. *Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1991*, 2, pp.71–75.
- Sun, C. et al., 1999. Use of vehicle signature analysis and lexicographic optimization for vehicle reidentification on freeways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7, pp.167–185.
- Sun, C. & Ritchie, S.G., 1999. *Individual Vehicle Speed Estimation Using Single Loop Inductive Waveforms*,
- Sun, C.C. et al., 2004. Vehicle reidentification using multidetector fusion. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5, pp.155–164.
- Taghvaeeyan, S. & Rajamani, R., 2014a. Portable roadside sensors for vehicle counting, classification, and speed measurement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1), pp.73–83.
- Taghvaeeyan, S. & Rajamani, R., 2014b. Two-dimensional sensor system for automotive crash prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1), pp.178–190. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6606810>.
- Tang, S. et al., 2014. Theme Classification and Analysis of Core Articles Published in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems From 2010 to 2013. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(6), pp.2710–2719. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6955849>.
- Tawfik, A.Y. et al., 2002. Learning Spatio-temporal Context for Vehicle Reidentification. In *Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*.
- Tewelde, G.S., 2012. Sensor and network technology for intelligent transportation systems. In *ElectroInformation Technology EIT 2012 IEEE International Conference on*. pp. 1–7.
- Thomas, N. & Jagannath, D.J., 2013. Detection of Peak And Boundaries of P And T Waves In Ecg Signals. *International Journal of Electronics Signals and Systems (IJESS)*, 3(1), pp.41–44.

- Thomson, W., 1856. On the Electro-Dynamic Qualities of Metals: Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron. *Proceedings of the Royal Society of London*, 8, pp.546–550.
- Tian, Y. et al., 2014. A vehicle re-identification algorithm based on multi-sensor correlation. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 15(5), pp.372–382. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84903575077&partnerID=tZOtx3y1>.
- Tok, A., Hernandez, S. & Ritchie, S.G., 2009. Accurate individual vehicle speeds from single inductive loop signatures. In *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*. pp. 1–22.
- Torres Garrigós, D., Samper Zapater, J.J. & Martínez Durá, J.J., 2012. Dealing with Traffic Information and User Profiles a Semantic Approach Based On Datex II. *Mechatronics Series I - Intelligent Transportation Vehicles*, pp.51–66. Available at: <http://www.eurekaselect.com/node/52432>.
- Tubaishat, M. et al., 2009. Wireless sensor networks in intelligent transportation systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9(March 2008), pp.287–302.
- Tubaishat, M., Shang, Y. & Shi, H., 2007. Adaptive Traffic Light Control with Wireless Sensor Networks. *2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, pp.187–191.
- Tumanski, S., 2001. *Thin Film Magnetoresistive Sensors*, CRC Press.
- Varghees, V.N. & Ramachandran, K.I., 2014. A novel heart sound activity detection framework for automated heart sound analysis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 13, pp.174–188.
- Volling, M.T., 2009. Arterial travel time using magnetic signature re-identification theory of application and its deployment in San Diego. In *ITS America*.
- Vopálenský, M., Ripka, P. & Platil, A., 2003. Precise magnetic sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 106, pp.38–42.

- Waheed, K., Weaver, K. & Salam, F.M., 2002. A robust algorithm for detecting speech segments using an entropic contrast. In *The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2002. MWSCAS-2002*.
- Wahlström, N. et al., 2012. Rapid classification of vehicle heading direction with two-axis magnetometer. In *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*. pp. 3385–3388.
- Wahlström, N., Callmer, J. & Gustafsson, F., 2011. Single target tracking using vector magnetometers. In *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. pp. 4332–4335.
- Wang, R. et al., 2011. EasiTia: A pervasive traffic information acquisition system based on wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(2), pp.615–621.
- Wender, S. & Dietmayer, K., 2008. 3D vehicle detection using a laser scanner and a video camera. *IET Intelligent Transport Systems*, 2(2), pp.105–112.
- Wenjie, C. et al., 2005. A Realtime Dynamic Traffic Control System Based on Wireless Sensor Network. *Parallel Processing*.
- Wenjie, C. et al., 2006. WITS: A Wireless Sensor Network for Intelligent Transportation System. *First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS'06)*, pp.635–641.
- Wilder, J.L., Milenković, A. & Jovanov, E., 2008. Smart wireless vehicle detection system. In *Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on System Theory*. pp. 159–163.
- Wolff, J. et al., 2006. Parking monitor system based on magnetic field sensors. *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp.1275–1279.
- Yeh, Y.C. & Wang, W.J., 2008. QRS complexes detection for ECG signal: The Difference Operation Method. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 91(3), pp.245–254.

- Yoo, J., Kim, D. & Park, J., 2010. Design and implementation of magnetic sensor network for detecting automobiles. *Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN*, pp.929–932.
- Yoo, J., Sung, K. & Jang, J., 2007. Intelligent non-signalized intersections based on magnetic sensor networks. *Proceedings of the 2007 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, ISSNIP*, pp.275–280.
- Zhang, J. et al., 2011. Data-Driven Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(4), pp.1624–1639.
- Zhang, L., Wang, R. & Cui, L., 2011. Real-time traffic monitoring with magnetic sensor networks. *Journal of Information Science and Engineering*, 27(4), pp.1473–1486.
- Zhang, W. et al., 2010. A distributed threshold algorithm for vehicle classification based on binary proximity sensors and intelligent neuron classifier. *Journal of Information Science and Engineering*, 26(3), pp.769–783.
- Zhang, W. et al., 2008. Vehicle Classification Algorithm based on Binary Proximity Magnetic Sensors and Neural Network. In *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. pp. 145–150.
- Zhang, Y., Huang, X., Cui, L., et al., 2007. Design and Evaluation of a Wireless Sensor Network for Monitoring Traffic. In *The 14th World Congress on Intelligent Transportation Systems (WCITS'07)*.
- Zhang, Y., Huang, X. & Cui, L., 2007. Lightweight Signal Processing in Sensor Node for Real-time Traffic Monitoring. *2007 International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp.1407–1412.
- Zhang, Z., Tao, M. & Yuan, H., 2015. A Parking Occupancy Detection Algorithm Based on AMR Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), pp.1261–1269.

- Zhou, X., 2013. Vehicle location estimation based on a magnetic sensor array. In *2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings*. pp. 80–83. Available at:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6493561>.
- Zou, F., Yang, B. & Cao, Y., 2009. Traffic light control for a single intersection based on wireless sensor network. In *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. pp. 1–1040–1–1044.

## **10. ANEXOS**

---



## 10.1. Anexo I. Lista de vehículos utilizados en el entorno de pruebas controlado

El conjunto de vehículos que se han utilizado en el entorno de pruebas controlado es el siguiente:

ID	Marca	Modelo	Motor	Combustible	Año
1	Opel	Astra GTC	1.9cc 120cv	diesel	2009
2	BMW	316i	1.6cc	gasolina	1997
3	Renault	Megane Eco2	1.5cc dci	diesel	2008
4	Renault	Scenic	1.8cc dci	diesel	2005
5	Citroen	C2 VTR Plus	70cv HDI	diesel	2006
6	Volkswagen	Golf 5	1.9cc 105cv tdi	diesel	2006
7	Opel	Astra	1.6cc 105cv	gasolina	2006
8	Ford	Focus	1.6cc 109cv	diesel	2000
9	Toyota	Corolla Sport Familiar	1.6cc	gasolina	2000
10	Renault	Megane	1.5cc dci	diesel	2005
11	Volkswagen	Passat CC	1.8cc	gasolina	2009
12	Volkswagen	Touran	1.6cc	gasolina	2005
13	Seat	Ibiza	1.4cc 75cv	gasolina	2005
14	Mini	One	1.4cc 100cv	gasolina	2006
15	Citröen	C4	90cv HDI	diesel	2010
16	Ford	Focus	1.6 109cv	diesel	2008
17	Fiat	Bravo	1.6cc 16V 105cv	diesel	2008
18	Chevrolet	Aveo	1.2cc 74cv	gasolina	2009

19	Opel	Astra	1.7cc	diesel	2009
20	Nissan	Primera	1.6cc	gasolina	1997
21	Chevrolet	Captiva LS	2.0cc	diesel	2010
22	Ford	Focus	2.0cc Tdci	diesel	2005
23	Peugeot	107 Urban car	1.0cc	gasolina	2009
24	Ford	Focus	1.8cc 90cv	diesel	2000
25	Ford	Focus	1.8cc 90cv	diesel	1998
26	Seat	Ibiza	1.9cc 90cv Tdi	diesel	1998
27	Volkswagen	Passat	2.0cc 110cv	diesel	2009
28	Toyota	Carina E	2.0cc 90cv	diesel	1998
29	Peugeot	407	2.0cc 135cv	diesel	2005
30	Toyota	Corolla	1.9cc	diesel	2005

*Tabla 52. Listado de vehículos usados en la entorno de pruebas controlado*

## 10.2. Anexo II. Muestra de datos de similitud

Paso #1	Paso #2	COS	XCORR	DEN	AvB	HP	DTW
120	41	0.3895	0.6548	0.4646	0.3876	-0.0624	0.6336
120	42	0.2452	0.5178	0.3985	0.2433	-0.1215	0.6404
120	43	0.1260	0.4154	0.3512	0.1252	-0.2697	0.6119
120	44	0.2609	0.5394	0.4070	0.2587	-0.1945	0.6254
120	45	0.1182	0.4117	0.3453	0.1188	-0.2154	0.6258
120	46	0.8629	0.9073	0.7419	0.8638	0.4671	0.8585
120	47	0.8432	0.8996	0.7225	0.8440	0.4544	0.8534
120	48	0.8186	0.8928	0.7013	0.8197	0.2980	0.8611
120	49	0.8317	0.8959	0.7138	0.8324	0.3297	0.8562
120	50	0.8826	0.9061	0.7618	0.8835	0.4202	0.8526
120	51	0.2823	0.4001	0.4663	0.2816	0.3655	0.5882
120	52	0.3365	0.4291	0.5110	0.3337	0.0803	0.5976
120	53	0.0298	0.2042	0.3304	0.0373	-0.0085	0.5964
120	54	0.2744	0.3827	0.4688	0.2729	0.0700	0.5841
120	55	0.3203	0.3904	0.5000	0.3172	0.3753	0.5937
120	56	0.5838	0.6932	0.5559	0.6016	0.2688	0.9165
120	57	0.9454	0.9685	0.8351	0.9488	0.7103	0.9143
120	58	0.9151	0.9513	0.7941	0.9204	0.5626	0.9054
120	59	0.7948	0.8887	0.6935	0.8061	0.4167	0.9140
120	60	0.9214	0.9500	0.7986	0.9262	0.5699	0.9099
120	61	0.0137	0.2822	0.3055	0.0189	-0.3115	0.6751
120	62	0.0867	0.3368	0.3368	0.0835	-0.0851	0.6442
120	63	0.4849	0.6737	0.5264	0.4811	0.0007	0.6749
120	64	0.3365	0.5837	0.4488	0.3360	-0.0970	0.6514
120	65	0.0495	0.3165	0.3239	0.0519	-0.2527	0.6505
120	66	0.5566	0.7196	0.5430	0.5634	0.0810	0.8162
120	67	0.6648	0.8051	0.6043	0.6694	0.1111	0.8182
120	68	0.8414	0.8916	0.7320	0.8410	0.3562	0.8270
120	69	0.8408	0.8860	0.7320	0.8402	0.3509	0.8040
120	70	0.7914	0.8826	0.6894	0.7924	0.2356	0.8286
120	71	0.6658	0.7519	0.5928	0.6662	0.1375	0.6867
120	72	0.7487	0.8168	0.6428	0.7495	0.2406	0.7267
120	73	0.6399	0.7799	0.5736	0.6411	0.0900	0.7372
120	74	0.6655	0.7927	0.5890	0.6671	0.1132	0.7502
120	75	0.5868	0.7321	0.5439	0.5894	0.0095	0.7672

