

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
Departamento de Electrónica



**SISTEMA DE CONTROL DE TRÁFICO PARA LA COEXISTENCIA ENTRE
VEHÍCULOS AUTÓNOMOS Y MANUALES MEDIANTE COMUNICACIONES
INALÁMBRICAS**

Autor

Vicente Milanés Montero

Directores

Carlos González Fernández-Vallejo
Centro de Automática y Robótica (CSIC-UPM)

Miguel Ángel Sotelo Vázquez
Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá

2010

TESIS DOCTORAL

Dedicado a

Charo, por estar ahí durante todos estos años y hacer que todo sea fácil a su lado. A mis padres, por convertirme en la persona que soy ahora. A mis hermanas, por todos los años vividos y porque siempre han sido el espejo en el que mirarme.

Agradecimientos

Al finalizar esta memoria que recoge el esfuerzo y trabajo de casi cuatro años, resulta inevitable echar la vista atrás con cierta nostalgia y recordar los momentos vividos durante su realización. Sería injusto atribuirme todo el mérito de la realización de este trabajo y espero que estas líneas recojan el sentimiento de agradecimiento hacia todas aquellas personas que han colaborado para llegar a este punto.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los directores de este trabajo, el Dr. Carlos González y el Dr. Miguel Ángel Sotelo. A Carlos, por su franca amistad, sus inagotables conocimientos sin los que este trabajo no se podría haber culminado y por esos días en La Rochelle. A Miguel Ángel, por su disposición en todo momento para la realización de esta tesis, haciendo que todo resultara más fácil.

A Tere y Ricardo, por haberme dado la oportunidad de trabajar en este grupo de investigación y por hacerme sentir tan cómodo durante estos años con un trato tan cercano.

Mi más sincero y profundo agradecimiento a todos los compañeros del grupo por esos duros días de frío en invierno y esas tardes de duro calor en verano en las pistas. A Joshué por los grandes momentos vividos en el plano personal en el Instituto, en Badajoz, en Tarragona, en Mallorca... y profesionalmente por haber estado siempre ahí dispuesto a ayudarme en lo que hiciera falta para que esta tesis saliera adelante. A Enrique por la semana de Versalles y su ayuda y paciencia en esos días enteros de pruebas para ajustar los controladores y poder realizar los experimentos. A Javi por su apoyo en mi llegada al grupo, a Roberto que siempre tiene las manos a la vista y dispuestas a echar esa mano fundamental en la cochera y a los Jorges recién llegados, que con su sencillez y disposición hacen que el trabajo resulte más fácil. No puedo olvidar incluir en estos agradecimientos a Eugenio que puso a mi disposición todos sus conocimientos sobre los vehículos y me guió en mis primeros pasos en el instituto y sin cuyos esfuerzos iniciales esta tesis no hubiese tenido un sólido y firme punto de partida.

Tampoco puedo olvidar a todos los miembros del IAI; a la gente del taller como Luis, Eugenio o Paco y, en especial a aquellos con los que he compartido el día a día, Nacho, Bego, Ángel, Lola, Rodolfo, Jesús, Agustín, Raúl, Jaime y tantos otros que con su compañía diaria hacen que el trabajo y los momentos difíciles sean más fáciles de llevar.

A Blas Vinagre, profesor de Universidad de Extremadura, por haberme guiado en mis comienzos no sólo como investigador sino iniciándome en los sistemas de control.

Al grupo Robesafe de la Universidad de Alcalá de Henares y en especial a David por su colaboración en el desarrollo de este trabajo sin cuya aportación no hubiera sido posible alcanzar los resultados en el sistema de evitación de atropellos.

A mis amigos, con los que he crecido y compartido toda mi vida en Badajoz; por el paso de la esponja a los cañones; de las tardes de fútbol en el Zurbarán al pabellón de la Universidad; de la Corchuela al Rincón de Manolo; gracias por esos momentos.

A todas estas personas y alguna más que me habré dejado en el camino que con su cariño y apoyo han contribuido a la realización de esta tesis doctoral, gracias.

This is my rule base. And if you don't like it, I have others.

(casi) *Groucho Marx*

Resumen

Los avances en el campo de los sistemas inteligentes de transporte (ITS, del inglés Intelligent Transportation Systems) en los últimos años han propiciado la aparición de sistemas que ayudan de manera significativa a los conductores facilitando su labor, relegándoles de tareas tediosas. No es demasiado utópico pensar en un futuro en vehículos completamente automatizados circulando por las carreteras. Sin embargo, se precisa de un sistema de transición desde los vehículos que actualmente circulan por las carreteras hasta los vehículos completamente automatizados y, por ende, la coexistencia entre ellos.

En el presente trabajo de tesis doctoral se presenta el diseño, desarrollo e implementación de un sistema global para el control del tráfico con vehículos guiados por conductores humanos o automáticos basado en comunicaciones inalámbricas con un doble objetivo: en primer lugar, disminuir de manera significativa la congestión actual del tráfico, fundamentalmente en entornos urbanos, y en segundo lugar, presentar un sistema seguro que permita pensar en una reducción del número de accidentes en las carreteras o, al menos, mitigar las consecuencias.

Para lograr los objetivos propuestos, se utilizarán diversas fuentes de información ya sean ubicadas en los vehículos -sistemas de navegación global por satélite (GNSS, del inglés Global Navigation Satellite System), sistemas inerciales (IMU, del inglés Inertial Measurement Unit) o cámaras- o en la infraestructura -unidades de control, sensores para detectar situaciones del tráfico.

La arquitectura presentada busca la escalabilidad para permitir de manera sencilla la inclusión de nuevos dispositivos que permitan mejorar las prestaciones. Para validar la solución propuesta, se presentan diferentes experimentos llevados a cabo con vehículos comerciales, algunos de ellos modificados para permitir el control automático de los mismos en la pista de pruebas del IAI-CSIC. Dichos experimentos incluyen situaciones habituales del tráfico como pueden ser la conducción en atascos, la gestión de preferencias en intersecciones sin señalización, la evasión de un peatón que se cruce en la carretera o la llegada a una curva peligrosa no señalizada. El sistema propuesto soluciona estas situaciones reales de tráfico de forma eficiente y segura.

Como principales aportaciones se destacan el sistema de control local del tráfico al que se le dota de inteligencia para optimizar las comunicaciones inalámbricas, las mejoras conseguidas sobre la arquitectura de control de los vehículos y la presentación de sistemas para el control de situaciones de tráfico en entornos desestructurados.

Abstract

The need to give solution to the current problems of the transport has caused the application of new technologies to this area, giving place to the field of the Intelligent Transport Systems (ITS). Focusing on the transport by road, these problems can qualify in two fundamental issues: the reduction of the traffic congestion and the increase of the safety of the vehicles.

The trend for the future is for there to be a step up from simple driving aids to automatic driving controls. One of the goals in the ITS field is to attempt to reduce the number of collisions, or at least to mitigate their consequences. Of the different solutions to these problems that have been proposed, the development of autonomous vehicles is today a particularly open field of research.

There exists a great variety of solutions and applications to solve the raised problems, but it is probably the end, that is, the automatic driving of vehicles where they all converge, in the short or in the long term. But before coming to this point, we must pass for the intermediate one: the coexistence among automated vehicles and those that are guided by human drivers.

Even so, this thesis presents an approximation of a system of management of traffic to allow the coexistence among automatic and manual vehicles. For it, two architectures have been defined: a general one for the management of the traffic and a local one for the control of the automatic vehicles depending on the above mentioned conditions of the traffic.

For the accomplishment of the experimental part one relies on four commercial vehicles, two of them automated, and an experimental private driving circuit for the prototypes in such a way that the algorithms of control - developed through fuzzy logic - and the proposed architecture they will be tested in a real environment to validate the proposed architecture

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	VII
Abstract	IX
Lista de Figuras	XIV
Lista de Tablas	XX
1. Introducción	1
1.1. Propósito	1
1.2. Origen y justificación	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Estructura de la memoria	5
1.5. Contribuciones	6
1.6. Difusión de los resultados	6
2. Estado del arte	9
2.1. Los sistemas de transporte por carretera	10
2.1.1. Situación actual	12
2.2. Sistemas comerciales	13
2.3. Revisión de los principales grupos de investigación	17
2.3.1. Grupos europeos	18
2.3.1.1. LaRA	18
2.3.1.2. Universidad de Bundeswehr	19
2.3.1.3. Centro de Investigación de FIAT	20
2.3.1.4. Programa AUTOPIA	21
2.3.1.5. INSIA	21
2.3.2. Grupos americanos	22

2.3.2.1.	NAVLAB	22
2.3.2.2.	Virginia Tech	23
2.3.2.3.	Tartan Racing Team	23
2.3.3.	Grupos asiáticos y australianos	25
2.3.3.1.	Ministerio de Transporte de Japón	25
2.3.3.2.	Universidad de Griffith	26
2.4.	Revisión de los principales proyectos de investigación	26
2.4.1.	Proyectos europeos	27
2.4.1.1.	CHAUFFEUR y CHAUFFEUR-2	27
2.4.1.2.	PROTECTOR, SAVE-U y WATH-OVER	27
2.4.1.3.	LACOS	28
2.4.1.4.	ALCOLOCK	28
2.4.1.5.	ROSETTA	28
2.4.1.6.	Safespot	29
2.4.1.7.	CVIS	29
2.4.1.8.	COOPERS	29
2.4.1.9.	PReVENT	30
2.4.1.10.	INTERSAFE 2	30
2.4.1.11.	Cybercars, Cybercars-2 y Cybercars-3	31
2.4.1.12.	Iniciativa e-Safety	31
2.4.1.13.	Consortio Car2Car	31
2.4.2.	Proyectos americanos	32
2.4.2.1.	PATH	32
2.4.2.2.	DARPA	33
3.	Arquitectura de control de tráfico	35
3.1.	Introducción	36
3.2.	Estructura general	37
3.2.1.	Requisitos de la arquitectura	38
3.2.2.	Especificación de la arquitectura de control	39
3.2.3.	Intercambio de información	40
3.3.	Implementación física	42
3.3.1.	Validación experimental	42
3.4.	Sistema local	45
4.	Sistema de control embarcado en el vehículo	47
4.1.	Arquitectura AUTOPIA	47

4.2.	Instrumentación del vehículo	49
4.2.1.	Nivel hardware	49
4.2.2.	Nivel software	51
4.3.	Etapa de percepción	53
4.3.1.	La Unidad de Medida Inercial (IMU)	54
4.3.1.1.	Especificaciones iniciales	55
4.3.2.	Diseño del sistema de posicionamiento	57
4.3.3.	Validación del sistema diseñado	61
4.4.	Etapa de planificación	68
4.4.1.	El copiloto	68
4.4.2.	El piloto	70
4.5.	Etapa de actuación	71
4.5.1.	Sistema de frenado electro-hidráulico	71
4.5.1.1.	Revisión bibliográfica	71
4.5.1.2.	Diseño del sistema de frenado	73
4.5.1.3.	Implementación del sistema de frenado	74
4.5.1.4.	Validación del sistema	76
4.5.1.5.	Inclusión en el sistema de control longitudinal	78
4.5.1.5.1.	Especificaciones previas	79
4.5.1.5.2.	Sistema de control basado en lógica borrosa	81
4.5.1.5.3.	Experimentos y validación del sistema en entorno real	84
4.6.	Conclusiones	85
5.	Resultados experimentales	89
5.1.	Conducción en atascos	90
5.1.1.	Revisión bibliográfica	90
5.1.2.	Sistema de control	91
5.1.3.	Experimentos	94
5.2.	Frenado de emergencia	98
5.2.1.	Revisión bibliográfica	99
5.2.2.	Sistema de control	100
5.2.3.	Activación del controlador	104
5.2.4.	Experimentos	106
5.3.	Control en cruces	110
5.3.1.	Revisión bibliográfica	110
5.3.2.	Sistema de detección de intersecciones	112
5.3.3.	Controlador diseñado	116

5.3.4. Experimentos	119
5.4. Evitación de peatones	123
5.4.1. Revisión bibliográfica	124
5.4.2. Consideraciones previas	126
5.4.3. Sistema de evasión	126
5.4.4. Fase de experimentación	130
5.5. Información desde la infraestructura	133
5.5.1. Revisión bibliográfica	133
5.5.2. Sensores Zigbee	135
5.5.3. Sistema implementado	136
5.5.4. Experimentación	138
5.5.4.1. Primer experimento: Curva peligrosa	139
5.5.4.2. Segundo experimento: Paso de peatones	141
5.5.4.3. Tercer experimento: Intersección de vehículos	142
6. Conclusiones y trabajos futuros	145
Bibliografía	149

Índice de figuras

1.1. Evolución de fallecidos en accidentes de tráfico dentro de EU-27.	2
1.2. Vehículo de transporte público adquirido por el Programa AUTOPIA.	4
2.1. Número de fallecidos en accidentes de tráfico desde el año 2000. (Fuente: DGT).	9
2.2. Sistemas propuestos para el desarrollo de los ITS por a) la comisión europea de transporte y b) el departamento de transporte de EE.UU.	13
2.3. Avances en los sistemas de ayuda al conductor en el sector comercial.	14
2.4. Vehículos del proyecto LaRA (La Route Automatisée) francés.	18
2.5. Volkswagen Touareg del proyecto MUCAR-3 perteneciente a la Universidad de Bundeswehr.	19
2.6. Vehículo FIAT adaptado para personas discapacitadas.	20
2.7. Flota de vehículos y pista de pruebas del programa AUTOPIA.	21
2.8. Imagen del Navlab 11.	23
2.9. Prototipo de la Universidad de Virginia.	24
2.10. Prototipo del Tartan Racing Team.	25
2.11. Nissan ASV-4 para la reducción de accidentes basado en comunicaciones vehículo-vehículo.	25
2.12. Vehículos eléctricos de la Universidad de Griffith realizando un experimento de seguimiento.	26
2.13. Demostración de la maniobra de platooning en el proyecto CHAUFFEUR-2.	27
2.14. Caravana de vehículos siguiendo a un vehículo guía en autopistas.	32
3.1. Principales estándares de comunicaciones inalámbricas.	37
3.2. Esquema general del sistema de control de tráfico propuesto.	38
3.3. Etapas de la arquitectura propuesta.	39
3.4. Relación entre los distintos niveles de la arquitectura propuesta.	40
3.5. Estructura de la trama de comunicaciones desde un vehículo o elemento de la infraestructura a la unidad central de control.	41

3.6. Estructura de la trama de comunicaciones desde la unidad central de control a un vehículo o a un dispositivo de la infraestructura.	41
3.7. Zona experimental y ubicación de las estaciones locales de control para validar la arquitectura propuesta.	42
3.8. Resultado experimental de la conmutación entre dos estaciones locales de control de un vehículo.	43
3.9. Resultado experimental de la conmutación entre dos estaciones locales de control durante la realización de un ACC.	44
4.1. Representación esquemática de la arquitectura AUTOPIA.	48
4.2. Equipamiento de Clavileño.	49
4.3. Diagrama de bloques del sistema de control AUTOPIA.	50
4.4. Citroën C3 Pluriel. Detalle de la ubicación del sistema de medida inercial y de la antena de recepción de la señal GPS.	58
4.5. Ángulos de partida determinados a través del GPS.	59
4.6. Diagrama de bloques de la etapa de percepción.	60
4.7. Uso de la IMU, el GPS o la fusión de ambos en función de la calidad de la señal GPS.	61
4.8. Recorrido seleccionado para la verificación del nuevo sistema de posicionamiento.	62
4.9. Calidad de la señal GPS para pérdidas de corta duración y repetitivas.	63
4.10. Desviación del vehículo respecto al centro de la carretera para el caso de pérdidas de corta duración y repetitivas.	63
4.11. Calidad de la señal GPS para pérdidas de larga duración.	64
4.12. Desviación del vehículo respecto al centro de la carretera para el caso de pérdidas de larga duración.	64
4.13. Velocidad y calidad de la señal GPS para el caso de fallos de corta duración.	65
4.14. Trayectoria realizada para el caso de pérdida de señal GPS durante cortos intervalos de tiempo mediante guiado automático.	65
4.15. Velocidad y calidad de la señal GPS para el caso de fallos de larga duración.	67
4.16. Trayectoria realizada para el caso de pérdida de señal GPS durante cortos intervalos de tiempo mediante guiado automático.	67
4.17. Diagrama de bloques del copiloto diseñado.	69
4.18. Esquema del sistema de frenos diseñado.	74
4.19. Ubicación de las válvulas selectoras.	75
4.20. Ubicación del sistema de frenado electro-hidráulico.	76
4.21. Test de frenado manual.	77
4.22. Test de frenado automático.	78

4.23. Relación entre la apertura de la válvula proporcional y la presión ejercida.	79
4.24. Resultados experimentales del comportamiento del acelerador con un conductor humano.	80
4.25. Resultados experimentales del comportamiento del freno automatizado con valores cercano a la aceleración de confort.	81
4.26. Diagrama de bloques del sistema implantado en Clavileño para el control longitudinal.	82
4.27. Funciones de pertenencia de las variables de entrada para el controlador borroso.	83
4.28. Superficie del controlador diseñado.	84
4.29. Resultados en simulación del comportamiento del sistema de control borroso.	85
4.30. Resultados en entorno real del sistema de control borroso diseñado para el vehículo prototipo.	86
5.1. Representación gráfica de las variables de entrada al controlador borroso para situaciones de atascos.	92
5.2. Funciones de pertenencia para las entradas al sistema. Distancia (a), velocidad del predecesor (b) y velocidad relativa (c).	93
5.3. Funciones de pertenencia para las variables de salida del sistema, acelerador y freno.	93
5.4. Velocidad de Clavileño y Platero durante tres maniobras consecutivas de arranque y parada a baja velocidad.	95
5.5. Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento en modo automático con arranque y parada.	96
5.6. Actuaciones normalizadas sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido realizado en el primer experimento del controlador para tráfico congestionado.	96
5.7. Velocidad de Clavileño y Platero durante una maniobra de seguimiento a baja velocidad.	97
5.8. Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento en modo automático a baja velocidad.	97
5.9. Actuaciones normalizadas sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido realizado en el segundo experimento del controlador para tráfico congestionado.	98
5.10. Relación entre la velocidad y la distancia de frenado en función de la tensión aplicada a la proporcional.	101
5.11. Superficie de control obtenida para el sistema de frenada de emergencia.	102
5.12. Resultados experimentales de una frenada de emergencia para una velocidad inicial de 30 km/h..	102

5.13. Resultados experimentales de una frenada de emergencia para una velocidad inicial de 40 km/h.	103
5.14. Experimento de ACC con frenada de emergencia.	105
5.15. Experimento con el sistema de emergencia con un único ocupante en el vehículo y el GPS funcionando con la máxima precisión.	107
5.16. Experimento con el sistema de emergencia con un único ocupante en el vehículo y sin señal GPS, realizando el posicionamiento con el sistema basado en la IMU.	108
5.17. Experimento con el sistema de emergencia con cinco ocupantes en el vehículo y el GPS funcionando con la máxima precisión.	109
5.18. Representación de las posibles posiciones de los vehículos cerca de una intersección.	113
5.19. Representación geométrica de los vectores para la activación del control de intersección.	115
5.20. Comportamiento del sistema de detección de peligro en una intersección.	116
5.21. Definición de las funciones de pertenencia de las variables de entrada al controlador borroso.	117
5.22. Funciones de pertenencia de las variables de salida.	118
5.23. Posición de Clavileño y Platero durante el primer experimento.	120
5.24. Velocidades de cada vehículo y salida del controlador borroso para el primer experimento.	120
5.25. Posición de Clavileño y Platero durante el segundo experimento.	122
5.26. Velocidades de cada vehículo y salida del controlador borroso para el segundo experimento.	122
5.27. Representación gráfica de las variables de entrada al controlador borroso para la maniobra de evasión.	127
5.28. Funciones de pertenencia de las variables de entrada al controlador borroso para evasión de peatones.	127
5.29. Funciones de pertenencia de la variable de salida del controlador borroso para evasión de peatones definidas como singletons de Sugeno.	128
5.30. Superficie de control del controlador de dirección borroso diseñado para la maniobra de evasión de peatones.	129
5.31. Velocidad del vehículo durante cada uno de los experimentos de la maniobra de evasión.	130
5.32. Resultados de la maniobra automática de evasión a diferentes velocidades.	131
5.33. Trayectorias de todas las maniobras de evasión a distintas velocidades en coordenadas UTM.	132
5.34. Valor medio del TTC, distancia longitudinal (m) y distancia lateral coche-peatón al inicio de la maniobra automática de evasión.	132

5.35. Tamaño de los sensores utilizados en la infraestructura. 136

5.36. Recepción de la información sensorial colocada en la infraestructura. 138

5.37. Representación en coordenadas UTM de la maniobra de curva peligrosa. Las aspas marcan las posiciones de los sensores Zigbee y el color gris el tramo considerado de riesgo. 139

5.38. Velocidad de referencia y real del vehículo, salida de los sensores de luz Zigbee, Salida normalizada del controlador longitudinal. 140

5.39. Maniobra del paso de peatones en coordenadas UTM. Las aspas indican el momento en el que detecta que un peatón está pasando y hace disminuir su velocidad hasta detenerse. 141

5.40. Velocidad real y de referencia, salida del sensor zigbee ubicado en el paso de peatones y salida del controlador longitudinal para un paso de peatones. 142

5.41. Coordenadas UTM del movimiento de ambos vehículos en la aproximación a la intersección. Las marcas azules indican la ubicación de los sensores Zigbee y las aspas rojas el tiempo en el que el vehículo manual se encuentra entre ellas y por tanto el vehículo automático disminuye su velocidad. 143

5.42. Velocidad del vehículo automático y manual, salidas de los dos sensores Zigbee ubicados en la infraestructura y salida del controlador borroso. 144

Índice de tablas

4.1. Formato del paquete de datos de la IMU.	56
4.2. Valores del offset para los ejes Y,Z.	57
4.3. Valores de la sensibilidad para los ejes Y,Z.	57
4.4. Cálculo para la inicialización de los ángulos	58
4.5. Parámetros del filtro de Fourier para la aceleración angular.	60
5.1. Reglas borrosas para la maniobra de conducción en atascos.	94
5.2. Distancia de Clavileño al punto de frenada.	104
5.3. Reglas borrosas para la maniobra de intersecciones.	119
5.4. Reglas borrosas para la maniobra de evasión.	129
5.5. Resumen del tiempo de colisión, velocidad media y desplazamiento lateral para los experimentos realizados en la maniobra de evasión.	133
5.6. Características de dispositivos Zigbee comerciales	136

Capítulo 1

Introducción

La aparición de los vehículos autónomos en el mercado ha pasado de ser una utopía a convertirse en una posibilidad real a medio plazo. La fuerte inversión realizada por las industrias del sector del automóvil ha propiciado la aparición de diversas ayudas al conductor eximiéndole de tareas como el manejo del acelerador y freno en autopistas o el aparcamiento en circulación urbana que hace pocos años se consideraban impensables.

A pesar de estas significativas mejoras, queda un largo camino por recorrer hasta encontrar vehículos completamente autónomos en el mercado, fundamentalmente porque dichos vehículos deberían coexistir con los vehículos que actualmente se encuentran en circulación. En este sentido se orienta el tema de esta tesis doctoral: una arquitectura para la coexistencia entre los vehículos autónomos y los vehículos que actualmente se encuentran en el mercado.

El trabajo presentado se encuadra dentro del Programa AUTOPIA perteneciente al Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAI-CSIC) que engloba varios proyectos dedicados a la investigación en el campo de los vehículos autónomos partiendo de los conocimientos del grupo en robótica móvil. La filosofía del grupo se orienta al empleo de técnicas de inteligencia artificial -lógica borrosa principalmente- para llevar a cabo el control de los vehículos con la mínima intrusión en los mismos.

1.1. Propósito

A principios de siglo se impulsó desde la Comisión de Transporte de la Unión Europea [ECT 01] una nueva política en el campo del transporte con el objetivo claro de reducir en un 50 % el número de accidentes de tráfico para el año 2010. En los últimos datos presentados por CARE (Community database on Accidents on the Roads in Europe) en junio de 2009 se refleja la buena dirección en este sentido con una sustancial disminución en el número de fallecidos en las carreteras (Fig. 1.1). A pesar de que estos objetivos se están cumpliendo, se sigue pensando que no es suficiente y se buscan formas para continuar mejorando estos resultados con la previsión

para 2010 de un nuevo documento que provoque un nuevo impulso en la política en materia de seguridad vial para la próxima década. Desde el punto de vista empresarial, los fabricantes de vehículos también se han volcado en la incorporación de sistemas de seguridad, tanto activa como pasiva, a sus modelos comerciales. Igualmente, han apostado de manera decidida por las líneas de investigación relacionadas con este campo y, prueba de ello, son los acuerdos existentes entre centros de investigación y empresas para la transferencia de tecnológica.

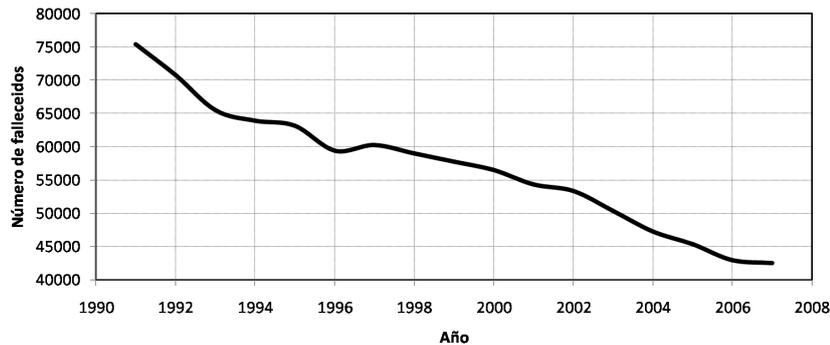


Figura 1.1: Evolución de fallecidos en accidentes de tráfico dentro de EU-27.

El aumento de la seguridad en los nuevos modelos de vehículos comerciales ha contribuido decisivamente a los resultados cosechados en los últimos años; sin embargo, nos encontramos con dos principales problemas a la hora de mejorar los resultados obtenidos. Por un lado, la saturación de las vías de circulación, cada vez más congestionadas en las inmediaciones de las grandes ciudades donde la posibilidad de incrementar el número de carreteras presenta una dificultad añadida por los problemas de espacio para la construcción de las mismas. Por otro lado, la dependencia del conductor humano. A pesar de las ayudas a la conducción ya implementadas, la última palabra a la hora de tomar una decisión sigue siendo del conductor humano que a través de su experiencia en la conducción y la predicción del comportamiento de los vehículos de su entorno, toma decisiones que pueden no ser correctas.

Desde la comunidad científica se han realizado numerosos y considerables esfuerzos para automatizar los sistemas de transporte citando como más relevantes los pilotos automáticos de aviones y metros. Sin embargo, las aplicaciones relativas al transporte por carretera, fundamentalmente en entornos urbanos, exigen la consideración de multitud de variables para un buen manejo de un entorno no estructurado, constituyendo un campo en plena expansión y de gran relevancia.

El trabajo presentado en esta tesis doctoral pretende aportar una solución objetiva y realista a los problemas del tráfico actual implementando una arquitectura de control para la mejora de los sistemas de transporte por carretera. Con objeto de validar la solución propuesta, se usarán vehículos comerciales reales -automáticos y guiados por conductores humanos- en la

fase experimental.

1.2. Origen y justificación

El Programa AUTOPIA pretende transferir las técnicas desarrolladas para el control de robots autónomos al control de vehículos, modificando en la menor medida posible el entorno en que éstos han de evolucionar. Se han realizado inicialmente experimentos simples que muestran los resultados obtenidos y se ha creado la infraestructura que permita llegar a hacer cada vez unas maniobras más sofisticadas.

AUTOPIA tiene dos objetivos esenciales. El primero, implementar una conducción automática de vehículos comerciales sobre carreteras reales. Aunque este objetivo se puede considerar utópico en este momento, es un punto de partida importante para explorar el futuro. El segundo objetivo es el desarrollo de un sistema de guiado automático formado por componentes modulares que pueda incorporarse de manera sencilla en la industria del automóvil.

Esta modularidad en el diseño de los sistemas implantados en el vehículo, ha permitido la inclusión de nuevos elementos de control de forma intuitiva. Así, se han desarrollado sistemas de adelantamiento con vehículos automáticos o sistemas ACC (Adaptive Cruise Control) en condiciones de circulación. Dichos sistemas, han sido validados mediante demostraciones públicas en Satory (2002) y Madrid (2003), gracias a dos furgonetas Citroën Berlingo totalmente automatizadas. Además, la flota de vehículos del grupo cuenta con dos vehículos más: un Citroën C3 Pluriel a cuya automatización se han sumado las aportaciones del doctorando, y un Citroën C3 que no está automatizado.

Este programa de investigación, iniciado en 1996, se ha apoyado en la financiación de diversos proyectos para alcanzar los objetivos propuestos. Entre los más relevantes, cabe destacar:

ORBEX Ordenador Borroso Experimental. Financiado por la CICYT, se definió e implementó la estructura de un computador borroso experimental que se emplea en la actualidad para dar soporte al sistema de navegación autónoma de los vehículos.

ZOCO proyecto igualmente financiado por la CICYT y que permitió la construcción de la pista de experimentación en la cual se ha llevado a cabo las pruebas del presente trabajo.

COVAN y **GLOBO** financiados el primero de ellos por la Comunidad Autónoma de Madrid y el segundo por la CICYT, sirvieron para comprar e instrumentar dos furgonetas Berlingo eléctricas con las que se llevaron a cabo los primeros experimentos de conducción autónoma tanto en maniobras individuales como en conducción cooperativa [Alcalde 00].

ISAAC e **ISAAC-2** financiados ambos por el extinto ministerio de Ciencia y Tecnología, donde en colaboración con grupos de la Universidad de Alcalá de Henares, la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad de Extremadura, se intentaba desarrollar sistemas de

reconocimiento del entorno buscando el guiado automático de los vehículos mediante diferentes técnicas de control. Los estudios fueron validados mediante diversos experimentos que usaban la información sensorial disponible para reconocer el entorno y tomar las decisiones de control oportunas.

CYBERCARS-2 proyecto financiado por la Comunidad Europea que versaba sobre la realización de maniobras cooperativas entre diferentes vehículos y en él participaban hasta 11 instituciones del campo de la investigación en el sector del transporte.

MARTA y **GUIADE** proyectos financiados por el Ministerio de Fomento y en actual desarrollo, buscan encontrar aplicaciones reales al mundo de la automoción con grandes empresas españolas del sector.

CITYELEC proyecto singular concedido a finales de 2009 y que, en una línea solidaria con el medio ambiente, busca la implementación en ciudades españolas de un flujo de tráfico verde disminuyendo de forma considerable la contaminación.

Para la realización de estos últimos proyectos, el grupo contará con un prototipo de autobús eléctrico con el que espera extrapolar los resultados obtenidos en los vehículos comerciales a los sistemas públicos de transporte urbano.



Figura 1.2: Vehículo de transporte público adquirido por el Programa AUTOPIA.

1.3. Objetivos

El objetivo de esta tesis doctoral es desarrollar un sistema de control que permita gestionar el tráfico global en una gran área. Para ello será preciso desarrollar un sistema eficaz de comunicaciones que permita obtener en tiempo real la información de cualquier zona de tráfico y

tomar decisiones de control en los vehículos automatizados de forma que puedan circular por las carreteras y ciudades incrementando la seguridad y reduciendo la tasa de accidentes.

Se plantea por tanto una arquitectura de control basada en unidades centrales de control locales que se puedan interconectar y por tanto intercambiar información con las estaciones adyacentes y que sean capaces de adquirir la información proveniente tanto de los vehículos que se encuentren dentro de su zona de cobertura, señales de tráfico, paneles luminosos o incluso de sensores que se puedan instalar a lo largo de la infraestructura. Dichas estaciones, serán las encargadas de enviar la información relevante para cada vehículo que actuará en consecuencia, mostrando un mensaje de alerta para los vehículos guiados por conductores humanos o tomando decisiones de control para los vehículos automáticos.

Dicha información será utilizada para la implementación de diversos sistemas de control embarcados en vehículos automatizados que serán capaces de identificar y gestionar situaciones reales del tráfico, actuando en consecuencia. Teniendo en cuenta que el elemento de mayor importancia en nuestra arquitectura es el vehículo automatizado, se presentan diversas mejoras a los sistemas previamente desarrollados [Sotelo 01, Naranjo 05a] con el objetivo de incrementar su autonomía.

Con este planteamiento, se presentan cinco posibles maniobras reales mediante el sistema de comunicaciones propuesto implementadas en los vehículos del programa AUTOPIA. Además, y como aportación a la arquitectura de control de vehículos previamente desarrollada [Naranjo 05a], se presenta un nuevo sistema de guiado para el vehículo así como un sistema de precisión para el control del elemento más crítico en los vehículos; el control del freno.

1.4. Estructura de la memoria

Con el objetivo de implementar un sistema de gestión de tráfico en el horizonte, la memoria está estructurada del más alto hasta el más bajo nivel en la arquitectura de control. Se detalla a continuación el contenido de los restantes cinco capítulos de los que consta esta tesis:

Capítulo 2 presenta el estado actual de la técnica tanto desde el punto de vista comercial como en el sector de la investigación, haciendo hincapié en los grupos de investigación más relevantes en el campo a nivel mundial.

Capítulo 3 incluye la descripción de la arquitectura general de control propuesta en este trabajo que se divide en cinco niveles. Con el objetivo de presentar la solución propuesta como un sistema tangible y que puede ser llevado a cabo en la realidad, se presenta un experimento para validar la arquitectura propuesta.

Capítulo 4 se centra en el desarrollo de los vehículos autónomos, elemento principal de nuestra arquitectura, y en las aportaciones realizadas por esta tesis a mejorar las prestaciones

del mismo y aumentar la robustez de la arquitectura de control del programa AUTOPIA [Naranjo 05a].

Capítulo 5 presenta diversos experimentos reales llevados a cabo en las instalaciones del IAI-CSIC. Para ello, se van a usar tanto vehículos completamente automatizados, como vehículos parcialmente automatizados así como vehículos sin ningún tipo de instrumentación con el objetivo de validar el sistema propuesto en esta tesis.

Capítulo 6 concluye el trabajo presentado y comenta los objetivos alcanzados así como las líneas futuras de trabajo en el campo.

1.5. Contribuciones

A juicio del autor, las principales contribuciones de la tesis son:

1. El desarrollo de una arquitectura de control de tráfico flexible, que permite la inclusión de nuevos elementos de manera sencilla y fiable; presentando como principal aportación no sólo la realización de maniobras coordinadas entre vehículos autónomos sino incluyendo vehículos guiados por conductores humanos cuyo comportamiento es impredecible por parte de los sistemas de control que se deben reajustar de forma automática y en tiempo real a las situaciones del tráfico. Como principal exponente de las capacidades de este sistema, merece citar el sistema de gestión de intersecciones presentado, dando solución a uno de los principales motivos de atascos y foco de accidentes en la circulación.
2. La significativa mejora de los sistemas de control de los vehículos automatizados gracias, fundamentalmente, a un nuevo sistema de guiado que potencia la capacidad del vehículo para funcionar de manera autónoma en situaciones reales de tráfico que antes no eran consideradas.
3. La arquitectura propuesta está diseñada para permitir la incorporación de nuevos elementos. Todo ello ha sido validado mediante experimentos reales realizados con diferentes sensores que verifican la solución propuesta y demuestran la flexibilidad y escalabilidad del sistema para incorporar nuevos elementos de percepción ya sea en la infraestructura o en los propios vehículos.

1.6. Difusión de los resultados

La participación del doctorando en diferentes proyectos tanto nacionales como europeos, han permitido el contacto con los grupos europeos más importantes en el campo, estableciendo

contactos con centros como el INRIA en Francia o TNO en Holanda que han posibilitado el intercambio de ideas y planteamientos con diferentes investigadores.

Fruto de la tesis realizada así como de los proyectos en los que se ha colaborado, han surgido diversas publicaciones en revistas de distintos campos como mecánica, control, transporte, robótica o electrónica de potencia. A continuación se citan algunos de los más importantes:

Publicaciones en revistas

TÍTULO *Autonomous Vehicle based in cooperative GPS and Inertial Systems*

AUTORES V. Milanés, J.E. Naranjo, C. González, J. Alonso y T. de Pedro

REVISTA Robotica

ESTADO Publicado. Vol. 26, no. 5, pp. 627-633, 2008.

TÍTULO *Sistema de Posicionamiento para Vehículos Autónomos*

AUTORES V. Milanés, J.E. Naranjo, C. González, J. Alonso y T. de Pedro

REVISTA Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial

ESTADO Publicado. Vol. 5, no. 4, pp. 36-41, 2008.

TÍTULO *Control de Velocidad basado en Lógica Borrosa para Entornos Urbanos Congestionados*

AUTORES V. Milanés E. Onieva, J. Pérez, T. de Pedro y C. González

REVISTA Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial

ESTADO Publicado. Vol. 6, no. 4, pp. 61-68, 2009.

TÍTULO *Lateral Power Controller for Unmanned Vehicles*

AUTORES V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. González y T. de Pedro

REVISTA Electrical Review

ESTADO Publicado. Vol. 86, pp. 207-211, Jan. 2010.

TÍTULO *Electro-Hydraulic Braking System for Autonomous Vehicles*

AUTORES V. Milanés, C. González, J.E. Naranjo, E. Onieva y T. de Pedro

REVISTA International Journal of Automotive Technology

ESTADO Publicado. Vol. 11, no. 1, pp. 89-95, Feb. 2010.

TÍTULO *Controller for urban intersections based on wireless communication and fuzzy logic*

AUTORES V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva y C. González

REVISTA IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems

ESTADO Publicado. Vol. 11, no.1, pp. 243-248, March. 2010.

TÍTULO *Sistema de Asistencia a la Conducción Basado en una Red de Comunicaciones de Bajo Coste*

AUTORES V. Milanés, E. Onieva, B. Vinagre, C. González, J. Pérez, J. Alonso

REVISTA DYNA

ESTADO Aceptado. Pendiente de publicación.

TÍTULO *Throttle and Brake Pedals Automation for Populated Areas*

AUTORES E. Onieva, V. Milanés, C. González, T. de Pedro, J. Pérez y J. Alonso

REVISTA Robotica

ESTADO Aceptado. Pendiente de publicación..

TÍTULO *Estimación de un Control Lateral Difuso de Vehículos*

AUTORES E. Onieva, V. Milanés, J. Pérez y T. de Pedro

REVISTA Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial

ESTADO Aceptado. Pendiente de publicación.

TÍTULO *Soft Computing Techniques for Autonomous Driving*

AUTORES E. Onieva, V. Milanés, J. Pérez, J. Alonso y T. de Pedro

REVISTA Mathware and Soft Computing

ESTADO Publicado. Vol. 16, pp. 45-58, 2009.

TÍTULO *Safe Crossroads via Vehicle to Vehicle Communication*
 AUTORES J. Alonso, V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez y R. García
 REVISTA Lecture Notes in Computer Science (Springer)
 ESTADO Publicado. EUROCAST, pp. 421-428, 2009.

TÍTULO *Las comunicaciones inalámbricas en los sistemas inteligentes de transporte*
 AUTORES V. Milanés, J. Alonso, E. Onieva, J. Pérez, C. González, T. de Pedro y R. García
 REVISTA Automática e Instrumentación.
 ESTADO Publicado. Vol. 411, pp. 76-80, 2009.

TÍTULO *A Frame for Urban Traffic Control Architecture*
 AUTORES T. de Pedro, R. García, C. González, J. Alonso, E. Onieva, V. Milanés y J. Pérez
 REVISTA Bioinspired Applications in Artificial and Natural Computation (Springer)
 ESTADO Publicado. LNCS, Part II, pp. 399-407, 2009.

Publicaciones en congresos

TÍTULO *Ajuste Genético de Controladores Difusos para Conducción Autónoma*
 AUTORES E. Onieva, V. Milanés, J. Alonso, J. Pérez y T. de Pedro
 CONGRESO Proc. XIV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy ESTYLF08, 2008.
 EXPOSICIÓN Oral.

TÍTULO *Conducción Autónoma en Circuito de Difícil Maniobrabilidad*
 AUTORES V. Milanés, E. Onieva, T. de Pedro, R. García, J. Alonso, J. Pérez y C. González
 CONGRESO Proc. XXIX Jornadas de Automática JATA08, 2008.
 EXPOSICIÓN Poster.

TÍTULO *Comunicación entre Vehículos Autónomos en Tiempo Real, para Maniobras de Alto Riesgo*
 AUTORES J. Pérez, E. Onieva, T. de Pedro, R. García, J. Alonso, V. Milanés y C. González
 CONGRESO Proc. XXIX Jornadas de Automática JATA08, 2008.
 EXPOSICIÓN Poster.

TÍTULO *Modularity, adaptability and evolution in the AUTOPIA architecture for autonomous vehicles*
 AUTORES J. Pérez, C. González, V. Milanés, E. Onieva, J. Godoy y T. de Pedro
 CONGRESO Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2009, 2009.
 EXPOSICIÓN Oral.

TÍTULO *Electric Power Controller for Steering Wheel Management in Electric Cars*
 AUTORES V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. González y T. de Pedro
 CONGRESO Proc. CPE '09. Computability and Power Electronics, 2009.
 EXPOSICIÓN Oral.

TÍTULO *Autonomous Car Fuzzy Control Modeled by Iterative Genetic Algorithms*
 AUTORES E. Onieva, J. Alonso, J. Pérez, V. Milanés y T. de Pedro
 CONGRESO Proc. 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2009.
 EXPOSICIÓN Oral.

TÍTULO *A Modular Parametric Architecture for the TORCS Racing Engine*
 AUTORES E. Onieva, D. Pelta, J. Alonso, V. Milanés y J. Pérez
 CONGRESO IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, 2009.
 EXPOSICIÓN Oral.

TÍTULO *Aplicación de las tecnologías de las comunicaciones a vehículos autónomos*
 AUTORES V. Milanés, J. Alonso, E. Onieva, J. Pérez, C. González, T. de Pedro y R. García
 CONGRESO Proc. V Simposio de Control Inteligente, 2009.
 EXPOSICIÓN Oral.

Capítulo 2

Estado del arte

Una de las mayores preocupaciones por parte de los gobiernos de todo el mundo es reducir el número de accidentes que se producen en carretera. Sólo en España, durante el año 2008 fallecieron más de 2000 personas en accidentes de tráfico y casi 1000 resultaron heridas [DGT 09a]. Estas cifras, a pesar de ser alentadoras debido a la disminución en más de un 50 % de las víctimas desde el año 2000 (Fig. 2.1), sigue siendo elevada y la colaboración, tanto del sector del automóvil como de los conductores, ha de ser decisiva.

La Comisión Europea de Transporte centra sus esfuerzos en el desarrollo de un transporte sostenible, esto es, con una mayor eficiencia, seguridad y fiabilidad basándose en que la construcción de nuevas infraestructuras no puede solucionar los actuales problemas del transporte tanto desde el punto de vista de la congestión como de la emisión de gases.

La solución pasa por los sistemas inteligentes de transporte (ITS) que aplican las tecnologías de la información y la comunicación al transporte mediante el uso de diferentes sistemas sensoriales en busca de una constante mejora en este campo. Los ITS son por tanto todos los instrumentos a nuestro alcance que se puedan aplicar para mejorar cualquier modo de transporte ya sea por carretera, ferrocarril, aire o agua.

En este capítulo realizaremos un repaso a los avances más significativos en este campo desde el punto de vista del transporte por carretera. Comenzaremos realizando una introducción a

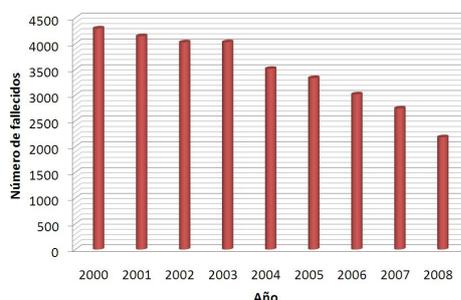


Figura 2.1: Número de fallecidos en accidentes de tráfico desde el año 2000. (Fuente: DGT).

este campo para posteriormente ver los avances más significativos en el sector comercial para, finalmente, comentar tanto los principales grupos de investigación en el mundo como los proyectos más relevantes.