Tabla 53. Muestra de similitudes entre pasos para el entorno de simulación

Paso #1	Paso #2	COS	XCORR	DEN	AvB	HP	DTW
60	25	0.0337	-0.0531	0.2941	0.0441	0.0120	0.7599
60	26	0.0120	-0.0843	0.2873	0.0274	-0.0172	0.7692
60	27	0.0104	-0.0828	0.2840	0.0296	-0.0308	0.7511
60	28	0.0354	-0.0527	0.2937	0.0542	-0.0354	0.7599
60	29	0.0211	-0.0408	0.2883	0.0439	-0.0663	0.7750
60	30	0.0568	-0.0057	0.3022	0.0801	-0.0559	0.7810
60	31	-0.0808	-0.0987	0.2570	-0.1127	0.1183	0.6397
60	32	-0.0586	-0.0656	0.2666	-0.0840	0.1522	0.6292
60	33	-0.0548	-0.0881	0.2669	-0.1018	0.2413	0.6307
60	34	0.2878	0.4749	0.4190	0.4165	-0.0058	0.7699
60	35	-0.0971	-0.0757	0.2470	-0.1092	0.0087	0.6401
60	36	-0.2577	-0.0959	0.2053	-0.2308	-0.0779	0.6972
60	37	0.0425	0.1029	0.2989	0.0575	0.1087	0.7165
60	38	0.0213	-0.0016	0.2895	0.0264	0.0811	0.6735
60	39	0.3191	0.5248	0.4185	0.4512	-0.0051	0.8418
60	40	0.5083	0.5520	0.5001	0.5942	0.3342	0.7682
60	41	0.0651	0.0636	0.3008	0.0817	0.0255	0.7056
60	42	0.1129	0.1050	0.3135	0.1321	0.0364	0.7166
60	43	0.0784	-0.0834	0.3076	0.0824	0.0080	0.7632
60	44	0.0804	-0.0112	0.3020	0.0845	0.0188	0.7533
60	45	0.0593	-0.0376	0.2956	0.0622	-0.0746	0.7405
60	46	0.1213	0.0230	0.3204	0.1378	-0.2327	0.7505
60	47	0.5411	0.6580	0.5065	0.5955	0.1634	0.7939
60	48	0.0638	-0.0478	0.2994	0.0676	0.0117	0.7521
60	49	-0.1254	-0.1336	0.2440	-0.1270	0.0576	0.7891
60	50	0.0628	0.0334	0.3061	0.0586	0.1963	0.7929
60	51	0.1444	0.0958	0.3373	0.1574	0.1278	0.8061
60	52	-0.0245	-0.0208	0.2798	-0.0292	0.0402	0.8111
60	53	0.0978	0.0547	0.3199	0.1014	0.1050	0.8096
60	54	0.1435	0.0910	0.3386	0.1561	0.1234	0.8088
60	55	0.1402	0.1414	0.3362	0.1406	0.2089	0.8000
60	56	0.0798	0.0646	0.3120	0.0814	0.1308	0.8076
60	57	0.1722	0.1414	0.3460	0.1964	0.1603	0.8319
60	58	0.1530	0.1085	0.3405	0.1709	0.1387	0.8507
60	59	0.1912	0.1651	0.3538	0.2275	0.2078	0.8463

Tabla 54. Muestra de similitudes entre pasos para el entorno de pruebas controlado

### 10.3. Anexo III. Histogramas de los valores obtenidos de las medidas de similitud

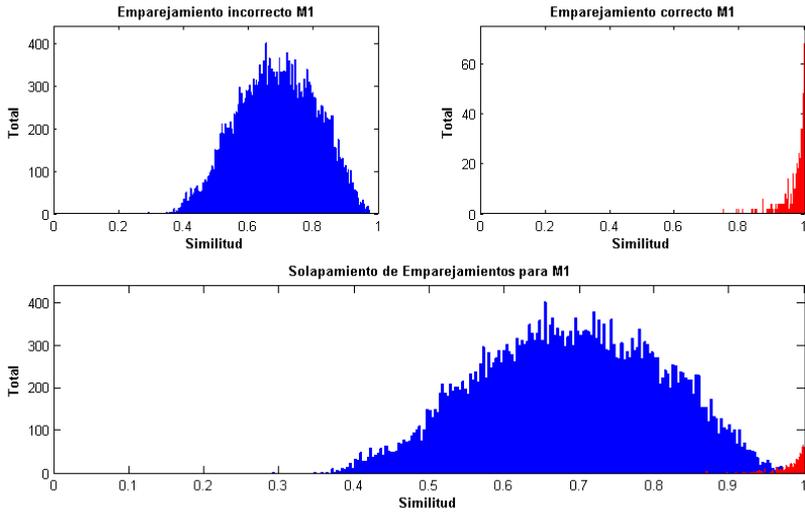


Figura 130. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_1$

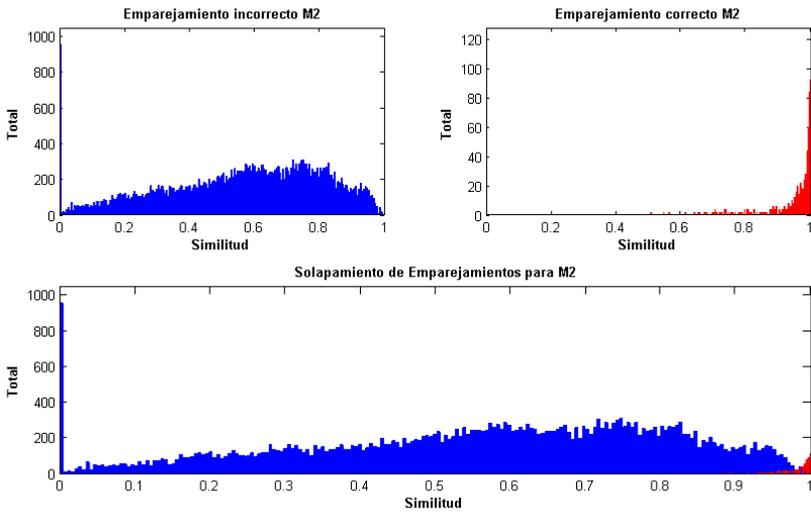


Figura 131. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_2$

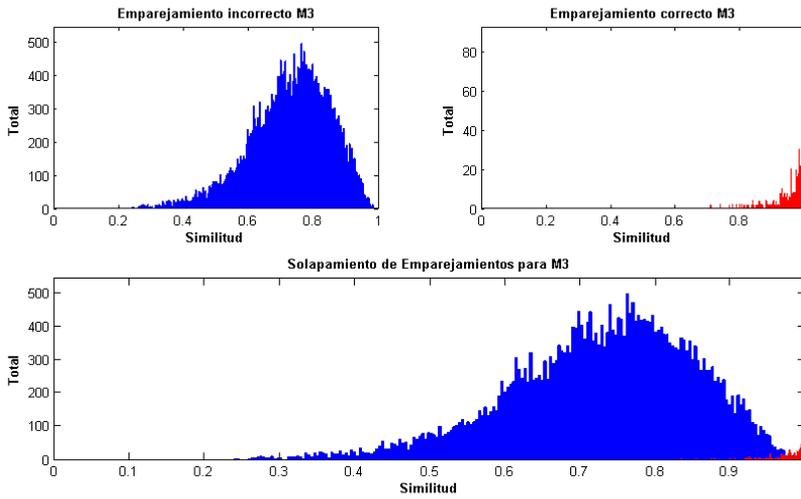


Figura 132. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_3$

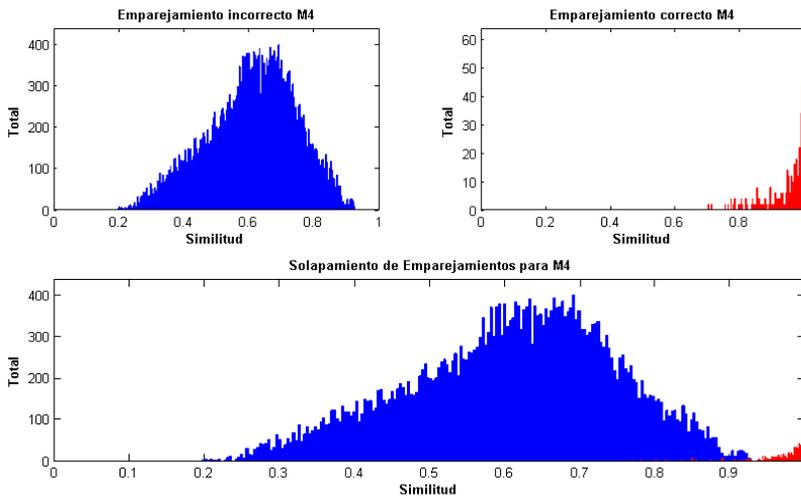


Figura 133. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_4$

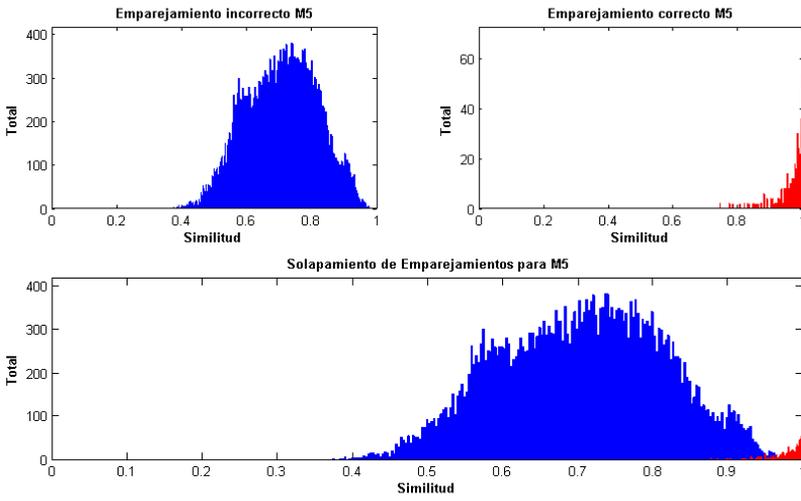


Figura 134. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_5$

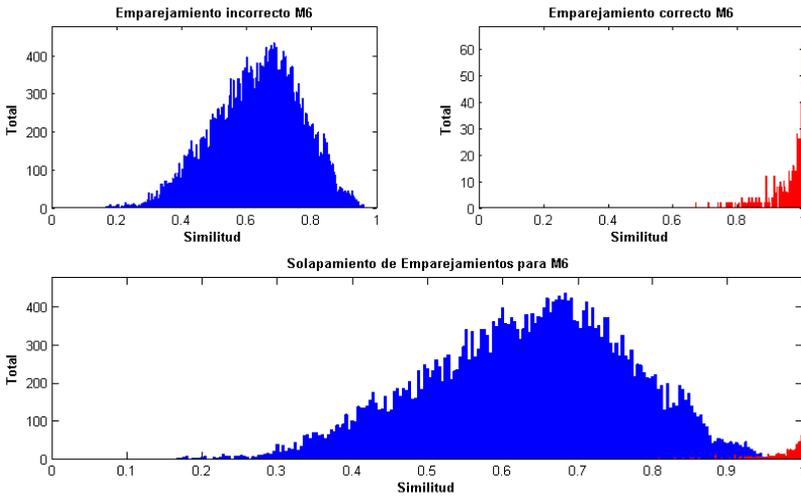


Figura 135. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_6$

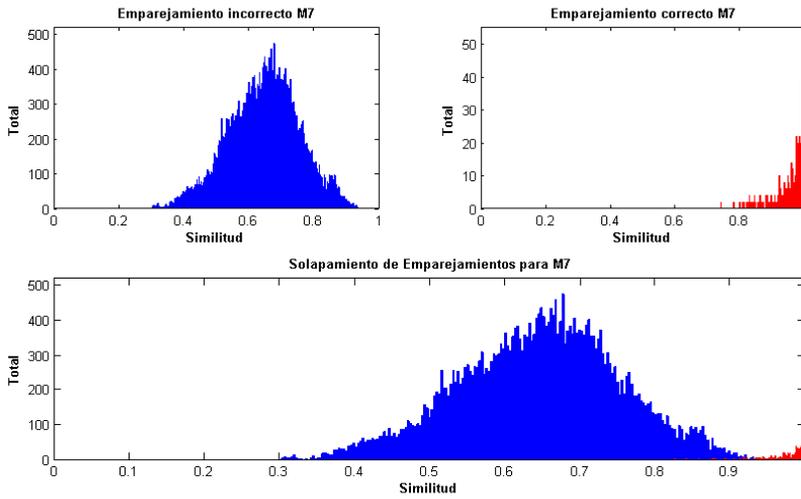


Figura 136. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_7$

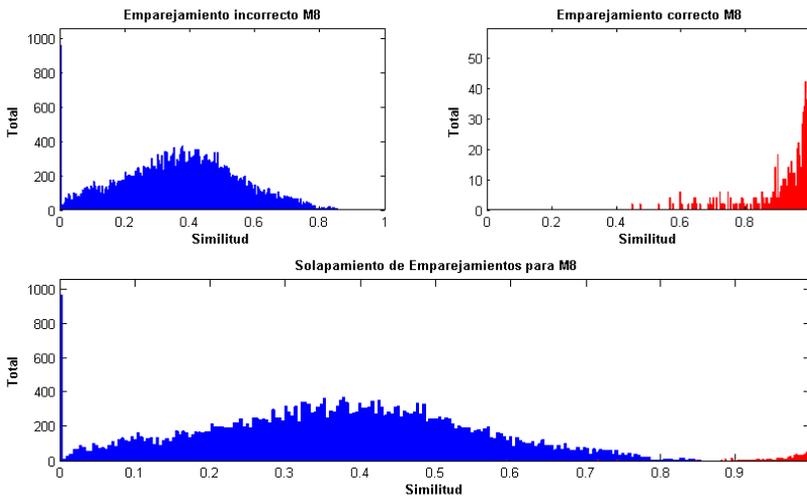


Figura 137. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_8$

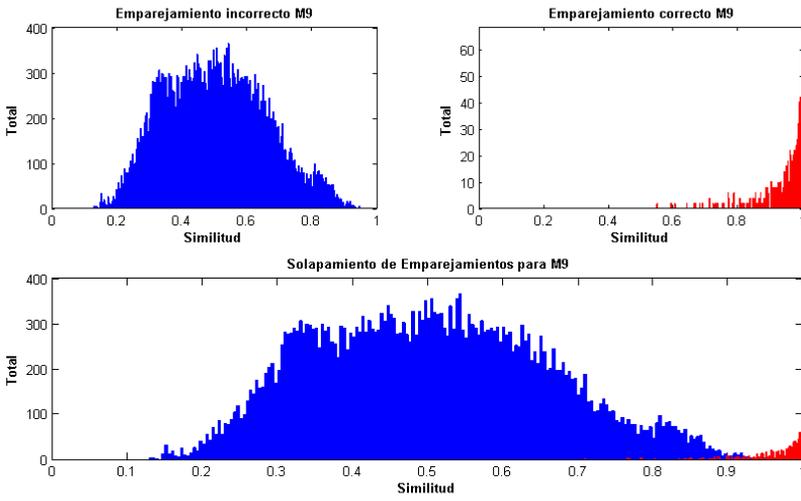


Figura 138. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_9$

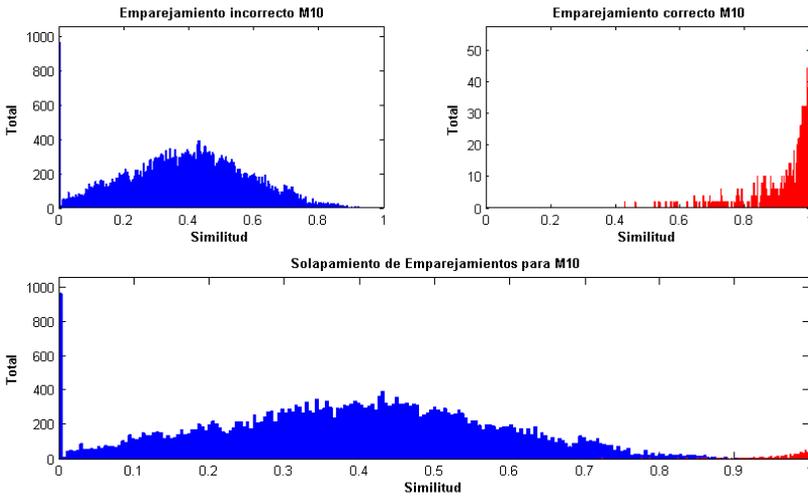


Figura 139. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_{10}$

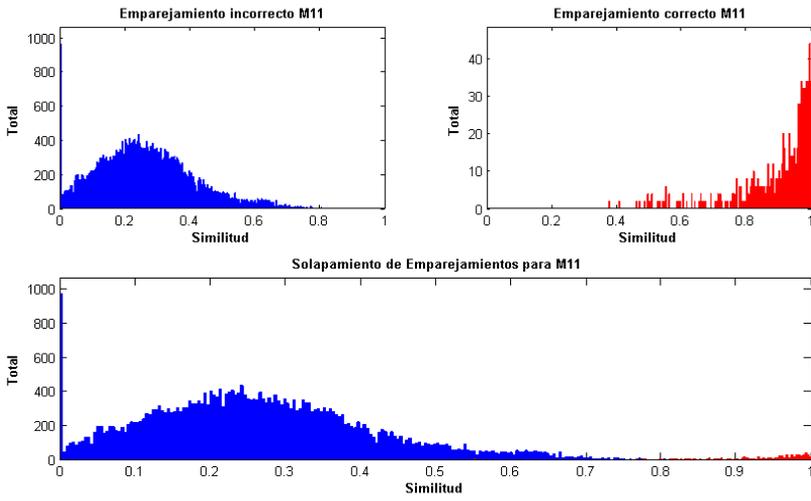


Figura 140. Histograma de los valores de similitud para la medida  $M_{11}$

## 10.4. Anexo IV. Datos de evolución de la cardinalidad de $Ep_{i,j}$ y $Ea_{i,j}$ por percentiles

En la Tabla 55 y Tabla 56 de este anexo se presentan los datos de la evolución de la cardinalidad de los conjuntos  $Ep_{i,j}$  y  $Ea_{i,j}$  para distintos percentiles.