2.1. Los sistemas de transporte por carretera

Los ITS surgen en la década de los años 90 como alternativa sostenible al problema generado por la creciente demanda de movilidad, especialmente en el ámbito urbano e interurbano. De esta manera, frente a las estrategias tradicionales -que pasan por un incremento de infraestructuras viarias y vehículos que pudieran conducir a niveles de insostenibilidad económica, espacial y medioambiental- los ITS suponen una apuesta por la movilidad sostenible. Esto es, una apuesta por incrementar la movilidad sobre la base de mejorar la eficacia y eficiencia del transporte y proveer seguridad a los usuarios.

Con ese triple objetivo, eficacia, eficiencia y seguridad, emergen los ITS como una combinación de información, comunicaciones y tecnologías del transporte en vehículos e infraestructuras. Una combinación que, en los últimos años, adquiere una enorme trascendencia puesto que las tecnologías de la comunicación permiten ya emitir información móvil en cualquier lugar y en tiempo real. No hay una definición exacta de donde se encuentran los límites de los ITS. Sin embargo, cualquier sistema ITS debe mostrar de manera intuitiva alguna forma de procesamiento de la información o una red de control de vehículos o carreteras para ser considerado inteligente.

Los ITS pueden realizar diferentes funciones; desde interactuar con un único vehículo hasta influir a lo largo de una extensa red de carreteras. Entre sus principales objetivos se encuentran la mejora de la seguridad en el tráfico, la fluidez del tráfico, los sistemas de transporte público, la eficiencia y producción de vehículos comerciales, la reducción de las emisiones y los sistemas de propulsión de los vehículos. Mientras que el potencial de los ITS para mejorar el entorno es halagüeño, quizás el mayor impacto de este tipo de sistemas se encuentra en el incremento de la seguridad en los usuarios. Muchos de los sistemas existentes hasta la fecha han sido desarrollados con el objetivo específico de aumentar la protección de los ocupantes de los vehículos y de la protección de los usuarios más vulnerables de las carreteras.

Una visión del futuro de los ITS desarrollada por ERTICO, la encontramos en [Rumar 99], en la que se realizan las siguientes predicciones:

1. Los ITS contribuirán significativamente a reducir el número de accidentes en carretera en un 50 %.
2. Gracias a estos sistemas, se prevé una reducción del 25 % en los viajes de larga distancia.
3. Una reducción del 50 % del tráfico en los centros de las grandes ciudades gracias a los sistemas de gestión del tráfico.

4. Los sistemas de aviso de accidentes disminuirán éstos en un 15 %.
5. Se ahorrarán un promedio de 40 horas por conductor debido a los sistemas de peaje automático.
6. Los sistemas de transporte público disminuirán en un 50 % sus retardos gracias a los sistemas de prioridad para el transporte público.

La división en categorías de los ITS puede realizarse de muy diversas formas según se enfoque desde la localización física del sistema desarrollado, los tiempos de mejora del sistemas, el sentido en el que el sistema mejora la seguridad o el campo del transporte al que se aplica. Uno de los más aceptados y comunes sistemas de clasificación de los ITS es el lugar en el que se encuentre el sistema, esto es, su ubicación en el vehículo, en la infraestructura o en ambos.

Vehículo: en este punto de engloban las tecnologías ubicadas en el interior de los mismos.

En ella, se incluyen sensores, procesadores de información y pantallas indicadoras que suministren información adicional al usuario ya sea de forma pasiva, alertando a los usuarios sobre peligros potenciales o de forma activa, interviniendo en alguna de las tareas asociadas a la conducción.

Infraestructura: este tipo de sistemas pueden tener dos funciones principales: la primera de ellas consiste en suministrar a los conductores información adicional mediante mensajes provenientes de la carretera; la segunda de ellas es la mejora del control y gestión del flujo de tráfico. En ambos casos se usan diferentes tipos de sensores para obtener la información de la carretera y se utilizan las diferentes señales viales para mejorar el tráfico.

Cooperativos: los sistemas cooperativos involucran comunicaciones entre el vehículo y la infraestructura o únicamente entre vehículos. Esta comunicación puede ser unidireccional, esto es, el vehículo recibe la información desde la infraestructura pero no devuelve ningún tipo de dato, o bidireccional, donde el vehículo envía y recibe información a otro vehículo o a un sistema localizado en la infraestructura.

Otra división de los ITS se puede realizar atendiendo a la forma en la que los sistemas intervienen. Así, se pueden dividir en:

Activos estos sistemas se pueden considerar como tecnologías para evasión de colisiones, esto es, prevenir posibles accidentes. Estos sistemas, controlan continuamente parámetros relacionados con el conductor, el vehículo, el entorno de la carretera o la red de transporte y pueden alertar al conductor de un peligro potencial, intervenir de modo automático para evitar una colisión o automatizar una parte concreta de la conducción.

Pasivos estos sistemas abarcan las tecnologías capaces de minimizar o mitigar posibles accidentes. Su función es aumentar la seguridad de los conductores disminuyendo los daños toda vez que el accidente es inevitable. El airbag es un claro ejemplo de este tipo de sistemas.

Combinados o CAPS (del inglés, Combined Passive and Active Systems) son sistemas que detectan situaciones potenciales de riesgo mediante componentes activos y aplican medidas de seguridad pasiva cuando se considera una colisión inevitable.

Los métodos de clasificación descritos no son excluyentes. Así, podemos encontrar sistemas activos instalados en vehículos o sistemas pasivos en la infraestructura. Algunos ejemplos son el control de cruce adaptativo, el sistema de antibloqueo de la frenada, el asistente de mantenimiento de carril, el sistema de ayuda al aparcamiento o el sistema de control de tracción como sistemas activos en vehículos; los airbags, los sistemas de alumbrado de emergencia, los grabadores de datos en caso de accidentes o los sistemas de puertas abiertas en caso de accidente como sistemas pasivos en vehículos; el parachoques extensible, el cinturón de seguridad automático o cualquier sistema pre-accidente como sistemas CAPS en vehículos; los sistemas de detección de animales, los sistemas de señalización de bicicletas, los sistemas de peaje automático, los paneles de señalización variable o las señales de límite de velocidad variables como sistemas activos ubicados en la infraestructura; los sistemas de gestión de accidentes como sistemas pasivos en la infraestructura y los sistemas de información al viajero avanzados, los dispositivos de aviso avanzado, los sistemas de navegación o los sistemas de comunicación vehículo-vehículo como sistemas cooperativos activos.

2.1.1. Situación actual

La amplitud en el campo de los ITS provoca que sea prácticamente imposible que un mismo grupo o proyecto de investigación cubra todas las áreas que lo integran. La principal consecuencia de esta diversidad es la especialización de cada grupo en áreas concretas, buscando avances significativos en las mismas. En este sentido, cabe destacar los avances de los grupos asiáticos -principalmente Japón- en el desarrollo de sistemas pasivos en vehículos para mitigar los daños en situaciones de atropello a peatones; el desarrollo de sistemas activos en vehículos por parte de los grupos de investigación americanos centrando sus investigaciones en el desarrollo de sistemas de percepción del entorno y toma de decisiones -la competición Urban Challenge es el máximo exponente de esta filosofía- y la fuerte inversión por parte de la Unión Europea en el desarrollo de sistemas CAPS cooperativos buscando un sistema fiable de comunicaciones que permita mejorar la interacción vehículo-vehículo y vehículo-infraestructura.

Desde el punto de vista de las comunicaciones, cabe destacar dos arquitecturas generales planteadas una en Europa y otra en Estados Unidos. La primera de ellas (Fig. 2.2.a) se conoce

con el nombre de CALM (Communications, Air Interface, Long and Medium Range) y es una arquitectura marco de ISO para dar soporte de comunicaciones en entornos móviles. CALM soporta comunicaciones continuas a través de distintos interfaces y medios físicos como los IEEE 802.11, 802.11p, 802.15, 802.16e, 802.20, telefonía móvil 2G/3G/4G. La segunda (Fig. 2.2.b) conocida por el nombre de VII (Vehicle Infrastructure Integration) busca los mismos objetivos que CALM, esto es, desarrollar todo tipo de tecnologías de comunicaciones que permitan el intercambio de información entre todos los actores que intervienen en la seguridad vial a fin de reducir el número de accidentes y mejorar la eficiencia de las redes de transporte. Para ello, define cuatro componente principales -*travelers*, *centers*, *vehicles* y *field*- que se interconectan mediante cuatro posibles tipos distintos de comunicaciones.

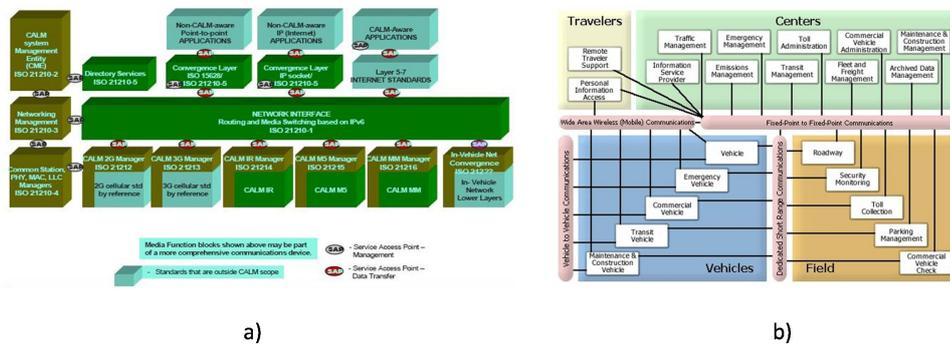


Figura 2.2: Sistemas propuestos para el desarrollo de los ITS por a) la comisión europea de transporte y b) el departamento de transporte de EE.UU.

Estas arquitecturas desarrolladas en los últimos años, no han sido puestas en práctica aún debido a la complejidad de las mismas para trasladarlas al mundo real. No obstante, se han producido algunas mejoras como las obtenidas en el proyecto europeo CVIS que se detallará más adelante.

A pesar de estas investigaciones y la fuerte inversión realizada en las mismas, queda lejana su implantación a nivel comercial debido fundamentalmente a las fuertes reticencias por parte de los fabricantes de automóviles a la hora de instalar en sus vehículos sistemas que eximan al conductor de su responsabilidad en caso de accidente. En el siguiente punto, se detallan algunos de los avances más significativos en los modelos comerciales actualmente en el mercado.

2.2. Sistemas comerciales

El campo de la investigación en ITS también ha sido abordado por los fabricantes de automóviles que, en los últimos años, han desarrollado novedosos y significativos sistemas para aumentar la seguridad en los vehículos. Antes de comenzar a presentar los grupos y proyectos de investigación más relevantes a nivel mundial en este campo, se presenta en esta sección la situación de

los sistemas inteligentes de transporte en el mercado. En los siguientes puntos, introduciremos los mayores avances obtenidos por los fabricantes de automóviles en sus últimos modelos. En la Fig. 2.3 se muestran algunos de estos avances.



Figura 2.3: Avances en los sistemas de ayuda al conductor en el sector comercial.

El grupo Alfa Romeo tiene disponible el asistente para arranque en subida (Hill-holder) y la dirección electrónica activa, que recomienda al conductor la maniobra más adecuada mediante el volante electrónico y realiza correcciones automáticamente para mejorar la seguridad y las prestaciones. Esta función actúa fundamentalmente en los casos de sobreviraje, cuando hace una contradirrección para permitir el control del coche y su detención en una menor distancia. Se trata de un sistema que retrasa la entrada en acción del sistema de control de tracción.

Audi ha desarrollado diversos sistemas, tanto activos como pasivos en vehículos, de ayuda a la conducción. Dichas ayudas se basan en sistemas capaces de reconocer el entorno del vehículo y, a partir de los datos recopilados, tomar decisiones y actuar en consecuencia, incrementando la seguridad al conductor y buscando como principal objetivo restarle trabajo sin quitarle responsabilidad. A continuación se detallan algunas incorporaciones de sus modelos respecto a las ayudas en la conducción.

Sistema de ayuda de luz adaptativa. Este sistema pasivo en vehículo, orienta el haz de luz de los faros en las curvas. Se combina con los faros de xenón para configurar un sistema que regula de forma dinámica el alcance de las luces en las curvas: a partir de 120 km/h, el haz de luz se eleva para conseguir una mayor visibilidad.

Asistente de cambio de carril. Otro sistema pasivo que busca reducir los accidentes en carretera. Su función es facilitar el cambio de carril en maniobras de adelantamiento para evitar el riesgo de que el conductor no haya visto que otro vehículo que circula detrás de él también va a adelantar. Funciona gracias a dos sensores de radar situados en el parachoques trasero, que “barren” en un radio de 50 metros el espacio lateral y trasero alrededor del vehículo. Cuando otro vehículo se acerca a gran velocidad desde atrás o circula aproximadamente a la misma velocidad en una zona crítica, se enciende un led anaranjado en la carcasa del retrovisor izquierdo o derecho (dependiendo de por qué lado se aproxime el otro coche) e ilumina un indicador si iniciamos una maniobra lateral que puede acabar en colisión, con más luminosidad cuanto mayor sea la luz ambiental, de forma que el conductor lo perciba claramente. El sistema se activa a partir de 60 km/h, por lo que no interfiere en la conducción urbana y resulta invisible al resto de los ocupantes del vehículo.

Asistente contra cambio involuntario de carril. Sistema similar al anterior que avisa al conductor cuando entiende que éste está abandonando su carril de forma involuntaria y puede provocar una colisión o salirse de la vía. Se activa a partir de 65 km/h gracias a una cámara ubicada sobre el retrovisor interior, que vigila la vía que se abre por delante del vehículo con un alcance de 60 metros y un ángulo de 40 grados. Un ordenador situado también en la carcasa del retrovisor detecta la señalización horizontal de la calzada y así, si el conductor pisa una de esas líneas sin accionar el intermitente, se produce una vibración en el volante. Como principales inconvenientes, el sistema no funciona si la velocidad es baja o si las líneas de la calzada no se detectan correctamente.

Dirección dinámica. Este sistema actúa sobre la acción del volante modificando la desmultiplicación de forma continua en función de la velocidad. Integrado en la columna de dirección, el sistema consta de un motor eléctrico y de un engranaje especial compacto y muy ligero capaz de transmitir pares de fuerza muy elevados. Si el vehículo está parado o al realizar maniobras a baja velocidad, la dirección dinámica actúa de forma muy directa permitiendo el giro del volante de tope a tope en dos vueltas. A altas velocidades el número de vueltas de tope a tope aumenta hasta cuatro.

Sistema de aparcamiento. Este sistema pasivo basado en una lente de tipo “ojo de pez” con un ángulo de 130 grados integrada en el portón del maletero, envía imágenes de la parte trasera al monitor del salpicadero, indicando además al conductor, por medio de líneas en pantalla, las maniobras que tiene que realizar para aparcar correctamente. Por ejemplo, al aparcar marcha atrás en batería, las líneas de color naranja indican la trayectoria. Al aparcar en línea, las superficies de color azul indican el espacio que necesita el vehículo y las líneas marcan las maniobras de giro que hay que hacer para estacionar el coche en dicho espacio.

El grupo BMW presentó en 2007 un conjunto de dispositivos en desarrollo para la implementación de diversos sistemas de ayuda a la conducción en sus modelos comerciales. Entre

ellos, cabe destacar una red de cámaras que facilita las maniobras -mediante sistemas pasivos de aviso al conductor- y el Car2x, un servicio de comunicación entre automóviles e infraestructura de tráfico buscando el desarrollo de sistemas de aviso al conductor ante situaciones de tráfico que incrementen el riesgo de producirse un accidente.

Intercambio de datos, Car2x, es un sistema que actualmente se encuentra en fase de desarrollo tras la constatación por parte de BMW de que la mayoría de los accidentes se produce en las intersecciones, incluso en aquellas en las que hay semáforos. No se basa en la utilización de sensores o de cámaras en la carrocería del coche, sino que recurre a los sistemas de comunicación digitalizados para recibir información sobre el estado de la circulación y de la carretera procedente de otros vehículos o de los organismos rectores de tráfico en una línea de trabajo similar a la arquitectura de control de tráfico que se presenta en esta tesis.

El objetivo es potenciar este sistema de intercambio de datos, hasta el punto de que en el futuro pueda advertir de, por ejemplo, la proximidad de un semáforo o la llegada a un cruce peligroso. Este sistema está aún en fase de desarrollo, ya que necesita del apoyo de un buen número de actores. El proyecto europeo PReVENT finalizado en 2009 y en el que BMW participaba activamente, buscaba encontrar aplicaciones prácticas del Car2x.

Otro dispositivo de ayuda a la conducción orientado al confort desarrollado por el grupo BMW, es el sistema iDrive. A través de él, tenemos acceso a páginas web en Internet, con un sistema que se ha denominado BMW ConnectedDrive. Gracias a este sistema es posible configurar el climatizador a través del teléfono móvil, pudiendo así establecer la temperatura deseada unos minutos antes de coger el coche.

El grupo FIAT, trabajando en una línea más solidaria con el medio ambiente, presentó a principios de octubre de 2008 el desarrollo, en colaboración con Microsoft, del nuevo sistema telemático 'EcoDrive' que ayuda a los conductores a conducir de un modo más ecológico y económico. Este dispositivo, permite grabar en una memoria USB consumos y emisiones de todos los viajes realizados y analizar en un ordenador el estilo de conducción, así como recibir consejos sobre cómo conducir con un efecto menor sobre el medio ambiente. El objetivo es que mediante estos consejos los conductores puedan reducir hasta un 15 % las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

En cuanto a sistemas de aviso sobre el estado del conductor, el grupo Mercedes-Benz ha desarrollado un dispositivo que alerta al conductor en caso de fatiga que está disponible desde 2009. Básicamente, lo que este sistema hace es, ayudado por distintos sensores, capturar los patrones de conducción de cada conductor y los compara con los que ya tiene en su base de datos y que son recogidos al inicio de la conducción. El sistema ha sido probado con 550 hombres y mujeres, dando como resultado que tras unas cuatro horas de conducción ininterrumpida estos patrones cambian. Mediante mediciones tanto en la aceleración lateral como lineal y en el movimiento del volante, el sistema detecta si el conductor está comenzando a sufrir los efectos

de la fatiga debido a la monotonía. El sistema también tiene en cuenta el tipo de conducción de cada conductor. Cuando la lectura de los parámetros da como resultado que el conductor está acusando el cansancio, un sistema de alerta le avisa mediante señales acústicas y visuales.

Uno de los fabricantes que mayores inversiones está realizando en I+D en el sector del automóvil es Volvo con la introducción de sistemas activos en los vehículos. Sus desarrollos están enfocados a disminuir el factor distracción, presente en el 90 % de los accidentes. De estos, algunos tipos de accidente como el atropello y el alcance a baja velocidad (en ciudad) podrán ser evitados en su mayoría con un sistema que reaccione automáticamente. Estos sistemas son:

Sistema de seguridad en ciudad (City Safety). Sistema concebido para vehículos urbanos. Un sensor láser, situado en la parte superior del parabrisas detecta los vehículos que están seis metros por delante del parachoques. En base a la velocidad a la que se circula y la distancia del auto de adelante, el sistema hace un cálculo 50 veces por segundo para estimar la velocidad de frenado para evitar la colisión.

Frenado automático ante atropello. Combina un radar de amplio espectro con una cámara. Si el sistema detecta que se acerca un peatón, enciende una luz sobre el parabrisas y activa una señal sonora. Si el conductor no frena y puede producirse un atropello, el sistema activa automáticamente los frenos. Este sistema funciona a velocidades inferiores a 15 km/h.

Control de alerta al conductor (DAC). Este sistema evalúa los movimientos descontrolados del auto. Si estima que puede haber peligro activa señales acústicas y luminosas. Para realizar estos análisis utiliza un radar y una cámara.

Advertencia de colisión con frenado automático (CWAB). Si calcula que se puede producir un impacto, activa una luz roja en el parabrisas además de una señal sonora y prepara los frenos acercando las pastillas a los discos y reforzando la presión hidráulica.

Auto Steering (Dirección automática). Es una ampliación del sistema anterior para evitar impactos por alcances laterales. Para evitar el impacto, gira automáticamente la dirección y vuelve a la posición original tras evitar la colisión.

2.3. Revisión de los principales grupos de investigación

Los avances hasta ahora descritos han sido implantados en vehículos comerciales dando una idea del nivel del desarrollo actual de los ITS, que han evolucionado superando las expectativas marcadas hace una década. A pesar de la fuerte inversión de los grandes fabricantes de automóviles, hay un gran número de grupos de investigación a lo largo del mundo dedicados a las mejoras de los equipos que ya se encuentran en el mercado y a la incorporación de nuevos sistemas que podrían ayudar de forma decisiva a reducir el número de accidentes y disminuir la congestión del tráfico. A continuación se repasan algunos de estos grupos con especial atención a los más influyentes en el campo.

2.3.1. Grupos europeos

2.3.1.1. LaRA

LaRA es un programa para analizar la seguridad actual y futura del transporte por carretera en Francia. Estudia cuatro casos: carreteras locales, rurales, interurbanas y redes de carreteras en torno a las grandes ciudades y dos aplicaciones de vehículos automatizados a baja velocidad para circulación urbana. La aplicación ofrece vehículos sin conductor para desplazamiento urbano. La idea es que una serie de coches siga automáticamente a un líder conducido por un humano. La distancia entre coches es 0.3 segundos a cualquier velocidad y el seguimiento lateral es muy preciso gracias a un sistema de visión. LaRA se mostró por primera vez en 1994, en la demo final de PROMETHEUS (figura 2.4). Más tarde se hicieron prototipos para circuitos cerrados como parques temáticos y cascos históricos de ciudades. La principal ventaja de este programa es que no necesita una infraestructura nueva, pues los vehículos autónomos emplean las infraestructuras ya existentes.



Figura 2.4: Vehículos del proyecto LaRA (La Route Automatisée) francés.

LaRA engloba otros proyectos como FACT o CYBERCARS-3. Éste último ha desarrollado coches de dos plazas automatizados con diversos elementos de control y un amplio abanico de sensores; entre ellos visión para el control lateral, láser para el seguimiento de vehículos, GPS para localización y seguimiento de la ruta y ultrasonidos para el aparcamiento [Bouraoui 06].

Actualmente están desarrollando el proyecto CRISTAL que define un nuevo concepto de transporte público donde un autobús eléctrico es guiado por un conductor humano y es seguido por una caravana de vehículos automáticos que imitan el comportamiento del vehículo guía.

2.3.1.2. Universidad de Bundeswehr

Este grupo participó en PROMETHEUS con el vehículo autónomo VaMoRs guiado por visión artificial [Dickmanns 93] que circuló por autopistas a velocidades de hasta 130 Km/h. Emplea una cámara en blanco y negro para detectar las marcas de los carriles, otros vehículos, peatones y señales de tráfico.

En el proyecto VITA y en colaboración con Daimler-Benz desarrolló un vehículo con actuadores electromecánicos y visión artificial para seguimiento y cambio de carril, detección de obstáculos y stop&go. A estos proyectos les siguieron el VaMoRs-P y VITA II y VaMP. En el primero se equipó un Mercedes 500 E con dos sistemas de visión estereoscópica, para detectar obstáculos delanteros y traseros, y un PC para procesar la imagen en tiempo real y reconocer los elementos de la vía.

En el proyecto VITA II se refuerza el equipo informático para las tareas de visión, planificación y control, permitiendo maniobras como mantener el carril a la velocidad deseada, reducir la velocidad en curvas cerradas o por señales de tráfico, detectar objetos alrededor al vehículo y evitar una colisión inminente.

El proyecto VaMP, de Daimler-Chrysler, Universität der Bundeswehr y Ruhr-Universität Bochum, tenía como objetivo conducir automáticamente un Mercedes clase S en entornos urbanos. El vehículo llevaba un cinturón de 18 cámaras para detectar obstáculos, líneas del carril y señales de tráfico. En 2006 se dio por culminado dicho proyecto y el vehículo se puede ver actualmente en el Museo de Tecnología de Alemania.



Figura 2.5: Volkswagen Touareg del proyecto MUCAR-3 perteneciente a la Universidad de Bundeswehr.

Desde 2006, están embarcados en un nuevo proyecto MuCAR-3 en el que un Volkswagen Touareg (figura 2.5) está instrumentado para llevar a cabo una conducción automática a través de una unidad central de toma de decisiones denominada BOSS [Bauermann 08a, Bauermann 08b].

2.3.1.3. Centro de Investigación de FIAT

El Centro de Investigación Fiat, sociedad del Grupo especialmente dedicada a la investigación, nace en 1976 como centro de referencia para la innovación, la investigación y el desarrollo del Grupo Fiat. Actualmente es un centro de excelencia, reconocido a nivel internacional, cuya misión es el uso de la innovación como bandera estratégica en los negocios del Grupo Fiat y la valoración de los resultados de las propias actividades a través de la promoción, el desarrollo y la transferencia de contenidos innovadores capaces de destacar y proveer competitividad al producto.

CRF forma parte de una red global de más de 150 universidades y centros de investigación y más de 1.000 colaboradores industriales en el mundo entero. Particularmente activo en el área de investigación para la movilidad sostenible, el CRF, se centra en el estudio de soluciones que incluyan la reducción de las emisiones gracias a mejoras en los motores de propulsión, pero también la reducción de los consumos a través de la disminución de peso y la mejora aerodinámica buscando el descenso del congestionamiento del tránsito y de los ruidos.

Respecto al proyecto “Vehículo Urbano MultiEcológico y Sostenible”, el CRF asumió la tarea de Vehicle Project Leader, responsable de las decisiones técnicas y arquitectónicas para el desarrollo del prototipo, que se presenta como un “Laboratorio Tecnológico” para experimentar soluciones innovadoras para una movilidad urbana sostenible.



Figura 2.6: Vehículo FIAT adaptado para personas discapacitadas.

Fiat Auto, a través de AUTONOMY, iniciado en 1994, se preocupa de las personas con discapacidades con un programa que va desde la evaluación de la capacidad de conducir de las personas con necesidades especiales hasta la adaptación propia del vehículo (figura 2.6). Programa Autonomy es la iniciativa más ambiciosa desarrollada por un fabricante de automóviles



Figura 2.7: Flota de vehículos y pista de pruebas del programa AUTOPIA.

para la mejora de la movilidad de personas con discapacidades motrices. Un programa que va desde la evaluación de la capacidad de conducir de las personas con necesidades especiales hasta la adaptación propia del vehículo, ofreciendo servicios de asesoría de ayudas gubernamentales. Actualmente, el grupo de investigación de FIAT se encuentra trabajando en varios proyectos europeos como Consensus, Agile, Quovadis, TAG, Mobilise o Cybercars-3.

2.3.1.4. Programa AUTOPIA

El centro de investigación IAI-CSIC a través de su programa AUTOPIA pretende el guiado automático de vehículos en entornos urbanos, que es el caso más complejo. En él se han automatizado tres vehículos Citroën de serie, dos Berlingo eléctricos [Perez 09] y un C3 de gasolina, en los que se ha colocado un receptor GPS y un computador [Milanés 08c]. En éste un controlador borroso mueve el acelerador, el freno y el volante. En un futuro próximo se incorporará a la flota un autobús de propulsión eléctrica (figura 2.7). Los resultados de AUTOPIA se han probado en numerosos experimentos. Citamos los más exigentes, como conducción en caravana manteniendo la distancia de seguridad [Naranjo 06] o adelantamientos [Naranjo 08], a la vez que se sigue la ruta deseada [Milanés 08a] y se respeta la velocidad máxima permitida.

AUTOPIA engloba proyectos ya terminados, como COVAN, GLOBO, COPOS y ISACC, CYBERCARS-2, ISAAC-II o ENVITE y otros proyectos en curso como MARTA, TRANSITO, GUIADE o CITYELEC.

2.3.1.5. INSIA

El INSIA, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, es un centro perteneciente a la Universidad Politécnica Madrid, adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales e integrado en el parque científico y tecnológico de la UPM.

El Instituto centró su trabajo en el análisis de accidentes de tráfico, transporte, seguridad pasiva en autobuses, autocares y vehículos industriales, biomecánica, sistemas inteligentes e ingeniería de vehículos. Así mismo está autorizado como Laboratorio Oficial para la homologación en diversos Reglamentos y Directivas (autobuses y autocares, estabilidad, neumáticos, asientos, sistemas de retención) y Reformas de Importancia.

El INSIA tiene abiertas las siguientes líneas de investigación: mejora de la seguridad en autobuses y autocares y en el transporte de mercancías, análisis de las causas y de las consecuencias de los accidentes de tráfico, biomecánica del impacto aplicada a la mejora de la seguridad pasiva, desarrollo y aplicación de modelos para la evaluación y predicción de los impactos del transporte por carretera en la seguridad y medio ambiente, sistemas de asistencia al conductor ADAS relacionados con el control inteligente de la velocidad, sistemas alternativos de propulsión e impacto medioambiental de los vehículos automóviles y modelos matemáticos para el análisis y simulación mecánicos de vehículos industriales.

Desde 2007 el INSIA ha comenzado a gestionar y establecer algunas alianzas estratégicas con otros centros de investigación y desarrollo con objeto de intercambiar experiencias, desarrollar capacidades complementarias y concurrir conjuntamente a convocatorias de proyectos de I+D+i. Se ha formado un convenio Marco con CITEAN (Centro de Innovación Tecnológica de Automoción de Navarra) y se están gestionando otros con Centros españoles y extranjeros.

Se han alcanzado también convenios generales de cooperación con empresas e instituciones para las cuales la labor del INSIA tiene un especial interés. Existen ya convenios generales firmados con ALSA, IRIZAR y la EMT. Están en marcha convenios específicos con otras empresas (DGT, FCC, CEMUSA, CASTROSUA) que a lo largo de 2009 podrán concretarse en nuevos convenios generales de colaboración para vehículos industriales y autobuses y autocares.

2.3.2. Grupos americanos

2.3.2.1. NAVLAB

El grupo Navlab trabaja en la implementación de sistemas para coches, camiones y autobuses con el objetivo de dotarlos de la capacidad de realizar una conducción autónoma. Desde su creación en 1984, han producido una serie de once vehículos, desde el Navlab 1 hasta el Navlab 11 que podemos observar en la Fig. 2.8. Entre sus objetivos se incluyen la exploración en cualquier tipo de terreno, la automatización en carretera, la reducción de las colisiones en circulación y la asistencia al conductor en entornos urbanos.

Navlab1 alcanzó una velocidad de 32km/h en conducción automática; siendo 88 km/h la velocidad máxima en el Navlab2. En 1995 el Navlab5 circuló desde Washinton a California por autopista, controlando de forma automática la dirección -el 98,8 % del recorrido- y manual la velocidad, en el experimento "No Hands Across America". El sistema RALPH [Pomerleau 95a] proporcionó datos de navegación, un GPS combinado con giróscopo la localización del vehículo



Figura 2.8: Imagen del Navlab 11.

y el sistema ALVINN [Krabbes 97] datos para mantener el carril y estimar el radio de curvatura de la vía. Además observando a una persona conducir durante 5 minutos, el sistema aprendía las características más importantes para imitar su comportamiento.

Actualmente, están desarrollando el proyecto CTA Robotics centrando sus investigaciones en la capacidad del vehículo para interpretar el entorno en el que se encuentra y hallar la solución óptima para moverse a través de él [Heckman 07].

2.3.2.2. Virginia Tech

La Universidad de Virginia ha formado un grupo compuesto por estudiantes, doctorandos y profesores provenientes de la universidad y compañías dedicadas a los sistemas autónomos. El equipo ha construido un prototipo que ha participado en la última edición del DARPA Urban Challenge en 2007 (figura 2.9) obteniendo la segunda posición.

El equipo está organizado en distintos departamentos para afrontar cada uno de los campos necesarios para desarrollar un vehículo autónomo. Además, cuentan con una potente herramienta de simulación de entornos reales desarrollada por TORC Technologies que se encuentra dentro del mismo proyecto. A través de esta herramienta son capaces de simular entornos 3-D para estudiar comportamientos de conducción, algoritmos de predicción del tráfico para varios vehículos circulando por más de un carril y sistemas de posicionamiento avanzados para pérdidas en la señal GPS.

2.3.2.3. Tartan Racing Team

La universidad de Carnegie Mellon en colaboración con General Motors Corporation, la mayor compañía de automoción del mundo, formaron el grupo Tartan Racing campeón del último Urban Challenge celebrado en 2007 [Urmson 08].



Figura 2.9: Prototipo de la Universidad de Virginia.

El equipo, liderado por el Dr. Whittaker y con el apoyo del Dr. Urmson en la parte técnica, está formado por investigadores tanto de la universidad como de General Motors y por un amplio número de empresas del sector como Caterpillar, Continental AG, Intel, Google, Applanix, TeleAtlas, Vector, Ibeo, Mobileye, CarSim, CleanPower Recursos, MA / COM, NetApp, Vector Cantech y Hewlett Packard.

El vehículo diseñado se denominó Boss y es un Chevrolet Tahoe 2007 modificado para una conducción autónoma (Fig. 2.10). Las modificaciones se realizaron teniendo en cuenta las necesidades para el control por computador y para una fácil y segura gestión de los algoritmos de control. Así, las modificaciones se pueden clasificar en dos categorías: las necesarias para la automatización del vehículo y aquellas para la realización de pruebas de forma segura y fácil. Un conjunto de motores comerciales se integró en Boss para el control simultáneo de la dirección, el pedal del freno y la caja de cambios.

Boss mantiene los controles normales de conducción humanos (volante y pedales de freno y acelerador), de modo que un controlador de seguridad o un conductor humano puede de forma rápida y fácil tomar el control durante los experimentos en modo autónomo. Además, incluye un sistema para proteger a los ocupantes en la caso de colisión o vuelco durante los experimentos.

Para la ejecución en tiempo real de los sistemas software desarrollados, Boss utiliza un chasis de CompactPCI con 10 procesadores de 2,16 GHz Core2Duo, cada uno de con 2 GB de memoria y un par de puertos Gigabit Ethernet. Cada equipo se inicia mediante una unidad externa flash de 4GB , reduciendo la probabilidad de un fallo de disco. Dos de las máquinas también incluyen unidades de 500GB de disco duro para registro de datos.

Boss utiliza una combinación de sensores para proporcionar la redundancia y la cobertura necesaria para navegar de forma segura en un entorno urbano. El vehículo incluye más de 18 sensores entre cámaras de visión, lidar, sistemas GPS, sistemas radar e inerciales.



Figura 2.10: Prototipo del Tartan Racing Team.

2.3.3. Grupos asiáticos y australianos

2.3.3.1. Ministerio de Transporte de Japón

Este ministerio se ocupa de regular la seguridad de la industria del automóvil. El programa más relevante es el Advanced Safety Vehicle (ASV) [Sugasawa 96], bajo cuyos auspicios todos los grandes OEM japoneses de automóviles han desarrollado técnicas para mejorar la seguridad, como sistemas ITS de advertencia y ayuda. Por ejemplo, airbags externos para proteger a peatones o para ciclomotores, parabrisas que repelen el agua, etc. Es importante decir que estos desarrollos los financian las compañías, el ministerio se limita a dirigirlos y coordinarlos. Este programa fue la base de la Demo 2000 del SmartCruise21 realizada en la pista del Japan Automobile Research Institute.



Figura 2.11: Nissan ASV-4 para la reducción de accidentes basado en comunicaciones vehículo-vehículo.

En 2007 ha comenzado la cuarta fase del programa ASV y en octubre de este mismo año Nissan ha presentado la cuarta generación denominada Nissan ASV-4 (figura 2.11) cuyo objetivo

es la reducción de los accidentes de tráfico mediante una comunicación vehículo – vehículo en la que se avisa al conductor de la existencia de otro vehículo en condiciones de climatología adversas o intersecciones de riesgo.

2.3.3.2. Universidad de Griffith

Esta universidad liderada un grupo formado por el gobierno australiano, un consorcio de universidades del país y el sector privado tiene como objetivo desarrollar, evaluar y modelar los avances en las tecnologías de transporte mejorando la seguridad y la eficiencia de estos sistemas. Dispone de un laboratorio de investigación de vehículos inteligentes en la universidad de Griffith donde trabajan en la cooperación de vehículos autónomos en tareas como el control de la distancia al vehículo precedente, cruces, adelantamientos y conducción cooperativa [Baber 05]. Han realizado experimentos con prototipos (Fig. 2.12) en los que intervienen varios vehículos que confluyen en un cruce, siendo capaces de salir de la intersección sin colisionar de manera coordinada.



Figura 2.12: Vehículos eléctricos de la Universidad de Griffith realizando un experimento de seguimiento.

2.4. Revisión de los principales proyectos de investigación

En esta sección se detallarán algunos de los proyectos de investigación más importante a lo largo de todo el mundo en el campo de los sistemas inteligentes de transporte. En dichos proyectos participan de forma activa los grupos citados con anterioridad.

2.4.1. Proyectos europeos

2.4.1.1. CHAUFFEUR y CHAUFFEUR-2

Dentro de los sistemas inteligentes en vehículos, el proyecto europeo CHAUFFEUR llevó a cabo el desarrollo de un sistema que permite el seguimiento de cualquier vehículo manteniendo una distancia de seguridad, el desarrollo de un sistema de mantenimiento de carril para camiones y la detección de obstáculos y la evasión de colisiones, el desarrollo del concepto de seguridad sostenible, realización de platooning con camiones.

A pesar de la dificultad para implantar los sistemas desarrollados en el mercado, CHAUFFEUR logró un significativo avance en la automatización de camiones.



Figura 2.13: Demostración de la maniobra de platooning en el proyecto CHAUFFEUR-2.

En el proyecto CHAUFFEUR-2, coordinado por Daimler-Chrysler, se realizó una demostración con tres camiones de Daimler, IVECO y Renault (Fig. 2.13) donde únicamente el primer camión era conducido por un conductor humano. Mediante un controlador electrónico se llevó a cabo el manejo del resto de los vehículos capaces de seguir al vehículo líder a una distancia cercana y segura.

2.4.1.2. PROTECTOR, SAVE-U y WATH-OVER

PROTECTOR (Preventative Safety for Unprotected Road User) fue un proyecto pionero en el campo de la seguridad en el transporte donde se realizaron pruebas para el desarrollo y posterior validación de sensores para la detección y clasificación de los usuarios más vulnerables de las vías de circulación (peatones, ciclistas, etc.) con el objetivo de implementar dispositivos de seguridad pasiva. Se obtuvieron buenos resultados en la detección de peatones pero se concluyó

que era necesario un mayor esfuerzo para la clasificación de los diferentes obstáculos que se pueden encontrar en las carreteras.

El proyecto PROTECTOR culminado en 2002 tuvo su continuación en el proyecto SAVE-U (Sensors and Systems Architecture for Vulnerable road User protection) que introdujo un sistema que permitió mejorar de manera significativa la clasificación de los elementos detectados, mejorando las prestaciones del sistema anterior. Además, se añadieron capacidades de frenado automático al sistema convirtiéndolo en un sistema CAPS.

Desde enero de 2006, estos dos proyectos continuaron la investigación del reconocimiento del entorno a través del proyecto WATCH-OVER basado en sistemas de visión.

2.4.1.3. LACOS

El proyecto LACOS (Lateral Control Support) buscaba la validación de sistemas autónomos capaces de ayudar al conductor en el caso de una colisión produciendo un movimiento lateral del vehículo, actuando sobre la dirección. Este proyecto integra dos principales funciones en el control lateral del vehículo: el asistente de abandono de carril (LWS, del inglés Lane Warning Support) y el asistente al cambio de carril (LCS, del inglés Lane Change Support). Para ambos se utilizaron cámaras de visión y radares de microondas. Una unidad de control embarcada en el vehículo fusionaba la información proveniente de los sensores incrementando la robustez del sistema.

2.4.1.4. ALCOLOCK

El proyecto ALCOLOCK evaluó el nivel de aceptación y viabilidad de un dispositivo para inhabilitar el arranque del motor en el caso de detección de consumo de alcohol por parte del conductor. Los experimentos mostraron buenos resultados en términos de aceptación a pesar de los problemas surgidos con las pruebas llevadas a cabo con conductores de camiones. Estudios realizados demuestran que alrededor de 10.000 personas fallecen en las carreteras europeas debido a conducir bajo los efectos del alcohol. Por este motivo, gobiernos como el sueco han aprobado leyes relativas al uso de alcolock para todos los autobuses y camiones a partir de 2010 y en todos los nuevos vehículos comerciales a partir de 2012.

2.4.1.5. ROSETTA

Entre los primeros proyectos relacionados con la utilización de las comunicaciones en el campo de los sistemas inteligente de transporte, nos encontramos con el proyecto ROSETTA que incluye la tecnología instalada en la infraestructura con el objetivo de desarrollar operadores de red para obtener datos del tráfico en autopistas que posteriormente servirán para alertar a conductores y dispositivos instalados para el control del tráfico.

2.4.1.6. Safespot

Safespot es un proyecto para estudiar cómo pueden cooperar vehículos y carreteras inteligentes para aumentar la seguridad. El objetivo es prevenir accidentes desarrollando un Asistente de Seguridad Marginal que detecte con anticipación situaciones peligrosas y extienda en el tiempo y en el espacio la ayuda a conductores en un entorno. El asistente es un sistema cooperativo basado en comunicaciones vehículo-vehículo (V2V) e infraestructura-vehículo (I2V).

2.4.1.7. CVIS

El proyecto Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS) es un proyecto IP europeo con el fin de especificar una arquitectura de comunicación y un conjunto de aplicaciones para comunicaciones vehículo-carretera y vehículo-internet. La arquitectura está basada en la arquitectura CALM, estándar ISO. CVIS desarrolla un “router” móvil para enlazar continuamente vehículos con equipos y servidores de la carretera. Esta tecnología aplica y valida el estándar CALM para comunicación móvil continua. CVIS ha realizado un terminal multi-canal que mantiene comunicación Internet continua con un amplio rango de operadores (móviles, WiFi, infrarrojos y microondas de corto alcance). CVIS también desarrolla una arquitectura abierta para conectar en el vehículo sistemas de gestión del tráfico con servicios telemáticos en la carretera. CVIS está desarrollando una solución innovadora que permita a cada vehículo comunicar y cooperar directamente con la infraestructura y con otros vehículos de forma segura y efectiva. Las tecnologías de comunicación en CVIS son las tres originales de la arquitectura CALM (M5, IR y 2G/3G).

CVIS proporciona una capa middleware con un entorno de desarrollo que contiene módulos de identificación y seguridad e interfaces de programación de aplicaciones para los vehículos, los equipos de carretera y los conductores. Estas interfaces se basan en estándares abiertos, para asegurar que los usuarios de CVIS puedan acceder a ellas en cualquier parte y que los proveedores puedan proporcionar servicios a todos los vehículos.

2.4.1.8. COOPERS

COOPERS (CO-Operative SystEms for Intelligent Road Safety) es un proyecto del 6^o Programa Marco cuyo objetivo es desarrollar a largo plazo aplicaciones telemáticas innovadoras para la infraestructura con el objetivo de gestionar el tráfico de forma cooperativa entre el vehículo y la infraestructura. Esta actividad permitirá salvar la brecha del desarrollo de aplicaciones telemáticas entre la industria automovilística y los operadores de la infraestructura. El objetivo es mejorar la seguridad de la carretera dirigiendo y actualizando la comunicación de la información de tráfico entre la infraestructura y los vehículos en una sección de la carretera. COOPERS evalúa las prestaciones de las tecnologías de comunicación: DAB, DVB-H, GSM/GPRS, WiMAX,

CALM-IR, y CALM-M5 en una comunicación I2V bi-direccional. La unidad embarcada en este proyecto consiste en una puerta de comunicación para las tecnologías definidas y un Automotive PC que incluye una unidad de posicionamiento robusta. La unidad de la carretera combinará un controlador RSU con puerta de comunicación de corto alcance con el vehículo así como con el centro de control y una plataforma de gestión de sensores.

Las arquitecturas COOPERS y CVIS muestran que una localización robusta, crucial en aplicaciones e-Safety, sólo se puede obtener aunando tecnologías. La integración de comunicación I2V y V2V es una manera de conseguir una localización robusta.

2.4.1.9. PReVENT

El proyecto PReVENT de la industria europea cofinanciado por la CE contribuye a la seguridad de la carretera desarrollando y demostrando técnicas y aplicaciones seguras [Amditis 10, Bertolazzi 10]. Las aplicaciones de seguridad ayudan a los conductores a evitar o mitigar accidentes usando sistemas que detecten la naturaleza y gravedad del peligro a la vez que tienen en cuenta el estado de alerta del conductor. Para ello se integra un amplio rango de sensores (infrarrojos, vídeos y cámaras, lidar y radar, giróscopos, acelerómetros, sensores inerciales etc.) y el procesamiento de datos sensoriales proporciona un entorno virtual del vehículo, por ejemplo la posición y la trayectoria de un peatón. Los mapas digitales y los dispositivos de localización (GPS, GNSS y Galileo) pueden ser percibidos como sistemas sensoriales adicionales para identificar con precisión la posición de un vehículo e interpretar su entorno de forma que se pueda predecir su trayectoria. Las comunicaciones V2V e I2V pueden enviar información desde un vehículo a otros o a la infraestructura, así como recibir información de seguridad que complementa la que se adquiere en tiempo real. El objetivo de estas aplicaciones preventivas es ayudar al conductor, cambiando su comportamiento en ciertas situaciones.