<b>j</b>	<b><math>M_1</math></b>	<b><math>M_2</math></b>	<b><math>M_3</math></b>	<b><math>M_4</math></b>	<b><math>M_5</math></b>	<b><math>M_6</math></b>	<b><math>M_7</math></b>	<b><math>M_8</math></b>	<b><math>M_9</math></b>	<b><math>M_{10}</math></b>	<b><math>M_{11}</math></b>
<b>100</b>	254	620	452	144	324	314	166	144	324	314	168
<b>99</b>	70	290	186	84	94	120	70	84	94	124	74
<b>98</b>	44	218	146	70	72	86	56	70	72	88	58
<b>97</b>	36	192	116	54	62	80	44	58	62	80	52
<b>96</b>	28	168	98	42	50	64	34	48	50	64	38
<b>95</b>	22	150	96	40	42	56	24	40	42	58	28
<b>94</b>	22	136	86	32	32	50	20	38	32	52	22
<b>93</b>	16	126	72	32	28	38	14	32	28	44	20
<b>92</b>	16	108	68	22	26	34	8	24	26	36	10
<b>91</b>	16	98	64	20	24	32	8	22	24	34	8
<b>90</b>	14	96	58	16	22	26	8	22	22	26	6
<b>89</b>	10	90	54	12	18	24	4	12	18	26	4
<b>88</b>	10	82	54	8	18	24	2	12	18	24	4
<b>87</b>	8	82	52	8	16	22	2	10	16	22	4
<b>86</b>	8	80	46	6	16	20	2	8	14	22	4
<b>85</b>	8	76	40	6	14	18	2	6	14	22	4
<b>84</b>	8	74	34	4	14	16	2	6	12	20	4
<b>83</b>	8	72	34	4	10	14	2	6	10	14	2
<b>82</b>	8	66	30	4	10	10	2	6	10	14	2
<b>81</b>	6	62	30	4	10	10	2	4	10	12	2
<b>80</b>	6	58	30	4	10	10	0	4	10	10	2
<b>79</b>	4	54	22	4	8	10	0	4	8	10	2
<b>78</b>	4	52	22	4	8	8	0	4	8	10	0
<b>77</b>	2	52	22	4	8	6	0	4	8	8	0
<b>76</b>	2	50	20	4	8	4	0	4	8	6	0
<b>75</b>	2	48	18	4	8	4	0	4	8	6	0
<b>74</b>	2	46	16	2	8	4	0	4	8	4	0
<b>73</b>	2	44	16	2	6	4	0	4	8	4	0
<b>72</b>	2	44	14	0	6	4	0	4	6	4	0
<b>71</b>	2	36	14	0	6	4	0	2	6	4	0
<b>70</b>	2	36	14	0	2	4	0	2	4	4	0
<b>69</b>	2	34	12	0	2	4	0	2	2	4	0
<b>68</b>	2	30	10	0	2	2	0	2	2	4	0
<b>67</b>	2	28	10	0	2	2	0	2	2	4	0
<b>66</b>	0	22	10	0	2	2	0	0	2	4	0
<b>65</b>	0	20	10	0	2	2	0	0	2	4	0

64	0	20	8	0	2	2	0	0	2	4	0
63	0	20	8	0	2	2	0	0	2	4	0
62	0	16	8	0	2	2	0	0	2	2	0
61	0	14	8	0	2	2	0	0	0	2	0
60	0	14	6	0	0	2	0	0	0	2	0
59	0	10	6	0	0	2	0	0	0	2	0
58	0	10	6	0	0	2	0	0	0	2	0
57	0	8	6	0	0	2	0	0	0	2	0
56	0	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 55. Evolución del cardinal de  $Ep_{i,j}$  en función del percentil

j	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$	$M_{11}$
0	11174	20976	20346	9190	13180	14438	6476	11364	12992	14718	7114
1	4102	14280	11836	3862	6722	7142	2670	4654	6852	7664	2872
2	2110	12508	8284	3290	3412	4964	2176	3424	3470	5362	2420
3	1378	11098	6734	2458	2442	3094	1558	2490	2480	3284	1684
4	770	9680	5260	1970	1872	2430	1298	2196	1882	2532	1518
5	558	8584	4666	1254	1576	2188	866	1366	1568	2152	1054
6	474	6916	3568	960	1212	1690	658	1076	1230	1850	722
7	392	6074	2924	760	840	1320	390	902	890	1326	434
8	310	5294	2286	486	590	1072	292	550	592	1192	336
9	220	3976	2068	352	494	908	190	352	496	894	194
10	194	3466	1704	186	402	610	130	206	402	638	152
11	186	2754	1170	172	278	578	90	178	278	600	96
12	170	2624	1070	114	226	484	52	106	226	522	58
13	138	2470	924	68	182	324	42	76	178	344	46
14	130	2240	846	26	160	304	24	20	160	306	26
15	92	1978	742	6	138	256	22	8	138	268	22
16	60	1686	628	0	124	232	14	0	122	246	14
17	54	1558	574	0	92	172	10	0	92	178	10
18	44	1340	510	0	88	160	0	0	92	168	2
19	42	1134	416	0	80	138	0	0	80	134	0
20	34	1064	336	0	74	122	0	0	74	120	0
21	30	932	288	0	58	100	0	0	58	98	0
22	22	832	228	0	50	84	0	0	52	84	0
23	16	726	220	0	32	66	0	0	34	62	0
24	8	636	210	0	28	56	0	0	28	60	0
25	6	588	182	0	22	50	0	0	22	52	0
26	2	482	152	0	16	44	0	0	16	44	0

27	2	462	122	0	10	28	0	0	10	30	0
28	0	412	112	0	6	26	0	0	6	24	0
29	0	396	92	0	6	20	0	0	6	20	0
30	0	362	74	0	6	20	0	0	6	20	0
31	0	350	64	0	6	16	0	0	6	14	0
32	0	282	58	0	6	10	0	0	6	10	0
33	0	254	54	0	6	8	0	0	6	8	0
34	0	220	38	0	4	0	0	0	6	0	0
35	0	212	32	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	196	28	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	182	26	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	174	24	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	146	18	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	132	18	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	112	16	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	96	14	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	78	14	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	72	14	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	66	12	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	64	6	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	64	4	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	62	4	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 56. Evolución del cardinal de  $Ea_{i,j}$  en función del percentil



## 10.5. Anexo V. Señales para la creación del modelo magnético de un vehículo.



Figura 141. Señales obtenidas para la creación del modelo magnético de un vehículo.

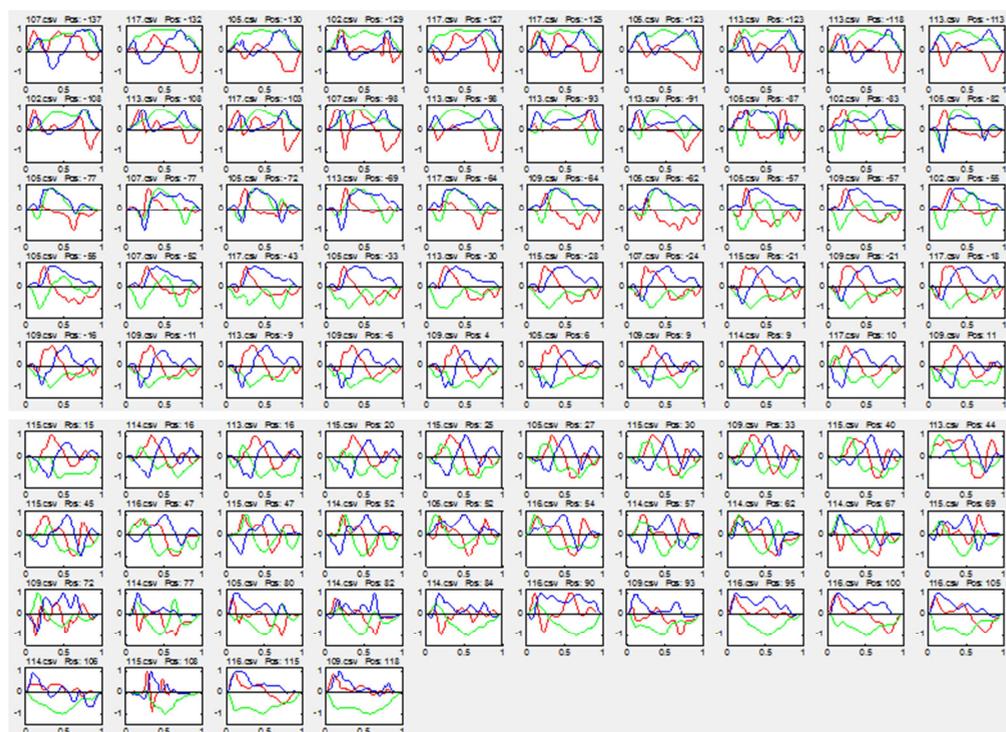


Figura 142. Señales definitivas y ordenadas por posición para la creación del modelo magnético de un vehículo.





## 10.7. Anexo VII. Datos técnicos del dispositivo sensor.

El dispositivo sensor está basado en la tarjeta PIC32 Ethernet Starter Kit (Figura 144). Esta tarjeta dispone de:

- RJ-45 Ethernet port.
- USB Type A (USB Host and OTG)
- USB connectivity for on-board debugger communications
- Microcontroller PIC32MX795F512L



Figura 144. Tarjeta MICROCHIP DM320004 PIC32 Ethernet Starter Kit

La tarjeta PIC32 Ethernet Starter Kit integra el microprocesador PIC32MX795F512L de 32-bit, basado en la arquitectura MIPS32® M4K®. Las propiedades más importantes de este microprocesador son:

- Frecuencia máxima del core: 80 MHz/105 DMIPS.
- Integra un módulo ADC:
  - 10-bit 1 Msps rate with one Sample and Hold (S&H)
  - 16 analog inputs
- 512 KB Flash
- 128 KB SRAM
- USB 2.0-compliant Full-Speed OTG controller
- 10/100 Mbps Ethernet MAC with MII and RMII interface
- Incluye 5 Timers:
  - Five 16-bit and up to two 32-bit Timers/Counters.

- Módulo CAN.
- 6 puertos UART (20 Mbps)
- 4 puertos SPI (25 Mbps)
- 5 puertos I2C (1 Mbaud)

Esta tarjeta permite la comunicación con la PCB que contiene el sensor HMC2003 y la conexión externa a través del puerto Ethernet. Para poder conectar la tarjeta PIC32 con la PCB es necesario utilizar una placa base que permita integrar ambos módulos. La tarjeta base donde se conectan la PIC32 Ethernet Starter Kit y la PCB con el sensor HMC2003 es la PIC32 I/O Expansion Board (Figura 145).

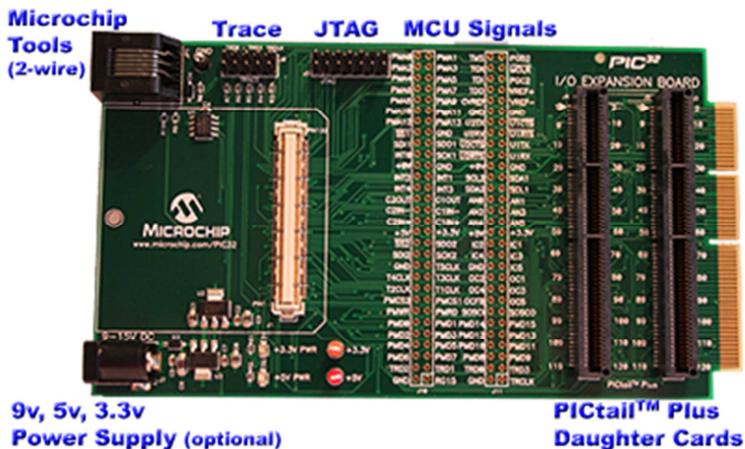


Figura 145. Tarjeta MICROCHIP DM320002 PIC32 I/O Expansion Board

La conexión de la tarjeta con el sensor magnético requiere 4 pines

- AN0, AN1 y AN2 son 3 entradas analógicas utilizadas para muestrear los 3 canales del sensor magnético a 1Khz por canal.
- Pin RD2. Produce un pulso de 50 milisegundos para cancelar el offset en el sensor cada 20 segundos.

## 10.8. Anexo VIII. Definición de la trama de red del sensor.

<b>ESTRUCTURA DE LA TRAMA</b>		
<b>DATO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>TAMAÑO</b>
CABECERA	Identificador de protocolo	1 byte
DIRECCIÓN DESTINO	Identificador del receptor	2 bytes
DIRECCIÓN ORIGEN	Identificador del dispositivo sensor	2 bytes
TAMAÑO	Tamaño de la trama	1 byte
GRUPO	Dato para caracterizar la trama	1 byte
TIPO	Dato para caracterizar la trama	1 byte
PREDECESOR	Identificador del paquete anterior	5 bytes
EJE	Identificador del eje	1 byte
SECUENCIA	Identificador de la secuencia en el paquete	2 bytes
DATOS	Datos capturados por el sensor en el eje	20 bytes
PREDECESOR	Identificador del paquete anterior	5 bytes
EJE	Identificador del eje	1 byte
SECUENCIA	Identificador de la secuencia en el paquete	2 bytes
DATOS	Datos capturados por el sensor en el eje	20 bytes
PREDECESOR	Identificador del paquete anterior	5 bytes
EJE	Identificador del eje	1 byte
SECUENCIA	Identificador de la secuencia en el paquete	2 bytes
DATOS	Datos capturados por el sensor en el eje	20 bytes
TIEMPO	Marca de referencia temporal	5 bytes

*Tabla 57. Descripción de la trama de comunicaciones del dispositivo sensor*

<b>TRAMA DE EJEMPLO</b>	
<b>INFORMACIÓN</b>	<b>BYTES (Hexadecimal)</b>
CABECERA	00 (1 byte)
DIRECCIÓN DESTINO	00 00 (2 bytes)
DIRECCIÓN ORIGEN	00 01 (2 bytes)
TAMAÑO	54 (1 byte)
GRUPO	00 (1 byte)
TIPO	93 (1 byte)
PREDECESOR	00 00 00 01 00 (5 bytes)
EJE	01 (1 byte) - Eje X
SECUENCIA	00 00 (2 bytes)
DATOS	00 6D – 00 58 – 00 53 – 00 50 – 00 4F – 00 4E – 00 4C – 00 4C – 00 4B – 00 4B (2 bytes por dato - 10 datos por eje (X))
PREDECESOR	00 00 00 00 01 00 (5 bytes)
EJE	02 (1 byte) – Eje Y
SECUENCIA	00 00 (2 bytes)
DATOS	00 51 – 00 4F – 00 4C – 00 4C – 00 4A – 00 49 – 00 48 – 00 47 – 00 47 – 00 47 (2 bytes - 10 datos por eje (Y))
PREDECESOR	00 00 00 01 00 (5 bytes)
EJE	03 (1 byte) – Eje Z
SECUENCIA	00 00 (2 bytes)
DATOS	00 4A – 00 47 – 00 44 – 00 43 – 00 40 – 00 40 – 00 3E – 00 3D – 00 3C – 00 3C (2 bytes por dato - 10 datos por eje (Z))
TIEMPO	0715 55 20 00 (Milisegundos 2 bytes - Segundos 1 byte - Minutos 1 byte - Horas 1 byte)

Tabla 58. Ejemplo de una trama de comunicaciones del dispositivo sensor

# 10.9. Anexo IX. Secuencias de paso de vehículos objetivo en el experimento final

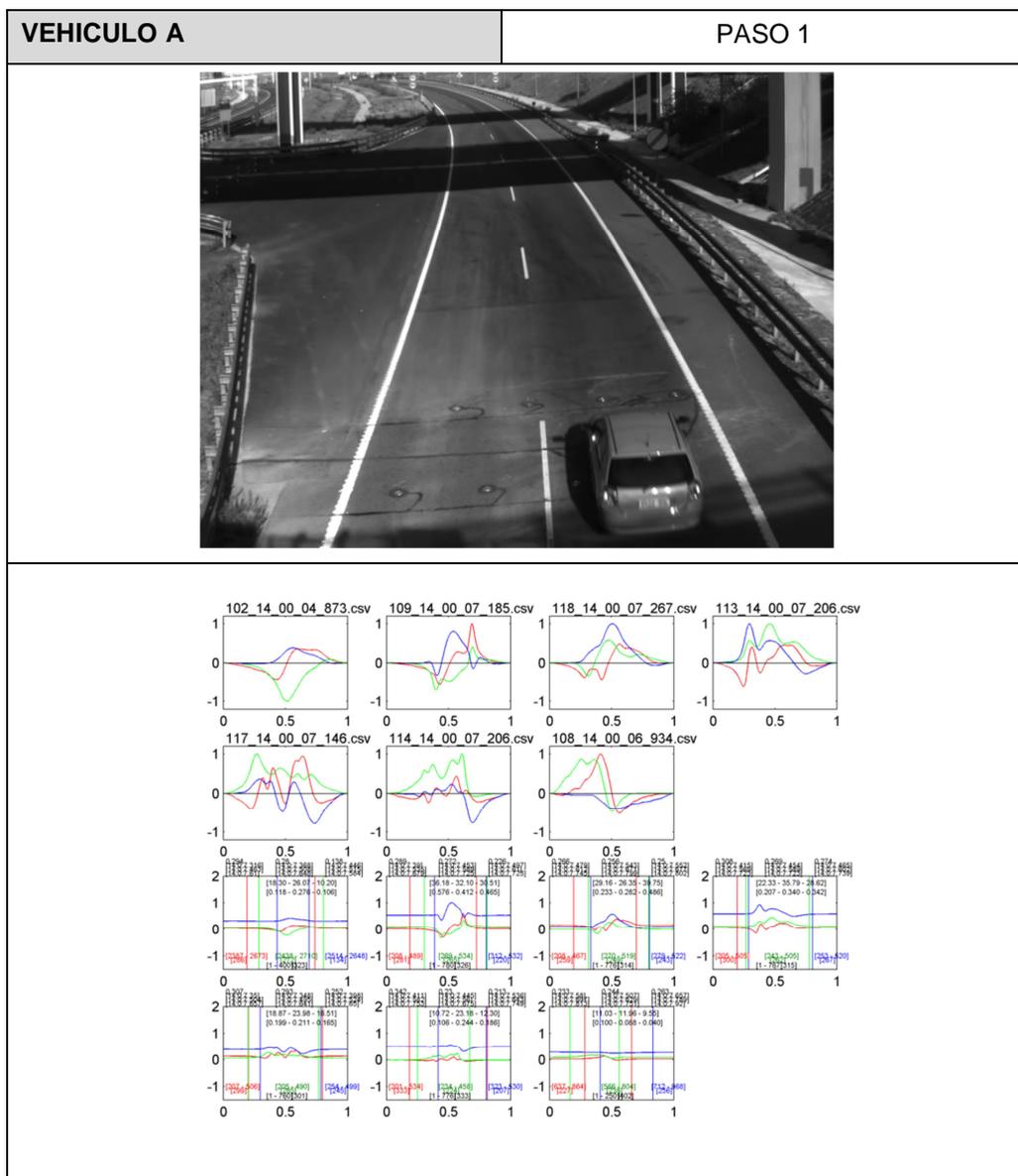


Tabla 59. Vehículo A. Paso 1.

VEHICULO A

PASO 2

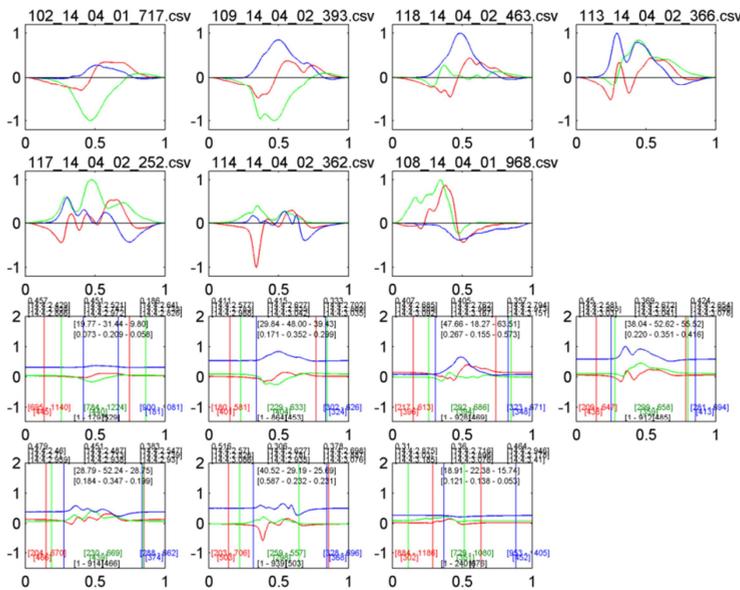


Tabla 60. Vehículo A. Paso 2.