2.4.1.10. INTERSAFE 2

Este proyecto, que finalizará en 2011, es la continuación del subprograma INTERSAFE que se encontraba dentro del proyecto PReVENT. El principal objetivo de este proyecto es realizar un sistema de control que sea capaz de gestionar tres vehículos -uno de ellos un autobús- en una intersección para evitar un posible accidente. Si el sistema detecta una situación de riesgo, tomará el control de los vehículos cercanos al entorno de la intersección para incrementar la seguridad. Para la realización de dicho objetivo se contará con un sistema de comunicaciones que permitirá obtener información tanto del resto de vehículos que circulan por la vía como de los sensores ubicados a lo largo de la infraestructura.

2.4.1.11. Cybercars, Cybercars-2 y Cybercars-3

Pensando que a corto plazo circularán por ciudades y carreteras unidades de transporte cibernético basados en vehículos completamente automáticos, un grupo de investigación del INRIA francés ha desarrollado una serie de proyectos denominados Cybercars en alusión a los vehículos biplaza eléctricos diseñados y montados para el desarrollo de dichos proyectos (ver Fig. 2.12).

De gran relevancia fueron los logros alcanzados en el proyecto CYBERCARS-2 donde se desarrolló una arquitectura de control de vehículos autónomos [Naranjo 09] que mediante un sistema de comunicaciones eran capaces de implementar maniobras de cooperación entre tres vehículos completamente automáticos. Dichos vehículos eran un cybercar del INRIA, un smart de TNO (Holanda) y un Citroen del IAI-CSIC.

En el proyecto actualmente en ejecución, Cybercars-3, el objetivo buscado es la introducción de este tipo de vehículos eléctricos biplazas en zonas con alta congestión de tráfico [Xia 10]. Para la realización experimental se espera realizar pruebas en ciudades asiáticas de alta densidad de población que se consideran óptimas para la inclusión de este tipo de vehículos en el mercado.

2.4.1.12. Iniciativa e-Safety

eSafety es una iniciativa conjunta de la industria y el sector público dirigida por la CE y copresidida por ERTICO-ITS Europa y ACEA (Association of European Car Manufacturers) con el fin de promover el desarrollo, despliegue y uso de sistemas inteligentes de seguridad en vehículos para mejorar la seguridad y reducir el número de accidentes en las carreteras europeas. eSafety se apoya en tecnologías de información y comunicaciones y lleva a cabo actividades importantes de investigación y desarrollo para cubrir sus ambiciosos objetivos. eSafety es el “Primer pilar de la iniciativa del coche inteligente”. Engloba los proyectos financiados por la Comunidad Europea en estos asuntos, 38 proyectos del FP6 y, actualmente, 25 del FP7.

2.4.1.13. Consorcio Car2Car

La misión del consorcio es crear sistemas de comunicación intervehiculares -Car2Car- estándar abiertos y europeos basados en redes LAN inalámbricas para la industria y garantizar la operatividad en toda Europa. Sus objetivos concretos son:

1. Desarrollar aplicaciones seguras haciendo especificaciones, prototipos y demostraciones del comportamiento del sistema Car2Car.
2. Promover la asignación de una banda de frecuencia exclusiva y gratuita para aplicaciones Car2car en toda Europa,
3. Impulsar la armonización de comunicaciones Car2Car estándar en todo el mundo,



Figura 2.14: Caravana de vehículos siguiendo a un vehículo guía en autopistas.

4. Desplegar estrategias y modelos de negocio realistas para acelerar su penetración en el mercado.

2.4.2. Proyectos americanos

2.4.2.1. PATH

Proyecto integrado por la universidad de California en colaboración con el Departamento de Transportes de California, el Departamento de Transportes de Estados Unidos, junto con otras agencias y organizaciones tanto públicas como privadas. Su objetivo es desarrollar estrategias y tecnologías innovadoras en el campo de los ITS mejorando la seguridad, flexibilidad, movilidad y administración de los sistemas de transporte en California -fundamentalmente la fluidez en sus congestionadas autopistas-, Estados Unidos y en todo el mundo.

El trabajo de investigación está dividido en tres grupos. El primero de ellos se encarga de la toma de datos para ver las necesidades reales en carretera de un vehículo autónomo. El segundo, operativo desde 2002, se centra en el estudio de las tecnologías y servicios que podrían mejorar el transporte a la vez que reducir el impacto ambiental mientras que el último grupo es el encargado de las comunicaciones V2V e I2V.

En San Diego del 7 al 10 de agosto de 1997 tuvo lugar la presentación de una caravana de 8 vehículos en la *National Automated Highway Systems Consortium Technical Feasibility Demonstration* para mostrar la posibilidad de operar automóviles estándar poco separados bajo un sistema de control automático preciso a velocidad de autopista (Fig. 2.14). Los vehículos hicieron una travesía completamente automática y se demostró que es técnicamente posible y confortable en un futuro próximo. La demostración fue diseñada por investigadores del programa PATH para mostrar que la automatización de vehículos puede reducir la congestión del tráfico.

Los ocho vehículos operaron en estrecha coordinación mostrando que un sistema de autopistas automatizado puede aumentar el flujo de tráfico. En la demo los vehículos se movieron a una distancia fija de 6.5 metros a cualquier velocidad. A esta distancia, la circulación de caravanas de vehículos separadas 60 metros a 60 mph supondría una capacidad de 5700 vehículos por hora y por carril. Aumentando la separación un 25 % para permitir entradas y salidas de vehículos de la caravana supondría un flujo efectivo de 4300 vehículos por hora y por carril. En condiciones normales este flujo es de 2000 vehículos por hora y por carril.

Además una distancia tan corta entre vehículos puede reducir la resistencia aerodinámica del vehículo líder y de los siguientes. Estas reducciones, moderadas a una distancia de 6.5 m., pueden reducirse aún más a una distancia de la mitad. Los tests hechos en el túnel de viento de la Universidad del Sur de California han probado que la resistencia aerodinámica puede reducirse a la mitad si la distancia entre vehículos es la mitad de la longitud de un vehículo. Otros análisis hechos en UC Riverside han mostrado que la reducción de la resistencia se traduce en una disminución de combustible del 20 al 25 %.

2.4.2.2. DARPA

DARPA, que toma sus siglas del inglés Defense Advanced Research Projects Agency no es propiamente un proyecto de investigación sino una competición de vehículos autónomos. Sin embargo, y debido a los grandes avances obtenidos a través de la misma, merece la pena ser citada.

Este programa de investigación y desarrollo en vehículos autónomos está orientado a su utilización en el campo militar para mantener a los soldados fuera de peligro evitando posibles problemas. En esta competición intervienen vehículos terrestres autónomos maniobrando en un entorno que simula una ciudad, realizando misiones de suministro militar mientras interacciona con el tráfico existente evitando obstáculos e intersecciones peligrosas. La competición se divide en una serie de rondas clasificatorias que culminan en un evento final cuya última edición se ha desarrollado el 3 de noviembre de 2007 en Victorville, California. El equipo Tartan Racing, ganador de esta edición, recorrió por un entorno urbano 85 km en algo más de cuatro horas.

Este programa es la continuación de dos competiciones precedentes de vehículos autónomos denominadas DARPA Grand Challenge. La primera de ellas tuvo lugar en marzo de 2004 y el objetivo era cubrir 230 kilómetros de desierto. Un total de cincuenta vehículos formaron parte de esta primera edición aunque ninguno consiguió terminarla. En la edición de 2005, cuatro vehículos concluyeron con éxito la prueba completando una ruta de 213 kilómetros invirtiendo el vehículo ganador, un total de diez horas en realizarla.

Capítulo 3

Arquitectura de control de tráfico

El objeto de la presente tesis es el desarrollo de un sistema de control capaz de gestionar el tráfico en un área, ya sea en zona urbana, peri-urbana o en conducción en carretera. De esta manera, se pretende alcanzar un sistema capaz de incrementar la fluidez del tráfico así como producir una mejora notable en la seguridad tanto de los peatones como de los ocupantes de los vehículos.

Con este fin, se utilizarán dos vehículos eléctricos completamente automatizados, dos Citroën Berlingos denominadas Rocinante y Babioca, que fueron objeto de tesis doctorales desarrolladas con anterioridad [Sotelo 01, Naranjo 05a], y se incluirán dos nuevos vehículos, un Citroën C3 Pluriel, llamado Clavileño, completamente automatizado y otro Citroën C3, Platero, cuyos actuadores no han sido modificados. De esta forma, se busca consolidar un paso intermedio entre la circulación completamente automatizada y la situación actual: la coexistencia entre vehículos conducidos de manera autónoma y vehículos guiados por conductores humanos.

El desarrollo en los últimos años de sistemas de ayuda a la conducción (ADAS, de sus siglas en inglés advanced driver assistance systems) han sido bien aceptados por los conductores que a través de sistemas como el ACC han encontrado una ayuda que les facilita la conducción de manera significativa. Visto esto, el objetivo final de esta tesis es desarrollar un sistema global que permita guiar a los vehículos de forma automática y que además dichos vehículos puedan convivir con los vehículos tripulados por conductores humanos.

Para alcanzar este objetivo, se presenta una arquitectura global de comunicaciones que permita conocer y controlar en todo momento la ubicación de todos los vehículos que circulan a través de ella. De esta manera, podemos transmitir esta información a los vehículos guiados automáticamente para que tomen las acciones oportunas en función de las condiciones del tráfico con el fin de aumentar la fluidez y seguridad.

En este capítulo presentaremos dicha estructura global y la división de la misma para tratarla como pequeñas celdas independientes que puedan interactuar entre ellas de la manera más eficiente posible. En el siguiente capítulo, iremos detallando nuestra arquitectura hasta llegar al quantum indivisible de la misma: el vehículo.

3.1. Introducción

El gran desarrollo de los sistemas inalámbricos de comunicaciones en los últimos años, unido a las exigentes necesidades implícitas a la naturaleza de los sistemas inteligentes de transporte, ha provocado el interés por parte de los fabricantes de vehículos como tecnología a embarcar en los mismos. La posibilidad de dotar a los vehículos de la capacidad de transmitir su intención o su situación actual, puede disminuir de manera significativa el número de accidentes tanto en carreteras como en entornos urbanos.

Uno de los estándares en desarrollo en este sentido son las denominadas Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC del inglés Dedicated Short Range Communications) [Miller 01]. Este nuevo estándar que cubre el espectro entre los 5,850 y los 5,925 GHz está asignado por la FCC estadounidense para mejorar la seguridad y la productividad en los sistemas de transporte. El comité de estandarización E17.51 de la ASTM (American Society for Testing and Materials) trabaja en el desarrollo del estándar para aplicaciones entre vehículos basadas en comunicaciones inalámbricas. DSRC es un servicio de comunicación de alcance medio con la intención de apoyar la Seguridad Pública en la interacción V2V. DSRC complementa las comunicaciones móviles proporcionando muy altas capacidades de transferencia de datos en circunstancias donde la reducción al mínimo de los retardos en la comunicación son fundamentales. El objetivo de estas comunicaciones es que sean orientadas, esto es, que cada vehículo sólo establezca conexión con los vehículos que le resulten de interés a corto plazo para coordinar las maniobras con ellos. De esta forma, se reduce el número de canales abiertos entre vehículos para evitar posibles cuellos de botella en la comunicación. En la actualidad, se está empleando en telepeajes y, uno de sus principales problemas radica en que la velocidad máxima del vehículo no debe superar los 40 km/h.

En una línea similar, se trabaja en el consorcio europeo Car2Car. Esta organización no lucrativa integrada por fabricantes de vehículos europeos como BMW, Daimler, Renault, Fiat o Audi entre otros, pretende mejorar la seguridad del tráfico en carretera y mejorar la eficacia de la misma mediante comunicaciones entre vehículos. Actualmente, se están realizando pruebas en dos frecuencias (2 y 5 GHz). También en Europa, y dentro de la denominada iniciativa *e-safety* hay alrededor de 60 proyectos dentro del sexto y séptimo programa marco donde la mayoría de ellos centran su trabajo en las comunicaciones entre vehículos.

En Japón, la iniciativa *Ubiquitous ITS* incluida dentro de *e-Japan Strategy* del Ministerio de Asuntos Internos y Comunicaciones trabaja en el desarrollo de sistemas de comunicaciones entre vehículos. El objetivo es utilizar dos canales: uno para la comunicación, en la banda de 5,8 GHz y otro para el control en la banda de 770 MHz. Para comunicaciones de situaciones críticas ambos canales están disponibles. DENSO realizó unas pruebas iniciales en abril de 2008 para mediciones de ruido con vehículos circulando por Abashiri (Japón). En marzo de 2011 están

previstas nuevas pruebas en la misma ciudad.

Así pues, se están desarrollando numerosas iniciativas en las que se encuentran implicados tanto gobiernos, como fabricantes y centros de investigación y desarrollo con la intención de buscar la solución óptima a la incorporación de sistemas de comunicación a los vehículos. En este trabajo, se presenta una arquitectura en la cual la comunicación no sólo se establece entre vehículos, sino que también se incluyen las infraestructuras. Mediante unidades centrales de control los vehículos pueden intercambiar información relevante de manera sencilla, confiable y segura.

3.2. Estructura general

La arquitectura propuesta se basa en estándares de comunicaciones inalámbricas. Las principales ventajas que presenta esta tecnología son su fácil implantación y poca carga de instalación, bajos costes de mantenimiento, movilidad dentro del área de la red e infraestructura escalable basada en la demanda, cobertura y concentración de vehículos. Como principales inconvenientes se encuentran su alcance y velocidad de transmisión limitado, las interferencias y apantallamientos de señal y los posibles problemas de seguridad. En la Fig. 3.1 podemos ver los principales estándares de comunicación inalámbrica en la actualidad.

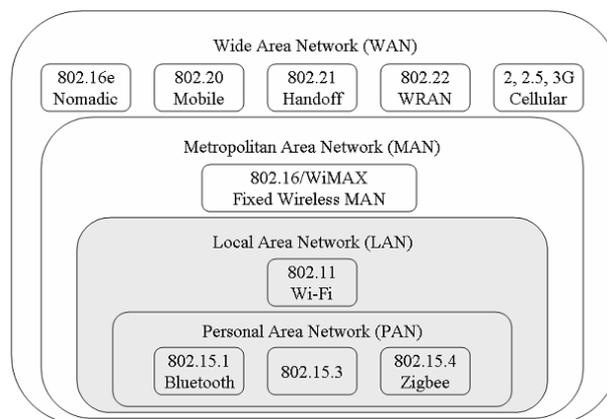


Figura 3.1: Principales estándares de comunicaciones inalámbricas.

La mayor limitación a la hora de utilizar un sistema de comunicaciones inalámbrico, es el alcance de la señal. Partiendo de este parámetro como principal limitador, se propone una estructura basada en áreas locales -celdas- de gestión del tráfico cuyos límites vendrán impuestos por la tecnología de comunicaciones empleada en cada caso. Dichas áreas locales tendrán zonas de solapamiento para permitir el flujo de información entre ellas y delimitar así cuando un vehículo se incorpora a un área y cuando lo abandona. Cada una de estas superficies acotadas contará con una unidad central de gestión del tráfico que estará encargada de recibir todos los datos suministrados ya sea por los vehículos o por la infraestructura circundante y, en función de

dicha información, mandar aquella que sea necesaria a los vehículos para que tomen las acciones oportunas. Una visión global del sistema propuesto se muestra en la Fig. 3.2.

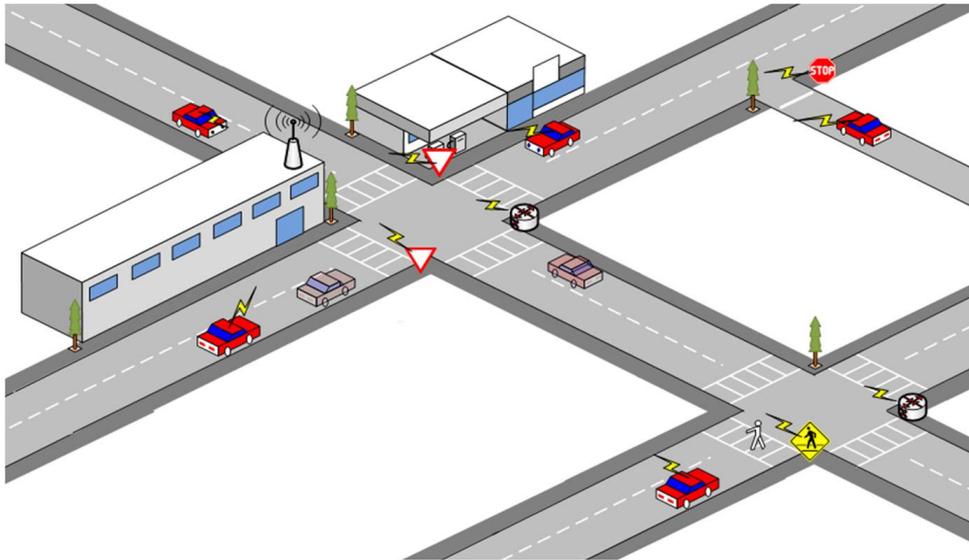


Figura 3.2: Esquema general del sistema de control de tráfico propuesto.

Cada estación central de control mantendrá comunicación con las estaciones centrales que la circundan para establecer así una topología en forma de enjambre de abejas y asegurar la cobertura total y la máxima fiabilidad posible al sistema diseñado. Una vez establecida esta red, cada vehículo o elemento de la infraestructura podrá conocer su estado y el de su entorno, actuando en consecuencia. Además, cada unidad central avisará del tránsito de vehículos salientes de su zona de control a la vez que recibirá la información proveniente de las estaciones cercanas acerca de los vehículos que van a entrar en su área.

3.2.1. Requisitos de la arquitectura

Con esta visión global de la arquitectura planteada, debemos pasar a fijar los requisitos mínimos que debe cumplir nuestra arquitectura para poder considerarla eficiente y segura. Así pues, las siguientes consideraciones deben ser tenidas en cuenta:

1. Debe existir al menos una unidad central de control dentro de cada área local considerada. Las funciones a desarrollar por esta unidad será la recepción y el control de toda la información recibida de los vehículos o dispositivos situados en la infraestructura que se encuentren dentro de su zona de cobertura.
2. Cada vehículo en circulación debe conocer la información de todos los vehículos que se encuentren dentro de un perímetro de seguridad previamente definido. Esto es, todo vehículo debe conocer sólo la información de los vehículos potenciales con los que puede interactuar.

3. La unidad de control que gestione la información del vehículo debe ser transparente al mismo. Con este requisito, independizamos la información recibida del área local en el que se encuentre el vehículo.
4. Existencia de una zona de itinerancia entre estaciones locales para permitir la continuidad en la comunicación evitando pérdidas de información.
5. Comunicación bidireccional entre todas las unidades centrales de control adyacentes para permitir el intercambio de información sobre los vehículos en itinerancia.

3.2.2. Especificación de la arquitectura de control

Definido el problema y teniendo en cuenta los requisitos fijados, vamos a definir la arquitectura que nos permita abordar la solución al mismo de una forma generalizada. Podemos dividir nuestra arquitectura en cinco etapas, cuya representación en forma de diagrama de bloques se muestra en la Fig. 3.3.

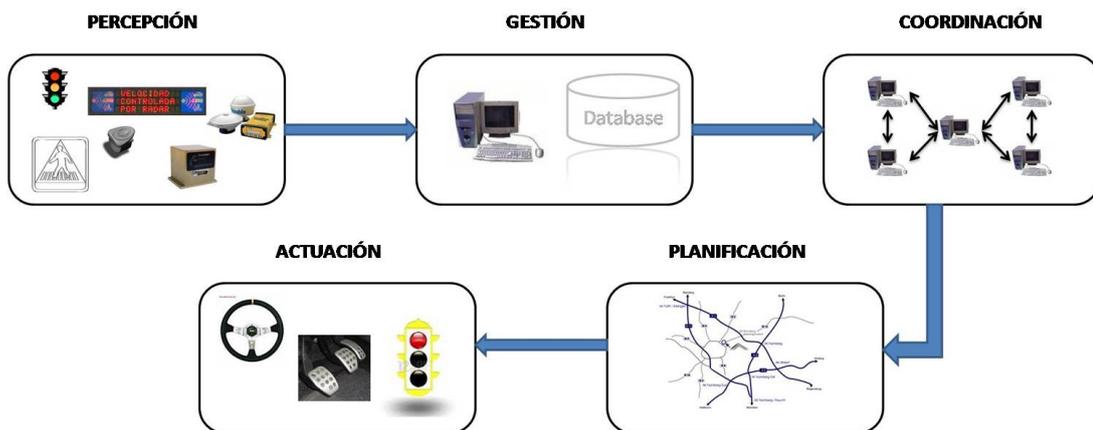


Figura 3.3: Etapas de la arquitectura propuesta.

1. **Percepción** en esta etapa se recoge toda la información sensorial proveniente tanto de la infraestructura (sensores Zigbee, RFID, información del tráfico a través de semáforos, ...) como de los vehículos (GNSS, IMU, brújula, CAN bus, ...) y se envía a las unidades locales de control.
2. **Gestión** en esta etapa cada unidad local de control recibe toda la información sensorial y se encarga de ordenarla de forma eficiente en función de las condiciones del tráfico y los posibles conflictos surgidos por culpa del mismo (atascos, accidentes, ...)
3. **Coordinación** en esta fase todas las unidades locales de control establecen comunicación con cada una de las estaciones locales con las que comparta zonas comunes, compartien-

do la información y seleccionando la información que será enviada a los vehículos y la infraestructura para que tomen las acciones de control oportunas.

4. **Planificación** durante esta etapa los sistemas de control ubicados ya sea en la infraestructura o en los vehículos seleccionan la mejor opción a tomar en función de la información que manejan.
5. **Actuación** finalmente se realizan las acciones oportunas ya sea modificando una luz de un semáforo, cortando o habilitando la circulación en un carril, modificando la velocidad de los vehículos o cambiando de carril para aumentar la fluidez del tráfico.

La relación entre cada uno de los niveles de la arquitectura propuesta se muestra en la Fig. 3.4.

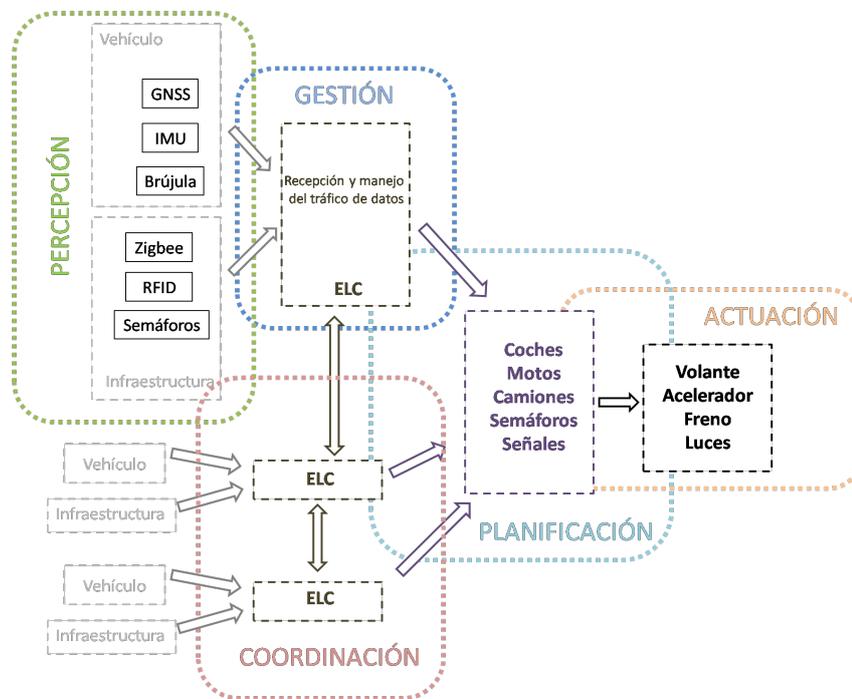


Figura 3.4: Relación entre los distintos niveles de la arquitectura propuesta.

3.2.3. Intercambio de información

La arquitectura descrita se basa en un intercambio de información entre los distintos elementos que la integran. Cada uno de los vehículos o dispositivos instalados en la infraestructura envía una trama estándar a la unidad central de control. Esta trama (Fig. 3.5) está formada por una cabecera, que incluye el identificador del elemento que envía la trama y marca temporal para sincronismo, y un campo de datos con la información necesaria para una correcta gestión

del tráfico desde la unidad central de control. Esta información será variable en función del elemento que mande la información. Así, un vehículo deberá transmitir su posición y velocidad; un semáforo el tiempo que lleva en un determinado estado; un sensor de detección el número de vehículos durante un determinado intervalo de tiempo, etc.

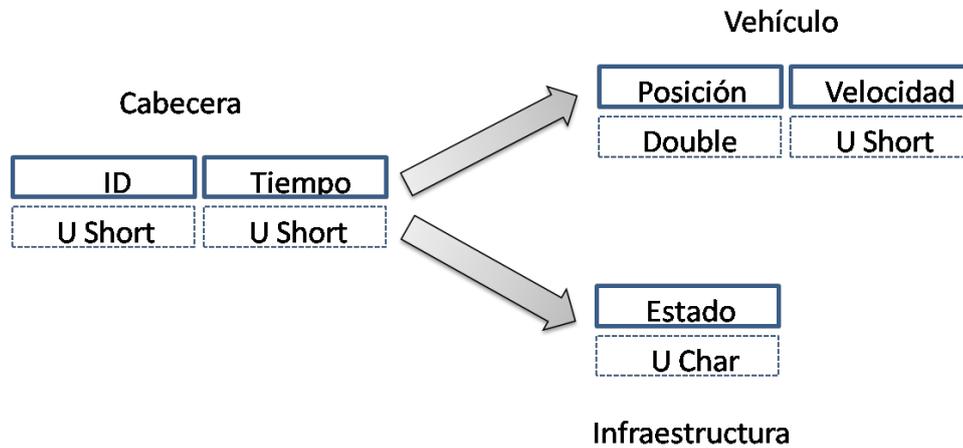


Figura 3.5: Estructura de la trama de comunicaciones desde un vehículo o elemento de la infraestructura a la unidad central de control.

En función del identificador detectado, la unidad central de control realizará un tratamiento distinto de la información recibida, procesará dicha información y reenviará las indicaciones oportunas a semáforos, señales de tráfico luminosas o sensores emplazados en la infraestructura o enviará la información de interés a cada vehículo en función de su radio de interés. Esta información, estará estructurada por un identificador que indicará el destino de la trama, un campo señalando el número total de paquetes a recibir, seguido de una marca de tiempo y, posteriormente, se incluirán los paquetes de datos. Si el envío se realiza a un sistema en la infraestructura será una orden para modificar o mantener su estado, mientras que si es para un vehículo se enviarán los datos relevantes en su zona de interés referidos a vehículos o a infraestructura (Fig. 3.6).

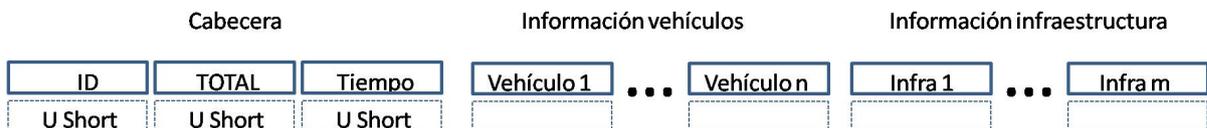


Figura 3.6: Estructura de la trama de comunicaciones desde la unidad central de control a un vehículo o a un dispositivo de la infraestructura.

Estas tramas, de frecuencia de envío variable en función de la criticidad de la acción asociada, deben ser seguras, fiables y de una longitud corta con el objetivo de no aumentar el ancho de

banda de forma innecesaria.

3.3. Implementación física

El punto crítico a la hora de implementar la arquitectura propuesta es la transferencia del control de vehículos entre celdas, es decir, el traspaso con éxito de la gestión del vehículo de una unidad de control a otra cuando se produce la salida de un vehículo de un área y su entrada en un área adyacente. El vehículo debe establecer la comunicación con la nueva unidad central de control para recibir la información desde ella y cerrar la conexión con la unidad de control del área abandonada de forma rápida y segura.

Para solventar estas zonas críticas, se han definido las zonas comunes a dos unidades centrales de control adyacente. Cuando un vehículo entra en esta zona, se incluye en el campo de datos de la trama enviada al vehículo un campo indicándole que se encuentra en una zona de solapamiento y la dirección física del nuevo centro de control al que debe conectarse. Al mismo tiempo, la información de ese coche es compartida por ambas unidades centrales hasta que se asegura la completa gestión del vehículo y su información por parte de la nueva unidad central. De esta forma, aseguramos la correcta recepción de los datos en todo momento, reduciendo el instante crítico a los retardos asociados al cierre de la conexión con la antigua unidad de control de referencia y la apertura de la comunicación con la nueva estación central.



Figura 3.7: Zona experimental y ubicación de las estaciones locales de control para validar la arquitectura propuesta.

3.3.1. Validación experimental

Para demostrar el correcto funcionamiento del sistema descrito, se realizaron diversos experimentos para comprobar la conmutación en la recepción de la información entre dos estaciones locales.

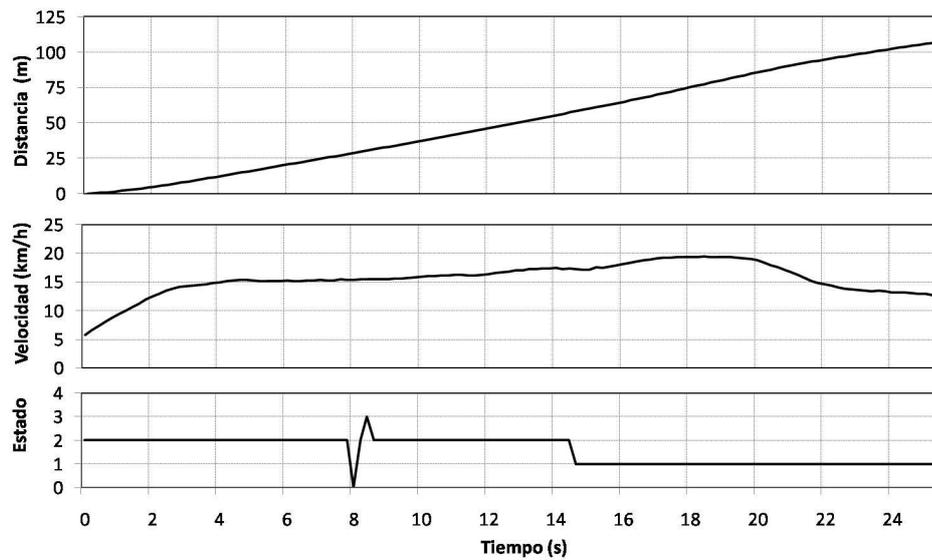


Figura 3.8: Resultado experimental de la conmutación entre dos estaciones locales de control de un vehículo.

Para realizar dichos experimentos se utilizó la pista de pruebas del IAI-CSIC (Fig. 3.7). Se definieron dos estaciones locales de control: la primera de ellas ubicada en lo alto de uno de los edificios pertenecientes a las instalaciones del IAI-CSIC y la segunda cerca de la intersección central de la pista de pruebas. De esta forma, la parte más alejada del edificio sólo era cubierta por la estación de control ubicada en la intersección e, igualmente, la zona más alejada del cruce era cubierta por la estación instalada en la terraza del edificio.

Con el objetivo de centrar el estudio en el cambio de estación de control de referencia, se seleccionó la recta central de las pistas -de longitud ligeramente inferior a los 200 metros- para este experimento. De esta forma, ambos vehículos partían de la 'Zona 2' para posteriormente entrar en la zona común, realizar la conmutación, y acabar en la 'Zona 1' sin que este cambio de estación afecte de manera significativa a la realización de la maniobra.

Las pruebas iniciales consistieron en pasar con un vehículo de un área a otra adyacente para determinar posibles fallos en la conmutación. La Fig. 3.8 muestra los resultados del experimento realizado. En la parte superior de la gráfica se muestra la distancia recorrida por el vehículo durante el experimento; inmediatamente debajo tenemos la velocidad de circulación del vehículo y en la parte inferior se muestra el estado de la comunicación entre el vehículo y la estación de control definido por cuatro posibles valores: '0' indica que el vehículo no se encuentra conectado a ninguna estación de control; '1' y '2' marcan la conexión del vehículo con las estaciones de control de la zona de cobertura 1 y 2 respectivamente; '3' es utilizado para indicar que se ha producido un retardo en las comunicaciones.

La toma de datos para la realización de este experimento se llevó a cabo a una frecuencia

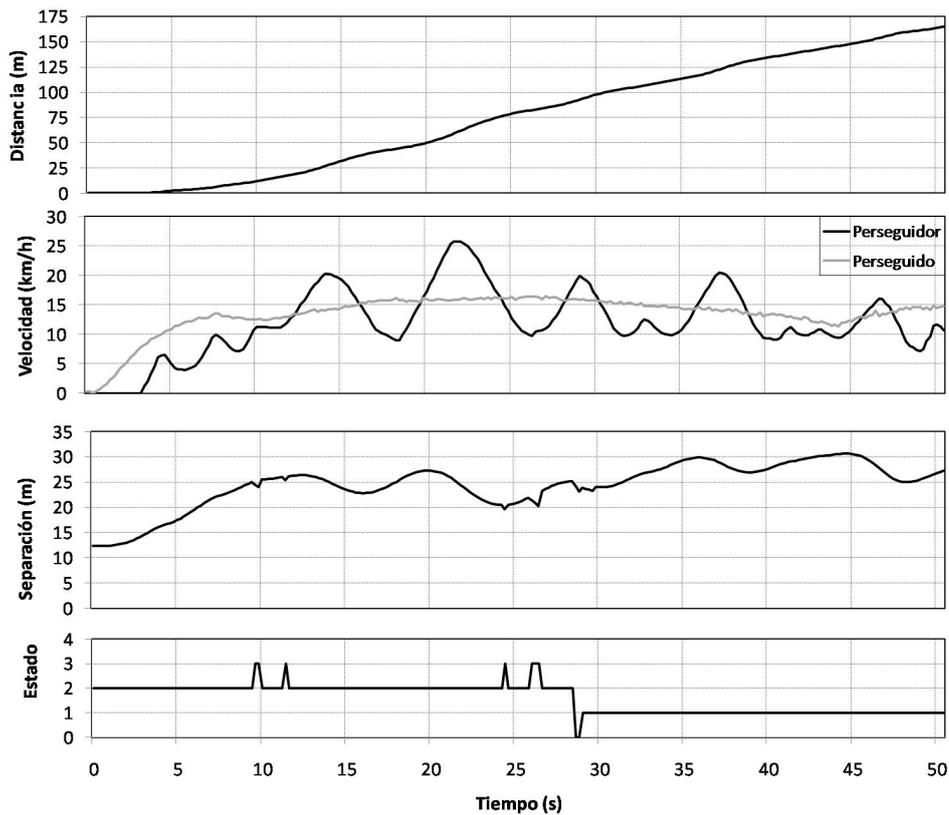


Figura 3.9: Resultado experimental de la conmutación entre dos estaciones locales de control durante la realización de un ACC.

de envío y recepción de datos de 5 Hz. En la gráfica del estado de la comunicación, se puede observar cómo se produce una desconexión durante un ciclo de control y, posteriormente, un retardo en la recepción de datos durante el siguiente ciclo, volviendo al fin a la normalidad. Respecto al cambio de estación que se produce alrededor del segundo 15, vemos que no hubo ninguna pérdida de información para el vehículo. De esta forma se comprueba que la conmutación entre dos estaciones de control es inmediata y los retardos o desconexiones derivados de ella no son superiores a los obtenidos si circulásemos por una zona cubierta por una única estación de control.

Posteriormente, se realizaron experimentos con dos vehículos controlados con ACC y que circulaban manteniendo una distancia de seguridad inferior a cuatro segundos [Naranjo 06], de tal forma que un fallo en el sistema de comunicaciones entre vehículos o en la conmutación entre dos estaciones de control puede causar un accidente de forma inmediata. En la Fig. 3.9 se muestran los resultados obtenidos. En las dos gráficas superiores se muestra la distancia recorrida por el vehículo perseguidor y las velocidades de ambos vehículos respectivamente. En las dos gráficas inferiores se aprecia la distancia de separación entre ambos vehículos y, finalmente, el estado de la comunicación definido de forma idéntica al ejemplo de un único vehículo. Se puede

ver, al igual que ocurría en el caso de un único vehículo, como se producen algunos retardos en la comunicación dentro de la 'Zona 2' de cobertura y en la conmutación entre zonas. Estos retardos no superan en ningún caso los dos ciclos de control. Teniendo en cuenta que la distancia de separación en tiempos entre dos vehículos es de al menos dos segundos, se pueden asumir esos fallos momentáneos en las comunicaciones, validando el sistema presentado.

Conviene notar que los experimentos muestran los resultados más desfavorables obtenidos durante varias pruebas, lo que demuestra la validez del sistema propuesto para llevar a cabo la transición entre estaciones locales.

3.4. Sistema local

Basado en el estudio llevado a cabo en el presente capítulo, vamos a centrar nuestro trabajo en la implementación de un sistema de gestión del tráfico en un área local, sabiendo que los resultados obtenidos se pueden extrapolar a una red global, compuesta por un número indeterminado de zonas -gobernadas cada una de ellas por una estación central de control- dando cobertura a una ciudad, una región o un país entero. En cada celda el vehículo puede circular de manera autónoma, recibiendo la información de lo que sucede a su alrededor independientemente del controlador central que se encargue de transmitírsela.

Como hemos visto, nuestro estudio se puede reducir a un único sistema local y fijar para éste las necesidades básicas del sistema de comunicación a implementar en función del flujo de vehículos. Así pues, podemos distinguir entre zonas urbanas con vías de circulación de más de dos carriles en cada sentido, zonas urbanas con dos o menos carriles de circulación en cada sentido, zonas peri-urbanas y circulación en carretera.

A pesar de que los experimentos mostrados en esta tesis abordan las comunicaciones inalámbricas mediante un sistema WiFi, es claro que la implementación debería depender de los requisitos del tráfico en la zona a gestionar, con diferentes sistemas de comunicaciones. Así, se podría pensar en sistemas WiMax para comunicaciones en autopistas y peri-urbanas, WiFi para zonas urbanas o incluso GSM o comunicaciones por satélite como apoyo a estas comunicaciones primarias aportando redundancia y una mayor seguridad.

Capítulo 4

Sistema de control embarcado en el vehículo

En este capítulo se presenta el quantum de nuestra arquitectura global de control de tráfico: el vehículo automatizado. Para ello, partiremos de los avances realizados en este campo en el programa AUTOPIA, el punto de partida de esta tesis doctoral. A partir de ahí, presentaremos las principales aportaciones y mejoras a la arquitectura de control.

En la tesis de la que parte este trabajo [Naranjo 05a], se presentó la arquitectura embarcada en los vehículos para su control, tanto longitudinal como lateral. Esta arquitectura, fue implantada en dos furgonetas eléctricas Berlingo y se realizaron diversos experimentos para demostrar su correcto funcionamiento. Las mejoras introducidas al sistema previamente diseñado aportados por la presente tesis, se implantaron en otro de los vehículos del grupo AUTOPIA: un Citroën C3 Pluriel descapotable, donde la inclusión de centralitas de control electrónico propias de los coches comerciales actuales, modificaba el enfoque requerido para el correcto control del vehículo.

El desarrollo de este capítulo se va a estructurar de la siguiente manera. En primer lugar se presenta la arquitectura de control del grupo AUTOPIA. Seguidamente, se explica la instrumentación del vehículo en el comienzo del desarrollo de esta tesis doctoral. Posteriormente, se presentan las aportaciones fundamentales a esta arquitectura para mejorar su funcionamiento y las modificaciones realizadas a bajo nivel. Así, se muestra el desarrollo de un nuevo sistema de guiado basado en fusión sensorial y se presenta la implementación de un nuevo sistema de frenado automático para el vehículo, probado con la implementación del control longitudinal del mismo.

4.1. Arquitectura AUTOPIA

La arquitectura de control embarcado en los vehículos del programa AUTOPIA tiene en cuenta la forma en la que el conductor humano lleva a cabo las distintas maniobras a las que se enfrenta durante la conducción. En primer lugar, el conductor humano recibe la información a través de los sentidos para, en función de esa información, decidir cual es la maniobra óptima en

función de la situación actual. Finalmente, transmite esa información a sus pies y manos que se encargan de ejecutarla sobre el volante y los pedales de acelerador y freno del vehículo.

El programa AUTOPIA, buscando en todo momento modelar el comportamiento humano, sigue una arquitectura de control jerárquica clásica que se puede descomponer en tres etapas: percepción, planificación y acción.

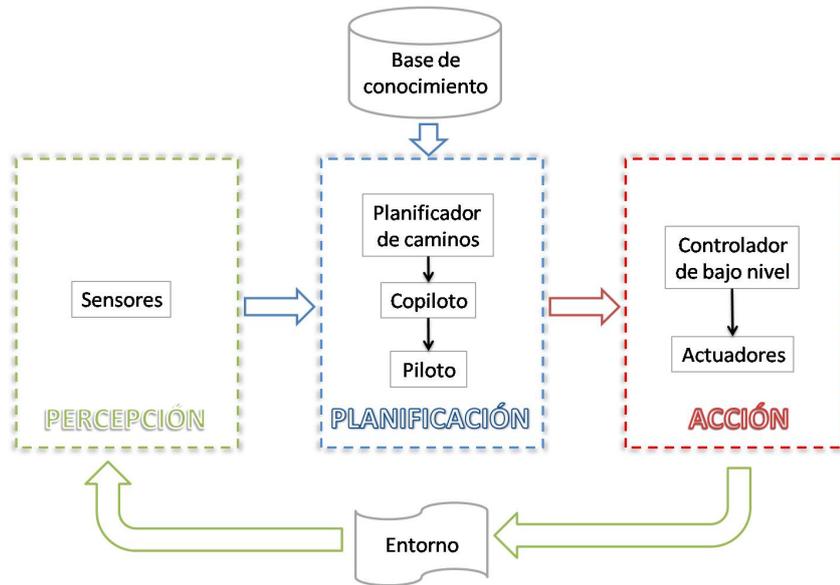


Figura 4.1: Representación esquemática de la arquitectura AUTOPIA.

Percepción: es la etapa en la que se realiza la adquisición y tratamiento de los datos del entorno provenientes ya sea del exterior o de los sensores embarcados en el vehículo. La principal entrada sensorial del sistema de percepción era la proveniente de un sistema de posicionamiento global diferencial con cinemática en tiempo real (RTK-DGPS, del inglés Real Time Kinematic Differential Global Positioning System).

Planificación: esta etapa que está subdividida a su vez en tres niveles, está formada por el planificador del camino, cuya misión es seleccionar la ruta que va a seguir el vehículo, el copiloto cuya misión es activar el modo de conducción que se debe utilizar en cada instante (hasta ahora se dividían en curva y recta) y el piloto, cuya misión es mover el vehículo. El piloto contiene los controladores que reciben sus entradas de los parámetros provenientes del copiloto y generan una salida hacia los actuadores.