VEHICULO A

PASO 3

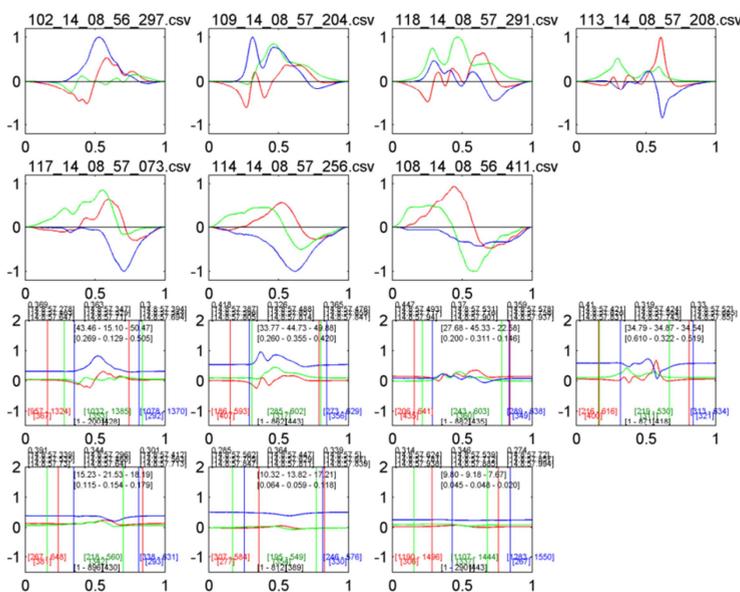


Tabla 61. Vehículo A. Paso 3.

VEHICULO A

PASO 4

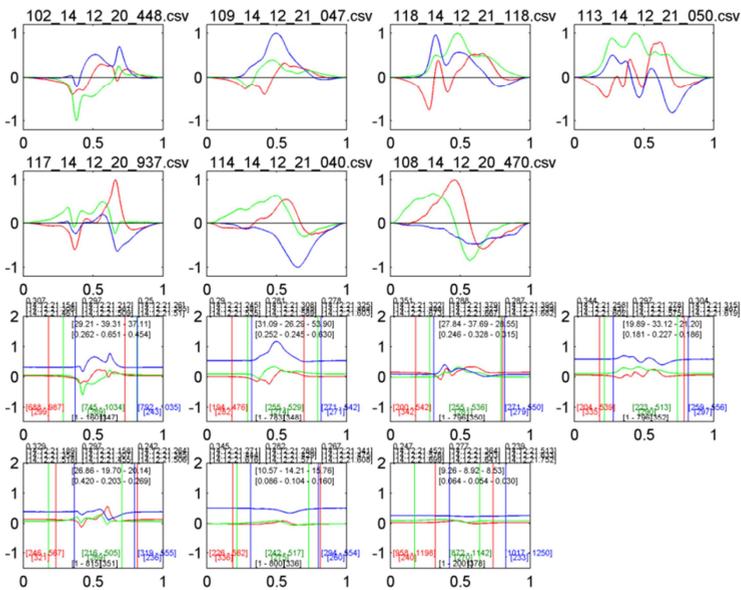


Tabla 62. Vehículo A. Paso 4.

VEHICULO A

PASO 5

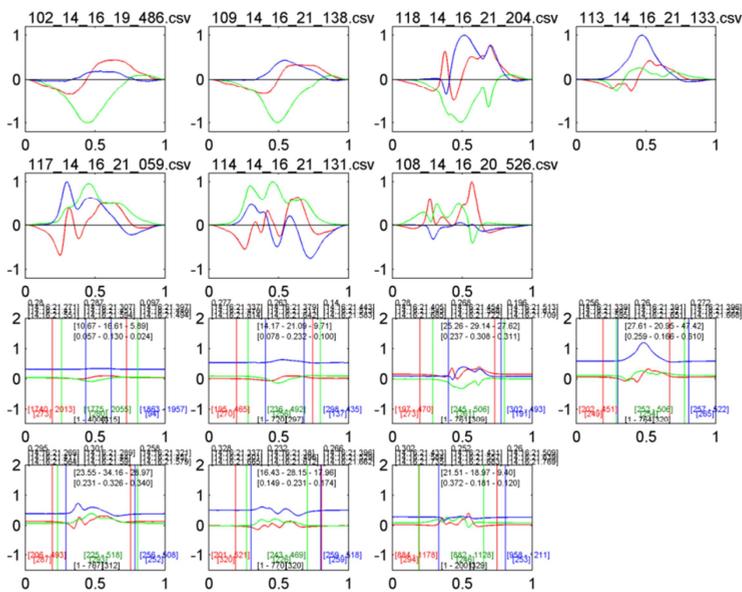


Tabla 63. Vehículo A. Paso 5.

VEHICULO A

PASO 6

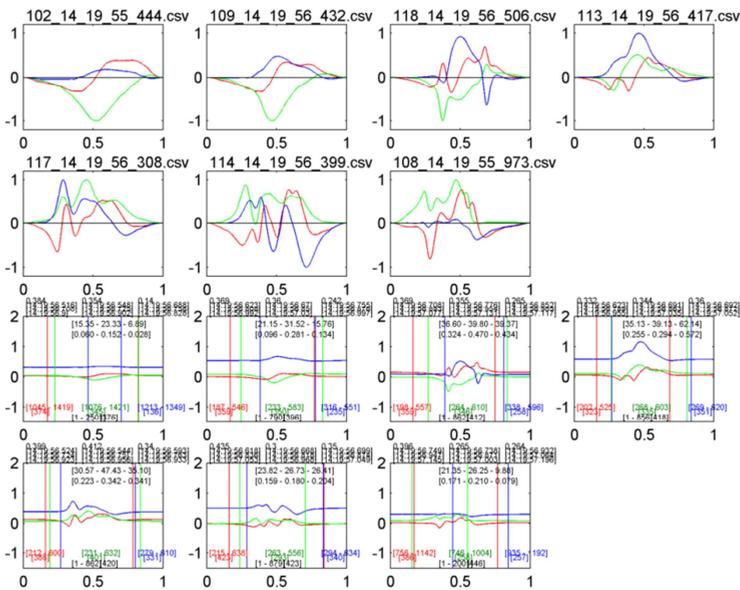


Tabla 64. Vehículo A. Paso 6.

VEHICULO A

PASO 7

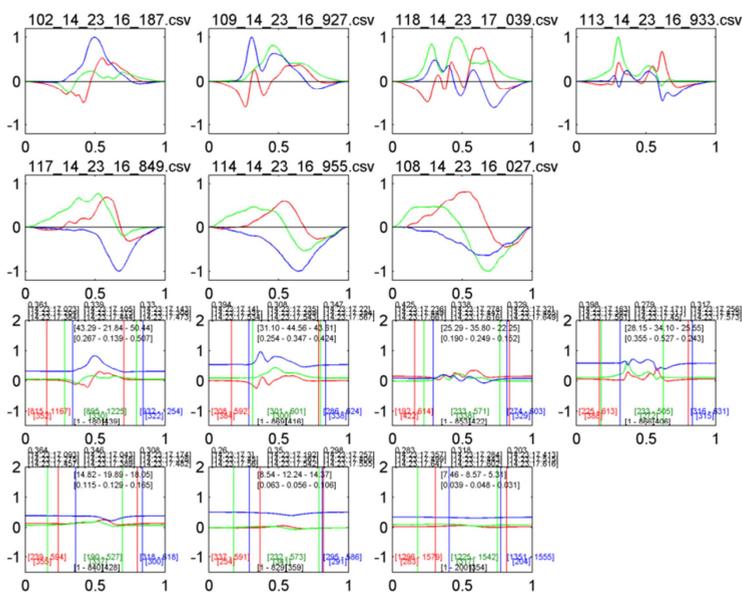


Tabla 65. Vehículo A. Paso 7.

VEHICULO A

PASO 8

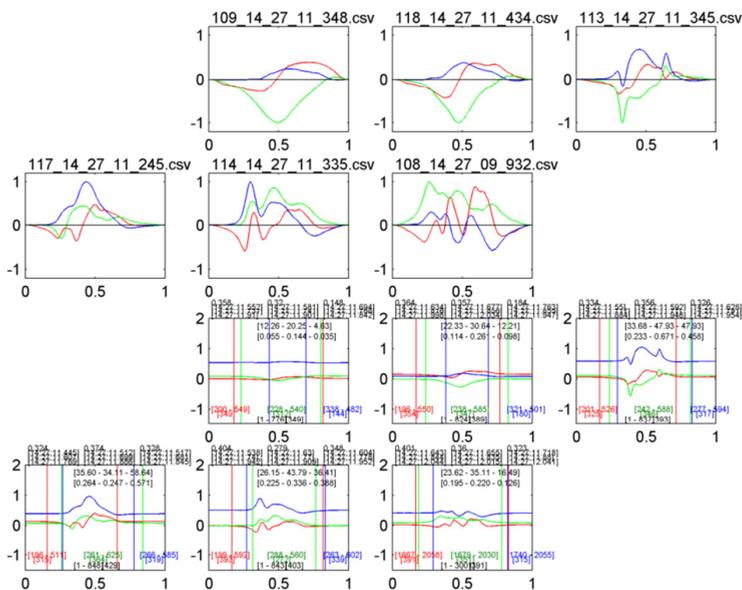


Tabla 66. Vehículo A. Paso 8.

VEHICULO A

PASO 9

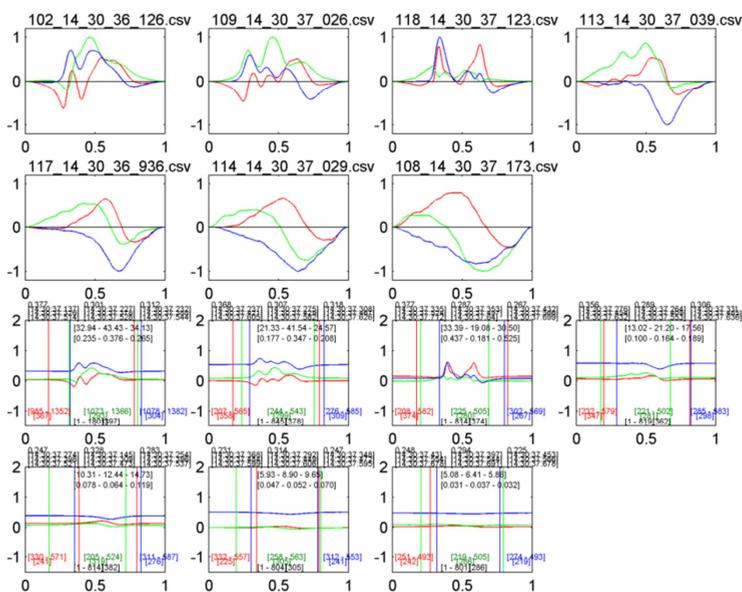


Tabla 67. Vehículo A. Paso 9.