Actuación: esta última etapa se encarga de la ejecución de las ordenes provenientes de la planificación sobre los actuadores del vehículo, esto es, el acelerador, el freno y el volante. Mientras que el volante y el freno se manejan a través de servomotores de corriente continua, el acelerador es gobernado mediante señales electrónicas que se envían directamente [Garcia 02]

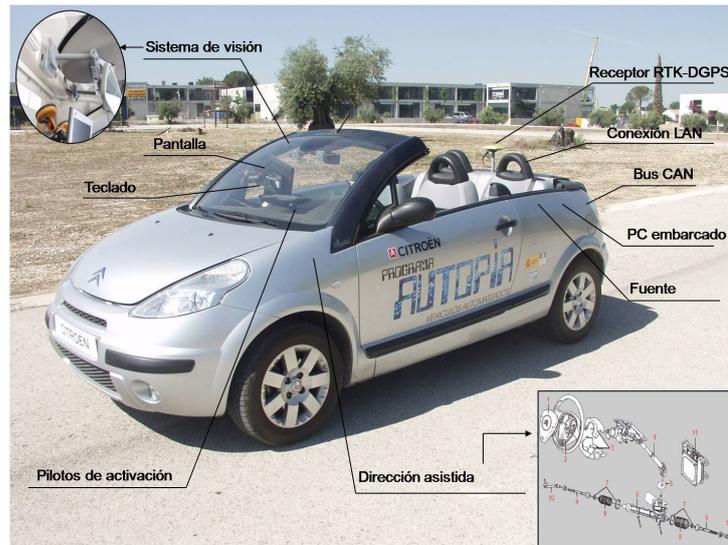


Figura 4.2: Equipamiento de Clavileño.

para accionar el controlador. En la Fig. 4.1 se presenta el esquema de la arquitectura de funcionamiento.

Esta arquitectura aquí presentada, cumple con las especificaciones necesarias para realizar un buen control sobre un vehículo y conseguir así un guiado automático. Sin embargo, dicha arquitectura presenta elementos cuya eficiencia puede ser mejorada. Estas mejoras forman parte de la aportación de esta tesis doctoral. En los siguiente apartados, veremos las modificaciones más importantes realizadas en cada uno de sus niveles.

4.2. Instrumentación del vehículo

Antes de comenzar a detallar las aportaciones a cada una de las capas de la arquitectura de control embarcado, se van a describir las características del vehículo utilizado, un Citroën C3 Pluriel, y la instrumentación incorporada al mismo -nivel hardware- del que partió esta tesis doctoral. Seguidamente, se presenta el motor de inferencia borrosa ORBEX (acrónimo de Ordenador Borroso EXperimental) encargado de generar las acciones de control -nivel software.

4.2.1. Nivel hardware

En la Fig. 4.2, se muestra una imagen del vehículo prototipo utilizado, bautizado con el nombre de Clavileño, y los sistemas embarcados en el mismo.

La instrumentación necesaria para el guiado incluye un PC embarcado que aloja el software de control; un receptor GPS diferencial como principal entrada sensorial para llevar a cabo el posicionamiento y posterior guiado del vehículo; una red inalámbrica LAN (del inglés, Local Area

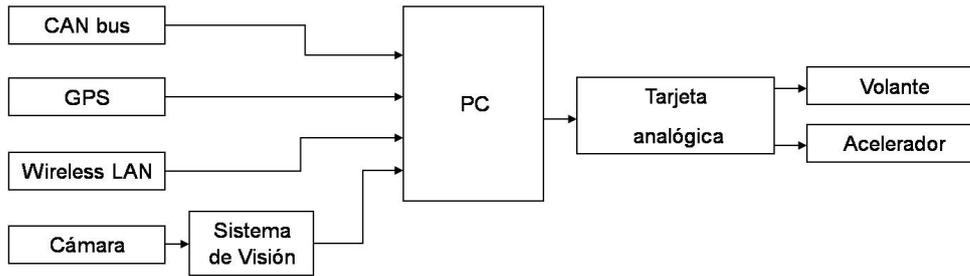


Figura 4.3: Diagrama de bloques del sistema de control AUTOPIA.

Network) para recibir las correcciones del sistema GPS y una tarjeta de entrada/salida digital encargada de enviar las señales de control generadas al volante y acelerador. El sistema de guiado también hace uso de la información que circula por el bus CAN del vehículo. Además de estos sistemas, el prototipo se encuentra equipado con un sistema de visión artificial -desarrollado por investigadores de la Universidad de Alcalá de Henares [Sotelo 01, Llorca 08]- cuyo software de control se encuentra instalado en otro ordenador conectado al PC de control a través de un cable Ethernet. En la Fig. 4.3 se muestra un diagrama de bloques del sistema de control desarrollado para manejar todos estos dispositivos.

La conducción de vehículos es un problema especial de control porque los modelos matemáticos son complejos y no son fácilmente linealizables. En nuestro caso, tanto el sistema de guiado del vehículo como el sistema de control del acelerador se modelaron utilizando reglas y variables borrosas que corrigen las desviaciones de la trayectoria y velocidad del vehículo. Esto se consigue comparando las medidas de posición del receptor GPS embarcado con la posición deseada del vehículo sobre un mapa cartográfico digital de alta precisión, en el que se fija el objetivo que se desea alcanzar y la ruta hasta el mismo.

Para realizar funciones tales como un control de cruceo adaptativo [Naranjo 06, Milanés 09a] o maniobras de adelantamiento [Alonso 07, Naranjo 08], además de la dirección y velocidad del vehículo es necesario considerar otras variables que el sistema de control del vehículo puede necesitar. Entre ellas, la distancia a la próxima curva, la distancia al vehículo precedente o la velocidad de éste.

Las aportaciones de esta tesis a esta arquitectura de control se centran en solventar dos problemas. En primer lugar, garantizar la medida de la posición del vehículo en todo momento. El sistema de posicionamiento del vehículo depende de la correcta recepción de la señal por parte del GPS embarcado, lo que provoca la inoperabilidad del sistema en zonas donde el receptor no reciba señal del satélite. Para ello, se ha desarrollado un sistema que combina los datos del bus CAN y los obtenidos a través de una unidad de medida inercial (IMU) [Milanés 08a]. En segundo lugar, garantizar un óptimo control longitudinal. Para ello se ha implementado un sistema de frenado electro-hidráulico [Milanés 10a].

Los sistemas explicados a continuación han sido instalados en el vehículo de la Fig. 4.2. Así mismo, las furgonetas que ya estaban automatizadas con anterioridad, han sido adaptadas con nuevos sistemas de control [Milanés 09b, Perez 09, Milanés 10b] siguiendo la arquitectura de control especificada.

4.2.2. Nivel software

Desde el punto de vista software, los sistemas de control embarcados en los vehículos para llevar a cabo el control lateral y longitudinal están basados en lógica borrosa y, concretamente, en ORBEX que es un motor de inferencia con un lenguaje de entrada muy sencillo basado en el lenguaje natural desarrollado en el IAI-CSIC [Garcia 98, Garcia 00].

Existen multitud de enfoques para abordar el control de los actuadores del coche. Los métodos convencionales de control producen buenos resultados a costa de un alto coste computacional y de diseño debido a que el objeto a modelar, un coche, es un sistema puramente no lineal cuya representación matemática se hace sumamente costosa [Sheikholeslam 92, Rossetter 02].

Los conjuntos borrosos, introducidos por Zadeh en 1965 [Zadeh 65], presentan una solución para la imprecisión a la hora de definir los conceptos que se encuentran en el mundo real. A partir de esta idea inicial, surgieron los controladores borrosos [Zadeh 73] y su aplicación a infinidad de procesos industriales. La lógica de los conjuntos borrosos se puede considerar como una potente herramienta para el control de procesos no lineales que son difíciles de modelar. Este método ha sido usado para controlar sistemas tan diferentes como helicópteros [Sugeno 95] o invernaderos [Salgado 05] siendo esta una de las razones por las que el grupo AUTOPIA lo considera una buena solución para atacar el problema de los vehículos autónomos.

Desde un punto de vista funcional, el razonamiento borroso se hace en tres etapas: fuzificación, inferencia y desfuzificación.

Fuzificación: en este paso, se transforma el valor numérico de la variable de entrada en un valor lingüístico que pueda ser procesado por el compilador borroso. Esta transformación asigna un grado de pertenencia del valor numérico a cada uno de los valores lingüísticos de entrada.

Motor de inferencia: es el encargado de generar la contribución de cada regla a la salida, en este caso, la acción de control sobre los actuadores del vehículo. El método de inferencia usado en Mamdani [Mamdani 74](min-max) para resolver la implicación.

Defuzificación: en este último paso se calculan los valores concretos de las variables de salida que posteriormente serán transformados en señales de tensión interpretables por los actuadores del vehículo. En nuestro caso, usaremos el método del centro de masas (4.1):

$$y_{CoA} = \frac{\int B \cdot y dy}{B dy}; B = \cup \omega_i B_i \quad (4.1)$$

donde ω_i representa el grado de contribución, resultante de la inferencia, de la i -th regla y B_i es la función de pertenencia para los diferentes valores de las variables de salida de la i -th regla.

En nuestro caso, las variables de salida borrosas se definen mediante *singletons* de Sugeno [Takagi 85] que se basan en funciones monótonas. En este sentido, se modifica la ecuación del centro de masas y se aplica (4.2)

$$y'_{CoA} = \frac{\sum \omega_i B_i}{\sum \omega_i} \quad (4.2)$$

El entorno de desarrollo difuso ORBEX es usado por el grupo AUTOPIA para el modelado y ejecución en tiempo real de los controladores borrosos que controlan a los vehículos. Gracias a él, se pueden describir diferentes formas de conducción con el fin de emular comportamientos de diferentes tipos de conductores y adaptar la conducción a la situación actual del tráfico. Dichas estrategias pueden ser definidas e implementadas mediante reglas difusas del tipo:

SI...ENTONCES...

ORBEX trabaja con controladores difusos del tipo TSK (Takagi-Sugeno-Kang), con consecuentes del tipo Singleton, lo que nos permite tomar decisiones de control en un período de tiempo muy corto y con muy buena precisión, cualidad más que deseable para sistemas de tiempo real, donde el tiempo de inferencia es un aspecto vital, como puede ser la conducción automática de un vehículo.

Para el diseño de un controlador con ORBEX es necesario especificar 3 secciones fundamentales:

Las variables de entrada al sistema con sus respectivas etiquetas lingüísticas o particiones borrosas. Esta sección se inicia con la cadena Entradas:, seguida de las definiciones de las variables de entrada. La definición de variables de entrada se hará seguir el siguiente formato, donde (A,B,C,D) definen una función de pertenencia:

Entrada1 {Etiqueta11 A11 B11 C11 D11 Etiqueta12 A12 B12 C12 D12...}

Entrada2 {Etiqueta21 A21 B21 C21 D21 Etiqueta22 A22 B22 C22 D22...}

Las variables de salida del sistema con sus respectivas particiones (singletons). Esta sección se inicia con la cadena Salidas:, seguida de las definiciones de las variables de salida, que son descritas de manera muy similar a las entradas, salvo que con un único valor, que se usa para definir la posición del Singleton:

Salida1 {Etiqueta11 A11 Etiqueta12 A12...}

Salida2 {Etiqueta21 A21 Etiqueta22 A22...}

Un conjunto de reglas de inferencia que operan sobre las variables de entrada y salida de tal forma que a las variables de salida les sea asignado un valor. Esta sección tiene la particularidad de que permite escribir e identificar varios juegos excluyentes de reglas a los que llamaremos contextos. Cada contexto debe iniciarse con la palabra Reglas seguida de un nombre de contexto. Para describir las reglas, ORBEX permite el uso de una sintaxis, que le hace ser muy potente y flexible en la definición de reglas o en el uso de modificadores, aunque principalmente trabajaremos con reglas del tipo:

SI Entrada1 Valor1 Y Entrada2 Valor2 ENTONCES Salida1 Salida

Una vez presentados los sistemas embarcados en el vehículo, tanto a nivel hardware como software, se detalla a continuación cada una de las etapas de la arquitectura de control embarcado con la inclusión de los nuevos sistemas desarrollados.

4.3. Etapa de percepción

La adquisición de datos del entorno es el paso de partida y de mayor importancia a la hora de realizar una buena toma de decisiones. Una mayor y más confiable medida de las condiciones del entorno, nos permitirá aumentar la precisión y la fiabilidad de nuestro sistema con el fin de incrementar su seguridad y estabilidad.

Es claro que un sistema RTK-DGPS para los sistemas de control avanzado de vehículos (AVCS) tiene un gran potencial gracias a su capacidad de medida con un error no superior a dos centímetros. Sin embargo, aunque en zonas despejadas, como autopistas, el GPS tiene ventaja sobre otras técnicas de navegación, en otras situaciones la señal GPS se puede perder y, en este caso, se deben tener en cuenta dos situaciones: *a)* la posibilidad que se produzcan fallos de corta duración donde la señal se pierde y recupera en escasos segundos, por ejemplo en ciudad donde los edificios pueden ocultar momentáneamente la señal de los satélites y *b)* el caso de fallos prolongados, como es el caso de túneles. En la primera situación se pueden producir acciones indeseadas como frenadas o movimientos bruscos del volante que se deben suavizar. En la segunda situación el sistema es incapaz de funcionar de forma autónoma y se hace necesario un sistema alternativo de localización para evitar un accidente. En resumen, es necesario un sistema alternativo de localización que permita obtener una conducción más estable y una cierta independencia de las señales externas.

Gran parte de la literatura relacionada con estos temas trata de mejorar la respuesta del GPS añadiendo sensores auxiliares para medir la posición. En nuestro caso la respuesta del GPS es

difícilmente mejorable al tratarse de un GPS centimétrico, por lo que nuestro problema se reduce a los fallos en la recepción de la señal. La aportación de esta tesis al sistema de posicionamiento del vehículo consiste en la introducción de un nuevo sistema que permita solventar los problemas anteriormente mencionados, una unidad de medida inercial (IMU) [Britting 71].

La fusión de estos dos sensores para obtener el posicionamiento del vehículo aporta diferentes ventajas como:

1. No requiere modificaciones en la infraestructura por la que circula el vehículo, por lo tanto el sistema RTK-DGPS/IMU es más económico que instalar y mantener sistemas de referencias alternativos.
2. El conocimiento de la posición del vehículo a través de coordenadas geográficas ya sea en zonas despejadas o en túneles, permite obtener una mayor información sobre la ruta a realizar, por lo que la realización de la etapa de actuación puede mejorar significativamente.
3. Los valores obtenidos como salida del sistema sensorial incluyen posición, velocidad y altura y la inclusión de un sistema inercial puede incrementar significativamente la frecuencia de funcionamiento del sistema de control.

La fusión sensorial de estos dispositivos para mejorar de manera significativa el posicionamiento de los vehículos ha sido un trabajo que se ha venido desarrollando en los últimos años [Farrell 98]. Si hacemos un repaso de la literatura relacionada, encontramos sistemas desarrollados basados en esta fusión sensorial para aplicaciones en vehículos con el objetivo de incrementar significativamente la frecuencia de funcionamiento del sistema [Obradovic 07] y sistemas basados en filtros de Kalman extendidos para la combinación de sistemas GPS sin precisión centimétrica y unidades inerciales para mejorar el posicionamiento [Toledo-Moreo 07, Abdelazim 04, Rezaei 05, Yoon 07]. Estos sistemas, han sido aplicados a otros vehículos, como el guiado de tractores [Shen 07] e incluso a otros campos de investigación como es el guiado de proyectiles [Xiao 07].

Merece la pena destacar que el grupo AUTOPIA desarrolló un sistema para la plantación de viñas basado únicamente en GPS [González 02] ya que en áreas abiertas como son los terrenos agrícolas, no es necesaria la aportación de un sistema adicional para la localización.

4.3.1. La Unidad de Medida Inercial (IMU)

Se ha empleado una IMU300CC de la compañía Crossbow que es un sistema inteligente inercial con seis grados de libertad diseñado para la medición en tres ejes ortogonales, tanto de la aceleración lineal como de la velocidad angular, en entornos dinámicos. La IMU300CC utiliza un procesador digital de señales de alta precisión que suministra la salida, con la compensación debida a las fuentes de error determinístico que puedan existir dentro de la unidad. La compensación interna incluye el offset, el factor de escala y la alineación. Todos los elementos de medición son

dispositivos de estado sólido y permite salidas tanto analógicas como digitales para facilitar la integración del sistema.

El dispositivo dispone de dos modos de funcionamiento:

Scaled las señales provenientes del sensor son muestreadas, convertidas a señales digitales, compensadas y transformadas a unidades de ingeniería.

Voltage las señales del sensor son muestreadas y convertidas a señales digitales en unidades de tensión. Este segundo modo será el utilizado

La IMU300CC está equipada con un cableado para conectar la DMU (del inglés Dynamic Measurement System) con el puerto serie del PC que incluye: a) conector final de 15 pines del cable de la señal digital al puerto de la DMU; b) conector final de 9 pines del cable al puerto serie del PC; c) los cables adicionales que suministran la alimentación. La interfaz serie es RS-232 estándar, con una velocidad de transmisión de 38400 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de inicio, 1 bit de parada y sin control de flujo. El modo de medición selecciona la información que se envía en el paquete de datos sobre la interfaz RS-232. En el modo '*voltage*', la señal muestreada por los sensores analógicos se convierte a una señal digital con 1 mV de resolución. Este valor es la salida que obtenemos de los sensores. El dato es de 12 bits sin signo. El valor de cada sensor se envía en 2 bytes en el paquete de datos. La conversión del dato en tensión se realiza según la ecuación 4.3 donde tensión es la tensión medida por el sensor, y dato es el valor entero sin signo de 16 bits que se obtiene del paquete de datos.

$$tension = dato \cdot \frac{5V}{2^{12}} \quad (4.3)$$

Aunque el dato se envía como un entero de 16 bits, la resolución que tiene es únicamente de 12 bits. En general, la representación del dato digital en cada medición se envía como un número de 16 bits (2 bytes), el primero de ellos es el MSB (del inglés Most Significant Byte) y posteriormente se envía el LSB (del inglés, Least Significant Byte). Cada paquete de datos comienza con un byte de cabecera (0xFF) y finaliza con un checksum que se calcula sumando todos los paquetes excepto la cabecera y el checksum; dividiendo dicha suma por 256 y el resto de la división debe ser igual al checksum.

En la Tabla 4.1 se muestra el paquete de datos que envía la IMU en respuesta a una solicitud del programa de control.

4.3.1.1. Especificaciones iniciales

Una vez definidas las características y el modo de operación de la IMU, vamos a explicar su aportación al sistema de posicionamiento. Antes de continuar, debemos reseñar que la aceleración lineal obtenida a través del dispositivo fue descartada como medida ya que la vibración del coche

Byte	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor	255	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB
Medida	Header	Giro X		Giro Y		Giro Z		Acel X	
Byte	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Valor	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	
Medida	Acel Y		Acel Z		Temperatura		Hora		CRC

Tabla 4.1: Formato del paquete de datos de la IMU.

y el comportamiento ante continuas aceleraciones y frenadas provocaba que los valores obtenidos no fueran representativos del comportamiento del mismo. Por lo tanto, solamente los valores obtenidos de la velocidad angular fueron tenidos en cuenta. De los tres ejes, las variaciones en el eje X fueron descartadas ya que la inclinación del vehículo respecto a ese eje sólo tendría sentido en carreteras con un peralte continuado cuya construcción no nos encontramos en las carreteras convenciones. Así pues, las variables consideradas para el sistema de posicionamiento fueron las variaciones respecto a un eje perpendicular al coche que nos permitiera detectar los giros del mismo y los cambios referidos a un eje paralelo al vehículo que nos permitiera detectar la pendiente de la carretera por la que circulamos.

La inclusión de la IMU en el sistema de posicionamiento se realizó en dos etapas. La primera de ellas consistió en obtener una ubicación cercana al centro de gravedad del vehículo. El siguiente paso consistió en calibrar tanto el offset como la sensibilidad de cada uno de los dos ejes ortogonales que forman parte del sistema de guiado.

Para la calibración del offset procedemos de igual forma en los dos ejes. Realizamos una serie de medidas con el vehículo detenido y, en esas condiciones, el valor obtenido de la velocidad angular en cada uno de los ejes debe ser igual a cero. De esta forma, conseguimos el valor de tensión que hace cero cada uno de los ejes y cuyos valores se muestran en la Tabla 4.2. Teniendo en cuenta la fuerte dependencia de este parámetro con variables como el número de ocupantes del coche o la presión de las ruedas que modificaban significativamente los valores obtenidos, se desarrolló un programa que permite recalibrar estos valores antes de comenzar la conducción autónoma, reajustando así los parámetros iniciales.

Para la calibración de la sensibilidad, partimos del coche en una posición cuyo ángulo inicial es conocido en el eje que queremos calibrar y realizamos un movimiento del coche hacia una

Eje	Offset (V)
Y	2,50545
Z	2,5121

Tabla 4.2: Valores del offset para los ejes Y,Z.

Eje	Sensibilidad (%/s)
Y	50,2
Z	49,25

Tabla 4.3: Valores de la sensibilidad para los ejes Y,Z.

posición cuyo ángulo también es conocido en ese eje, deteniendo el vehículo en ese punto. Para calcular el ángulo que tenemos en cada punto, utilizamos la ecuación 4.4 donde ϕ es el ángulo en cada punto, ω es la velocidad angular obtenida de la IMU y Δt es el incremento de tiempo que transcurre entre la recepción de dos paquetes de datos consecutivos.

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \omega_{k+1} \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

Mediante iteraciones sucesivas, podemos ajustar la sensibilidad en cada uno de los tres ejes hasta obtener un valor igual al ángulo final ya conocido. Los valores alcanzados para cada uno de los tres ejes se muestran en la Tabla 4.3.

4.3.2. Diseño del sistema de posicionamiento

El sistema inercial presentado, se complementa con la información de la odometría del coche proporcionada por los sensores propioceptivos. Dicho valor se obtiene del conjunto de sensores situados en las ruedas del vehículo, cuyas medidas están disponibles a través del bus CAN del Citroën C3 Pluriel (Fig. 4.4). Con esta información, podemos obtener la posición del coche en un sistema de coordenadas global (Norte, Este) con independencia de la precisión del GPS y, así, comparar su posicionamiento con la cartografía digital de referencia [Serrano 05].

A partir del sensor que mide la velocidad del coche, podemos determinar la distancia recorrida, en metros (d_a), a través de la ecuación 4.5

$$d_a(m) = \frac{v_{sensor} \cdot \Delta t}{3,6} \quad (4.5)$$

donde v_{sensor} es el valor de la velocidad del coche obtenido directamente del bus CAN en km/h y Δt es el tiempo entre dos medidas consecutivas en segundos.

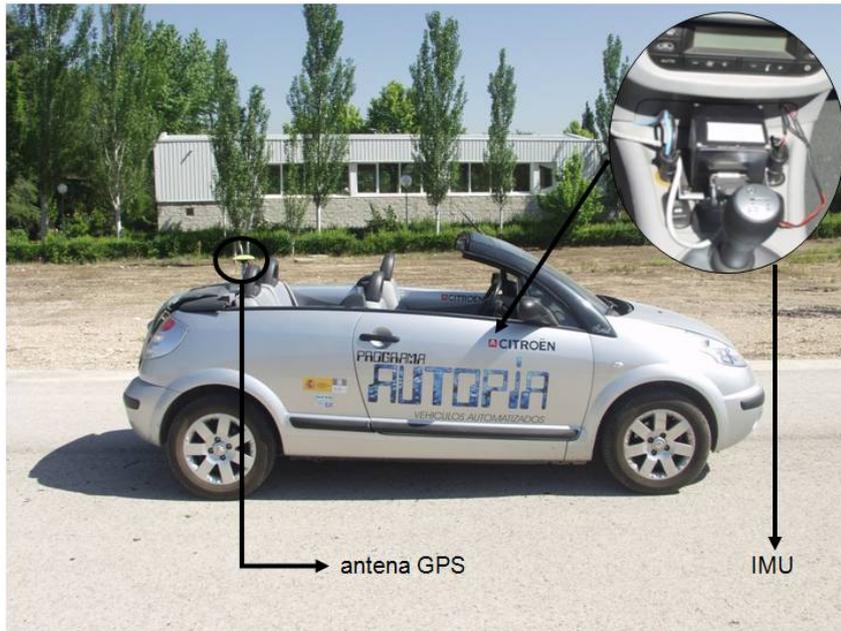


Figura 4.4: Citroën C3 Pluriel. Detalle de la ubicación del sistema de medida inercial y de la antena de recepción de la señal GPS.

Ángulo	Expresión
ϕ_Z	$\phi_Z = \arctan \frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}$
ϕ_Y	$\phi_Y = \arctan \frac{h_k - h_{k-1}}{\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}$

Tabla 4.4: Cálculo para la inicialización de los ángulos

La inclinación y orientación del vehículo se obtienen de la unidad de medida inercial (Tabla 4.4) y nos permiten determinar si nos encontramos en un tramo con pendiente y/o en una zona curva respectivamente. Los sensores miden cualquier variación angular que se produzca pero, para el control, necesitamos ángulos absolutos. Por este motivo, es necesario iniciar estos ángulos de manera correcta. Como se muestra en la Fig. 4.5, la posición GPS del vehículo permite determinar el ángulo inicial.

La distancia recorrida por el vehículo (d_a) debe ser corregida, ya que no se ha tenido en cuenta la pendiente de la carretera para su cálculo. Además, introducimos una constante de corrección (e_d) que contempla diversos factores como la presión de los neumáticos o el número de pasajeros. Mediante (4.6) podemos determinar la distancia real

$$d_r = d_a \cdot \cos(\phi_Y - e_d) \quad (4.6)$$

siendo d_r el valor de la distancia corregida y ϕ_Y el ángulo que determina la pendiente de la carretera. El valor de e_d se obtiene a través de (4.7)

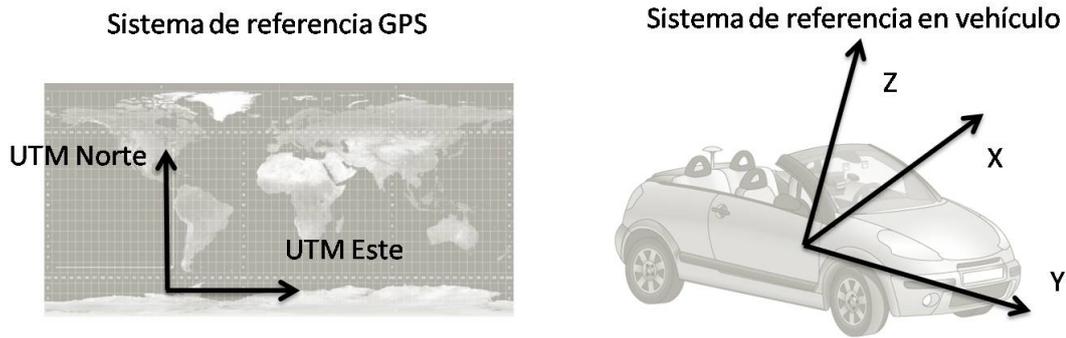


Figura 4.5: Ángulos de partida determinados a través del GPS.

$$e_d = \frac{d_{IMU} - d_{GPS}}{n} \quad (4.7)$$

donde d_{IMU} y d_{GPS} son las distancias medidas por la unidad inercial y el GPS respectivamente durante el tiempo en que la corrección diferencial está funcionando correctamente y n el número de muestras recibidas en este tiempo. El valor e_d se actualiza en tiempo real mientras el GPS trabaja con precisión centimétrica. Este valor se usa cuando entra en funcionamiento el sistema de control basado en la la unidad inercial.

Una vez determinada la distancia real recorrida y conociendo la posición actual del vehículo, podemos determinar la posición siguiente, mediante (4.8, 4.9).

$$X_{GPS,k+1} = X_{GPS,k} + d_r \cdot \cos(\phi_Z) \quad (4.8)$$

$$Y_{GPS,k+1} = Y_{GPS,k} + d_r \cdot \sin(\phi_Z) \quad (4.9)$$

Por otro lado, debemos tener en cuenta que en un mismo intervalo de tiempo el número de muestras adquirido por cada sensor es diferente; así, la frecuencia de muestreo del GPS es 5 Hz, los sensores de las ruedas mandan una señal cada 25 ms y la frecuencia de trabajo de la IMU es superior a 100 Hz. Este hecho motiva que determinemos el ciclo de control en función de la frecuencia del GPS, ya que su reloj es el de mayor precisión.

Para calcular la aceleración angular en cada instante de muestreo, diseñamos un filtro de Fourier cuyos parámetros se muestran en la Tabla 4.5. Con este filtro se consigue suavizar el valor obtenido de la medida y una importante disminución en el error de deriva.

El ángulo absoluto se obtiene de la aceleración angular en cada muestra según (4.4). Una vez conocida la posición del vehículo mediante este nuevo método de cálculo, se integra en el sistema de guiado del vehículo y entra en funcionamiento dependiendo de la calidad de la señal GPS, como se detalla a continuación.

Parámetro	Valor
Frecuencia de corte	0,01 Hz
Período de muestreo	0,00714 seg
Número de muestras	28

Tabla 4.5: Parámetros del filtro de Fourier para la aceleración angular.

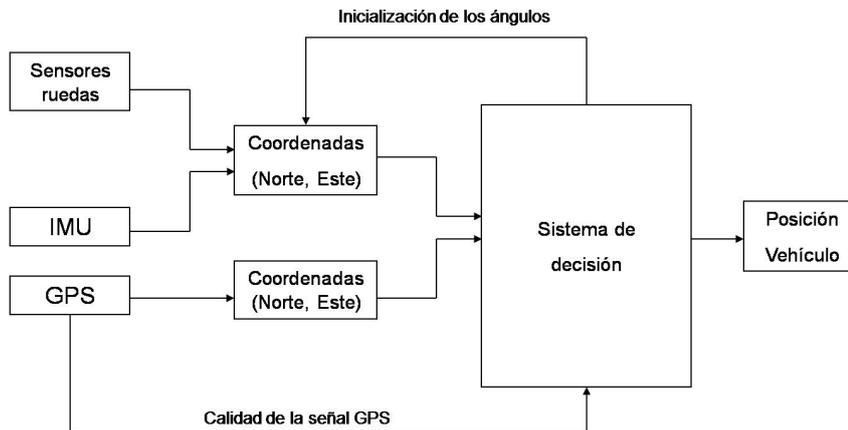


Figura 4.6: Diagrama de bloques de la etapa de percepción.

El GPS presenta cinco modos de funcionamiento en función de la precisión con la que proporcione la posición del vehículo:

1. Modo 0: el GPS no recibe señal.
2. Modo 1: el error oscila entre 15 y 20 metros.
3. Modo 2: el error en la medida puede llegar hasta los dos metros.
4. Modo 4: el error es inferior a 2 cm.
5. Modo 5: el error es de un metro.

En los tres primeros modos, el control del vehículo no puede basarse en la medida del GPS. Esto es evidente en el primero de ellos ya que no se recibe señal en el receptor mientras que en los otros dos no es lo bastante precisa para permitir un guiado automático. En el modo 4 la medida del GPS es la forma más exacta de determinar la posición del vehículo en un sistema de coordenadas global. En el modo 5 el error de la medida provoca que el volante realice movimientos bruscos. Para discernir qué sistema de posicionamiento utilizar en el control, se ha implementado una unidad de decisión que determina en cada momento cual es la medida que tiene mayor precisión (Fig. 4.6). Si el GPS se encuentra trabajando en los modos 0, 1 ó 2, el sistema formado por la IMU y los sensores propioceptivos toma el control, ya que los errores de medida del GPS son lo

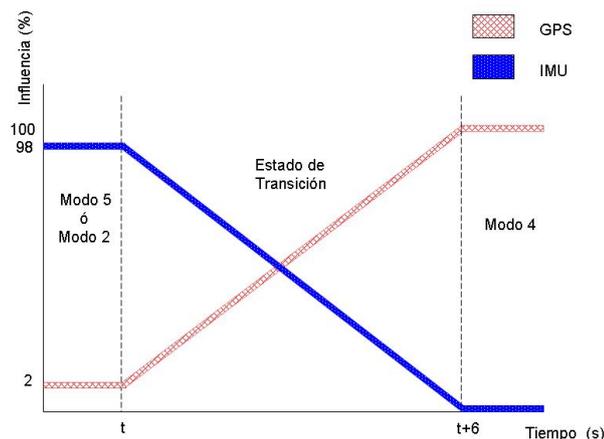


Figura 4.7: Uso de la IMU, el GPS o la fusión de ambos en función de la calidad de la señal GPS.

suficientemente grandes como para despreciar sus valores. Si el GPS funciona en modo 4, integrar cualquier otro sensor proporcionaría un posicionamiento peor. Si la calidad de la señal GPS es del tipo 5, utilizamos un sistema combinado de IMU y GPS. En este caso, aunque inicialmente la IMU tiene una mayor precisión, la degradación que experimenta su medida, debido a la deriva, recomienda fusionar los datos de la IMU con el GPS como pequeña corrección. La función esencial de la inclusión del GPS es como vector director.

Cuando se produce el cambio de un sistema a otro, pueden aparecer movimientos indeseados en el volante que deben suavizarse. En el caso de pasar de utilizar GPS a IMU en el sistema de control (modo 4 a modo 0, 1 ó 2), no se aprecian giros inesperados, pero las transiciones de la IMU al GPS (modo 2 ó 5 a modo 4) provocan cambios bruscos de dirección debido a que el sistema de control intenta retomar rápidamente la referencia marcada por el GPS. Para solucionar este problema y conseguir un ajuste suave en la vuelta a la referencia, se permite un tiempo de transición entre sistemas, cuya evolución se muestra en la Fig. 4.7. Es decir, en ese intervalo se toma un valor que pondere las medidas de ambos sensores.

Una vez conseguido ese retorno suave y con el GPS trabajando con la máxima precisión, se calcula nuevamente el ángulo inicial (Tabla 4.4) para el posicionamiento a través de la IMU, evitando de esta forma la degradación en la medida.

4.3.3. Validación del sistema diseñado

El sistema de control se ha implementado en Clavileño (Fig. 4.2) para validar el sistema diseñado a través de experimentos reales. Estos experimentos se han hecho en la pista de pruebas para vehículos autónomos propiedad del IAI-CSIC, que está dedicada exclusivamente a tareas de investigación. Tiene una forma reticulada con calles de seis metros de ancho, como las manzanas de una ciudad, con alguna irregularidad, ya que se han respetado todos los árboles, olivos, que

había en el terreno en el que se ha construido.



Figura 4.8: Recorrido seleccionado para la verificación del nuevo sistema de posicionamiento.

La Fig. 4.8 muestra el circuito de pruebas en el que se han hecho los experimentos y el recorrido efectuado por el vehículo. Se ha seleccionado este trazado por la combinación de tramos rectos con curvas muy pronunciadas, que nos permiten emular una conducción urbana.

Para estudiar distintos comportamientos del sistema, se han efectuado dos tipos de experimentos: una conducción manual, a modo de ADAS, para ver los errores del sistema diseñado y otra automática para comparar los valores obtenidos del sistema actual con el antiguo sistema.

El experimento con conducción manual se divide en dos casos. En ambos se realizaron con un conductor humano que trataba de seguir el centro de la carretera. El ancho de la misma es de seis metros, con lo que se pueden asumir errores inferiores a tres metros, ya que el coche se mantendría dentro de la vía. La velocidad en la realización del recorrido ha sido alrededor de los 25 km/h en los tramos rectos y en torno a los 12 km/h en los tramos curvos. La primera simula la pérdida de precisión de la señal del GPS en repetidas ocasiones durante intervalos de tiempo que oscilan entre uno y cinco segundos. Se trata de reproducir una situación real de conducción en ciudad en la que la presencia de edificios puede provocar esta pérdida. En este caso, ambos sistemas de posicionamiento se combinan para llevar a cabo el guiado del vehículo. La segunda, simula la pérdida total de la señal GPS durante más de un minuto, dejando el posicionamiento del coche exclusivamente al sistema inercial.

La Fig. 4.9 muestra el comportamiento del GPS en el caso de producirse pérdidas de señal durante cortos espacios de tiempo a lo largo del recorrido. En la Fig. 4.10 se muestra el error lateral del vehículo durante esas pérdidas de corta duración de la señal GPS. Se observa que para el caso más desfavorable el error es inferior a los dos metros lo que nos permitiría guiar el vehículo dentro de los límites de la carretera. Las diferencias de errores en los distintos tramos son debidas al cálculo de los ángulos iniciales del sistema basado en la IMU según la tabla 4.4.

Entre los segundos 40 y 50 se producen dos pérdidas consecutivas de muy corta duración, lo que provoca que, en el intervalo en el que hay señal de GPS entre ambas pérdidas, el coche esté retornando a la referencia cuando vuelve a caer la calidad de la señal. Esta situación es solventada de manera satisfactoria por el nuevo sistema de posicionamiento, evitando que el vehículo salga de la vía.

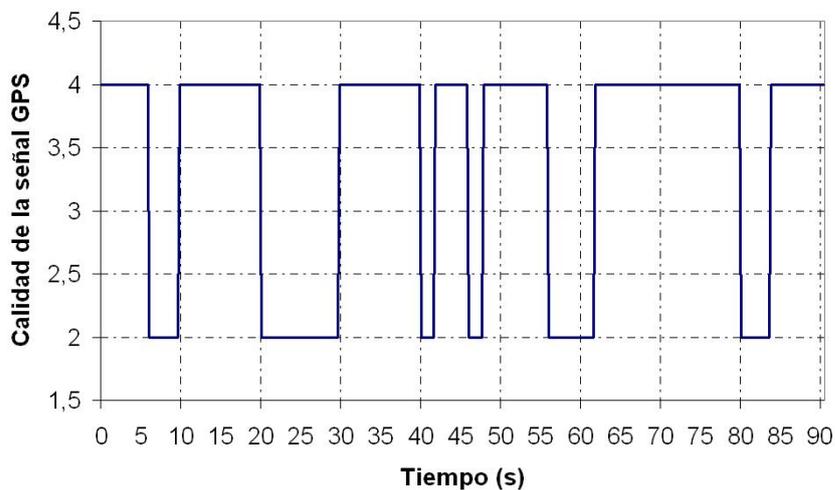


Figura 4.9: Calidad de la señal GPS para pérdidas de corta duración y repetitivas.

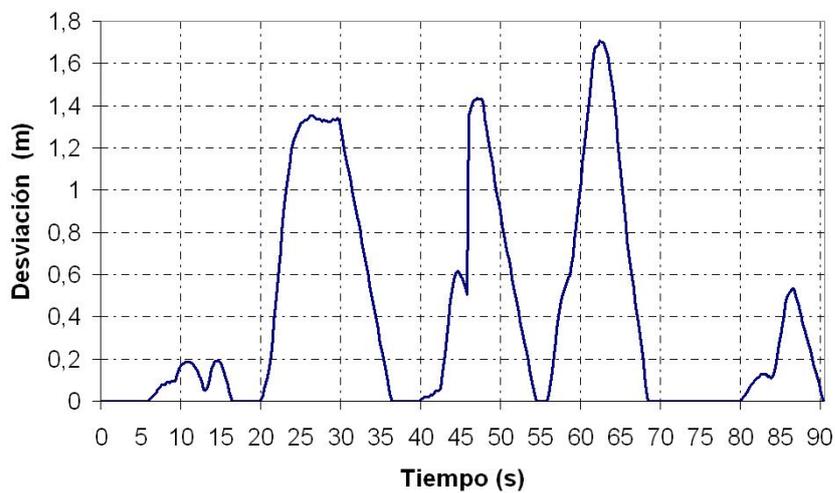


Figura 4.10: Desviación del vehículo respecto al centro de la carretera para el caso de pérdidas de corta duración y repetitivas.

Por otro lado, conseguimos que el volante gire de forma suave en todo momento. Se evita así que errores superiores a dos metros en la medida del GPS produzcan movimientos bruscos del volante y se mejora de esta forma la seguridad y el confort de los pasajeros.

En la Fig. 4.11 mostramos la calidad de la señal GPS para el caso de pérdida durante intervalos largos. En este caso, la señal GPS se pierde a partir del segundo diez y sería imposible localizar el vehículo con el sistema de posicionamiento global. El experimento reproduce la pérdida de señal en un intervalo de tiempo superior a un minuto, en el que se recorre una distancia de 500 metros.

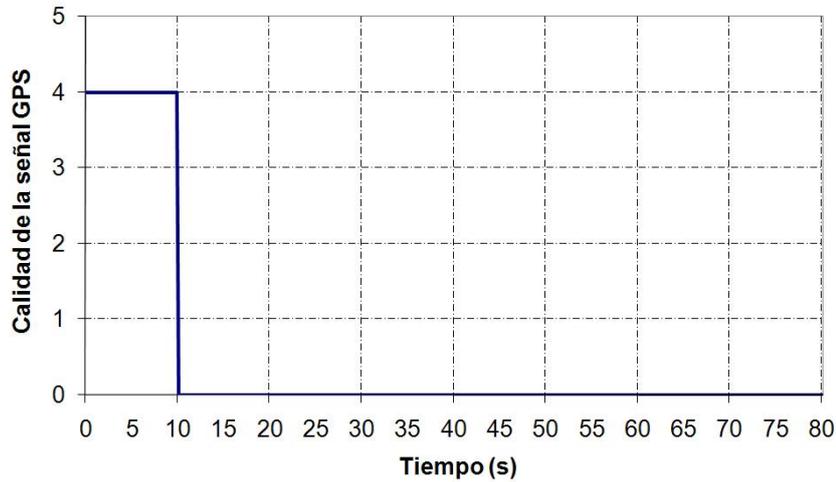


Figura 4.11: Calidad de la señal GPS para pérdidas de larga duración.

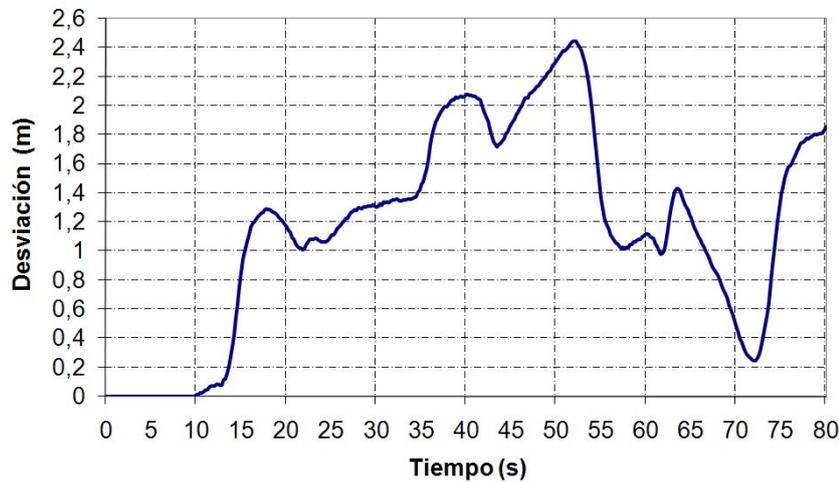


Figura 4.12: Desviación del vehículo respecto al centro de la carretera para el caso de pérdidas de larga duración.

En la Fig. 4.12 se muestra el error lateral del vehículo. Se observa que el error es inferior a 2,5 metros con lo que aseguramos que el coche sigue circulando dentro de la vía. Además, los mayores errores se producen fundamentalmente en las zonas curvas y son admisibles debido al pequeño

radio de curvatura y al tamaño del coche. El experimento demuestra un buen comportamiento del sistema de control, sin degradación de la señal durante un tiempo superior a un minuto. Por tanto, se prueba que el sistema de guiado diseñado es capaz de mantener el coche en la carretera durante fallos prolongados en la recepción de la señal GPS.

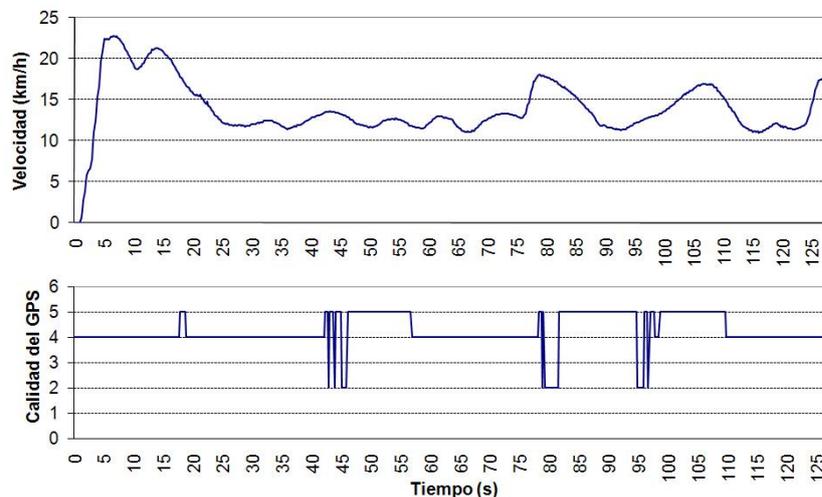


Figura 4.13: Velocidad y calidad de la señal GPS para el caso de fallos de corta duración.

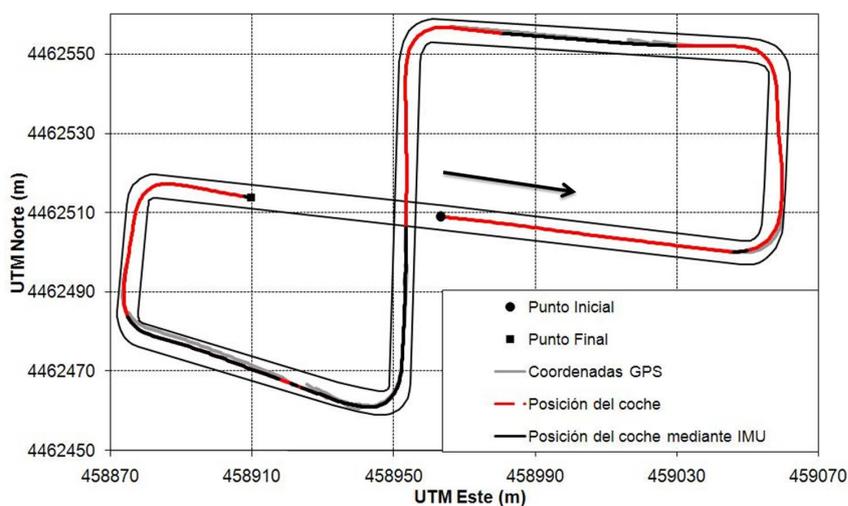


Figura 4.14: Trayectoria realizada para el caso de pérdida de señal GPS durante cortos intervalos de tiempo mediante guiado automático.

Seguidamente, detallamos el experimento llevado a cabo mediante conducción automática que, al igual que el anterior, ha sido dividido en dos pruebas. La primera trata de simular una situación real en la cual la precisión centimétrica (modo 4) se pierde en varias ocasiones entre el punto inicial y final de la trayectoria. Esta sería la situación circulando por ciudad donde la

altura de los edificios puede bloquear la señal del GPS durante cortos intervalos de tiempo. En la Fig. 4.13 se observa la velocidad del vehículo durante el recorrido que, debido a las pronunciadas curvas es inferior a 25 km/h, y el valor de la calidad del GPS en cada instante.

La Fig. 4.14 muestra el mapa, representado en coordenadas GPS, del circuito de conducción privado del IAI-CSIC sobre el que se ha realizado el recorrido.

El experimento comienza con el GPS funcionando con precisión centimétrica. Antes de la primera curva cambia su modo de funcionamiento durante un intervalo de un segundo, volviendo tras este tiempo al modo 4. En este intervalo, el sistema de control de la IMU realiza el guiado y durante los seis segundos siguientes el sistema combinado para transición de estados entra en funcionamiento. En la gráfica se observa como el sistema combinado realiza la curva de forma suave.

En el tercer tramo recto se produce una pérdida de la señal llegando, en esta ocasión, a alcanzar el modo 2 de funcionamiento. Se observa en la gráfica como en esos puntos la posición del GPS se separa bastante de la posición de guiado del coche obtenida mediante el sistema de control de la IMU. Gracias a él, se evitan movimientos bruscos del volante y se consigue mantener el control del vehículo.

En la parte final del recorrido, se vuelve a producir una pérdida de la precisión centimétrica del vehículo durante un intervalo de 31,6 segundos donde el sistema coordinado consigue mantener el coche en la carretera y realizar el guiado de forma suave.

Este experimento muestra como el sistema de control de posicionamiento automático del vehículo realizado por medio del GPS, se mejora de manera sustancial mediante la adición de un sistema de control que combina el uso de una IMU con la odometría del coche obtenida a partir del sensor de velocidad en las ruedas. De esta forma queda probada la posibilidad de mejorar el control suavizándolo, con la inclusión de un sistema inercial.

La segunda parte del experimento con conducción automática que se presenta es la continuación del anterior. Es decir, desde la posición final del ensayo anterior hasta la posición de partida del mismo. Esta segunda prueba presenta la pérdida de señal durante largos períodos de tiempo. El caso más habitual en el que nos encontramos en esta situación es el paso por túneles.

La velocidad de este recorrido y la calidad del GPS durante el mismo se muestran en la Fig. 4.15. Durante los primeros 4,6 segundos la calidad de la señal oscila entre los modos 2 y 5 para, finalizado este período, pasar a modo 2, lo que provoca que el guiado del vehículo mediante el GPS se haga imposible. En esta situación, el nuevo sistema de posicionamiento se encarga, en exclusiva, de realizar todo el recorrido. Este experimento nos sirve para comprobar si el sistema de control independiente de señales externas diseñado, se puede utilizar para períodos mayores de unos segundos.

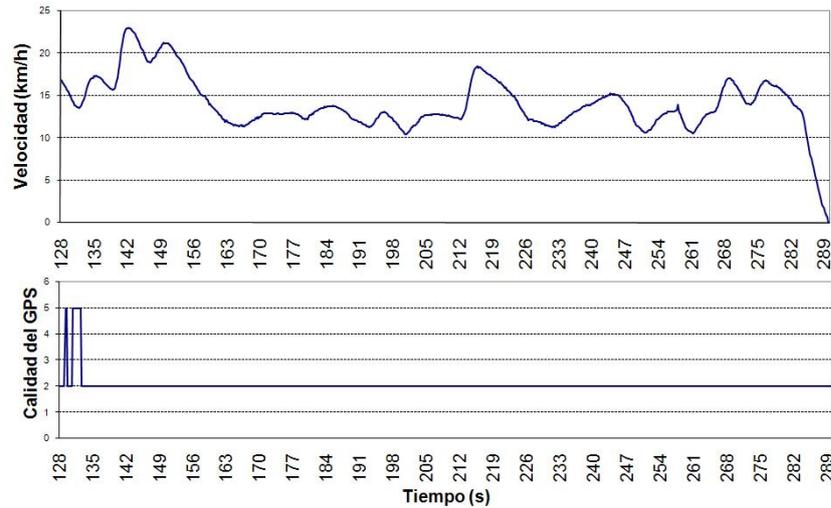


Figura 4.15: Velocidad y calidad de la señal GPS para el caso de fallos de larga duración.

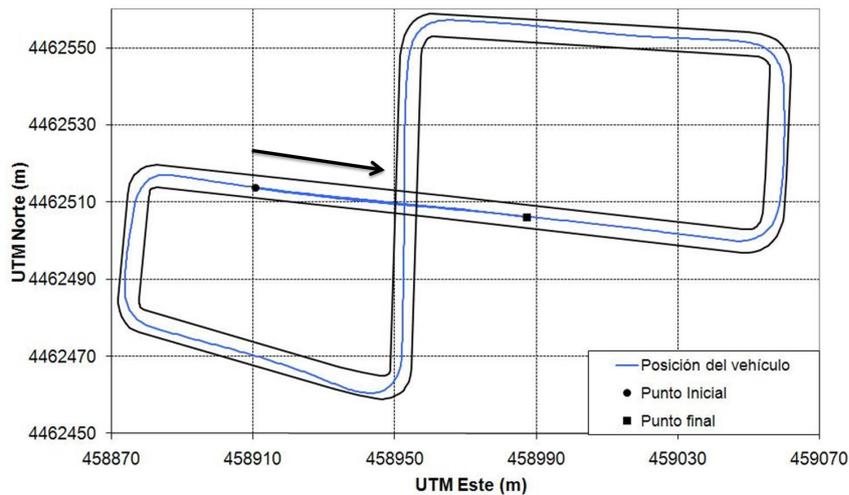


Figura 4.16: Trayectoria realizada para el caso de pérdida de señal GPS durante cortos intervalos de tiempo mediante guiado automático.

El análisis de la trayectoria para este recorrido se muestra en la Fig. 4.16. Durante los tramos rectos, vemos que la IMU mantiene la dirección tan bien como el GPS. En los tramos curvos, los movimientos del volante son muy suaves permitiendo un guiado cómodo para los pasajeros. El experimento demuestra un buen comportamiento del sistema de control sin degradación de la señal durante un tiempo de 162 segundos. Por tanto, se prueba que el guiado automático de vehículos en áreas sin señal GPS durante largos intervalos de tiempo es posible mejorando el sistema anteriormente utilizado [Naranjo 05b].

4.4. Etapa de planificación

Una vez presenta las aportaciones a la etapa de percepción, pasamos a detallar las modificaciones introducidas en la etapa de planificación. En esta fase, de igual manera que cuando conducimos nuestro coche introducimos el destino al que queremos llegar y el sistema de navegación nos selecciona cual es la ruta óptima para realizar dicho recorrido, nuestro sistema necesita que introduzcamos cual es esa ruta que queremos realizar. Mediante un sistema de selección de recorridos desarrollado previamente en el Instituto de Automática Industrial [Serrano 05] podemos introducir de forma sencilla la ruta deseada.

Una vez tengamos elegido el recorrido que deseamos realizar, es necesario tanto un sistema que nos indique cual es el modo de conducción óptimo para cada zona del recorrido (labor del copiloto) y, en función de esto, cual es el controlador óptimo para llevar a cabo esta labor (labor del piloto). En los siguientes puntos presentamos las modificaciones realizadas en estos dos puntos para que nuestro vehículo sea capaz de interpretar el entorno de la manera más real posible y con la mayor semejanza a la forma que emplearía un conductor humano para llevar a cabo esta tarea.

4.4.1. El copiloto

Las tareas asignadas al copiloto hasta la realización de esta tesis doctoral están divididas en la asignación de conducción en tramos rectos y curvos en función del punto del recorrido en el que nos encontramos teniendo en cuenta la ruta que queda hasta el destino final.

Este planteamiento, que inicialmente era suficiente para permitir que el vehículo realizara un recorrido de manera autónoma, no lo es si introducimos el vehículo en una situación real de tráfico en el que la interacción con el resto de vehículos, ya sean estos guiados autónomamente o tripulados por un conductor humano, debe permitir elegir la manera óptima de conducción en función de las necesidades dadas por un entorno cambiante. En este sentido, hemos diseñado un copiloto que sea capaz de detectar la situación actual del tráfico -en función de la información recibida por la unidad central de control- y avisar al piloto de cual es el modo óptimo de conducción en cada caso. Así pues, los siguientes modos de conducción han sido incorporados a los citados con anterioridad:

Atascos este sistema de conducción se selecciona en el caso de detectar que los vehículos que circulan en el entorno se encuentran circulando a velocidades muy bajas (inferiores a 10 km/h) o con continuas detenciones y arranques. Es el caso habitual que encontramos en las grandes ciudades en horas punta o en las denominadas por tráfico “operaciones salida” donde, el gran número de vehículos en circulación, provoca retenciones que pueden durar horas.

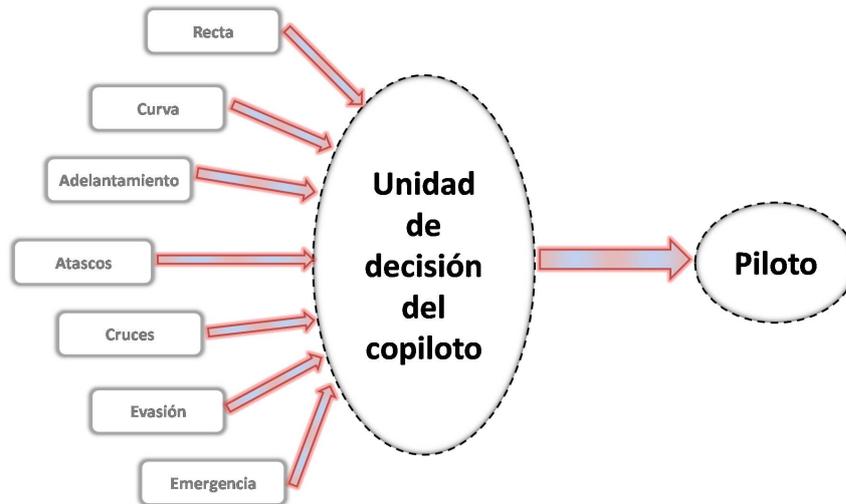


Figura 4.17: Diagrama de bloques del copiloto diseñado.

Cruces uno de los sistemas de mayor riesgo en conducción urbana es el paso por intersecciones que presenta dos principales dificultades: la escasa visibilidad que en muchas ocasiones impide ver al coche que circula perpendicularmente y la falta de señalización en zonas con continuas intersecciones que dificultan al conductor determinar el orden de preferencia en cada una de ellas. Todo ello, provoca la entrada del conductor en la zona del dilema (del inglés, *dilemma zone*), esto es, el punto en el cual el conductor no sabe si es mejor acelerar para pasar la intersección o detenerse para aumentar la seguridad a costa de aumentar también la congestión del tráfico.

Evasión la función de este modo de conducción es evitar la colisión con el elemento más débil en la circulación: el peatón. Este sistema es de seguridad y anticipa, mediante la recepción de una señal proveniente de un sistema de visión, la posible colisión con un peatón, activando el control que permite evitar dicho accidente de manera eficiente y segura.

Infraestructura mediante este sistema incluimos cualquier información procedente de la infraestructura a través de la unidad central de control. Esta información, que puede provenir desde paneles luminosos, semáforos o sensores instalados en la infraestructura realizando una función principal de alerta y modificación de la velocidad del vehículo.

Emergencias este último sistema de control incorporado al copiloto consiste en un sistema de seguridad para evitar las colisiones traseras con el vehículo en caso de una frenada de emergencia por parte del vehículo que circula inmediatamente delante. Este sistema es el de mayor seguridad implementado y el último en entrar en funcionamiento ya que atendería a una situación crítica de posible accidente.

Así como los cuatro primeros controladores están basados en lógica borrosa, el último de ellos se implementa mediante un controlador diseñado a través del método de los mínimos cuadrados. La selección en el uso de un controlador u otro se realiza en función de las condiciones del tráfico.

Todos estos controladores y los desarrollados con anterioridad quedan recogidos en la nueva arquitectura del copiloto presentada en la Fig. 4.17.

Los controladores desarrollados cumplen con las normas de tráfico y el código de circulación. Si acudimos a la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, en su título II, Normas de Comportamiento en la Circulación, capítulo II, de la circulación de vehículos, sección 4, incorporación a la circulación, el artículo 26 dice:

El conductor de un vehículo parado o estacionado en una vía o procedente de las vías de acceso a la misma, de sus zonas de servicio o de una propiedad colindante, que pretenda incorporarse a la circulación, deberá cerciorarse previamente, incluso siguiendo las indicaciones de otra persona en caso necesario, de que puede hacerlo sin peligro para los demás usuarios, cediendo el paso a otros vehículos y teniendo en cuenta la posición, trayectoria y velocidad de estos, y lo advertirá con las señales obligatorias para estos casos. Si la vía a la que se accede esta dotada de un carril de aceleración, el conductor que se incorpora a aquella procurará hacerlo con velocidad adecuada a la misma.

En el mismo sentido, el artículo 27 dice:

Con independencia de la obligación de los conductores de los vehículos que se incorporen a la circulación de cumplir las prescripciones del artículo anterior, los demás conductores facilitarán, en la medida de lo posible, dicha maniobra, especialmente si se trata de un vehículo de transporte colectivo de viajeros, que pretende incorporarse a la circulación desde una parada señalizada.

4.4.2. El piloto

La función del piloto es, en función del controlador seleccionado por el copiloto, utilizar las entradas al sistema de control y generar las salidas que irán directamente a los actuadores del vehículo, esto es, el acelerador, freno y volante [Naranjo 05b]. Estos controladores han sido implementados la mayoría de ellos mediante lógica borrosa. El objetivo buscado en el desarrollo de estos controladores será su implementación de una manera intuitiva, esto es, de forma fácil de comprender por el ser humano. La salida de estos controladores será transformada a valores que puedan ser enviados a los controladores de cada uno de los actuadores.

4.5. Etapa de actuación

Finalmente, presentamos las aportaciones realizadas a la etapa final del sistema de control embarcado en los vehículos. En esta etapa, definimos la manera en la que vamos a accionar los distintos mandos del vehículo: el volante, el acelerador y el freno. La aportación fundamental de esta tesis a esta etapa, ya realizada de forma previa sobre las furgonetas eléctricas Berlingo [Naranjo 05a], se ha centrado fundamentalmente en la acción sobre el pedal de freno.

Es claro que el elemento crítico y de máxima seguridad en el control de vehículos es el sistema de frenado. Hasta ahora, el sistema de frenado estaba controlado por un motor acoplado al pedal del freno que se encargaba de imitar el comportamiento del ser humano pisando o soltando el pedal en función de la necesidad del tráfico. Con el objetivo de disponer de un sistema de actuación más preciso, se ha diseñado y desarrollado un sistema de frenado electro-hidráulico que ha sido implementado en uno de los prototipos según se describe en el siguiente apartado.

4.5.1. Sistema de frenado electro-hidráulico

Comenzaremos la explicación del sistema de frenos desarrollado realizando una revisión bibliográfica de los principales trabajos de investigación realizados en la automatización de este actuador, para posteriormente explicar el sistema propuesto, su implementación y las pruebas realizadas para su validación.

4.5.1.1. Revisión bibliográfica

La relevancia de un buen sistema automatizado de frenada cobra una importancia vital debido al gran número de accidentes de tráfico que se producen por atropellos [WHO 04]. El principal problema desde el punto de vista de los conductores es reaccionar de manera rápida y efectiva a las circunstancias inesperadas que puedan aparecer en la carretera. Para solucionar este problema se han desarrollado sistemas semiautónomos para mejorar la frenada del coche y se han realizado test para validar su funcionamiento [Cummings 07, Petersen 06]. En cualquier caso el factor humano continua siendo necesario para llevar a cabo la acción de frenada.

Dentro del campo de los ITS, cuando nos referimos específicamente al guiado autónomo de vehículos, podemos hablar de dos tipos diferentes de controles. El control lateral [Naranjo 05b] en el que el actuador asociado es el volante y el control longitudinal [Gerdes 97, Liang 03] donde los actuadores involucrados son los pedales de acelerador y freno. Aunque en una primera aproximación el control del pedal del acelerador puede bastar para controlar la velocidad del vehículo, para aumentar la seguridad y evitar accidentes como hacer una parada de emergencia [Yi 05], Stop&Go [Naranjo 06], control de cruce adaptativo [Naranjo 06], detección de peatones [Li 06b], mantenimiento del carril [Wang 05] o control del ángulo muerto [Collado 04] es fundamental la automatización del pedal del freno.

Existen dos posibilidades a la hora de automatizar un sistema de freno: realizar una modificación en el circuito original o diseñar un nuevo sistema capaz de trabajar en paralelo con el original. La segunda opción permite incrementar la seguridad ya que se duplica la posibilidad de actuar sobre el pedal del freno.

En la literatura relacionada, se enfoca la automatización del freno desde distintos puntos de vista. Por un lado, se han desarrollado modelos para estudiar el comportamiento del sistema de frenada. En este sentido, Celentano [Celentano 03] propone un sistema simple basado en la división en cuatro subsistemas donde los parámetros del modelo propuestos han sido extraídos de un coche Fiat. Song [Song 06] realimenta la presión de frenado a la entrada del ABS y las simulaciones demuestran que, en función de la frenada, el algoritmo es capaz de reconocer los cambios en la superficie por la que circula el vehículo. Song [Song 04] propone un sistema híbrido de frenado eléctrico donde las simulaciones consiguen un muy bajo consumo de energía para realizar la detención del vehículo. Liang [Liang 03] presenta un modelo donde consigue reducir significativamente los errores en la distancia de frenada.

Por otro lado, se han estudiado diferentes tipos de controladores para el sistema de frenado. Lignon [Lignon 06] utiliza un control robusto para eliminar las vibraciones debidas a la fricción y conseguir una gran estabilidad cualesquiera que sean las condiciones de funcionamiento. Maciuca se basa en el diseño de controladores no suaves [Maciuca 97] y controladores adaptativos [Maciuca 98] para aplicarlos a frenadas en autopista. Hong [Hong 06] usa un controlador capaz de aumentar la precisión en la fuerza de frenado de manera significativa y con capacidad para ser instalado en cualquier tipo de vehículo de manera sencilla. Park [Park 06] propone una novedad para los sistemas de freno hidráulicos, en el diseño de un freno magnetoreológico.

Por último, se han logrado resultados experimentales sobre el comportamiento del freno automatizado. Gerdes [Gerdes 97] probó un sistema basado en la combinación de un controlador del motor y el freno para vehículos automatizados en carretera. Kim [Kim 96] diseña un controlador que actúa directamente sobre el sistema de frenos original. Naranjo [Naranjo 06] usa un encoder acoplado a un motor de continua que actúa sobre el pedal de freno del circuito original. Song [Song 05] conecta un actuador eléctrico en paralelo para generar una presión de frenado adicional para ayudar al sistema neumático de los autobuses y Bu [Bu 07] desarrolla un freno neumático para detener los autobuses a su llegada a la estación con gran precisión.

El sistema de frenado que se presenta en esta tesis doctoral consiste en un sistema electrohidráulico compuesto por una bomba y diferentes válvulas controladas a través del PC embarcado en el vehículo. El montaje se ha realizado en paralelo con el circuito original para no deshabilitar el pedal de freno cuando se esté realizando una frenada con el sistema automático. De esta forma, se consigue un sistema redundante, aumentando la seguridad.

4.5.1.2. Diseño del sistema de frenado

El sistema de frenado electro-hidráulico diseñado partía con la única premisa de mantener el funcionamiento en todo momento del circuito original del coche. Por este motivo, se instaló una válvula selectora que nos permitía conmutar sin retardos entre los dos sistemas de frenada. De esta manera, asegurábamos tener siempre disponible un sistema que permitiera frenar el coche desechando la idea de válvulas eléctricas cuyo tiempo de conmutación podría introducir retardos indeseables.

El sistema diseñado para conectar a la válvula selectora está compuesto por un depósito de líquido de frenos con una capacidad de un litro que incluye una bomba acoplada a un motor de continua de doce voltios y 350 W de potencia.

Para evitar un sufrimiento excesivo entre las zapatas y el disco de freno, debemos conocer la máxima presión de frenado que ejerce el circuito de frenos original. Este dato fue obtenido experimentalmente mediante un manómetro conectado directamente a la zapata de freno. La presión medida fue de 160 bares cuando el pedal estaba pisado a fondo.

La presión ejercida por la bomba del sistema electro-hidráulico está controlada por tres válvulas. La primera de ellas una limitadora cuyo valor está fijado a 160 bares para evitar que se produzcan daños en el disco de freno. La segunda es una válvula todo/nada que nos permite la circulación del líquido de frenos tanto desde la bomba hasta las ruedas como en sentido opuesto. Esta válvula es normalmente abierta y se cierra para permitir el paso del líquido. La última válvula es una electro-proporcional con un rango de presión entre 12 y 250 bares y cuya tensión de control oscila entre cero y diez voltios.

Por último, el sistema incluye un manómetro que nos permite saber la presión que estamos introduciendo en cada momento. En la Fig. 4.18 se muestra el esquema del sistema diseñado. El vehículo prototipo incluye un sistema de seguridad basado en la duplicación del circuito de frenado. Por lo tanto, fue necesario instalar dos válvulas selectoras para conmutar entre el circuito original y el sistema electro-hidráulico diseñado. Las salidas de ambas válvulas están conectadas a la entrada del ABS.

La válvula selectora utilizada permite el tránsito del líquido a través de dos puertos de entrada y uno común de salida. Entre las dos entradas y la salida posee una bola de metal sin sujeción de tal manera que cuando se produce una presión mayor en una de las entradas, la bola es empujada hacia la otra entrada que queda taponada. En la Fig. 4.19 se muestra el montaje de dicha válvula en el prototipo. Para mantener el circuito original con el mínimo de cambios posibles, las válvulas se colocaron directamente a la entrada del ABS. La entrada inferior se conectó al sistema electro-hidráulico y la superior al circuito de frenos original.

Por tanto, el funcionamiento del sistema automático es el siguiente. Mediante un interruptor situado en el salpicadero del coche activamos el motor de continua a través de un relé. Mientras

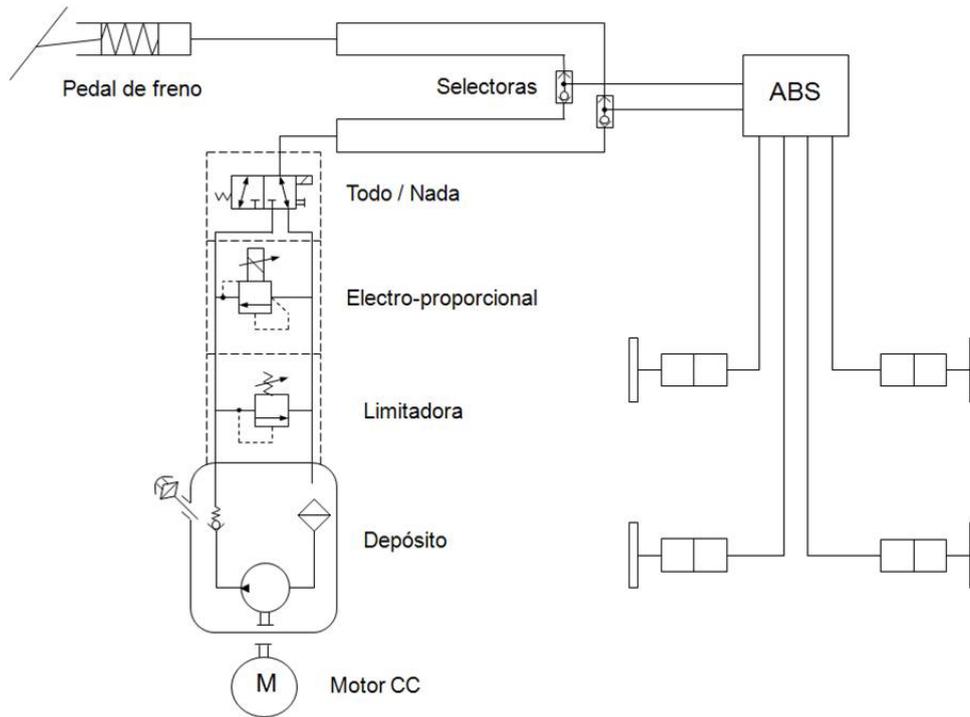


Figura 4.18: Esquema del sistema de frenos diseñado.

que la válvula todo/nada se encuentre abierta, una presión de diez bares se encuentra circulando desde el depósito a la proporcional y de vuelta al depósito. Una vez se cierra dicha válvula, la presión se aplica a la válvula selectora que empuja la bola de metal a la posición superior cerrando así la circulación de líquido a través del circuito original y llevando el líquido de frenos inyectado por la bomba a las zapatas. Desde este instante, es posible regular la frenada a través de la tensión aplicada a la proporcional.

4.5.1.3. Implementación del sistema de frenado

El sistema automático diseñado se ha instalado en el maletero del vehículo prototipo, en el lugar reservado para la rueda de repuesto. El diseño compacto permite usar este espacio donde la bomba se encuentra protegida de posibles daños.

Se ha colocado una batería auxiliar de doce voltios para alimentar el motor de continua. Esta batería está fijada al chasis del vehículo a través de un pulpo y es posible recargarla a través de un interruptor colocado en el lateral del maletero que conecta esta batería en paralelo con la batería del coche cuando está arrancado.

Además del motor, la batería se encarga de alimentar a otro dispositivo. Se trata de módulo CAN que se usa para controlar tanto la apertura y cierre de la válvula todo/nada como la tensión de la válvula electro-proporcional. Este módulo está conectado a través de un adaptador USB-CAN al PC embarcado en el vehículo que se encarga del control del módulo mediante software.

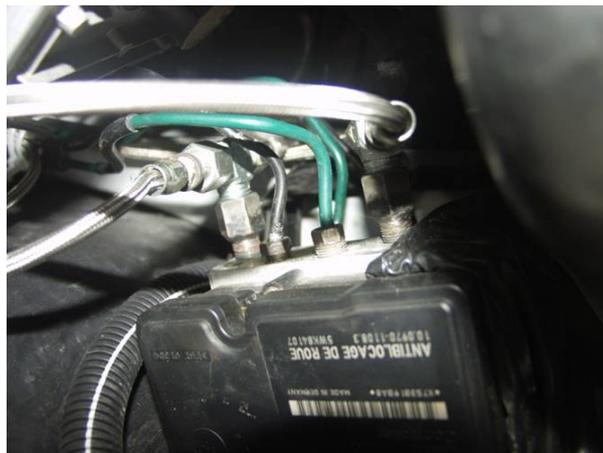


Figura 4.19: Ubicación de las válvulas selectoras.

Dicho módulo está compuesto por un relé de seis amperios que se usa para alimentar la válvula todo/nada y una salida analógica.

Por último, la bomba tiene dos salidas. Una de ellas se divide en dos y va conectada a las dos entradas de las válvulas selectoras de la Fig. 4.19. La otra permite conectar un manómetro para medir la presión que está dando la bomba.

El interruptor manual situado en el salpicadero activa el relé que conecta la alimentación del motor. Un carril dim para fijar el módulo CAN y el relé se ha puesto en el maletero. En la Fig. 4.20 se muestra la distribución de todos los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema.

Durante el montaje del sistema surgieron algunos problemas. Inicialmente, el depósito de la bomba se cerraba mediante un tapón ventilado imitando el depósito del circuito de frenos del coche. El equipo funcionaba correctamente pero, cuando deteníamos el vehículo, el líquido de frenos pasaba poco a poco del depósito del coche al depósito de la bomba. Esto se debía a la falta de estanqueidad de la válvula selectora. Esto provocaba que el líquido se desbordara por el depósito de la bomba a través del tapón ventilado. Para solucionar este problema, se sustituyó el tapón ventilado por uno estanco para evitar el desbordamiento. Esta solución, que impedía la pérdida de líquido provocaba que cuando la bomba se desconectaba, quedaba una pequeña presión en el circuito que hacía que el coche quedase frenado.

La solución adoptada para solucionar este problema fue comunicar ambos depósitos a través de una pequeña tubería. Se realizó una perforación en el tapón estanco y se llevó un tubo desde el depósito de la bomba al depósito de líquido de frenos del vehículo. En éste, se realizó otra perforación para introducir la tubería y comunicar así los dos tanques. De esta forma, la ventilación necesaria para evitar que el coche se quedara frenado la suministraba el depósito original del vehículo. El depósito de la bomba se llenó y el líquido que anteriormente se desbordaba, volvía

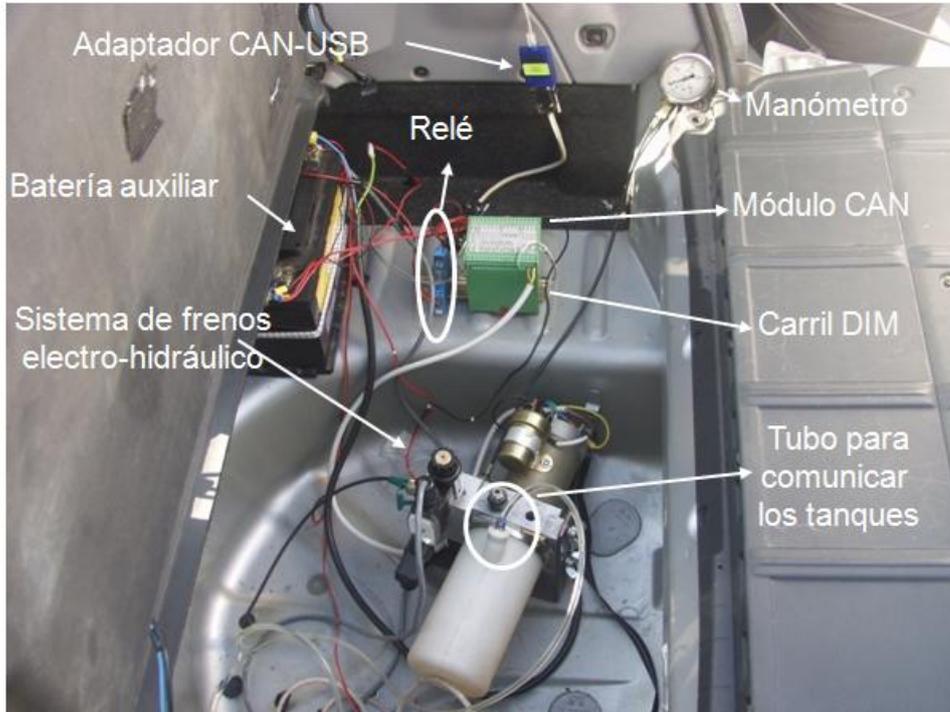


Figura 4.20: Ubicación del sistema de frenado electro-hidráulico.

mediante la tubería al circuito original. En la Fig. 4.20 se muestra el tubo instalado.

4.5.1.4. Validación del sistema

Para probar el correcto funcionamiento del sistema se realizaron varios test en la pista de pruebas del IAI-CSIC (Fig. 4.8). Se utilizó la recta más larga del circuito y, con el coche conducido en modo automático, se aceleraba hasta una velocidad de 46 km/h cubriendo una distancia de unos cien metros aproximadamente.

Cuando el coche alcanza el punto de frenado seleccionado del circuito se suprimió la actuación sobre el acelerador introduciendo por software una consigna de velocidad igual a cero km/h. De esta manera, sólo la fuerza debida a la fricción entre el coche y el asfalto está actuando y es posible evaluar la fuerza de frenada del sistema diseñado.

En primer lugar, se llevó a cabo un test de frenada manual para comprobar la respuesta del sistema de freno a la actuación de un conductor. El resultado de este test se puede ver en la Fig. 4.21. Las gráficas muestran la variación de la velocidad respecto al tiempo a lo largo de la carretera. El coche emplea 13 segundos en alcanzar la velocidad prefijada en modo automático. Los cambios de pendiente que se aprecian en la figura son debidos a los cambios de marcha del vehículo. Una vez terminado el período de aceleración, se estudiaron diferentes casos.

En la parte superior de la Fig. 4.21 se muestra la respuesta del vehículo si no se aplica ninguna fuerza sobre el pedal de freno. La reducción de la velocidad se produce lentamente excepto el

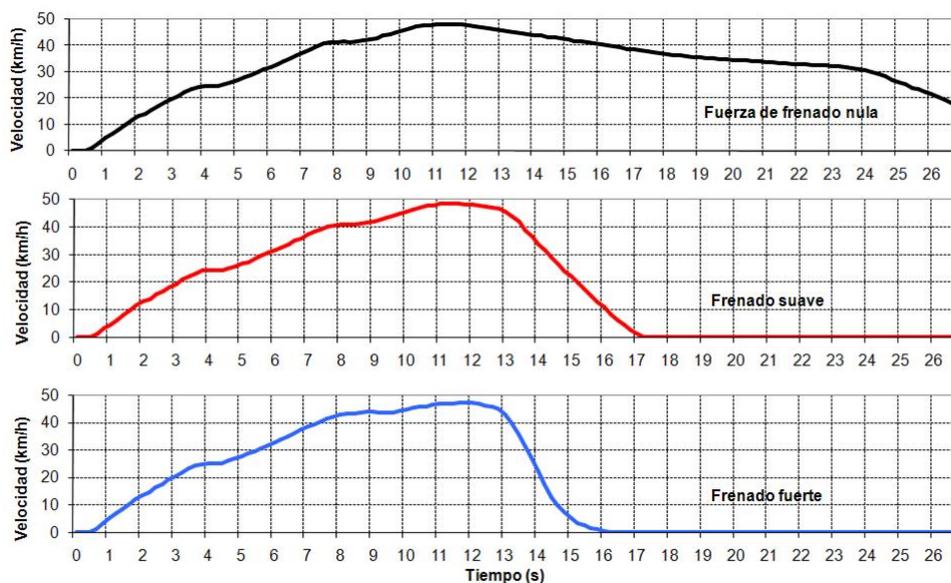


Figura 4.21: Test de frenado manual.

cambio de pendiente producido en el segundo 24 debido a una reducción de la caja automática de cambios.

En la parte central de la Fig. 4.21 se muestra el comportamiento del vehículo ante una frenada suave, esto es, ante una ligera actuación sobre el pedal de freno. En este caso, el coche necesita 50 metros para detener completamente la marcha. Con esta prueba, tratamos de emular la acción habitual de un conductor cuando no ocurren circunstancias imprevistas en el tráfico y puede predecir con suficiente antelación el frenado del vehículo.

La parte inferior de la Fig. 4.21 ilustra una actuación fuerte sobre el pedal de freno tratando de emular el comportamiento del conductor ante una situación imprevista durante la circulación.

La Fig. 4.22 muestra una frenada del vehículo con el sistema implementado. Se han llevado a cabo las mismas pruebas que en el test manual con la intención de comparar ambos resultados. El experimento se ha realizado con diferentes valores de activación de la válvula proporcional.

La bomba está limitada a 160 bares y cuando está trabajando a esta presión, la proporcional está totalmente abierta (100 %). En la Fig. 4.23 se muestra la relación entre el porcentaje de apertura de la válvula proporcional y la presión que se está ejerciendo sobre las ruedas. Los resultados fueron obtenidos experimentalmente y muestran que la relación es prácticamente lineal entre ambas variables.

Los porcentajes usados en el experimento son: 10 %, donde se produce un frenado muy suave; 20 % cuya respuesta es similar a la conducción manual pero con una disminución de la velocidad más uniforme; 30 % donde la respuesta es comparable a la frenada fuerte realizada manualmente y, por último, una frenada muy fuerte emulando lo que sería una frenada de emergencia ante una

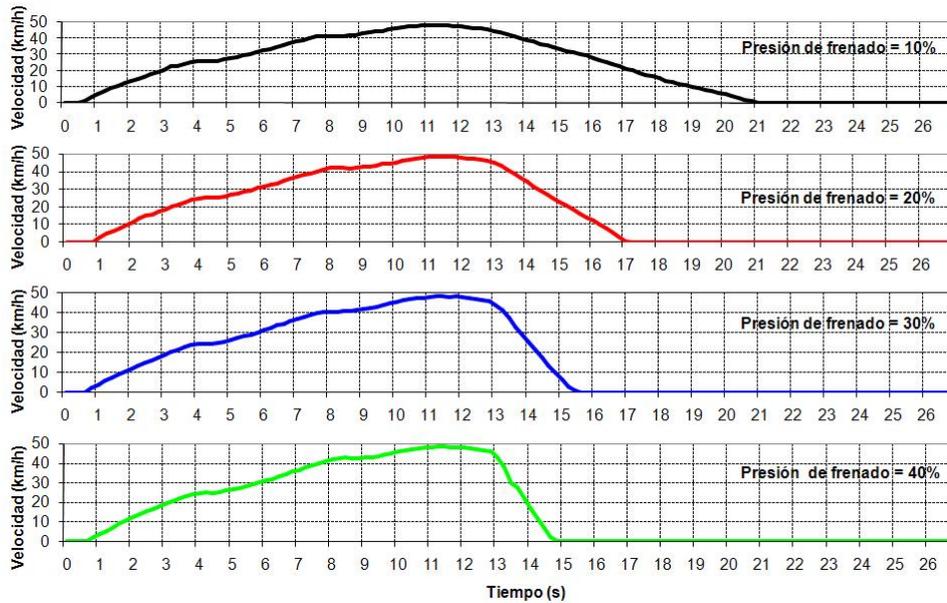


Figura 4.22: Test de frenado automático.

situación imprevista con un porcentaje de apertura de la proporcional del 40 %. La frenada en este caso es más fuerte que la que se obtiene pisando manualmente el pedal del freno a fondo.

Estos valores corresponden a entradas de tensión de la válvula electro-proporcional de uno, dos, tres y cuatro voltios. No se han realizado pruebas a tensiones mayores ya que se consideran demasiado bruscas a tenor de los resultados.

Los resultados del test muestran el buen comportamiento del sistema diseñado y la respuesta casi lineal del mismo lo que permite una desaceleración casi constante cuando se realiza un frenado con una apertura constante.

4.5.1.5. Inclusión en el sistema de control longitudinal

El control inteligente y las técnicas basadas en inteligencia artificial -sistemas expertos, lógica borrosa, redes neuronales, algoritmos genéticos, etc.- para solventar el control de sistemas cuyo comportamiento a priori no es predecible ha sido ampliamente utilizado en las últimas dos décadas [Galán 00] en diversos campos. Una rápida revisión bibliográfica permite encontrar la aplicación de una red neuronal recurrente (RNR) para el control de un sistema de fermentación [Solomon 05]; un sistema neuroborroso para el modelado y control en red de un proceso de tala-drado de alto rendimiento [Gajate 09]; la localización de objetivos en tareas militares mediante sistemas expertos [Sahin 09]; el uso de algoritmos genéticos aplicado al control de maniobras en barcos [Alfaro-Cid 08] o la fusión de un controlador en modo deslizante y un sistema adaptativo borroso para el control de vehículos subacuáticos [Sebatian 07] dando una idea de los diferentes campos a los que cualquier de estas técnicas da una solución de control eficiente y fiable.

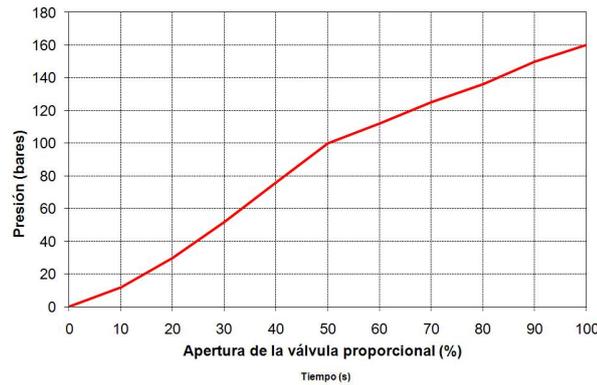


Figura 4.23: Relación entre la apertura de la válvula proporcional y la presión ejercida.

La aplicación de estas técnicas de control en el estudio de los sistemas de transporte por carretera y más concretamente en los vehículos autónomos ha sido ampliamente estudiada en los últimos años. Para una conducción totalmente autónoma, además del control en dirección, es necesario el control de la velocidad -o control longitudinal- del vehículo. El control de velocidad ha sido llevado a cabo por diferentes autores utilizando diferentes sensores como fuente de información. Así podemos encontrar implementaciones realizadas mediante sistemas radar [Abou-Jaoude 03], sistemas basados en visión [Sotelo 04] o en GPS [Milanés 09a].

El proyecto en el que se encuadra este trabajo ha presentado diversos controladores borrosos para el control longitudinal en distintas situaciones del tráfico con buenos resultados [Naranjo 08, Onieva 10, Milanés 10c]. En esta ocasión, se ha diseñado un controlador de velocidad que trata de seguir unos requisitos previamente establecidos para permitir su comparación con otra técnica de control.

4.5.1.5.1. Especificaciones previas Puesto que se trata de mejorar controladores longitudinales previos del programa AUTOPIA, en este caso se ha dado prioridad al confort de los ocupantes del mismo. La denominación de conducción de confort es un término no muy preciso y que puede ser fijado en distintos límites. Uno de los convenios más aceptados lo encontramos en [BECHTEL 93] donde se fija como aceleración de confort 2 m/s^2 . Este valor ha sido usado por diferentes autores para tratar de determinar las zonas óptimas donde se debe llevar la aceleración del vehículo para incrementar la comodidad de los pasajeros. En [Wu 09c] se usa un modelo de vehículo para fijar tres zonas de conducción, divididas por funciones asintóticas, definidas como confort, incómoda y peligrosa.