VEHICULO B

PASO 1

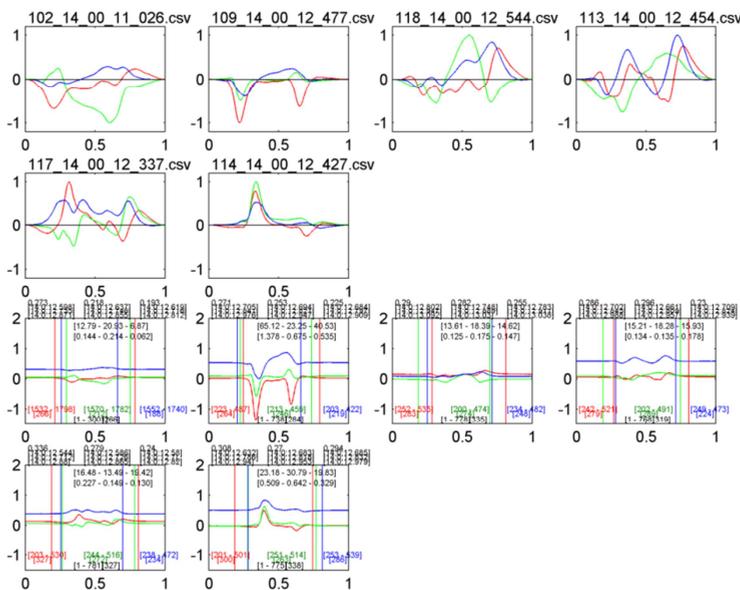


Tabla 69. Vehículo B. Paso 1.

VEHICULO B

PASO 2

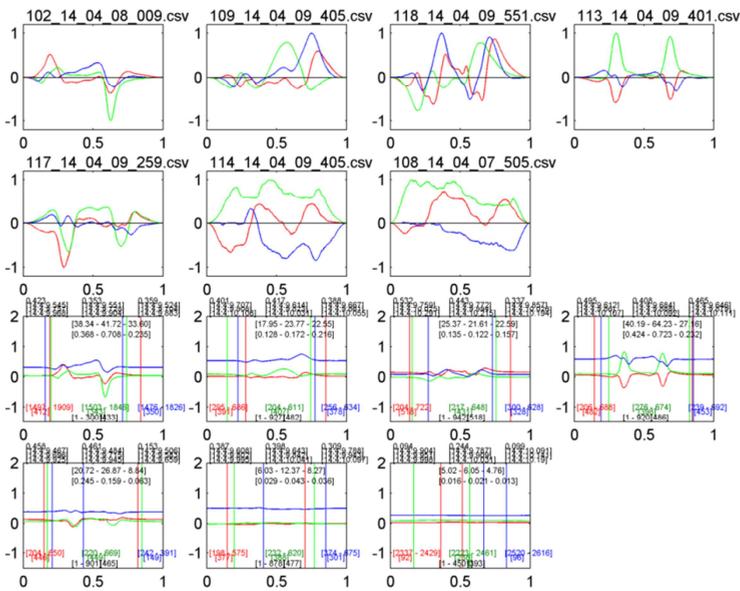


Tabla 70. Vehículo B. Paso 2.

VEHICULO B

PASO 3

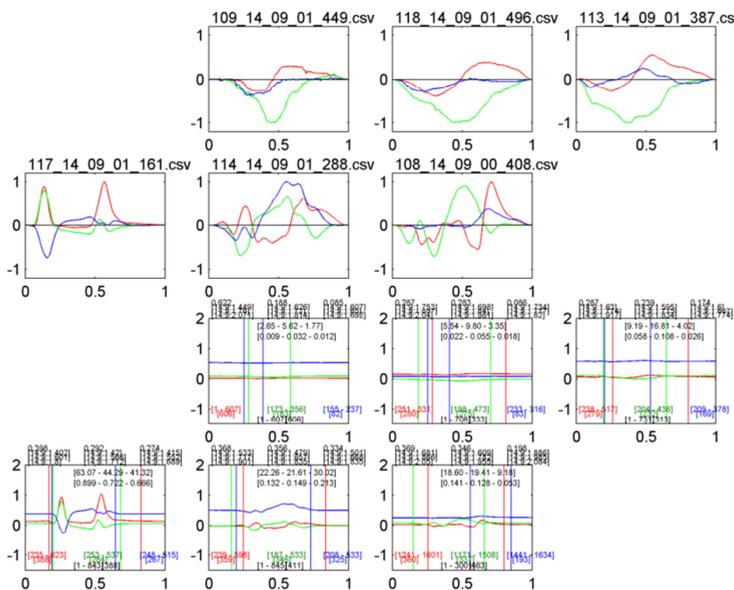


Tabla 71. Vehículo B. Paso 3.

VEHICULO B

PASO 4

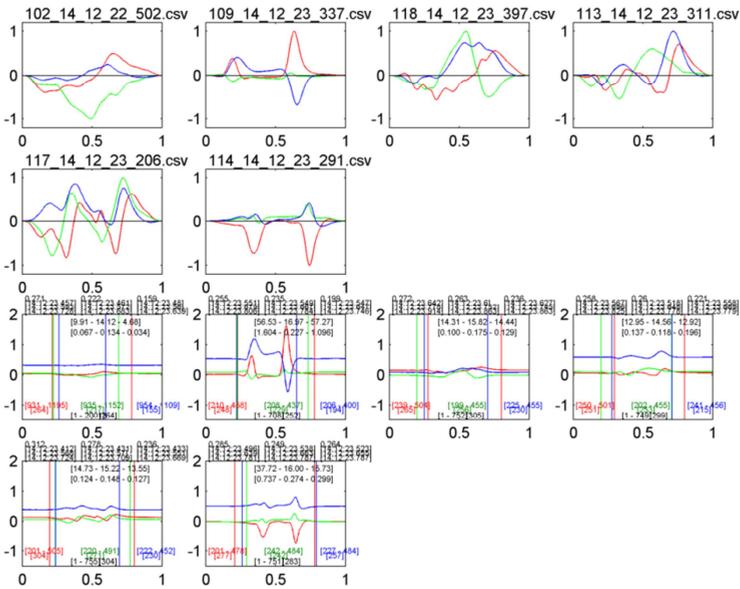


Tabla 72. Vehículo B. Paso 4.

VEHICULO B

PASO 5

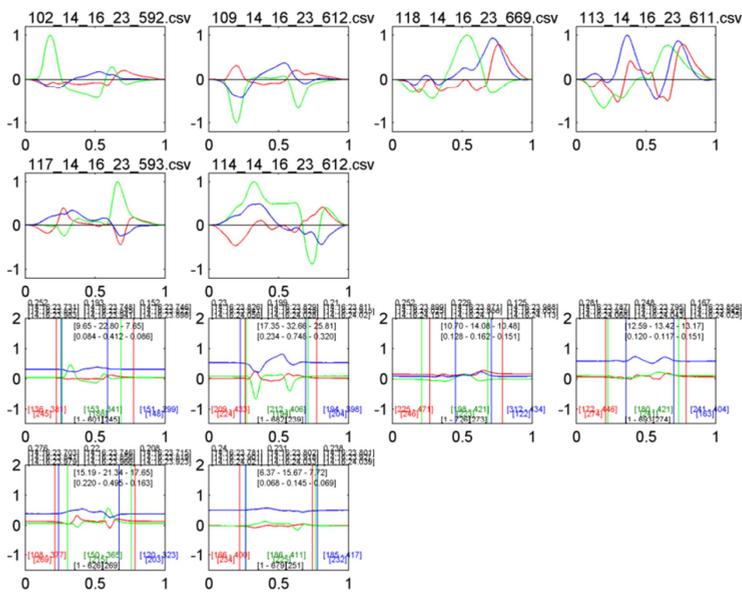


Tabla 73. Vehículo B. Paso 5.

VEHICULO B

PASO 6

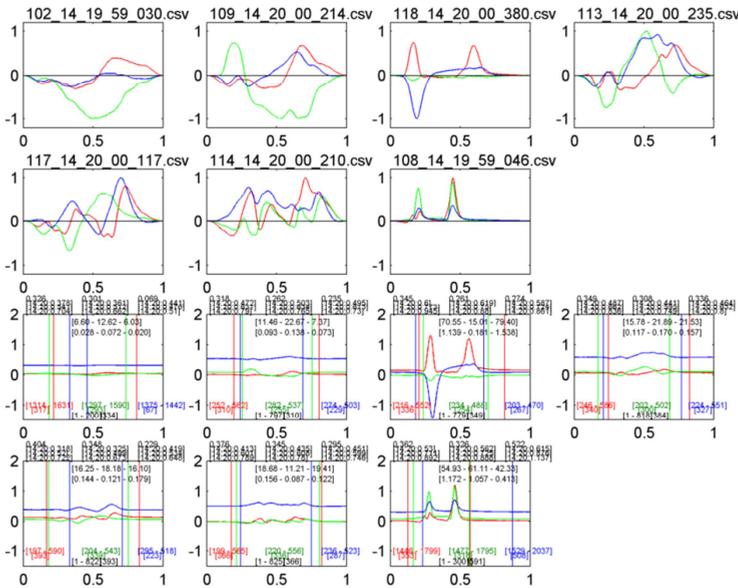


Tabla 74. Vehículo B. Paso 6.

VEHICULO B

PASO 7

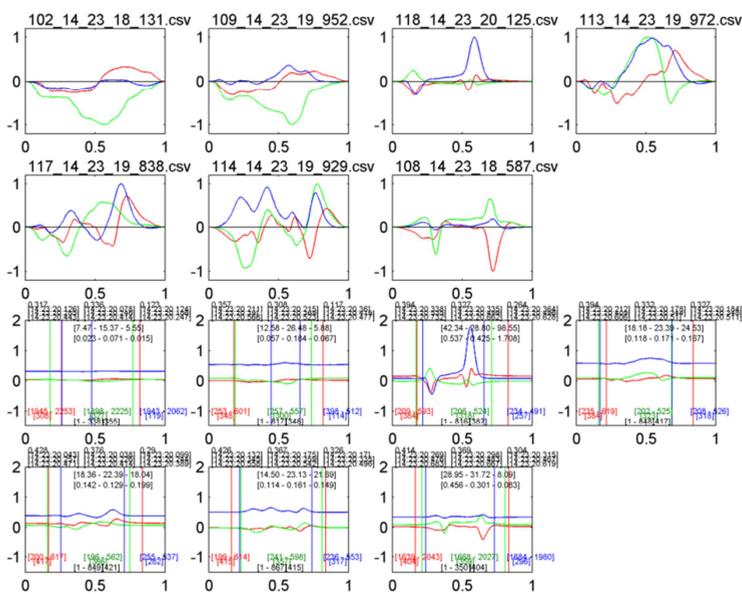


Tabla 75. Vehículo B. Paso 7.