Partiendo de este valor de aceleración como el máximo permitido para el confort de los pasajeros, se ha llevado a cabo una prueba experimental para determinar cuales son las máximas aceleraciones que era capaz de generar el prototipo de pruebas utilizado. Para la primera prueba (Fig. 4.24), un conductor humano llevó el control del pedal del acelerador presionándolo al

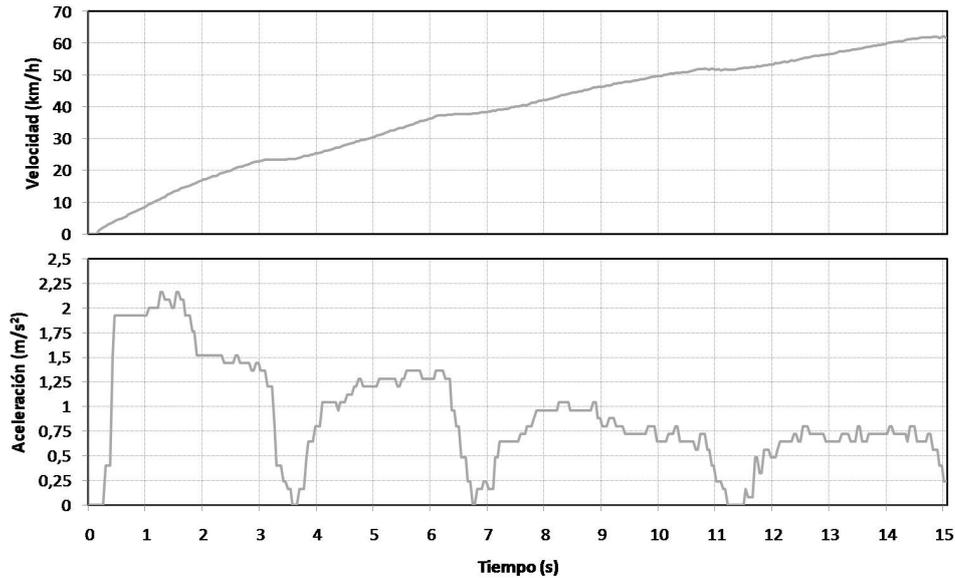


Figura 4.24: Resultados experimentales del comportamiento del acelerador con un conductor humano.

máximo. En la parte superior de la Fig. 4.24 se muestra la velocidad del vehículo durante el experimento mientras que en la parte inferior se puede ver la aceleración del mismo. La frecuencia de muestreo para este experimento está fijada por la velocidad de refresco del bus CAN (40 ms). En la figura, se aprecia como la aceleración sobrepasa levemente la aceleración de confort únicamente en los instantes iniciales. Una vez superada la velocidad de 15 km/h, la aceleración baja de manera considerable hasta valores entorno a los $1,5 \text{ m/s}^2$, disminuyendo paulatinamente la aceleración máxima del vehículo a medida que aumenta la velocidad. Los valores de aceleración nula que aparecen en la gráfica, coinciden con los cambios de marcha del vehículo que se realizan de forma automática y están implantados de serie. Esta influencia del cambio de marchas queda reflejada en la velocidad del vehículo donde se aprecia una disminución en la pendiente de la curva de velocidad.

Por tanto, teniendo en cuenta las características físicas del prototipo a utilizar, la aceleración máxima del vehículo se ajusta a la prefijada como límite de aceleración de confort.

El sistema de frenado electro-hidráulico instalado en el vehículo fue diseñado para poder realizar frenadas de emergencia y para permitir deceleraciones bruscas. Teniendo en cuenta que el objetivo buscado en esta ocasión se aleja de esas necesidades, se ha medido experimentalmente la deceleración máxima que generaba el sistema para distintos valores de entrada. Para ello, se ha acelerado el vehículo de forma manual y, alcanzada una velocidad, se ha activado por software la frenada del vehículo a una presión constante. La Fig. 4.25 muestra la velocidad y aceleración obtenidas de este experimento con una apertura de la válvula reguladora de presión del sistema de frenado electro-hidráulico del 20 %. En la gráfica de aceleración se aprecian valores alrededor de

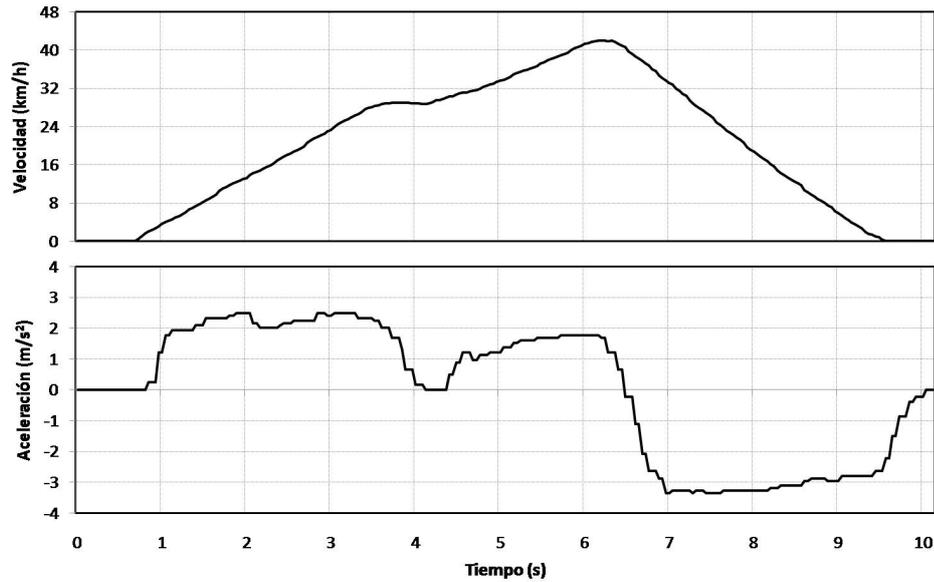


Figura 4.25: Resultados experimentales del comportamiento del freno automatizado con valores cercano a la aceleración de confort.

-3 m/s^2 que corresponden a instantes de actuación del freno. A la hora de diseñar nuestro control, consideraremos que la máxima acción permitida sobre el pedal del freno será una apertura de la válvula reguladora de presión del 20 % para adaptarlo a lo que sería una conducción confortable.

Una vez fijadas la acción sobre los pedales de acelerador y freno, debemos determinar las variables de control. Únicamente se usarán como señales de entrada al sistema aquellas que puedan ser leídas a través del bus CAN del vehículo. En este caso, la velocidad y la aceleración del mismo. La velocidad de referencia será introducida por software en forma de escalones variables para poder así estudiar la respuesta de ambos sistemas. El envío de las señales generadas por los controladores a los actuadores se realizará a una frecuencia de 25 Hz.

4.5.1.5.2. Sistema de control basado en lógica borrosa Teniendo en cuenta el nuevo sistema de frenos implantado, se ha diseñado un nuevo controlador borroso para llevar a cabo el control longitudinal. Como principal diferencia con el sistema implantado en las furgonetas, se ha diseñado un controlador absoluto a diferencia del controlador incremental desarrollado previamente.

En la Fig. 4.26 se presenta la arquitectura implantada en el vehículo para llevar a cabo el control longitudinal. El control del sistema de aceleración se realizó cortando directamente las dos señales de tensión que genera el acelerador y conmutándolas por otras generadas por el ordenador embarcado en el vehículo. Cuando el conmutador cambia de posición para activar el sistema automático de control, recibe la señal de una tarjeta externa de conexiones (modelo ADAM-3937) a la que se han derivado las señales analógicas de control provenientes de la tarjeta

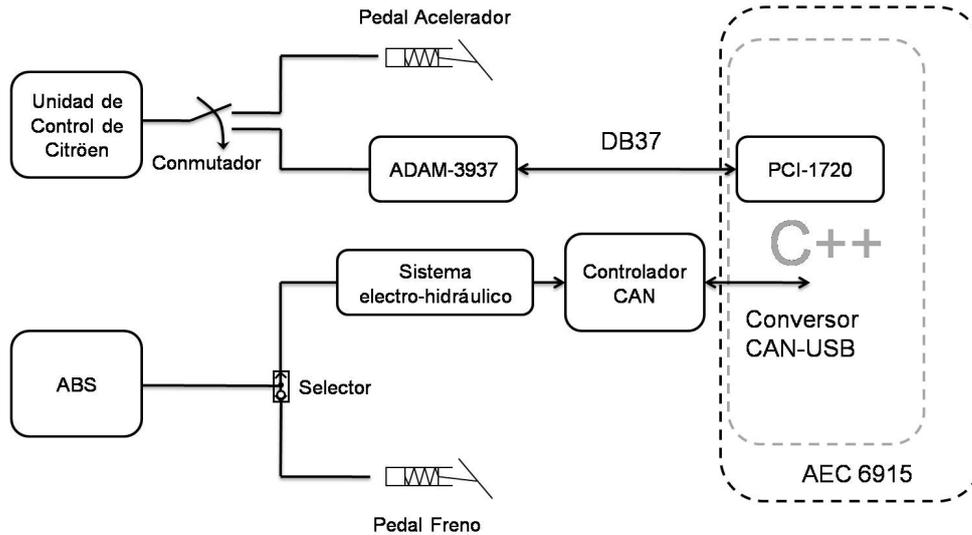


Figura 4.26: Diagrama de bloques del sistema implantado en Clavileño para el control longitudinal.

PCI 1720 de salidas analógicas. Esta tarjeta se conecta a su vez al PC industrial embarcado de control (modelo AEC-6915 de AAÉON) encargado de enviar las tensiones inferidas por el controlador borroso para regular la aceleración del vehículo.

Para el diseño del controlador basado en lógica borrosa, se tomó como modelo el comportamiento real del vehículo -Fig. 4.24 para el control del acelerador y Fig. 4.25 para el control del freno. Con estos modelos, y teniendo en cuenta la aceleración del confort previamente fijada, se realizó un estudio en laboratorio del comportamiento de diferentes controladores borrosos. Se realizó una batería de pruebas en las que, para diferentes consignas de velocidad, se estudió la variación de la velocidad del vehículo y su ajuste a cada una de estas consignas. Se fijaron seis posibles velocidades de referencia - 0, 10, 20, 30, 40 y 50 km/h- y una velocidad instantánea del vehículo que podía oscilar entre 0 y 50 km/h y que venía determinada por la ecuación

$$v_k = v_{k-1} + \frac{1}{f_{cc}} \cdot a_{max} \cdot (a_{FZZ} - f_{FZZ}) \quad (4.10)$$

donde v_k representa la velocidad del vehículo en un ciclo de control, v_{k-1} indica la velocidad en el ciclo anterior, f_{cc} es la frecuencia del ciclo de control del sistema, a_{max} es la aceleración máxima permitida al vehículo y a_{FZZ} y f_{FZZ} son las salidas del controlador borroso para acelerador y freno normalizadas dentro del intervalo $[0, 1]$.

El controlador borroso diseñado utiliza dos variables de entrada:

Error de velocidad definido como la velocidad de consigna marcada al vehículo menos la velocidad actual del mismo, en km/h.

Velocidad actual velocidad instantánea del vehículo obtenida según la fórmula previamente

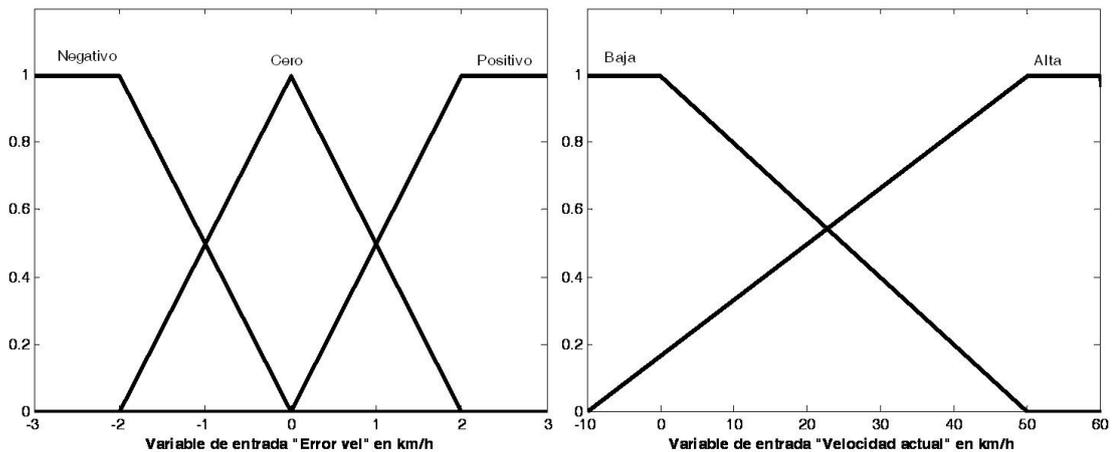


Figura 4.27: Funciones de pertenencia de las variables de entrada para el controlador borroso.

presentada para las pruebas en simulación y medida a través del bus CAN para las pruebas realizadas en el prototipo real, en km/h.

Las funciones de pertenencia para cada una de estas variables se muestra en la Fig. 4.27. Se definen tres funciones de pertenencia para la variable *error de velocidad*. La etiqueta lingüística 'Negativo' indica que la velocidad de referencia es inferior a la velocidad actual del vehículo, la etiqueta 'Cero' define la zona en la que prácticamente se ha alcanzado la velocidad prefijada y la etiqueta 'Positivo' indica los instantes en los que la velocidad de referencia es superior a la velocidad del vehículo. Para la variable *Velocidad actual* se definen dos funciones de pertenencia cuyas etiquetas lingüísticas serán 'Baja' y 'Alta'.

Como salidas de control tenemos dos variables: *acelerador* y *freno*. Las funciones de pertenencia de ambas están definidas por tres singletons: 'Nada' para indicar que no se está ejerciendo ninguna presión sobre el pedal, 'Medio' que indica una presión sobre el pedal del 50 % y 'Todo' que define una presión del 100 % sobre el pedal. La Fig. 4.28 muestra la superficie generada por el controlador diseñado donde se aprecia la continuidad de la misma en todo momento y la suavidad en el comportamiento. Para mostrar ambas variables en la misma gráfica se ha invertido la salida del freno con lo que una salida entre $o[0, 1]$ indica una actuación sobre el pedal del acelerador mientras que un salida entre $[0, -1]$ representa una actuación sobre el pedal del freno. En la figura se aprecia como la actuación sobre el freno es máxima cuando la velocidad del vehículo es 'Alta' y el error de velocidad es 'Negativo', bajando su intensidad a medida que disminuye la velocidad del vehículo. Para errores de velocidad positivos, se puede apreciar un comportamiento análogo del pedal del acelerador.

En la Fig. 4.29 se muestran los resultados obtenidos con el controlador diseñado para diferentes velocidades de referencia calculando la velocidad según la fórmula previamente presentada.

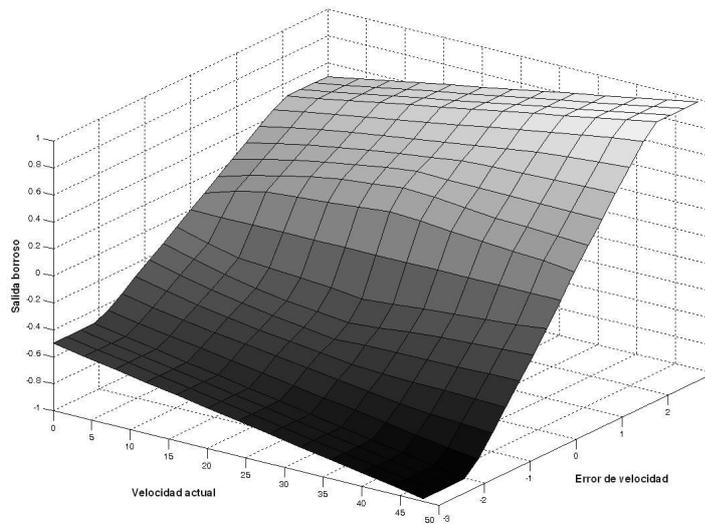


Figura 4.28: Superficie del controlador diseñado.

En la parte inferior se presenta la salida del controlador borroso. Inicialmente, se produce una fuerte actuación sobre el pedal del acelerador con el objetivo de alcanzar la velocidad prefijada. A medida que la velocidad se va aproximando a la de referencia, la actuación comienza a ser menor hasta alcanzar dicha velocidad donde no se produce ninguna actuación sobre ninguno de los dos pedales. De igual forma, se puede ver como, cada vez que la velocidad de referencia es modificada, la velocidad de referencia se incrementa o decrementa para alcanzar el nuevo objetivo siguiendo las consignas generadas por el controlador borroso.

A pesar de no tener en cuenta variables como la fricción, número de pasajeros, etc., este estudio es un buen punto de partida para la diseño final del controlador en un entorno real de modo que, encontrados estos valores, podemos considerarlos como el punto de partida para realizar un ajuste fino ya en el vehículo de forma rápida y sencilla.

4.5.1.5.3. Experimentos y validación del sistema en entorno real Para concluir se presentan las pruebas realizadas durante un recorrido con el vehículo durante varios minutos con el control longitudinal del mismo en modo automático.

La parte superior de la Fig. 4.30 muestra la referencia de velocidad que debe seguir el vehículo -introducida en este caso por teclado- junto a la velocidad real que tiene en todo momento. En la parte central de la figura, tenemos el valor de la aceleración del vehículo a lo largo de todo el recorrido. Finalmente, la parte inferior muestra las salidas del controlador borroso normalizadas entre cero y uno.

Se han probado diversas velocidades, todas ellas dentro del rango de conducción urbana

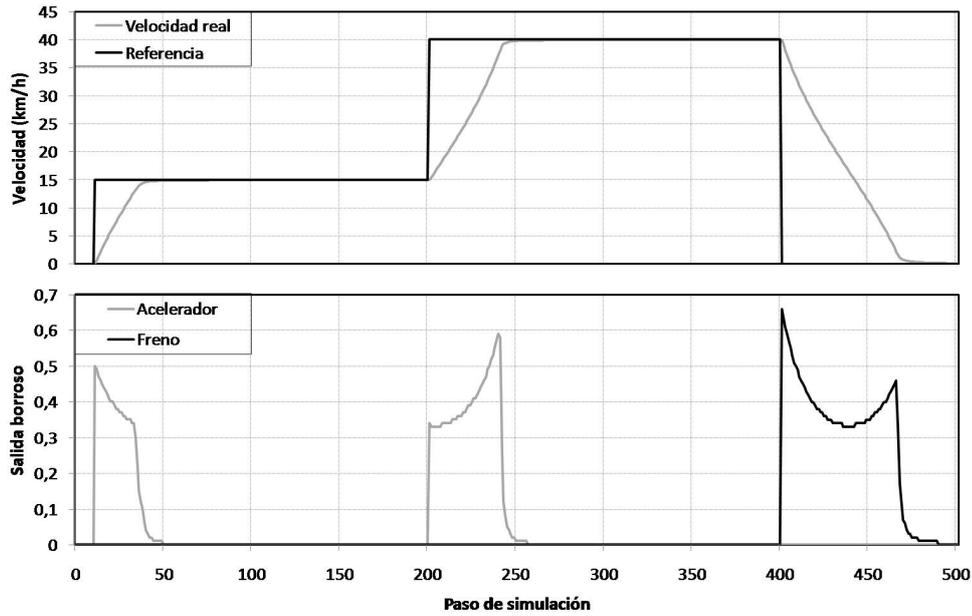


Figura 4.29: Resultados en simulación del comportamiento del sistema de control borroso.

debido a las limitaciones físicas del circuito de pruebas. Se observa cómo el vehículo alcanza la velocidad de referencia de manera rápida y confortable y cómo es capaz de mantener los valores fijados incluso a velocidades extremadamente bajas y complicadas -para un vehículo a gasolina- como los instantes de referencia a 4 km/h. También es interesante reseñar que el sistema ha sido probado en toda la pista donde existen pendiente de hasta el 3% de desnivel, demostrando su robustez ante pendientes en la carretera.

En cuanto al sistema de frenado, limitado por software hasta un máximo del 20% de su máxima capacidad, vemos como en algunos instantes llega hasta ese máximo -concretamente cuando se le exige una disminución brusca de velocidad- obteniendo desaceleraciones ligeramente superiores a $1,5 \text{ m/s}^2$, manteniendo por tanto el máximo confort para los ocupantes del vehículo.

4.6. Conclusiones

El desarrollo de los vehículos autónomos para su inclusión en circulación en entornos reales es un objetivo que se puede hacer realidad a medio-largo plazo. La arquitectura planteada por el grupo AUTOPIA para llegar a tal fin se presenta en este capítulo. Dicha arquitectura se divide en tres capas que permiten el control del vehículo de una manera completamente autónoma.

Esta tesis ha profundizado en los sistemas previamente desarrollados mejorando los puntos más débiles de dicha arquitectura como eran el sistema de guiado -limitado a zonas completamente despejadas para una correcta recepción de la señal GPS- y el sistema de actuación sobre el elemento más crítico: el freno.

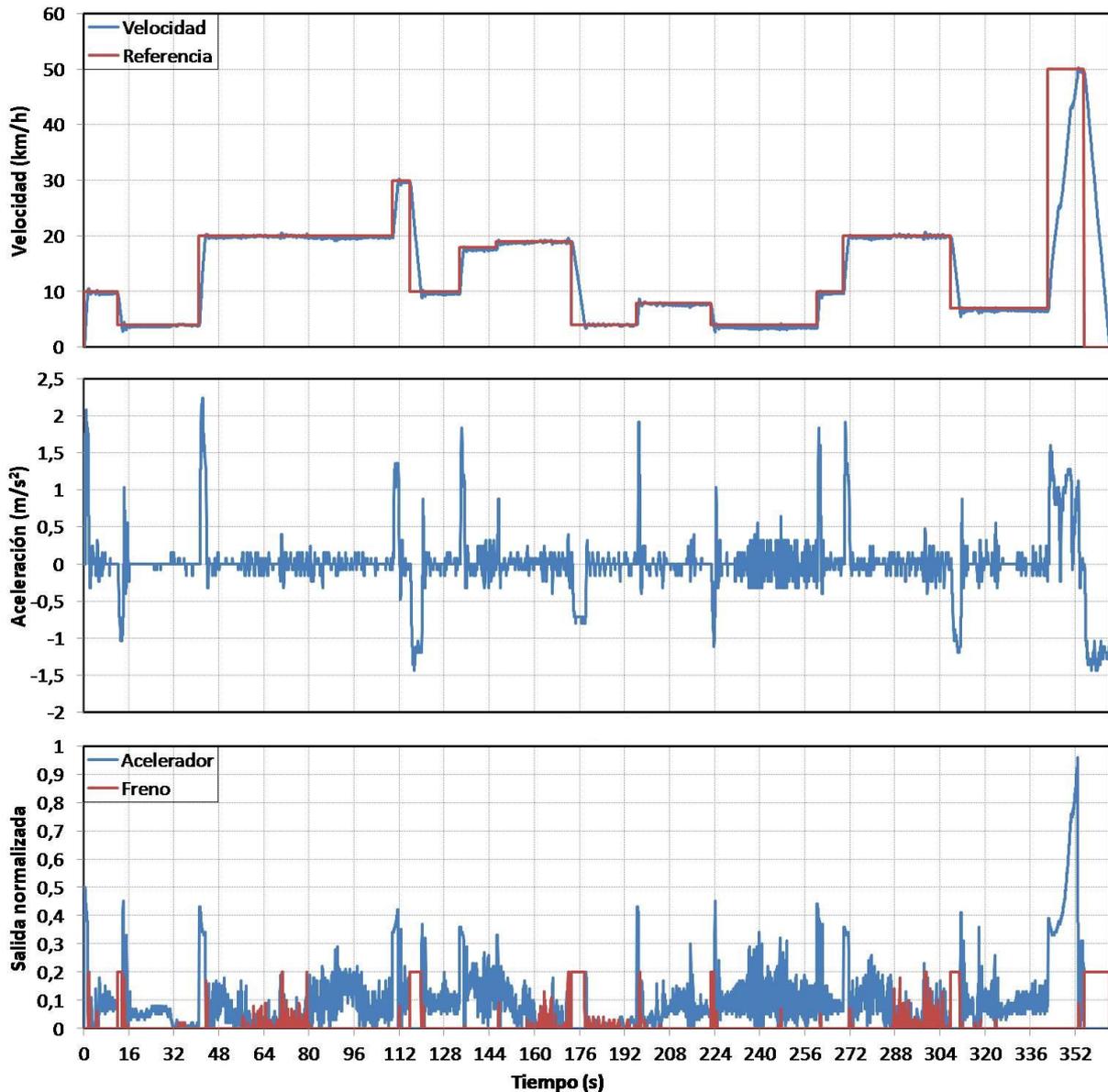


Figura 4.30: Resultados en entorno real del sistema de control borroso diseñado para el vehículo prototipo.

Ambas incorporaciones han sido probadas de manera satisfactoria en numerosas demostraciones, resaltando los resultados obtenidos en el proyecto europeo Cybercars-2 donde una demostración en un entorno urbano cerrado evitaba la correcta recepción de señales GPS. En estas condiciones, el coche pudo realizar el recorrido de forma autónoma gracias a la fusión de datos inerciales y de localización que informan al nuevo sistema de guiado diseñado.

Respecto al sistema de frenos instalado, permite un mayor y más seguro control sobre este actuador. Así es posible realizar maniobras cooperativas implementando un sistema de máxima seguridad: un frenado de emergencia ante una situación imprevista.

Por último, gracias a la modularidad de la arquitectura de agentes implementada, estos nuevos controles y dispositivos instalados en un vehículo prototipo son fácilmente portables a cualquiera de los vehículos del grupo, demostrando la capacidad de la arquitectura para admitir la inclusión de mejoras.

Capítulo 5

Resultados experimentales

Como verificación del funcionamiento robusto de la arquitectura presentada, se incluyen en este capítulo los resultados experimentales obtenidos en la realización de diversas maniobras de manera automática con el sistema propuesto. Estas maniobras, que tratan de emular situaciones de tráfico reales, son de diversa índole: basadas en fuentes de información diversas provenientes de otro vehículo, de la infraestructura o incluso de sensores instalados en el vehículo que ayudan a la detección de situaciones potencialmente peligrosas. El sistema de guiado del vehículo integra un control unificado que es capaz de seleccionar para cada maniobra el controlador más adecuado en cada momento.

Se presenta en primer lugar un sistema para la conducción en condiciones de atasco con el objetivo de proponer un sistema que reduzca la duración de los mismos y la separación entre vehículos; posteriormente se explica el desarrollo de un sistema de seguridad para frenado de emergencia del vehículo para situaciones críticas como el caso de fallos en las comunicaciones, en un primer caso, y su posterior adaptación a un sistema real de circulación en el que el vehículo precedente realice una frenada brusca; el tercer experimento realizado consiste en un controlador borroso para la gestión de intersecciones de tráfico en el que, en función del vehículo que tenga preferencia y la distancia de éste a la intersección, se toman unas acciones de control u otras con el objetivo de mejorar el flujo de vehículos a través del cruce; seguidamente, se incluye un sistema para llevar a cabo una maniobra evasiva para evitar a un peatón y, finalmente, se incluye un sistema de seguridad para la adaptación de la velocidad basado en la información sensorial enviada desde la infraestructura con el objetivo de prevenir situaciones peligrosas como una curva pronunciada o un peatón atravesando un paso de peatones de manera inesperada.

Estas maniobras son una muestra de la capacidad del sistema presentado para solucionar cualquier situación de tráfico, ya sea en condiciones de circulación normales o inesperadas. Además, la arquitectura propuesta es totalmente abierta para la incorporación de nuevas maniobras en vehículos, nueva información sensorial -bien sea proveniente del propio vehículo o de la infraestructura- o la inclusión de nuevos sensores a bordo de los vehículos de una manera sencilla y eficiente que ayude a mejorar de manera significativa la fluidez del tráfico así como a reducir

el número de accidentes.

5.1. Conducción en atascos

Uno de los sistemas con mayor repercusión en el mundo de la automoción ha sido el control de crucero adaptativo que permite, adecuando la velocidad, realizar el seguimiento del vehículo precedente en autopistas mientras que este vehículo no se detenga. Sin embargo, en áreas urbanas donde el tráfico congestionado por los atascos obliga a continuas detenciones, este sistema pierde funcionalidad ya que, una vez detenido, el conductor debe reactivar el sistema. Además, las curvas de 90° que encontramos en zonas urbanas, dificulta la posibilidad de utilizar los sistemas láser usados en la actualidad para la detección del coche perseguido.

Con estas premisas, se presenta un sistema de control de velocidad adaptativo para situaciones continuadas de parada y arranque donde la velocidad del vehículo es inferior a diez kilómetros por hora -velocidad típica de circulación en atascos. Mediante el sistema de comunicaciones entre vehículos y el posicionamiento GPS de los mismos, el controlador borroso diseñado actúa sobre los pedales de acelerador y freno.

A continuación, presentamos una revisión bibliográfica sobre la maniobra a implementar, para posteriormente detallar el sistema de control desarrollado. Finalmente se incluyen los resultados experimentales obtenidos.

5.1.1. Revisión bibliográfica

El objetivo marcado por la Unión Europea en 2001 [ECT 01] y revisado en 2005 [ECT 06] y 2009 [ECT 09] de reducir a la mitad el número de siniestros para 2010 es un proyecto ambicioso en el que se ha embarcado la Comisión de Transportes. La fijación de este objetivo ha influido en las empresas dedicadas al sector de la automoción que han entrado con gran fuerza en el desarrollo de sistemas ADAS [Brookhuis 01, Blythe 04].

Estos sistemas, núcleo de la investigación de varios proyectos dentro del sexto y séptimo programa marco, conocidos en su conjunto como *eSafety*, constituyen una ayuda al conductor en forma de alerta o aviso para prevenir accidentes. En los últimos años, además, se les ha dotado de asistencia activa, esto es, los sistemas ADAS tienen la posibilidad de intervenir para evitar un posible accidente o, al menos, mitigar sus consecuencias.

Un sistema pionero de intervención activa fue el control de crucero (CC, del inglés Cruise Control) [Muller 92] que permite al conductor fijar una velocidad de marcha y mantenerla sin su intervención actuando únicamente sobre el acelerador. El sistema se desactiva si el conductor pisa el freno, permitiendo recuperar automáticamente la velocidad preseleccionada mediante la pulsación de un botón. Una evolución de este sistema es el denominado ACC [Pauwelussen 08] en el cual el vehículo detecta la distancia al coche que circula delante y mantiene una distancia de

seguridad hasta que el coche desaparezca, momento en el que acelera hasta retomar la velocidad prefijada.

Recientemente algunas empresas han desarrollado sistemas que permiten realizar esta función. Por ejemplo TRW Automotive, en colaboración con el grupo VW, anunció a finales de 2008 un dispositivo basado en el primer radar de largo alcance de circuito integrado monolítico de microondas (MMIC, del inglés Monolithic Microwave Integrated Circuits) que ofrece información a una distancia de más de 150 metros y en todo tipo de condiciones meteorológicas y estados de la calzada. Volvo, ha presentado en abril las versiones renovadas de sus modelos V70 y XC70 que incluyen un sistema de control de crucero adaptativo con autofrenado de emergencia. Igualmente, BMW ha implementado un sistema que permite fijar un tiempo de seguridad en función de la distancia al vehículo precedente y la velocidad actual y ajusta su velocidad en un rango entre 30 y 180 kilómetros por hora. Todos estos sistemas se han desarrollado para funcionar en autopistas donde las curvas son suaves, permitiendo así el correcto funcionamiento del sistema radar de los vehículos. Además, no permiten acelerar el coche una vez detenido completamente, opción más que deseable en el caso de atascos o zonas de tráfico muy congestionadas.

Para superar estos inconvenientes se han hecho investigaciones que desarrollan diferentes sistemas de control de crucero adaptativo. Algunos de ellos se basan en visión; los hay que hacen uso de una única cámara, con el fin de extraer propiedades del tráfico, detectar obstáculos o estimar el tiempo para que se produzca una colisión [Graefe 93, De Micheli 93]. Stein utiliza la visión para implementar un sistema de control de crucero [Stein 03]. Sotelo hace uso de dos cámaras para un control de crucero adaptativo [Sotelo 04]. También hay sistemas de control de la velocidad basados en radar o láser ([Ioannou 93, Gholamhossein 08]). Finalmente algunos sistemas usan la fusión de ambos sensores para llevar a cabo el control [Hofmann 03]. El principal inconveniente de todos estos sistemas radica en la falta de información proveniente de los vehículos de su entorno y sus problemas en curvas pronunciadas donde las cámaras de visión o el lidar pueden perder la referencia del vehículo guía.

5.1.2. Sistema de control

El objetivo de la maniobra que vamos a introducir es controlar la velocidad del vehículo automatizado en situaciones extremas de atasco. Los sistemas ACC desarrollados en la actualidad para vehículos con motor de gasolina presentan inconvenientes a la hora de efectuar maniobras a velocidades extremadamente bajas -inferiores a 30 km/h y el objetivo que aquí se plantea es precisamente cubrir esa franja de velocidad inferior que suele ser la más habitual en conducción urbana.

Un convenio ampliamente aceptado en el estudio para el desarrollo de sistemas de seguimiento es el uso del tiempo de separación entre vehículos como principal variable de entrada al sistema [Lin 09, Moon 09, Kesting 08]. Este tipo de controladores no permiten llevar a cabo un

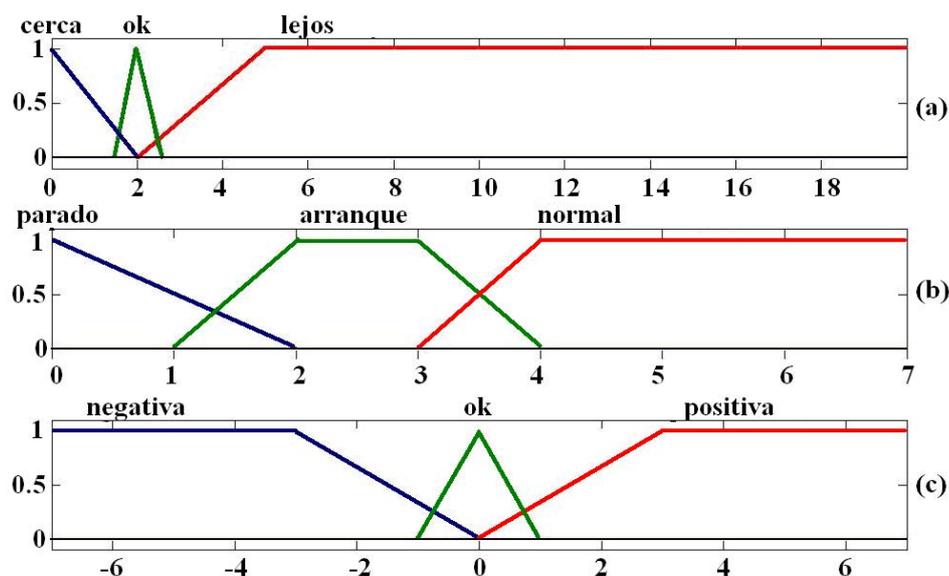


Figura 5.2: Funciones de pertenencia para las entradas al sistema. Distancia (a), velocidad del predecesor (b) y velocidad relativa (c).

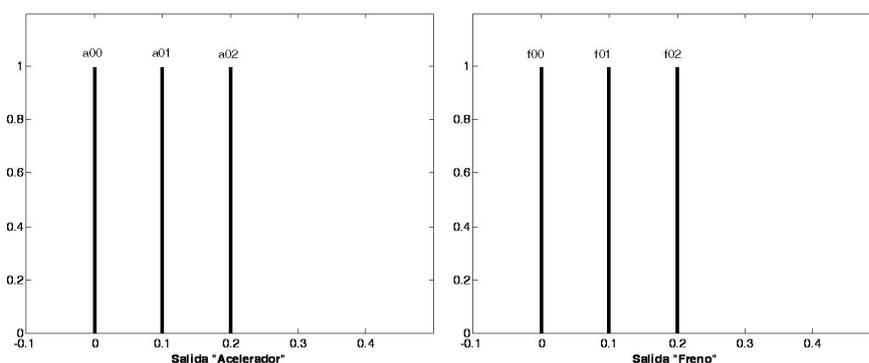


Figura 5.3: Funciones de pertenencia para las variables de salida del sistema, acelerador y freno.

por la aplicación para la que ha sido diseñado este controlador, mejorar de manera sustancial la circulación en atascos. No se pretende en ningún momento su utilización para condiciones de circulación en autopistas donde las reglas tendrían que ser modificadas sustancialmente. De igual manera, el rango de variación de la velocidad relativa entre ambos vehículos es estrecho para forzar la rápida respuesta del coche perseguidor ante cualquier variación en la velocidad del vehículo perseguido.

Nuestro controlador utiliza dos variables de salida, una de ellas dirigida a la actuación sobre el pedal del freno (Fr) y otra sobre el pedal del acelerador (Ac), que serán definidas mediante 3 singletons cada una. Teniendo en cuenta las bajas velocidades, debemos limitar la acción sobre ambos pedales ya que no tendría sentido permitir la máxima presión sobre ninguno de ellos. Así,

la acción máxima permitida será del 40 % sobre cada uno de los pedales.

Las salidas del controlador se representan en la Fig. 5.3. En el eje de abcisas se indica el porcentaje del valor máximo de la presión tanto para el acelerador (a_{00} , a_{01} , a_{02}) como para el freno (f_{00} , f_{01} , f_{02}).

No utilizamos valores superiores para las salidas al sistema, ya que se ha comprobado experimentalmente que estos pueden llegar a generar aceleraciones y deceleraciones del vehículo muy bruscas que, por una parte resultarán incómodas para los ocupantes del vehículo y, por otra, pueden resultar un riesgo para mantener adecuadamente una distancia de seguridad entre vehículos, elevando el peligro de colisión trasera con el vehículo precedente.

Base de reglas para $V_r = \text{negativa}$			
D / V_p	Parado	Arranque	Normal
Cerca	Ac= a_{00} Fr= f_{02}	Ac= a_{00} Fr= f_{01}	Ac= a_{00} Fr= f_{01}
Ok	Ac= a_{00} Fr= f_{01}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}
Lejos	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}

Base de reglas para $V_r = \text{ok}$			
D / V_p	Parado	Arranque	Normal
Cerca	Ac= a_{00} Fr= f_{01}	Ac= a_{00} Fr= f_{01}	Ac= a_{00} Fr= f_{01}
Ok	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}
Lejos	Ac= a_{01} Fr= f_{00}	Ac= a_{01} Fr= f_{00}	Ac= a_{01} Fr= f_{00}

Base de reglas para $V_r = \text{positiva}$			
D / V_p	Parado	Arranque	Normal
Cerca	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{00} Fr= f_{00}
Ok	Ac= a_{00} Fr= f_{00}	Ac= a_{01} Fr= f_{00}	Ac= a_{01} Fr= f_{00}
Lejos	Ac= a_{01} Fr= f_{00}	Ac= a_{01} Fr= f_{00}	Ac= a_{02} Fr= f_{00}

Tabla 5.1: Reglas borrosas para la maniobra de conducción en atascos.

El núcleo del controlador borroso está formado por las reglas mostradas en la Tabla 5.1, que garantizan que no se mandarían señales simultáneamente a ambos actuadores.

5.1.3. Experimentos

Las pruebas realizadas han sido llevadas a cabo en las instalaciones del Instituto de Automática Industrial, en la pista de pruebas privada dedicada a labores de investigación (Fig. 3.7). La zona del circuito que se ha utilizado para las pruebas ha sido la manzana superior derecha que incluye curvas pronunciadas como las que podemos encontrar en zonas urbanas en condiciones de tráfico congestionado. De esta forma, se prueba el funcionamiento del sistema en trayectorias curvas donde los sistemas basados en detección con radar o visión presentan dificultades.

Para comprobar el funcionamiento del sistema desarrollado, se han llevado a cabo dos ex-

perimentos. El primero de ellos, consiste en un seguimiento en el que el coche precedente va a velocidades inferiores a los siete kilómetros por hora durante un minuto realizando tres paradas y arrancadas durante este periodo. Con este test se pretende mostrar la capacidad del sistema para responder a muy bajas velocidades a sucesivas paradas y arranques, comportamiento extremadamente difícil tratándose de un vehículo con motor de inyección a gasolina. En el segundo experimento se comprueba el comportamiento del sistema para mantener velocidades que oscilan en torno a los seis kilómetros por hora. Para realizar esta prueba el coche perseguido, guiado por un conductor humano, ha realizado durante dos minutos continuas aceleraciones y frenadas sin llegar a detener el vehículo de manera que registrásemos la suficiente información que nos permitiera extraer conclusiones sobre la capacidad del controlador de seguir al vehículo precedente a velocidades muy bajas.

Para las demostraciones se utilizaron los dos vehículos con motor de gasolina del grupo AUTOPIA. Para todos los experimentos, Platero fue guiado por un conductor humano mientras que Clavileño llevaba incorporado el sistema de control en atascos desarrollado.

La Fig. 5.4 muestra la diferencia de velocidades entre los dos vehículos. Para el experimento Platero mantuvo una velocidad inferior a siete kilómetros por hora en todo momento para comprobar si el sistema era capaz de responder de forma eficaz a velocidades muy bajas. En la gráfica se aprecia como la velocidad de Clavileño aumenta rápidamente hasta superar levemente a la de Platero, esto se debe al tipo de motor del vehículo con el que no es posible suavizar el arranque. Una vez que la distancia se ha reducido entre ambos vehículos, la velocidad de Clavileño se estabiliza en un valor cercano al de Platero.

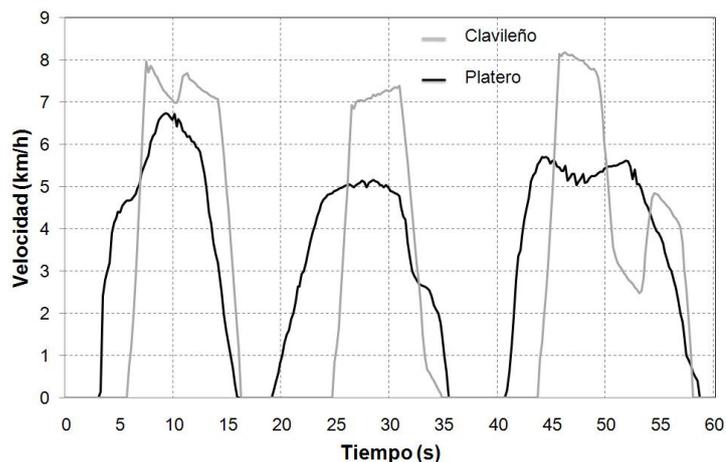


Figura 5.4: Velocidad de Clavileño y Platero durante tres maniobras consecutivas de arranque y parada a baja velocidad.

En la Fig. 5.5 vemos la distancia entre ambos vehículos en los experimentos. Esta distancia es inferior a seis metros en todo momento lo que permite intuir que el sistema, para el caso

de más vehículos manejados de manera automática, permitiría reducir notablemente el “efecto acordeón” que se produce habitualmente en atascos.

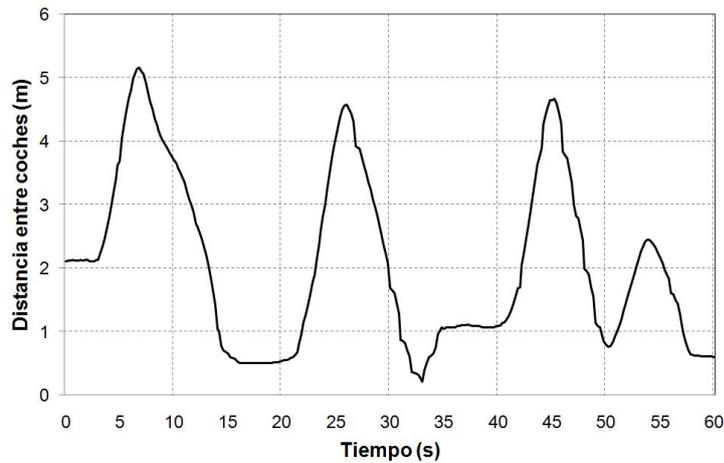


Figura 5.5: Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento en modo automático con arranque y parada.

La actuación sobre los pedales de acelerador y freno, esto es, la salida del controlador borroso diseñado, se muestran en la Fig. 5.6. En ella, se puede ver como en los momentos de arranque de Clavileño se producen los picos en la salida del controlador. Una vez pasado el instante inicial, no se produce ninguna actuación ya que la propia inercia del coche permite mantener la distancia de manera correcta.

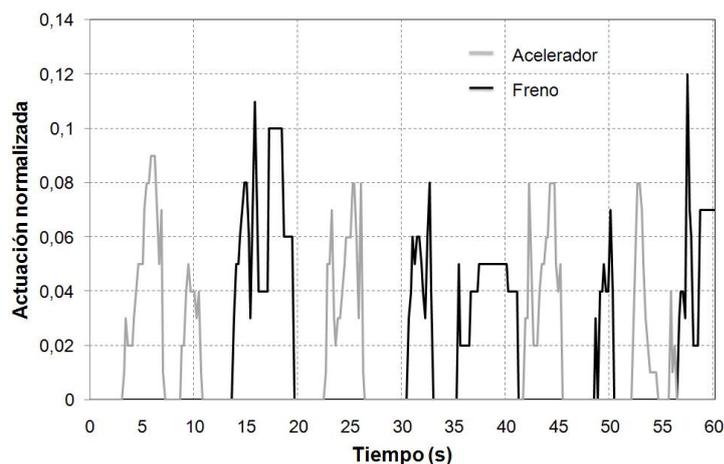


Figura 5.6: Actuaciones normalizadas sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido realizado en el primer experimento del controlador para tráfico congestionado.