VEHICULO B

PASO 8

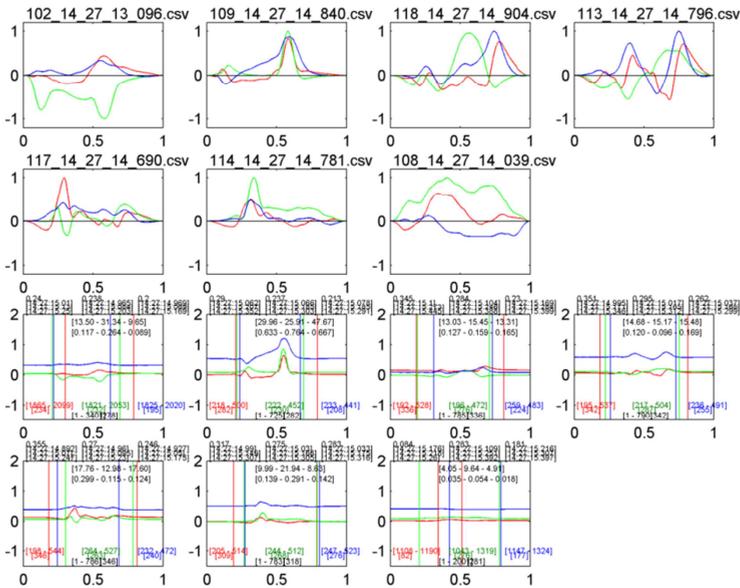


Tabla 76. Vehículo B. Paso 8.

VEHICULO B

PASO 9

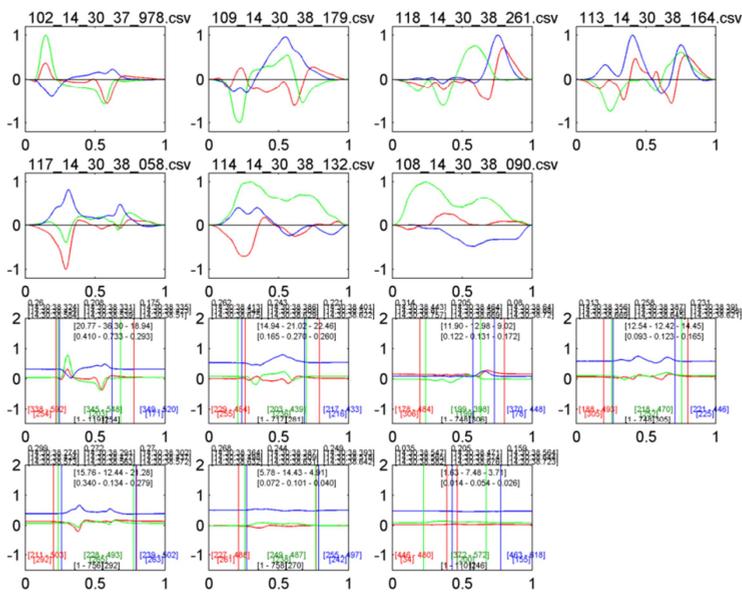


Tabla 77. Vehículo B. Paso 9.

VEHICULO B

PASO 10

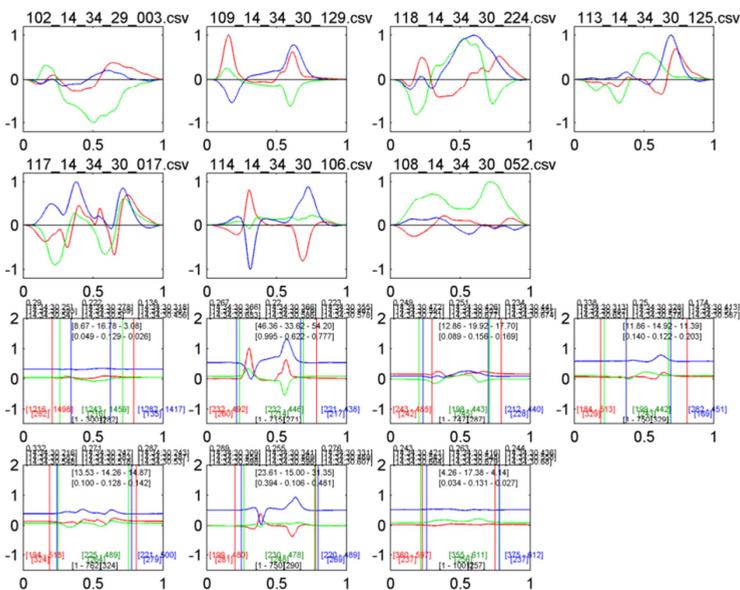


Tabla 78. Vehículo B. Paso 10.

# 10.10. Anexo X. Comparación de señales de vehículos de la misma marca y modelo

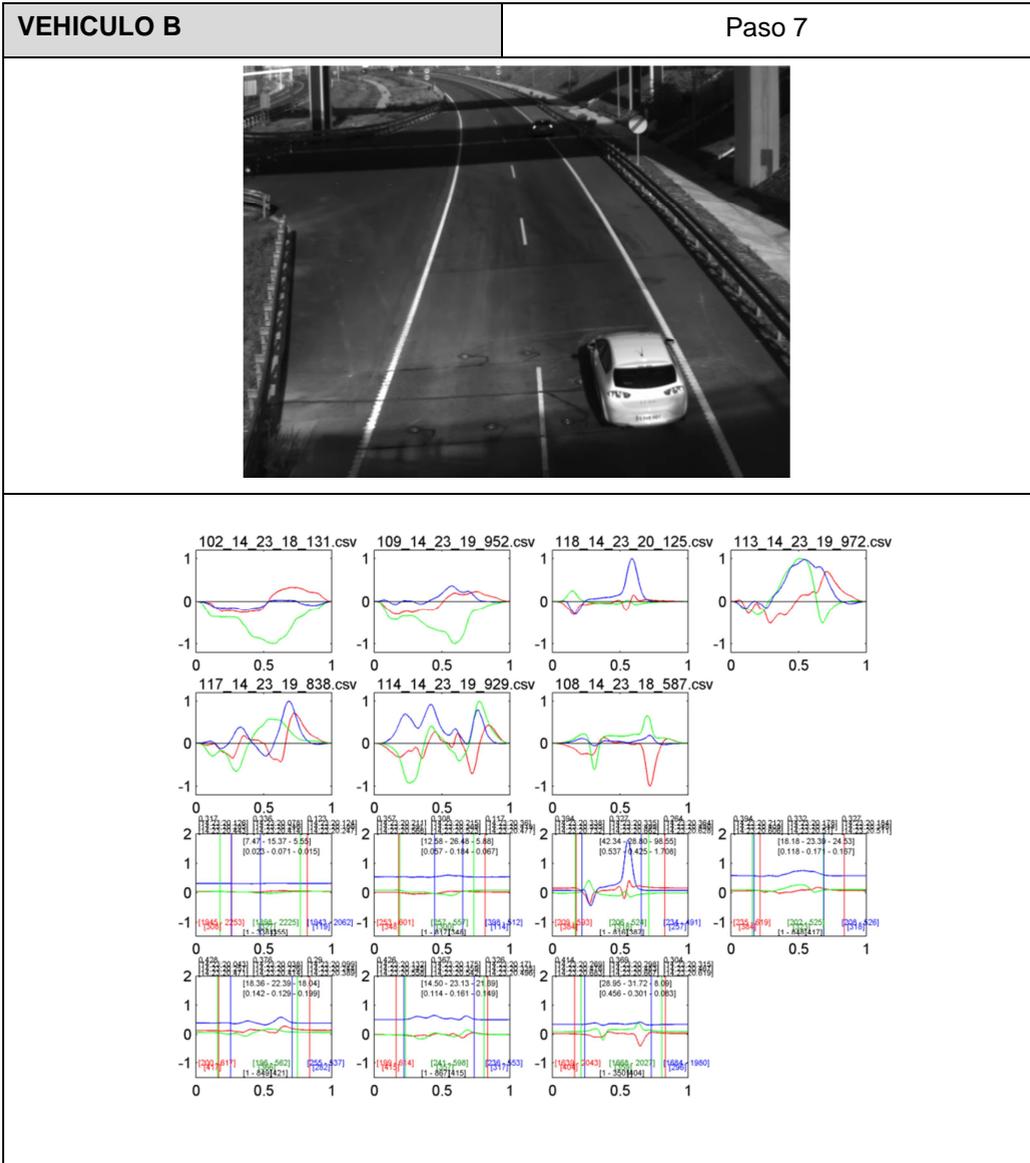


Tabla 79. Vehículo B. Paso 7.

VEHICULO INDETERMINADO

Falso Positivo

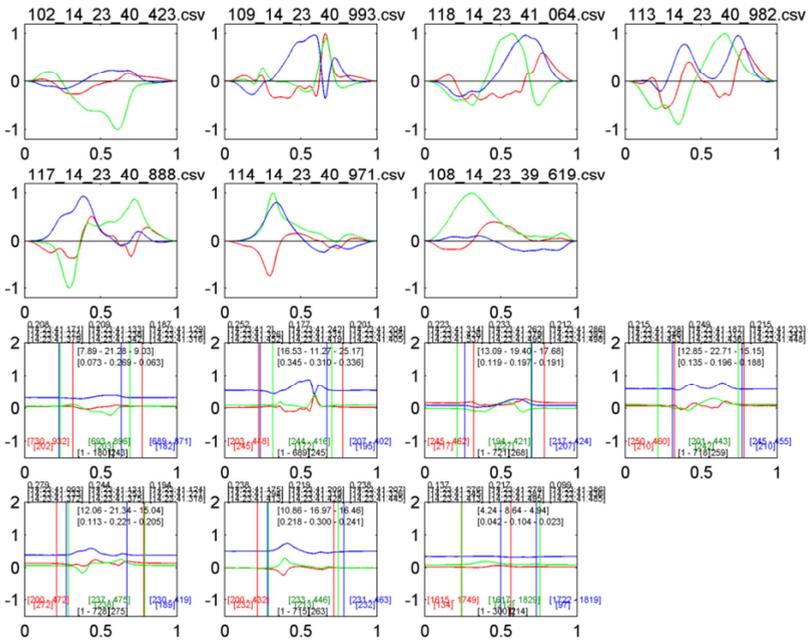


Tabla 80. Vehículo C. Paso 1.