En el segundo experimento, se mantuvo una velocidad del coche conducido manualmente, Platero, en valores que oscilaban alrededor de los seis kilómetros por hora con continuos cambios

de velocidad que nos permitieran observar estos efectos sobre el sistema de control diseñado y comprobar su capacidad de reacción.

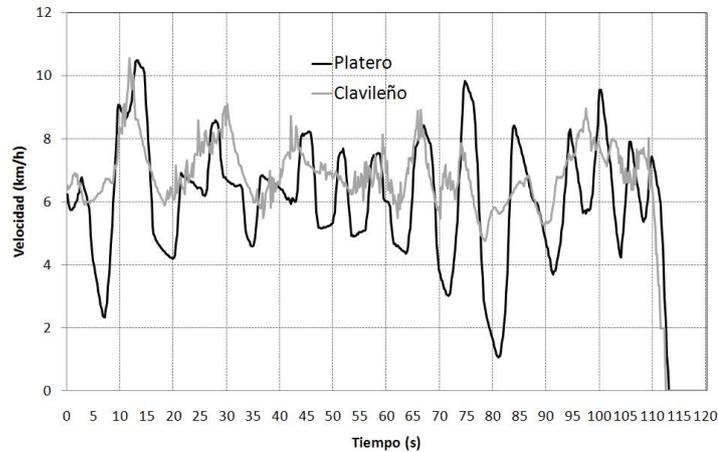


Figura 5.7: Velocidad de Clavileño y Platero durante una maniobra de seguimiento a baja velocidad.

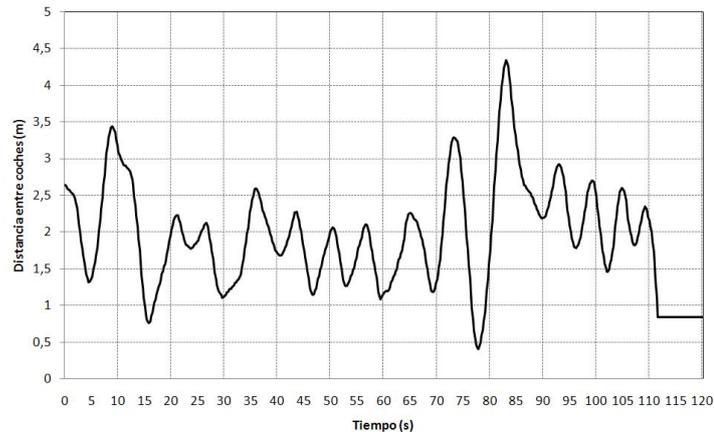


Figura 5.8: Distancia entre los coches durante el experimento de seguimiento en modo automático a baja velocidad.

En la Fig. 5.7, se muestra la comparación entre las dos velocidades. Vemos como la velocidad de Platero cambia constantemente mientras Clavileño trata de emular su comportamiento. El controlador provoca que las variaciones de velocidad en Clavileño sean mayores pero presenta como ventaja que estas oscilaciones son más estables que los continuos cambios producidos en Platero debido al constante accionamiento de los pedales. En la Fig. 5.8 tenemos la distancia de separación mantenida entre los dos coches a lo largo de todo el experimento. En ella, se observa como las variaciones son mínimas y prácticamente inferiores a dos metros, lo que nos permite

asegurar que el sistema reduce la distancia entre vehículos y mantiene este valor acotado en un rango de variación inferior a cuatro metros. La salida del controlador borroso para esta prueba se muestra en la Fig. 5.9. Los continuos cambios de velocidad provocan actuaciones muy rápidas sobre los pedales de acelerador y freno consecutivamente.

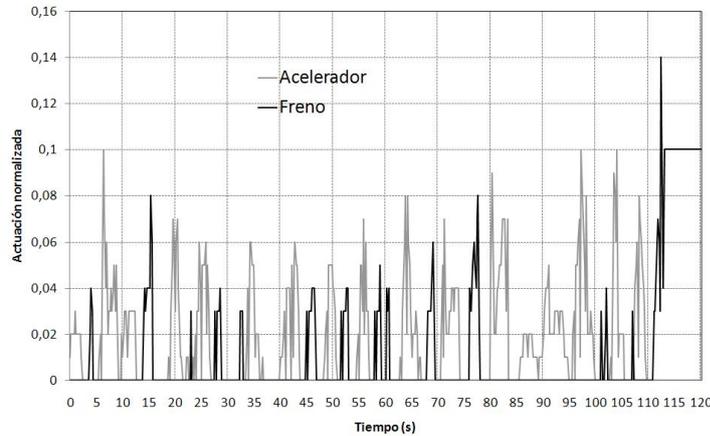


Figura 5.9: Actuaciones normalizadas sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido realizado en el segundo experimento del controlador para tráfico congestionado.

A modo de resumen de estos experimentos, podemos concluir que el sistema presentado soluciona una de las situaciones más tediosas en la conducción: la conducción en atascos, que obliga al conductor a continuas paradas y arranques durante largos períodos de tiempo provocando cansancio o pérdida de atención en la conducción. Un sistema basado en el control de los pedales de acelerador y freno constituye una excelente solución para relevar al conductor de este tipo de trabajo y mejorar las condiciones del tráfico.

Por último señalar que, a pesar de que un conductor humano pudiera igualar o incluso mejorar la respuesta del sistema diseñado durante algún tiempo, diversos estudios [Dragone 09] demuestran que el paso del tiempo y la consecuente fatiga por parte del conductor provocarían una disminución significativa de su capacidad de atención.

5.2. Frenado de emergencia

Hasta ahora, todas las maniobras incorporadas al vehículo -adelantamientos [Naranjo 08], ACC [Naranjo 06], conducción en atascos [Milanés 09a]- basan su control en sistemas borrosos que ajustan al límite la distancia entre los vehículos tanto longitudinal -ACC y atascos- como lateral -adelantamientos. A pesar de ser sistemas probados en numerosas ocasiones, la criticidad de la maniobra obliga a pensar en la necesidad de implementar un sistema de seguridad para detener el vehículo ante cualquier acción inesperada en la realización de este tipo de maniobras de alto riesgo. Con esta motivación, se ha incorporado al conjunto de maniobras del vehículo au-

tomático un sistema de seguridad que permita detener el vehículo de forma eficiente minimizando la posibilidad de accidente.

Este sistema de frenado de emergencia, parte del sistema electro-hidráulico de frenos previamente explicado. El controlador desarrollado sale del compromiso entre la distancia al punto de colisión y el mantenimiento del confort de los pasajeros. En este caso, se va a utilizar el método de los mínimos cuadrados [Venture 06, Zhou 06] para determinar experimentalmente la relación entre las variables del sistema. El objetivo es diseñar un sistema completamente robusto dentro del rango de velocidades legales permitidas en entornos urbanos. Además, debemos considerar que la frenada debe ser progresiva ya que un frenazo repentino puede provocar un accidente en cadena con los vehículos cercanos.

En el siguiente punto se incluye una revisión bibliográfica de los sistemas desarrollados hasta ahora para posteriormente presentar el desarrollado, validación y experimentación del controlador diseñado.

5.2.1. Revisión bibliográfica

En el campo de los sistemas inteligentes de transporte y más concretamente en el desarrollo de los vehículos autónomos es crucial el desarrollo de sistema de seguridad que eviten un accidente en el caso de producirse algún error en los sistemas de control.

Estos sistemas se encuentran incorporados en los distintos prototipos participantes tanto en las dos primeras ediciones del DARPA Grand Challenge [Crane 06] como en la última edición, denominada Urban Challenge [Murali 08, Urmson 08] lo que da una idea de la necesidad de incorporar este tipo de sistemas a los prototipos de vehículos autónomos como sistemas de seguridad.

Las posibilidades de estos sistemas para reducir el número de accidentes es de gran interés y, prueba de ello, son proyectos europeos dedicados a este campo como VALSE [Athanasas 03] que busca desarrollar sistemas ADAS basados en radar, lidar y visión para realizar maniobras de frenado de emergencia en camiones.

En el campo de la investigación, se han realizado estudios desde diferentes puntos de vista. En [Petersen 06] encontramos un estudio de la realización de una frenada de emergencia con numerosos sujetos para ver como reaccionan ante situaciones de colisión inminente. En una línea similar de trabajo, [Chang 09b] desarrolló un sistema para detección de colisión en autobuses partiendo de la información obtenida de los conductores de una compañía que realizaron las pruebas en un simulador que emulaba las condiciones de circulación en carretera. Con estos datos se diseñó un sistema borroso que sirve como aviso a los conductores para indicar que se va a producir una colisión. [Pingyuan 09] cambia el enfoque del problema hacia los ocupantes del vehículo y presenta un estudio para determinar la tensión que ejerce en la frenada el cinturón de seguridad sobre el conductor del vehículo en función de la fuerza.

Los sensores más habituales para este tipo de sistemas se basan en visión, lidar o radar. En [Wedel 07] se evalúa, mediante un sistema basado en visión, la ubicación de un posible obstáculo, determinando los límites con el objeto de evitar la colisión. En [Labayrade 05] se presenta un controlador que evalúa situaciones habituales en circulación y propone un sistema de mitigación de daños basado en disminuir la energía cinética en la colisión mediante la activación de una frenada de emergencia un segundo antes. El disparo de dicho sistema se estima a través de la fusión de un sistema de visión y un láser.

Un elemento clave en el desarrollo de estos sistemas es el algoritmo para determinar cuando se debe activar un sistema de aviso de colisión inminente. En [Kaempchen 09] se presenta un sistema de aviso al conductor de colisión en función del movimiento del vehículo precedente y de la dinámica del vehículo con el sistema incorporado.

[Choi 01] presenta un estudio en simulación en el que ante una frenada del vehículo precedente al máximo de su capacidad evalúa tres parámetros de seguridad previamente definidos como la probabilidad de colisión entre vehículos, el esperado número de colisiones en cadena y la velocidad esperada en cada impacto con el objetivo de evaluar los beneficios de una acción coordinada en este tipo de accidentes.

Por último, existen multitud de estudios sobre la determinación del coeficiente de fricción para estimar la frenada de emergencia de los vehículos [Yi 00, Yi 05] así como sistemas que tratan de controlar la entrada o no del ABS en caso de frenadas muy bruscas [Wang 09a, Kayacan 09].

Los sistemas basados en radar, lidar o visión presentan los inconvenientes en zonas con curvas pronunciadas o con obstáculos como edificios que disminuyan la eficacia de dichos sistemas. Así pues, se presenta un sistema de frenado de emergencia en el que primero se diseña el sistema y se valida, seguidamente se determinan las condiciones de disparo del mismo y finalmente se incluye en nuestra arquitectura de control del tráfico para validarlo en condiciones reales de circulación.

5.2.2. Sistema de control

A pesar de tratarse de un sistema que responde a situaciones críticas, se trató de buscar el máximo confort para los ocupantes del vehículo a la hora de diseñar el controlador.

Con estas consideraciones previas, el controlador implementado utiliza como variables de entrada la distancia al punto de colisión y la velocidad del vehículo. Los pasos a seguir serán en primer lugar determinar experimentalmente la función que relaciona la presión de frenada con estas dos variables y en segundo lugar encontrar el algoritmo de actuación sobre el freno.

Las dos variables necesarias para el controlador se obtienen de las entradas sensoriales del coche. La distancia recorrida por el coche se determina a través del DGPS-RTK cuya precisión es superior a dos centímetros y la velocidad se obtiene a través del bus CAN.

La relación entre la tensión suministrada por la válvula proporcional y la presión aplicada en las ruedas es no lineal. Se han realizado diferentes pruebas para obtener una función capaz de

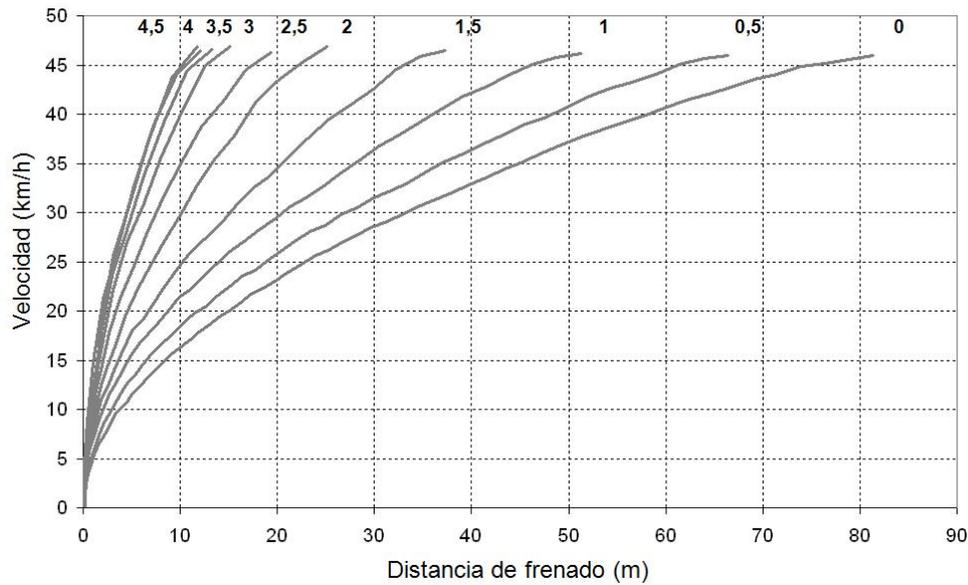


Figura 5.10: Relación entre la velocidad y la distancia de frenado en función de la tensión aplicada a la proporcional.

relacionar ambas variables, en la Fig. 5.10 se muestran los resultados. Los experimentos realizados consisten en registrar la distancia que el coche recorre con dos parámetros fijos: la velocidad en el instante de iniciar la frenada que se ha fijado en torno a los 50 km/h, límite de velocidad para áreas urbanas, y la presión de frenada que oscila entre 0 y 4,5 voltios que representa el límite físico impuesto por el sistema mecánico. El método seguido consiste en introducir incrementos de medio voltio en la presión ejercida por el sistema electro-hidráulico en cada prueba, obteniéndose diez comportamientos diferentes.

Los resultados de las pruebas muestran que, para la velocidad prefijada, si ejercemos la mínima presión posible sobre las ruedas, el vehículo recorre 80 metros. Para el caso de aplicar la máxima presión permitida el sistema es capaz de detener el vehículo en 11,7 metros. De esta manera, obtenemos los límites sobre los que puede actuar de manera correcta el controlador y podemos aplicar el método de los mínimos cuadrados según la expresión

$$\text{Presión de frenado} = f(\text{distancia}, \text{velocidad}) \quad (5.1)$$

que nos permite obtener la presión a aplicar ante situaciones críticas en las que se requiere una parada de emergencia. En la Fig. 5.11 se muestra la superficie hallada y se ha probado para distintos casos obteniendo buenos resultados.

La última imposición para desarrollar un dispositivo de parada de emergencia que permita evitar colisiones es la necesidad que funcione en tiempo real. El funcionamiento es el siguiente: cuando el sistema se activa, se determina la presión a ejercer en las ruedas en función de la dis-

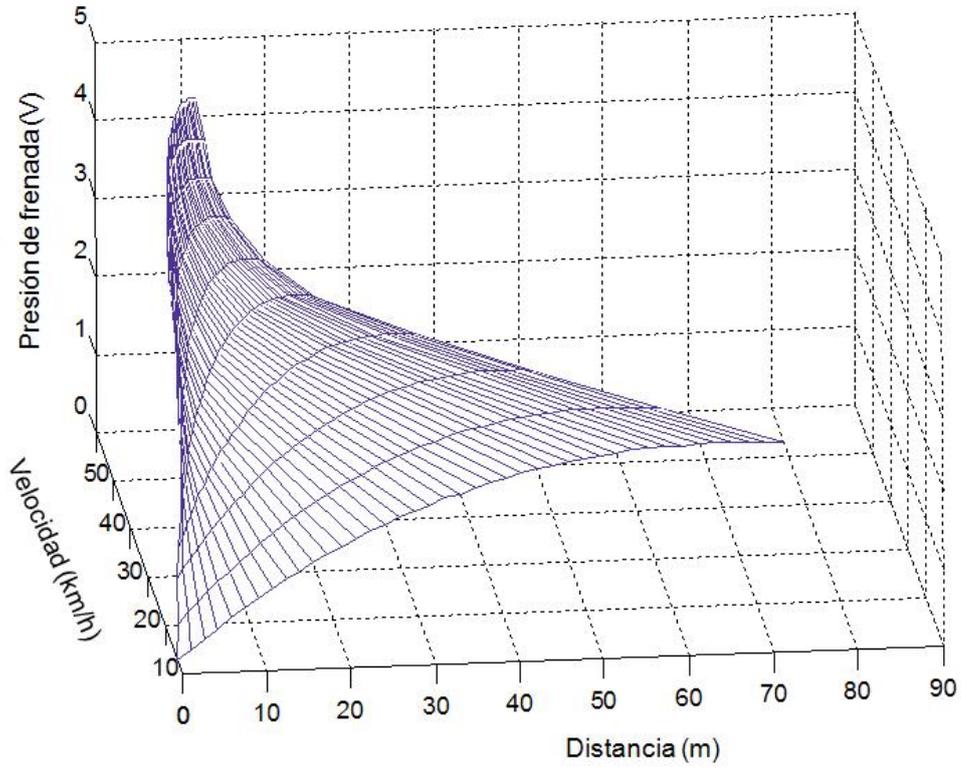


Figura 5.11: Superficie de control obtenida para el sistema de frenada de emergencia.

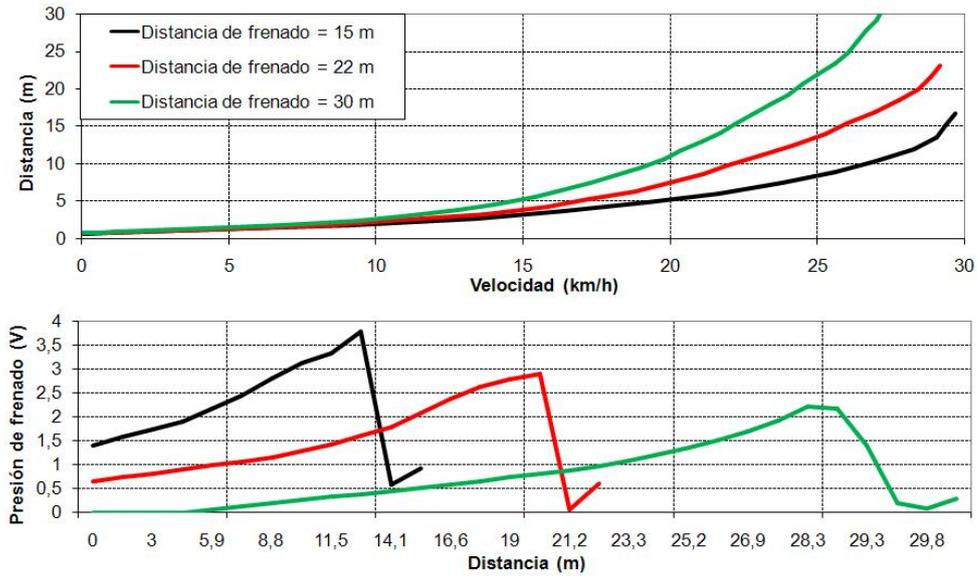


Figura 5.12: Resultados experimentales de una frenada de emergencia para una velocidad inicial de 30 km/h..

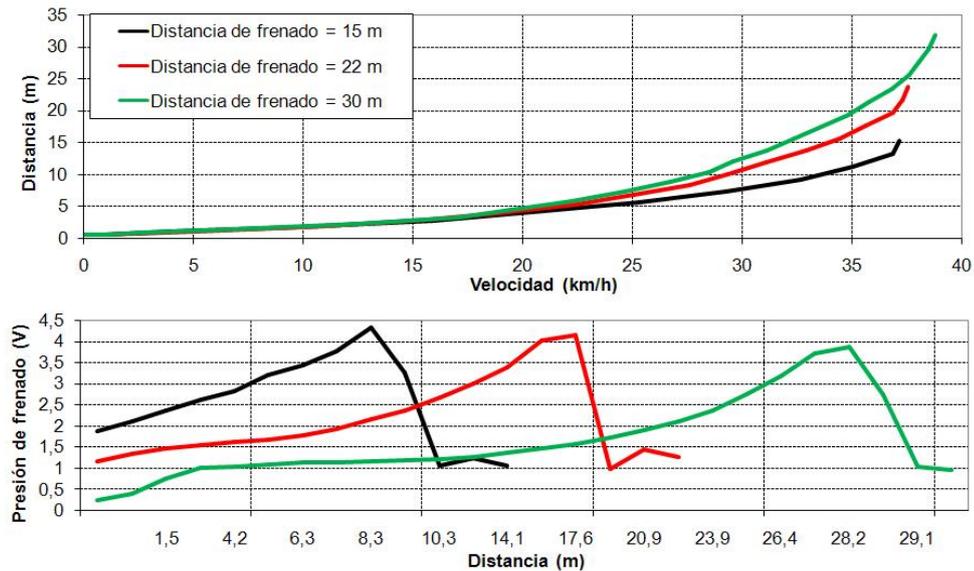


Figura 5.13: Resultados experimentales de una frenada de emergencia para una velocidad inicial de 40 km/h.

tancia al objetivo detectado y la velocidad del vehículo en ese instante. En cada nueva iteración, la distancia al objetivo es calculada nuevamente y se modifica la presión ejercida en función de ese dato y de la velocidad del vehículo.

Para validar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se han llevado a cabo varias pruebas en la pista del pruebas del IAI-CSIC (Fig. 3.7). Se utilizó la calle más larga que atraviesa el cruce para realizar las pruebas. La longitud de la calle es cercana a los 200 metros y el punto en el que se debe detener el coche está fijado unos metros antes del final de la calle.

Se realizaron seis test diferentes definiendo tres distancias al punto de frenado distintas de 15, 22 y 30 metros y dos velocidades para cada una de esas distancias fijadas en 30 y 40 kilómetros por hora.

Durante los experimentos el coche fue conducido en modo automático para reducir la influencia del factor humano. El coche se encontraba detenido y era acelerado hasta alcanzar la velocidad de referencia. Cuando alcanzaba la velocidad de consigna la mantenía hasta llegar a la distancia en la que el sistema de frenado de emergencia era activado.

En la Fig. 5.12 se muestran los resultados para una velocidad de 30 km/h en el instante que se activa el sistema de frenada. La parte superior de la figura muestra la relación entre la velocidad del coche y la distancia recorrida hasta que se detiene completamente para tres distancias de activación del sistema distintas. La parte inferior de la figura ilustra la relación entre dicha distancia y la presión ejercida sobre las ruedas. Al comienzo de los tres experimentos se observa un progresivo incremento en la presión de frenado. Después de ese instante inicial, la presión alcanza su valor máximo para posteriormente ir decreciendo hasta detener el vehículo en

Distancia al punto final (m)	Velocidad inicial (km/h)	
	30	40
15	68 cm	60 cm
22	75 cm	55 cm
30	79 cm	65 cm

Tabla 5.2: Distancia de Clavileño al punto de frenada.

el punto fijado.

Los resultados para una velocidad de activación del sistema de 40 km/h se muestran en la Fig. 5.13. El comportamiento del sistema es, al igual que en el anterior experimento, muy bueno. En esta ocasión, la presión de frenado alcanza valores cercanos a los 4,5 voltios de manera que casi alcanzamos el límite físico del sistema ya que valores superiores provocarían el bloqueo de las ruedas y la activación del sistema de frenado antibloqueo (ABS, del inglés Antilock Braking System).

En la Tabla 5.2 se incluyen las distancias entre el punto final fijado y el punto donde el coche se detuvo. En todos los experimentos, el rango de variación entre los distintos puntos de parada es inferior a 25 cm y la distancia máxima al punto de detención nunca supera los 80 cm.

Si tenemos en cuenta los errores asociados a la medida hasta el punto de frenado inducidos por el GPS y que el período de actualización en el cálculo de la presión de frenado a ejercer es de 5 Hz, período fijado por el GPS utilizado en las demostraciones, los resultados obtenidos demuestran un buen comportamiento del sistema diseñado para la realización de paradas de emergencia y prueban que la activación de sistemas de seguridad independientes de la acción del conductor son una buena solución para reducir el número de accidentes en carretera.

5.2.3. Activación del controlador

En la validación del sistema presentada en el punto anterior, se realizaron pruebas con un punto fijo determinado por el GPS. En la parte experimental, se incluyen pruebas reales en la que el vehículo autónomo se encontraba siguiendo a un vehículo guía que repentinamente realizaba una frenada brusca activando el sistema de frenado de emergencia en el vehículo automático. Para la activación del citado sistema, es necesario una señal de disparo en función de las condiciones del tráfico.

Antes de pasar a detallar cada uno de los experimentos realizados, se justifica la necesidad de este sistema realizando una prueba en la que, tras una frenada brusca, los sistemas de control de velocidad de cruceo adaptativo[Naranjo 06] no están preparados para evitar el accidente.

En la Fig. 5.14 se muestra un ejemplo del sistema de control de cruceo adaptativo en el coche y su funcionamiento ante una frenada de emergencia. En la parte superior de la figura se

muestran las velocidades del coche perseguido -trazo negro- y del coche automático perseguidor -trazo gris. Debajo de la gráfica de velocidades, se muestra la distancia de separación entre ambos vehículos a lo largo de todo el recorrido. En la parte inferior de la figura se observa la aceleración del vehículo perseguido a lo largo del experimento.

Los valores de aceleración son cercanos a cero a lo largo de la mayoría del recorrido. Alrededor del segundo 40 se produce una deceleración -5m/s^2 por parte del vehículo perseguido que se ve reflejada en la gráfica de la velocidad. Dicha deceleración es momentánea, continuando el vehículo su ruta perseguido por el coche automatizado sin que se aprecie variación significativa en la separación entre vehículos.

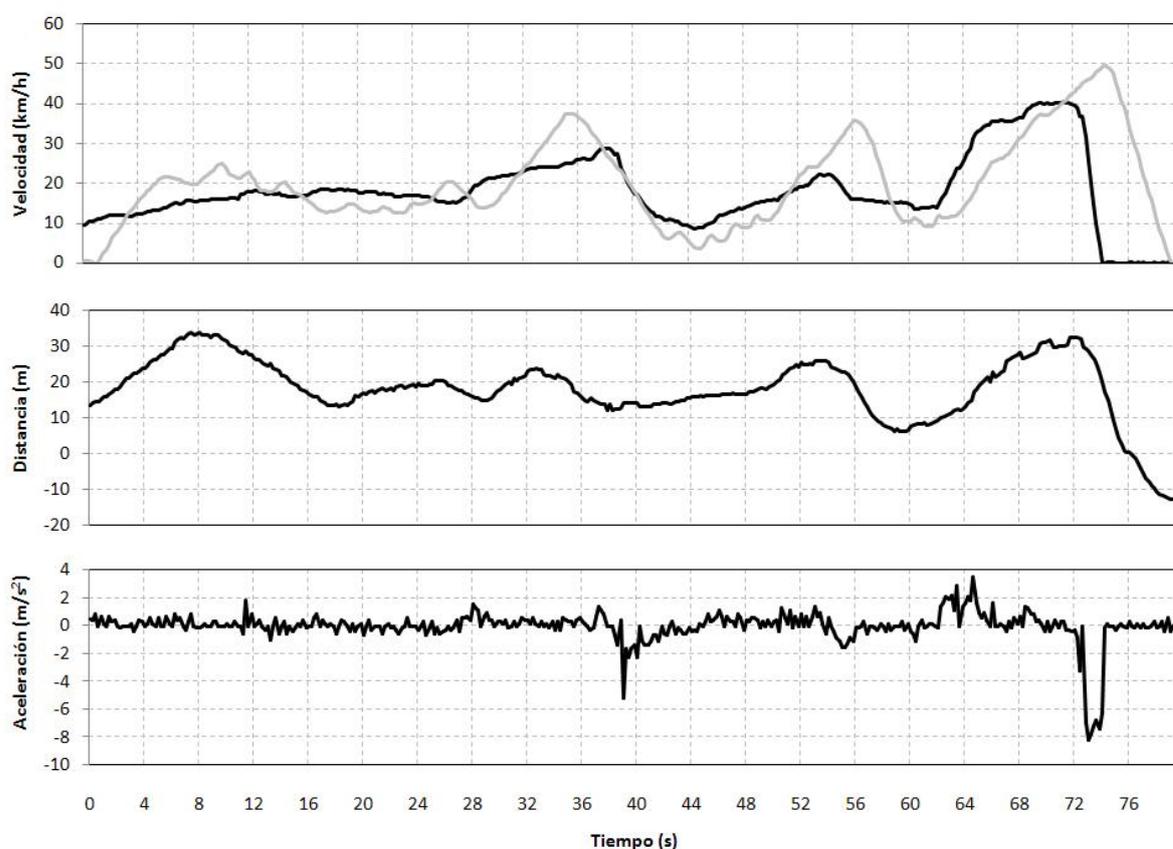


Figura 5.14: Experimento de ACC con frenada de emergencia.

En el segundo 72, se produce otra deceleración fuerte por parte del vehículo perseguido, esta vez más brusca y prolongada deteniendo el vehículo en un corto espacio de tiempo. En esta ocasión se observa cómo el vehículo automatizado no puede detener su marcha antes de alcanzar al vehículo guía y la distancia de separación alcanza valores negativos indicando que la colisión se habría producido. Debemos hacer notar que un valor negativo es posible ya que durante los experimentos de frenada de emergencia los vehículos circulaban cada uno por un carril.

Mediante esta prueba, se demuestra que los sistemas de ACC están diseñados para buscar el confort y la comodidad de los conductores pero, en ningún caso, están preparados para deceleraciones bruscas del vehículo.

A la hora de poner en práctica nuestro sistema de frenado de emergencia, debemos determinar que señal provocará la activación del sistema. Dicha activación, está basada en la medida de dos variables: la distancia entre vehículos y la aceleración del vehículo precedente. La razón de utilizar dos variables es la incapacidad de una sola de ellas para predecir que nos encontramos ante una situación crítica de inminente peligro de colisión. Como ejemplo, una fuerte deceleración momentánea no es suficiente para activar el sistema si ésta no es continuada y la distancia entre vehículos no disminuye significativamente -caso que ocurría en el anterior experimento.

Así pues, se ha fijado una deceleración de 7 m/s^2 como umbral de emergencia. Este valor umbral, además de ser coherente con los resultados obtenidos en el experimento previo, es ampliamente aceptado como deceleración de emergencia. En [Gail 01] se presenta un ADAS basado en el incremento significativo del nivel de luminosidad de las luces de frenos cuando se detectan valores de deceleración superiores a los 7 m/s^2 . Teniendo en cuenta esta deceleración y la distancia mínima de frenado del vehículo a velocidades legales de circulación urbana -11,7 metros a 50 km/h -, se fijó una distancia menor de 15 metros como segunda condición de activación del sistema de emergencia. Si se cumplen ambas condiciones, el copiloto cambia del modo de conducción que tuviera en ese momento al sistema de frenada de emergencia.

5.2.4. Experimentos

En esta sección se presentan tanto las pruebas del sistema de activación para la frenada de emergencia como el comportamiento del control para situaciones reales de tráfico.

Se realizaron tres pruebas en las que el vehículo perseguido circula a lo largo del circuito sin realizar cambios significativos en su velocidad hasta realizar una repentina frenada. En el primer test el vehículo automático estaba ocupado por una única persona y el sistema de posicionamiento funcionaba con la máxima precisión. En la segunda prueba, el vehículo automático también estaba ocupado por una única persona pero, esta ocasión, se simulaba una situación en la que no se tiene recepción de la señal GPS y el posicionamiento del vehículo era dado por el sistema inercial [Milanés 08a]. El último test consistió en probar el sistema con cinco personas montadas en el vehículo y el GPS funcionando en la máxima precisión. De esta forma, se buscaba probar la robustez del sistema ante distintas situaciones reales de tráfico.

La Fig. 5.15 muestra el caso de un único ocupante en el vehículo con el GPS trabajando con la máxima precisión. Las tres gráficas superiores representan los mismos valores que en la Fig. 5.14. La gráfica inferior nos indica tanto el estado del copiloto, esto es, el controlador que está seleccionado en cada momento, como la activación del sistema de frenado de emergencia. Para el estado del copiloto -marca en negro- se definieron los valores 0 para conducción normal, 1

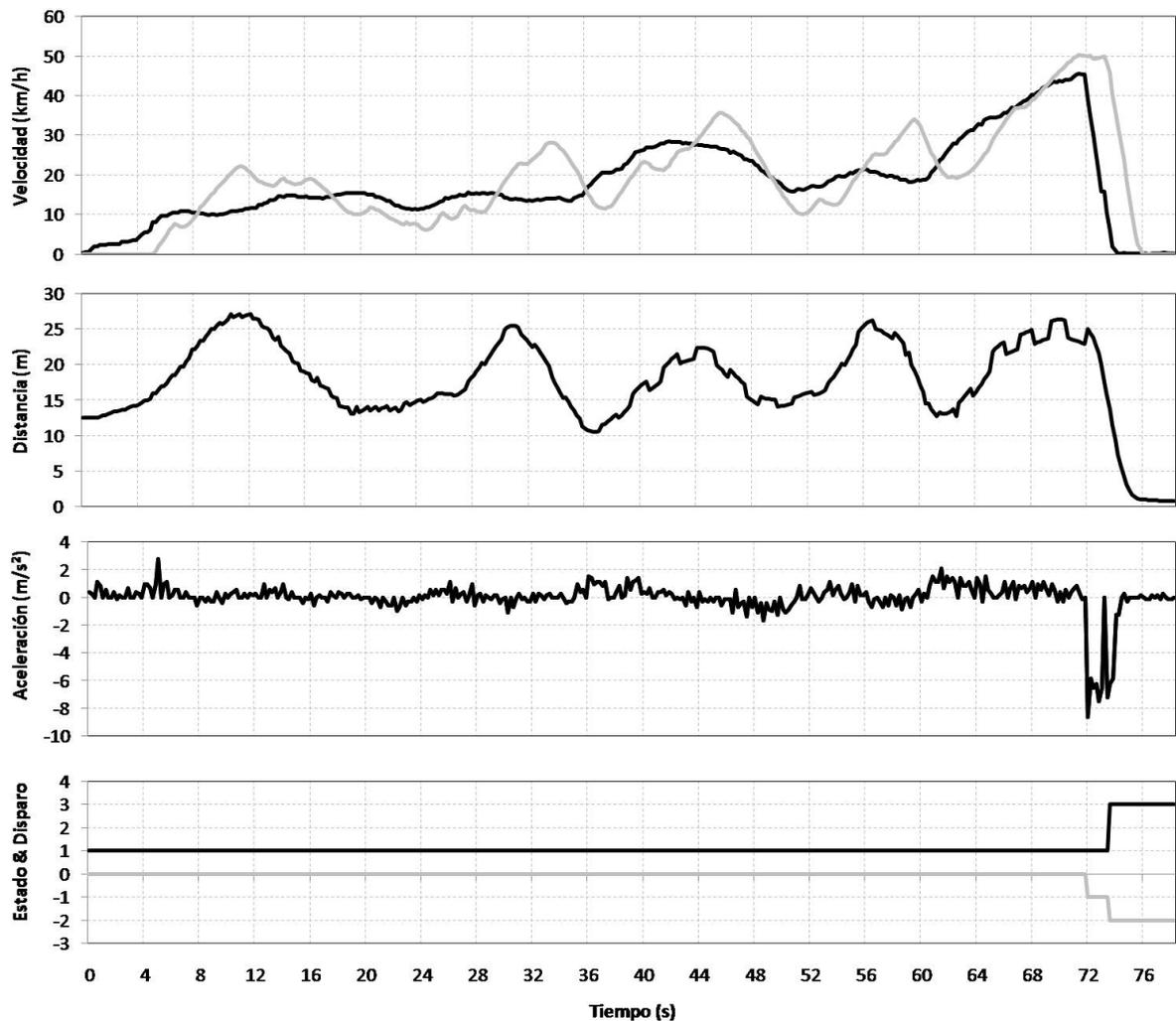


Figura 5.15: Experimento con el sistema de emergencia con un único ocupante en el vehículo y el GPS funcionando con la máxima precisión.

para ACC, 2 para adelantamiento y 3 para frenado de emergencia. Para el disparo del sistema de frenado de emergencia -marca en gris- se definió 0 cuando no se ha detectado ningún cambio de velocidad, 1 para el caso de producirse una deceleración igual o superior a 7 m/s^2 y 2 para, cumplida la primera condición, la distancia entre vehículos sea inferior a 15 metros.

Durante los primeros 70 segundos del primer experimento (Fig. 5.15) el vehículo automático mantiene la distancia de separación entre 10 y 30 metros mientras que el vehículo perseguido realiza suaves modificaciones en su velocidad de circulación. Alrededor del segundo 72, el vehículo guía realiza una fuerte frenada de algo más de 2 segundos llegando a un pico de deceleración de $8,61 \text{ m/s}^2$. Vemos que en ese instante el sistema de disparo cambia de 0 a 1 su valor pero hasta que la distancia entre vehículos no baja hasta los 15 metros, no cambia su valor a 2 activándose el sistema de frenado de emergencia -reflejado en el paso del 1 al estado 3 del copiloto.

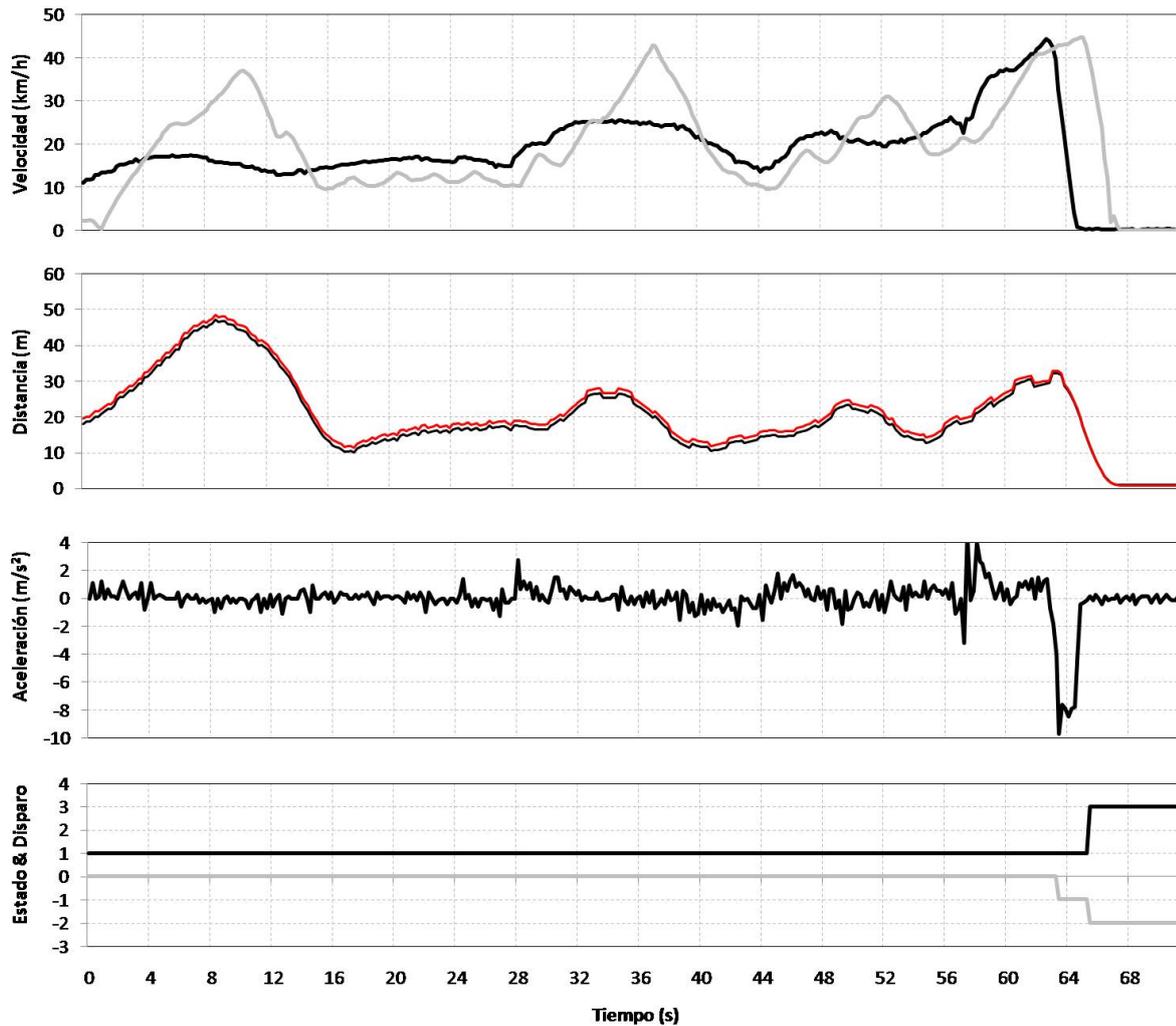


Figura 5.16: Experimento con el sistema de emergencia con un único ocupante en el vehículo y sin señal GPS, realizando el posicionamiento con el sistema basado en la IMU.

La distancia final de separación entre vehículos fue de 78 cm lo cual demuestra que el sistema es capaz de detenerse aprovechando al máximo la distancia disponible para la realización de la frenada.

El objetivo del segundo experimento era determinar el funcionamiento del sistema en caso de un fallo del sistema GPS. Con este fin, se simuló un fallo en el sistema de recepción de la señal, forzando al programa de control a conmutar al sistema de posicionamiento basado en el sistema inercial. El vehículo continuó registrando las posiciones GPS para determinar con la máxima precisión la separación entre vehículos.

En la Fig. 5.16 se muestran los resultados de este experimento. La segunda gráfica desde arriba muestra la distancia medida por el sistema GPS -marca negra- y la distancia usada como entrada al sistema de control medida por el sistema inercial -marca roja. Debido a la deriva

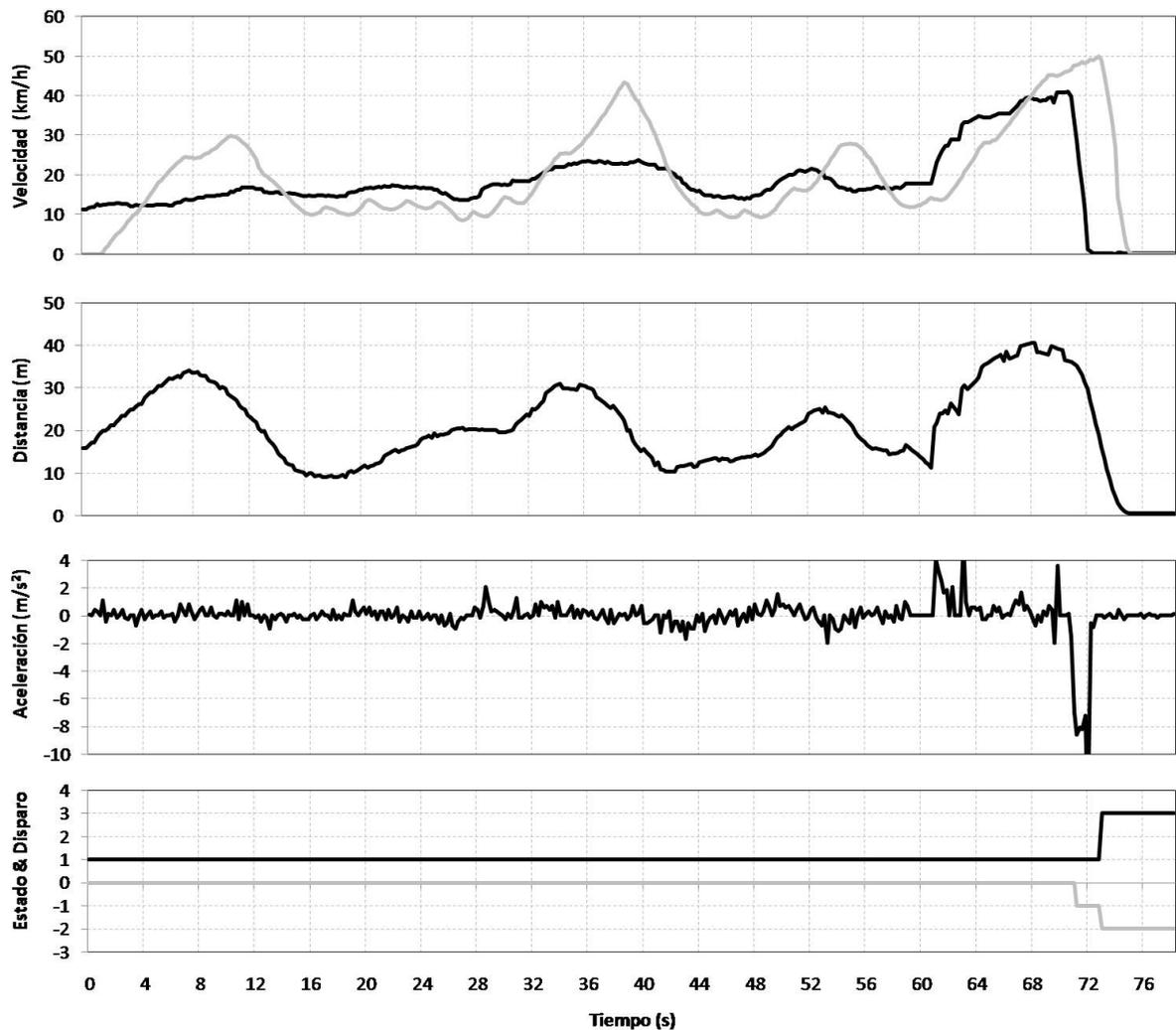


Figura 5.17: Experimento con el sistema de emergencia con cinco ocupantes en el vehículo y el GPS funcionando con la máxima precisión..

asociada al uso de sistemas inerciales, se produce un error acumulativo a la hora de determinar la distancia recorrida. Así, al final del experimento obtenidos se aprecia una separación entre vehículos de 84 cm mientras que la distancia real, medida por el GPS, es de 1,16 m.

La última prueba (Fig. 5.17) trataba de evaluar la influencia de un incremento significativo en la masa del vehículo montando a cinco ocupantes. En este caso, el hueco de separación entre vehículos fue de 74 cm.

Los experimentos realizados validan el sistema ante diferentes condiciones y demuestran su robustez.

5.3. Control en cruces

Uno de los temas más importante en la investigación dentro del área de los sistemas inteligentes de transporte es el desarrollo de sistemas capaces de controlar el flujo de vehículos en intersecciones, particularmente en entornos urbanos. Las intersecciones dentro de las ciudades, representan una de las mayores causas de accidentes. Aproximadamente el 50 % de todos los accidentes de tráfico ocurren en cruces y, de estos, más de un 60 % en entornos urbanos [Lindley 07]. Hay dos principales problemas al abordar la seguridad en un cruce: la baja visibilidad, que en ocasiones es culpable de los accidentes, y la mala señalización que no indica con claridad el orden de preferencia.

Los sistemas de control de flujo de vehículos podrían disminuir significativamente los atascos, siempre que los vehículos fueran capaces de determinar su velocidad óptima para maximizar el número de coches que cruzan una intersección por unidad de tiempo. Gracias a nuestra arquitectura de comunicaciones que nos permite saber la posición y velocidad de los vehículos en un área determinada, estimaremos el punto de intersección de las trayectorias de los vehículos y, mediante un controlador borroso, se modificará la velocidad del coche sin preferencia en función de la velocidad del vehículo con preferencia en el cruce.

5.3.1. Revisión bibliográfica

La coordinación de vehículos en intersecciones urbanas es una de las maniobras de mayor complejidad y, la complicación aumenta si consideramos que los vehículos que confluyen en la misma son unos completamente automatizados y otros guiados por conductores humanos.

Desde el punto de vista de los proyectos de investigación, es interesante destacar la aportación a este campo del subproyecto INTERSAFE [Schulze 08] -dentro del proyecto europeo PReVENT- que trataba de desarrollar un ADAS mediante visión, lidar y radar para mejorar el tráfico en las intersecciones y reducir el número de fallecidos[Fuerstenberg 06]. Para dicho estudio, se definieron distintos tipos de intersecciones con diferentes niveles de complejidad. De estos, los escenarios de mayor relevancia fueron escogidos para un posterior análisis de accidentes y así centrarse sólo en los escenarios más peligrosos.

INTERSAFE se centra en dos posible enfoques. El primero es un enfoque de abajo a arriba (bottom-up), comunicando al vehículo información procedente de diferentes sensores y de la infraestructura. El segundo es un enfoque de arriba a abajo (top-down) basado en un simulador de tráfico. Así, diferentes configuraciones tanto de información sensorial como de los métodos de comunicación fueron evaluadas.

A pesar de este proyecto, no encontramos muchas aportaciones hasta el año 2009 en este campo. Entre ellas, cabe destacar un sistema basado en visión para monitorizar el tráfico en las intersecciones y predecir en tiempo real una posible colisión [Atev 05]; un sistema de control de

intersección con dos prototipos de vehículos similares a los utilizados en campos de golf donde a muy bajas velocidades -alrededor de 2 m/s- se detiene un vehículo para dejar pasar a otro si ambos se encuentran en una intersección y donde la detección del otro vehículo está basado en lidar [Bouraoui 06]; un experimento con más de 60 participantes con el objetivo de determinar el comportamiento del conductor cuando el semáforo ubicado en una intersección cambia a ámbar [Rakha 07] o un sistema para calcular el flujo de automóviles por una intersección mediante un algoritmo de control [Wunderlich 08].

Un sistema fácilmente incorporable a nuestra arquitectura de control se presenta en [Yang 01] donde mediante un sistema de control del tráfico se recibe la posición GPS de los vehículos y, cuando se acercan a una intersección, la regulación de los semáforos se ajusta de tal forma que los vehículos prioritarios no deban esperar para cruzar dicha intersección.

Existen numerosos estudios en simulación en los que se presenta el comportamiento de los vehículos en un cruce realizando el control de los mismos. En [Civilis 06] dicho control se realiza mediante redes neuronales. En [Li 06a] se utiliza un sistema de comunicaciones inalámbricas vehículo-vehículo para determinar la posición de cada vehículo en un cruce y actuar en consecuencia.

En cuanto a las comunicaciones [Korkmaz 07] propone dos modificaciones al protocolo IEEE 802.11 para realizar un estudio en simulación de varios vehículos aproximándose de manera simultánea a una intersección pero siempre basándose en una comunicación vehículo-vehículo.

Durante el año 2009, han aparecido numerosas aportaciones desde diferentes puntos de vista al estudio de las intersecciones, lo que da una muestra de la importancia de esta maniobra así como de los esfuerzos por parte de todos los grupos de investigación para tratar de solucionar la causa de un gran número de los accidentes urbanos. A continuación, se citan algunos de estos trabajos.

En [Wu 09a, Wu 09b] se presenta un estudio en simulación el en que se propone un nuevo control de intersecciones basado en el envío de información para vehículos inteligentes. Un controlador central gestiona la llegada de todos los vehículos de forma individual. Se considera que no existen semáforos y el controlador central se encarga de la gestión del cruce. La intersección se modela como un recurso compartido entre los vehículos que circulan por las carreteras. El controlador central de la intersección determina el mejor orden de acceso a la intersección de todos los vehículos que se acercan a ella. El objetivo es despejar de tráfico la intersección lo antes posible.

En [Ben 09] se crea un modelo de tráfico urbano que emula una intersección en ciudad y se comparan los datos de flujo de tráfico obtenido con las simulaciones con los datos del comportamiento de un autobús real en horas pico de tráfico.

En [Sato 09] se realiza un análisis del comportamiento de los conductores a la hora de realizar un giro en una intersección. Mediante vehículos equipados con distinta instrumentación, se

compara la acción sobre el pedal del freno para adecuar la velocidad al giro en la intersección con la activación del intermitente de giro.

En [Wang 09b] se utiliza una única cámara en una ubicación elevada para monitorizar el tráfico en una intersección. Mediante un sistema de control robusto, desarrolla un algoritmo para detección de vehículos aproximándose a la intersección.

En [Li 09] se presenta un estudio basado en cámaras de visión para determinar de forma eficiente el tiempo que permanece un vehículo detenido hasta que cruza la intersección y el número de vehículos detenidos en cada carril.

En [Chang 09a] se muestra un sistema basado en comunicación vehículo-vehículo mediante DSRC para desarrollar un sistema de aviso de posible colisión en la intersección.

En [Zou 09] se presenta un sistema basado en visión para la extracción de parámetros del tráfico en una intersección como flujo de vehículos que lo atraviesan, tiempo de ocupación del cruce o la velocidad media de circulación dentro de la intersección.

En [Alonso 09] se desarrolla un algoritmo de control basado en comunicación vehículo-vehículo para detener al vehículo automático antes de una intersección cuando hay algún otro vehículo dentro de un cuadrante previamente definido.

En [Liu 09] se presenta un sistema que mejora el flujo del tráfico en intersecciones mediante un sistema exclusivo de carriles dedicados para el giro a la derecha. Los resultados obtenidos mejoran las características del tráfico en intersecciones siempre y cuando la intención de la mayoría de los vehículos sea continuar recto en el cruce.

En [Farahmand 09], mediante un estudio en simulación, se desarrolla un sistema de evasión de colisiones en intersecciones mediante un filtro de Kalman extendido.

En [Yan 09] se presenta una simulación en la que un gestor de intersecciones recibe la información de cada vehículo que se acerca a la intersección y le asigna un tiempo para atravesarla con el objetivo de maximizar el número de vehículos que atraviesan la misma.

La mayoría de los estudios aquí presentados, terminan en simulaciones sin llegar a demostrar mediante pruebas reales el comportamiento de los sistemas desarrollados. Además, no se han encontrado trabajos cuyo objetivo sea el incremento de la fluidez del tráfico permitiendo el paso del vehículo sin preferencia. Se presenta a continuación el sistema de detección de intersecciones desarrollado así como el controlador diseñado para tratar de dar una solución a este problema.

5.3.2. Sistema de detección de intersecciones

El primer paso para realizar un control eficiente de cruces es determinar la zona de intersección entre dos carreteras. En trabajos previos [Naranjo 07, Alonso 09], este análisis no era necesario ya que se seguía la ruta previamente trazado para realizar la conducción a través del mismo. Sin embargo, esta dependencia incapacitaba al vehículo para circular por entornos desestructurados, objetivo a futuro marcado en trabajos previos del grupo [Naranjo 05a].

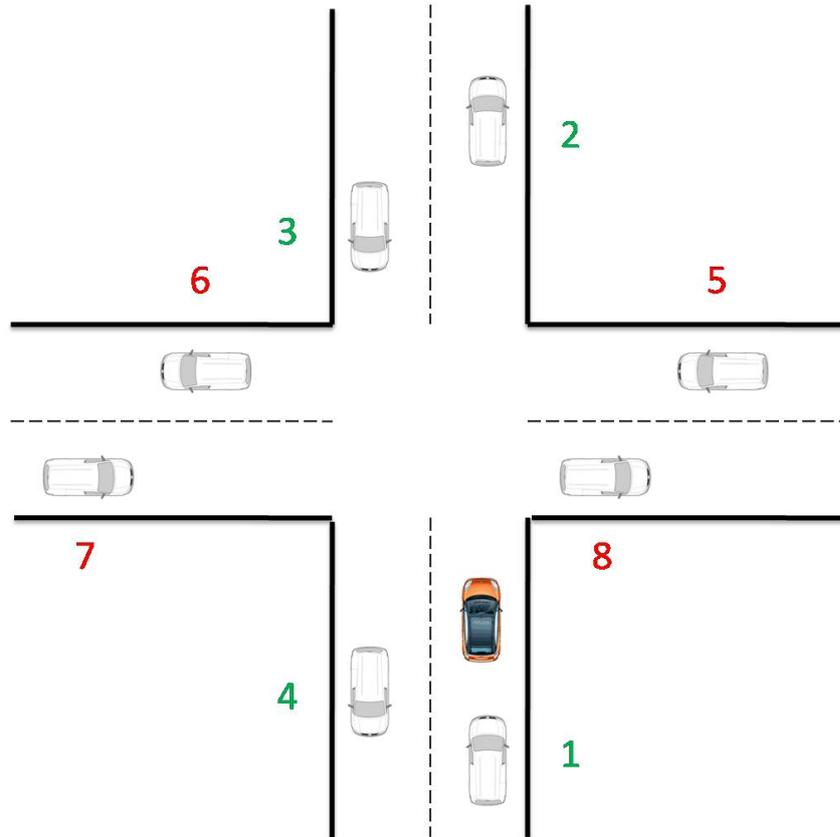


Figura 5.18: Representación de las posibles posiciones de los vehículos cerca de una intersección.

Con este precedente y el objetivo claro de desarrollar un sistema válido para entornos desestructurados, se ha implementado un sistema inteligente capaz de detectar la aproximación de dos vehículos a una intersección. El desarrollo de este sistema se divide de forma natural en dos partes. En la primera de ellas, explicada en esta sección, se muestra un sistema capaz de detectar la ubicación de los vehículos cercanos al cruce. En la segunda, que explicaremos en la sección posterior, se implementa un controlador borroso para gestionar de forma eficiente el paso por la intersección.

El sistema de detección fue diseñado sobre la base de un análisis topológico local -según la arquitectura propuesta- y se basa en el conocimiento de las posiciones de cada vehículo que se detecte en el entorno cercano a la intersección a lo largo del tiempo. Con estos datos, es posible determinar el vector dirección de cada uno de los coches. El área que percibe el coche conducido de manera automática -en color en la Fig. 5.18- se extiende a un radio de 80 metros. Cuando otro vehículo es detectado dentro del área, su vector dirección es monitorizado para analizar si trayectoria.

Una vez que el vehículo ha sido detectado, esto es, se encuentra dentro del radio de 80 metros y por consiguiente recibimos información del mismo desde la unidad central de control, puede

ocurrir una de las siguiente ocho posibilidades, que se muestran en la Fig. 5.18. El vehículo puede circular en nuestra misma dirección (coches 1, 2, 3 y 4), en nuestro mismo sentido (coches 1 y 2) -delante (coche 2) o detrás nuestra (coche 1)- o en sentido contrario (coches 3 y 4). Del mismo modo, el vehículo puede circular en la carretera perpendicular (coches 5, 6, 7 y 8), estando antes (coches 5 y 7) o después (coches 6 y 8) del cruce y en el sentido con preferencia (coche 5) o sin ella (coche 7) en la cruce.

El artículo 24 del Código de Circulación da el criterio de preferencias en intersecciones como:

El conductor de un vehículo que haya de ceder el paso a otro no deberá iniciar o continuar su marcha o su maniobra, ni reemprenderlas, hasta haberse asegurado de que con ello no fuerza al conductor del vehículo que tiene la prioridad a modificar bruscamente la trayectoria o la velocidad del mismo y debe mostrar con suficiente antelación, por su forma de circular, y especialmente con la reducción paulatina de la velocidad, que efectivamente va a cederlo.

Con esta premisa, únicamente los vehículos que llegan a la intersección desde la derecha del vehículo automático -coche 5 según la Fig. 5.18- deben ser tenidos en cuenta a la hora de optimizar el tráfico de vehículos en una intersección. Por tanto, estamos en disposición de afirmar cuales son las tres principales condiciones que se deben cumplir para que un vehículo automático que se aproxima a un cruce, de prioridad a otro: que las trayectorias de los vehículos se corten, que circule por el carril con preferencia y que aún no hayan rebasado la intersección.

La Fig. 5.20 muestra los tres vectores unitarios necesarios para comprobar estas condiciones y que definimos como:

Vector dirección unitario del vehículo autónomo ($\vec{d1}$) es un vector en la dirección y sentido de avance del vehículo autónomo.

Vector dirección unitario del vehículo manual ($\vec{d2}$) nos determina la dirección y sentido de avance del vehículo que se aproxima a la intersección con preferencia de paso. Tanto este vector como el anterior se determinan con las coordenadas conocidas de los vehículos.

Vector dirección unitario común ($\vec{d12}$) utilizaremos este nombre para referirnos a un vector con origen en la posición del vehículo autónomo y extremo en la posición del vehículo manual en cada iteración del ciclo de control.

Teniendo todo esto en cuenta, se deben de cumplir tres condiciones para activar el sistema de control de intersecciones cuya representación geométrica se muestra en la Fig. 5.19.

1. El valor absoluto del producto escalar entre el vector dirección del vehículo autónomo y el vector dirección del vehículo manual debe ser menor que $\cos 45^\circ$. Esto indica que las direcciones de ambos vehículos son perpendiculares. ($\vec{d1} \cdot \vec{d2} < \cos 45^\circ$).

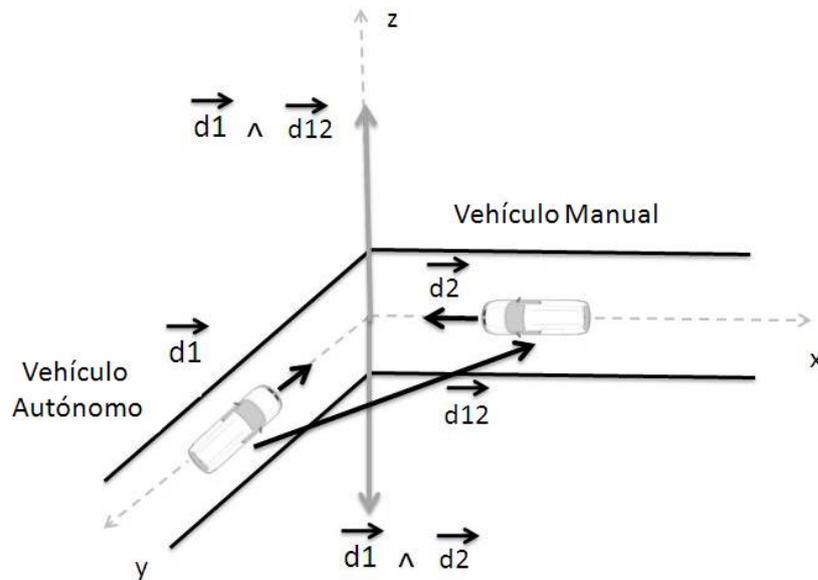


Figura 5.19: Representación geométrica de los vectores para la activación del control de intersección.

2. El producto vectorial del vector dirección del vehículo autónomo con el vector común debe ser positivo. Esto indica que el vehículo manual está circulando por el carril con preferencia en el cruce respecto a nuestra posición ($\vec{d}_1 \wedge \vec{d}_{12} > 0$).
3. El producto vectorial del vector dirección del vehículo autónomo con el vector dirección del vehículo manual debe ser negativo. Esto indica que el vehículo se encuentra en el tramo anterior al cruce, esto es, que aún no ha llegado a la intersección y debe ser tenido en cuenta ($\vec{d}_1 \wedge \vec{d}_2 < 0$).

En la Fig. 5.20 se muestra un ejemplo del funcionamiento del sistema de detección de intersecciones en el circuito de pruebas propiedad del IAI-CSIC. Para esta prueba, el objetivo era comprobar la evolución del punto de intersección desde que el sistema es activado. Los vehículos comienzan moviéndose simultáneamente desde la posición inicial en la que se encuentran en la figura. Debemos tener en cuenta que el cálculo de los puntos de intersección se hace a la frecuencia de funcionamiento del GPS, esto es, a 5 Hz.

Para la comprobación del funcionamiento del sistema, la limitación de 80 metros para detectar el vehículo fue desactivada y, por tanto, tan pronto como las tres condiciones explicadas anteriormente se cumplieran, el sistema comienza a calcular el punto de intersección entre ambos vehículos. Como se puede ver en la figura, los primeros puntos están significativamente alejados de la intersección y corresponden al momento en el que el vehículo conducido manualmente está finalizando la curva y está situándose en la recta de llegada a la intersección. En ese momento, el vehículo automático ya se encuentra en la recta en la que llegará al cruce. A pesar de que los

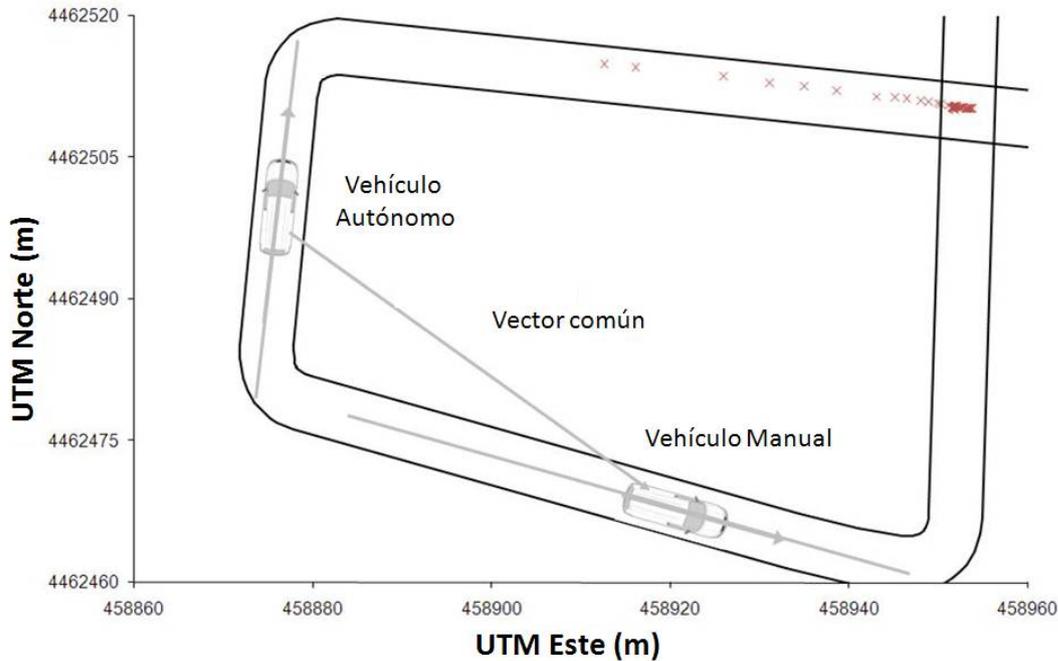


Figura 5.20: Comportamiento del sistema de detección de peligro en una intersección.

puntos se encuentran alejados, se puede observar como convergen rápidamente hacia el centro de la intersección. Teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo, vemos que en aproximadamente tres segundos, el punto de intersección ya se encuentra situado en el centro del cruce. Este es el tiempo que tarda el vehículo manual en enderezar completamente su trayectoria para enfilarse en la intersección.

Si tenemos en cuenta los errores asociados al sistema DGPS instalado en el vehículo manual, se observa que el error en el cálculo del punto de intersección es insignificante teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo. Se realizaron diferentes experimentos para comprobar el correcto funcionamiento del sistema en diversas circunstancias obteniendo buenos resultados.

Podemos concluir por tanto, que el sistema desarrollado permite determinar cuando dos vehículos se aproximan a una intersección independientemente de la forma de la carretera y del recorrido que estén llevando ambos coches. Cuando un vehículo se encuentra dentro del alcance de otro -distancia inferior a 80 metros- estamos en disposición de determinar si se van a cruzar y calcular el punto de intersección en tiempo real y, a partir de este punto, el cálculo de las distancias de ambos coches al punto de intersección es inmediata.

5.3.3. Controlador diseñado

El controlador responsable del control de los pedales de acelerador y freno, tomará las decisiones de mantener, reducir o aumentar la velocidad del vehículo autónomo cuando se aproxime a una intersección al mismo tiempo que otro vehículo.

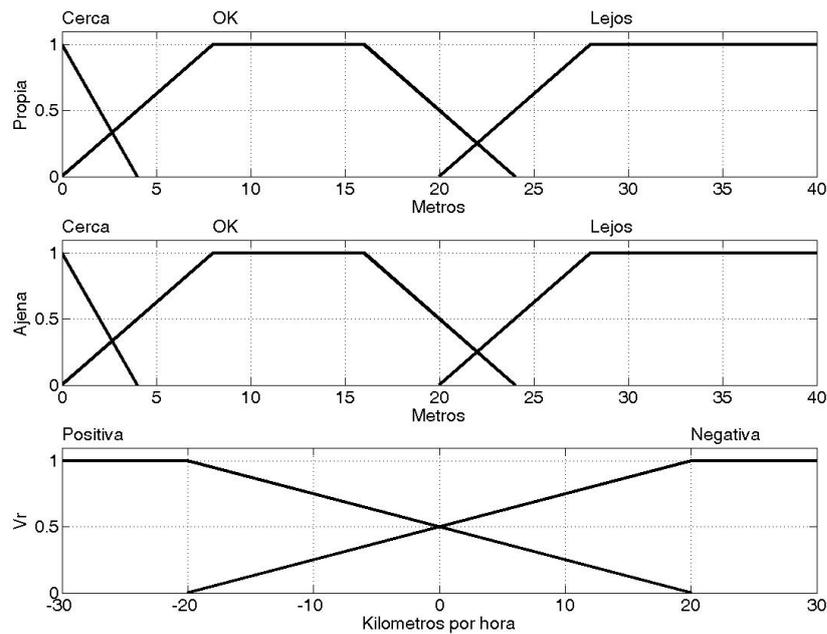


Figura 5.21: Definición de las funciones de pertenencia de las variables de entrada al controlador borroso.

Para realizar el controlador de intersecciones definimos tres variables de entrada cuya representación gráfica se muestra en la Fig. 5.21. Estas entradas son:

Distancia coche automático al cruce (Propia) que determina la distancia, en metros, desde la posición del coche al punto de intersección determinado con el procedimiento indicado en la sección anterior.

Distancia coche manual al cruce (Ajena) que marca la distancia del coche que se aproxima a la intersección con preferencia de paso al punto de intersección determinado.

Diferencia de Velocidad (Vr) entre el vehículo automático y el manual, en km/h.

Una vez definidas las entradas del controlador, codificaremos las dos primeras (Propia y Ajena) mediante tres funciones de pertenencia mientras que la última será codificada únicamente con dos (Vr). Estas funciones de pertenencia se presentan en la Fig. 5.21.

Tanto la distancia del vehículo automático a la intersección (Propia) como la distancia del vehículo manual (Ajena) se codifican mediante tres funciones de pertenencia cuyas etiquetas lingüísticas dan una idea de la distancia a la que se encuentren dichos vehículos del punto de intersección. Debemos hacer notar que el valor a partir del cual se considera la distancia al cruce como lejana está situada en los 22 metros.

La velocidad relativa entre vehículos, definida únicamente con dos etiquetas lingüísticas

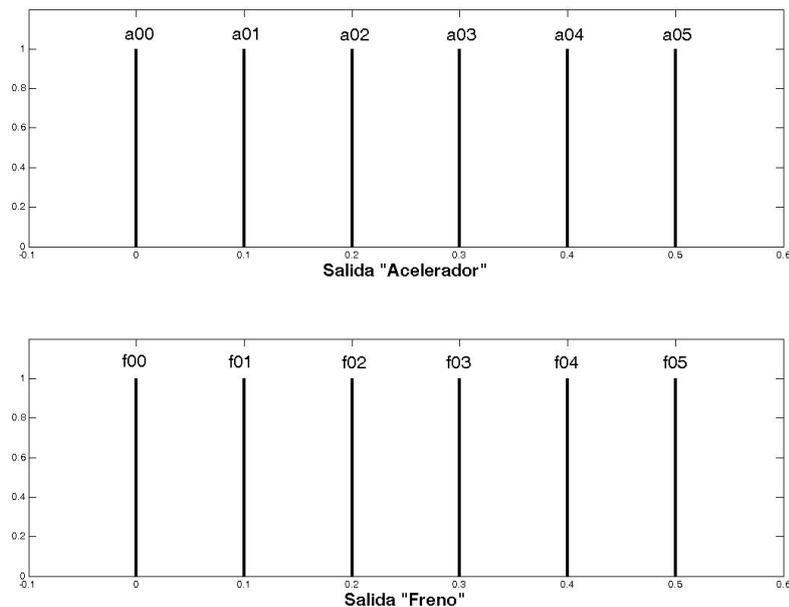


Figura 5.22: Funciones de pertenencia de las variables de salida.

cruzadas en los cero km/h, nos sirven para introducir la velocidad con la que cada uno de los vehículos se está acercando a la intersección y, en función de la misma, acelerar para pasar el cruce y así contribuir a una mayor fluidez en el tráfico o bien frenar para permitir el paso del vehículo con preferencia incrementando la seguridad. La diferencia máxima de velocidad se fija en 20 km/h ya que este controlador está diseñado para intersecciones urbanas.

Al igual que en el caso del controlador en atascos, usamos dos variables de salida, una de ellas dirigida a la actuación sobre el pedal del freno (Fr) y otra sobre el pedal del acelerador (Ac), que serán definidas mediante 6 singletons cada una. A diferencia del controlador en atascos, la acción sobre los pedales no se limita y se permite la actuación sobre los mismos en todo el rango de valores.

Las salidas del controlador se representan en la Fig. 5.22. En el eje de abcisas se indica el porcentaje del valor máximo de la presión tanto para el acelerador (a00, a01, a02, a03, a04, a05) como para el freno (f00, f01, f02, f03, f04, f05).

La base de reglas diseñadas para el control se muestra en la Tabla 5.3, que garantizan que no se mandarían señales simultáneamente a ambos actuadores.

Vr=Positiva	Ajena		
Propia	Cerca	OK	Lejos
Cerca	Ac=a00 Fr=f04	Ac=a00 Fr=f03	Ac=a02 Fr=f00
OK	Ac=a00 Fr=f02	Ac=a03 Fr=f00	Ac=a02 Fr=f00
Lejos	Ac=a01 Fr=f00	Ac=a03 Fr=f00	Ac=a02 Fr=f00

Vr=Negativa	Ajena		
Propia	Cerca	OK	Lejos
Cerca	Ac=a00 Fr=f02	Ac=a00 Fr=f01	Ac=a03 Fr=f00
OK	Ac=a00 Fr=f01	Ac=a00 Fr=f01	Ac=a03 Fr=f00
Lejos	Ac=a02 Fr=f00	Ac=a01 Fr=f00	Ac=a04 Fr=f00

Tabla 5.3: Reglas borrosas para la maniobra de intersecciones.

5.3.4. Experimentos

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos con el sistema de control diseñado. Se han llevado a cabo dos experimentos diferentes para demostrar el correcto funcionamiento del sistema diseñado utilizando la intersección del circuito de pruebas en las instalaciones del IAI (cuyas coordenadas UTM se muestran en la Fig. 5.20) para comprobar el correcto funcionamiento del controlador borroso desarrollado. El primer experimento trata de comprobar el correcto funcionamiento del controlador para detener el vehículo automático cuando se está aproximando a una intersección a la vez que otro vehículo que tiene preferencia de paso, esto es, que circula por su derecha. El segundo experimento realizado comprueba la capacidad del sistema para que el vehículo automático acelere a la llegada a un cruce para pasar antes del vehículo que circula por su derecha de tal manera que permita incrementar la fluidez del tráfico.

Teniendo en cuenta que la seguridad es el parámetro crítico en el tráfico en intersecciones se debe considerar un área de seguridad; un cuadrado de 8x8 metros, en torno al punto de intersección en el centro del mismo. También ya que las antenas del GPS están ubicadas en la parte trasera del vehículo, consideramos que la longitud de un vehículo comercial es de unos cuatro metros. Por tanto, a la distancia al punto de intersección calculado en cada iteración se le suma una distancia de seguridad de ocho metros para asegurar la fiabilidad del sistema.

De ahora en adelante, seguiremos el siguiente convenio de marcas y colores. El color gris se utilizará para el vehículo automático y el negro para el guiado manualmente. Las cruces corresponderán a las posiciones en que las condiciones para activar el sistema de intersección no se cumplen. Para indicar los instantes en que el sistema esté activo, se emplearán círculos. Por último, la línea continua y discontinua indicará que el sistema está desactivado o activado respectivamente.

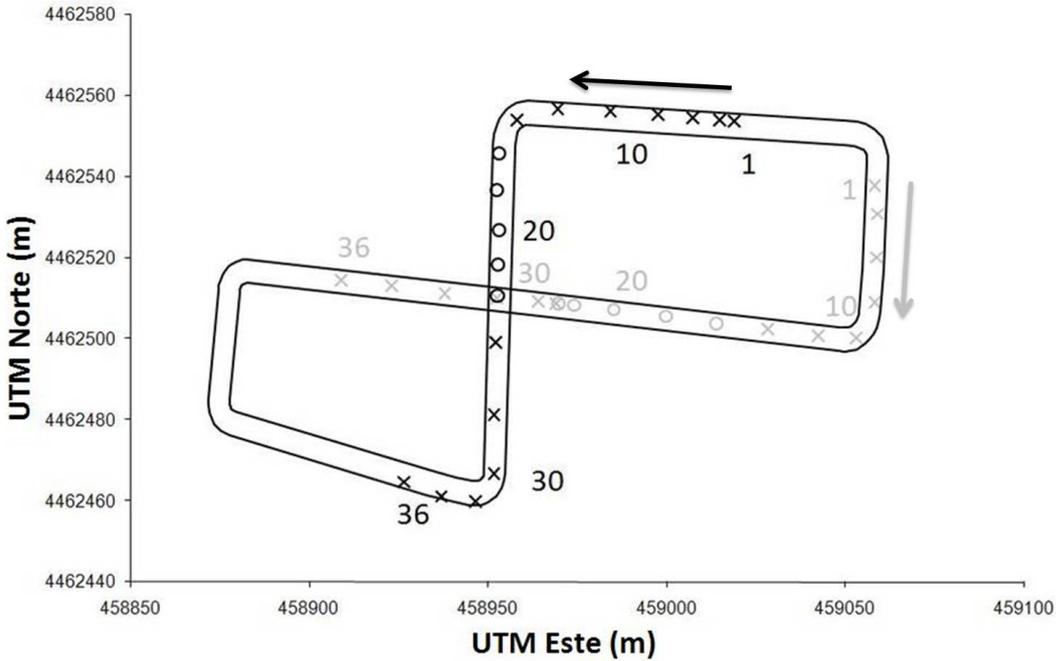


Figura 5.23: Posición de Clavileño y Platero durante el primer experimento.

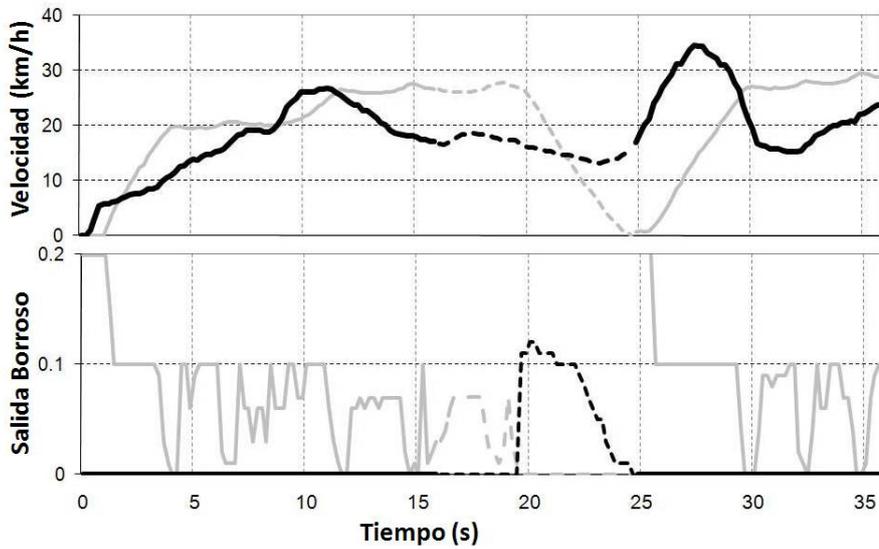


Figura 5.24: Velocidades de cada vehículo y salida del controlador borroso para el primer experimento.

En la Fig. 5.23 se muestra el comportamiento del vehículo autónomo para el caso en que otro vehículo que se acerca a la intersección es detectado. En este experimento, cuando el vehículo autónomo detecta al otro vehículo, reduce su velocidad hasta que el otro vehículo ha atravesado la intersección. Cada marca en la figura corresponde a una posición GPS cada dos segundos.

Al comienzo del experimento, ambos vehículos se alejan y el sistema de detección de intersección se encuentra inactivo. Entorno al segundo 15, el control del vehículo autónomo detecta la presencia de otro vehículo aproximándose al cruce y, en ese instante, se activa el controlador borroso. Se aprecia como alrededor del segundo 20, las siguientes tres posiciones del vehículo automático están muy próximas entre si, reflejando una reducción significativa en la velocidad. De esta manera, permite que el vehículo guiado por un conductor humano, cruce la intersección sin problemas. Cuando esto sucede, el vehículo autónomo recupera su velocidad de crucero y prosigue su ruta.

La velocidad de cada vehículo durante este experimento se muestra en la parte superior de la Fig. 5.24. La parte inferior de esta figura muestra la salida del controlador borroso con los valores normalizados donde el color gris se ha utilizado para el acelerador y el negro para el freno. La velocidad del vehículo autónomo se incrementa hasta los 20 km/h durante los primeros 10 segundos para pasar posteriormente a una velocidad de referencia de 27 km/h hasta el final del experimento. La activación del controlador de intersecciones se produce alrededor del segundo 15. Inicialmente, el vehículo autónomo mantiene su velocidad hasta que detecta la proximidad del vehículo manual sobre el segundo 20. En ese instante, el sistema actúa sobre la señal del control del freno para permitir al vehículo manual cruzar la intersección. Esta acción se ve reflejada en la gráfica de la salida del controlador borroso. Una vez que el vehículo manual atraviesa la intersección, el vehículo autónomo retoma su velocidad de referencia y prosigue su camino.

El segundo experimento es la continuación del primero. Los dos vehículos siguen recorriendo el circuito y se vuelven a encontrar en el mismo cruce y con el vehículo manual manteniendo la preferencia de paso (Fig. 5.25). En esta prueba, el vehículo manual reduce su velocidad antes de llegar a la intersección y el vehículo automático decide atravesar la intersección para mejorar la fluidez del tráfico.

El controlador borroso encargado de gestionar el tráfico en un cruce se activa sobre el segundo 10. La decisión del vehículo autónomo es intentar mantener una velocidad similar a la del vehículo conducido manualmente. En el segundo 18, el vehículo manual reduce su velocidad significativamente y esto provoca que el controlador decida incrementar la velocidad para atravesar la intersección antes del vehículo manual.

En la Fig. 5.26 se muestra la velocidad de cada coche y la salida del controlador borroso en la parte superior e inferior de la figura respectivamente. La velocidad de referencia del vehículo autónomo está fijada en 12 km/h durante los primeros cinco segundos y en 9 km/h después de ese instante hasta que se activa el controlador. Durante los primeros 18 segundos los vehículos mantienen velocidades similares hasta que el vehículo manual disminuye su velocidad sensiblemente y el controlador del vehículo automático decide atravesar el cruce. La velocidad del vehículo es incrementada significativamente para asegurar que cruce la intersección antes de la llegada del vehículo manual.

Con estos experimentos, se demuestra que el sistema implementado no sólo es capaz de detener el vehículo caso que otro vehículo esté llegando a la vez a la intersección sino que además es capaz de cruzar la intersección si la velocidad del otro vehículo es baja independientemente que tenga prioridad en el cruce.

5.4. Evitación de peatones

En esta sección, se presenta la cuarta maniobra implementada en nuestra arquitectura de control; la evitación de peatones. Se implementa un control lateral del vehículo para su resolución.

Las distracciones al volante por parte de los conductores son una de las mayores causas de accidente en carreteras. Situaciones como hablar por el teléfono móvil o conducir bajo la influencia del alcohol reducen significativamente la capacidad de atención de los conductores. Los estudios realizados en este campo, demuestran que la reacción de una persona de veinte años de edad hablando por teléfono ante una situación de tráfico inesperada es equiparable a una persona de 70 años de edad. Este mismo estudio concluye que cualquier conductor, con independencia de su edad, reduce un 18 % el tiempo de respuesta ante una situación de riesgo inminente [Cooper 08] si está hablando por teléfono.

Las maniobras evasivas constituyen uno de los mayores desafíos dentro del campo de los vehículos autónomos. Esta maniobra se usa como último recurso en situaciones críticas ya sea mediante la acción del freno o actuando sobre la dirección del vehículo mientras que la evasión sea posible. El enfoque para el desarrollo de maniobras evasivas puede centrarse tanto en vehículos [King 07, Chang 08] como en peatones, siendo estos últimos los de mayor riesgo de siniestralidad [Gandhi 07, Chen 08].

Para la implementación del sistema se deben tener en cuenta al menos tres partes fundamentales: la detección del objeto, la toma de decisión y la posterior actuación.

Para la primera fase, la detección del objeto a evitar, es necesario una percepción del entorno que se puede extraer de uno o varios sensores. Típicamente, la detección de objetos inesperados en situaciones de tráfico ha sido llevada a cabo mediante sensores de rango tales como lidar o radar encontrándose numerosas referencias en este sentido [Xu 09] y, fundamentalmente, mediante sistemas de visión. Es este campo donde encontramos una extensa bibliografía [Gavrila 99, Moeslund 06, Gerónimo 09, Enzweiler 09]. La mayoría de estas técnicas buscan estimar la posición y velocidad del objeto a detectar ya sea un peatón, ciclista, vehículo o camión.

Para la segunda fase, la toma de decisiones, es necesario un sistema que interprete esas estimaciones obtenidas en la primera fase y tome una decisión sobre cuando y cómo realizar la maniobra de evasión. [Jansson 02]. La complejidad de esta fase depende de manera directa de la situación específica del tráfico. El amplio conjunto de posibles maniobras a adoptar en función de dichas situaciones del tráfico y las propiedades no lineales del mismo convierten al sistema de

toma de decisión en un problema complejo de resolver.

La tercera y última fase, la actuación, consiste en adaptar las órdenes generadas por la etapa previa y transformarlos en señales que el control de bajo nivel se encarga de enviar a los actuadores.

En la implementación de esta maniobra, la detección del peatón se realizará mediante un sistema de visión [Parra 07, Llorca 09] desarrollado por la Universidad de Alcalá de Henares, que envía al sistema de control tanto la posición como el movimiento del peatón. La decisión está basada en el cálculo del tiempo de colisión (TTC, del inglés Time To Collision) que viene determinado por la separación entre peatón y vehículo dividido por la velocidad a la que circula el vehículo.

Partiendo de la premisa que la evitación de la colisión es posible gracias a una acción sobre la dirección, esto es, que la situación imprevista ha sido detectada con la suficiente antelación para evadir el obstáculo sin la necesidad de realizar una frenada de emergencia, un controlador basado en lógica borrosa llevará a cabo el desplazamiento lateral necesario que asegure la integridad tanto del peatón como de los ocupantes del vehículo; dicho desplazamiento junto con la velocidad del vehículo serán las entradas al controlador borroso diseñado.

5.4.1. Revisión bibliográfica

La maniobra de evasión automatizada fue presentada por primera vez en el campo de los vehículos aéreos no tripulados (UAV, del inglés Unmanned Aerial Vehicles) [Morrel 58], comercializándose para vuelos domésticos desde principios de la década de los noventa [Kuchar 00]. Aunque la navegación aérea autónoma es sensiblemente diferente a la navegación autónoma en el campo de los vehículos inteligentes, algunos aspectos pueden ser utilizados. Conceptos como tiempo de colisión, tiempo de escape, evaluación de riesgo y otros provenientes del campo de los UAVs, son también aplicados a los vehículos autónomos.

El siguiente paso en el campo de la investigación fue realizado en aplicaciones para robótica móvil. En este campo, la maniobra de evasión se basa en modificar la trayectoria del robot móvil en tiempo real de forma suficientemente rápida como para eludir cualquier obstáculo que se encuentre a su paso. Existen numerosos trabajos en el campo de la robótica móvil y una buena revisión sobre las aportaciones más importantes se puede ver en [Kunchev 06].

Con respecto a los vehículos autónomos, la maniobra de evasión basada en la acción sobre el volante se encuadra dentro del control lateral de los vehículos. En este sentido, podemos encontrar cuatro posibles acciones sobre el control de dirección:

Guiado o mantenimiento del carril esta primera maniobra para el control de la dirección busca el mantenimiento del vehículo dentro de un carril. Los primeros trabajos en el guiado de vehículos se remontan a 1977 en Japón [Tsgawa 79]. A finales de los 80 aparecieron

nuevos trabajos en el mismo sentido [Dickmanns 87, Thorpe 90]. Tanto la Universidad Carnegie Mellon a través de su sistema RALPH (NN-based Rapidly Adapting Lateral Position Handler) [Pomerleau 95b] como el programa PATH [Varaiya 93, Hessburg 94, Rajamani 00, Tan 02] han contribuido de manera decisiva al desarrollo de diversos controladores para aplicación al guiado de vehículos autónomos. En Europa, uno de los trabajos de obligada referencia en este campo son los llevados a cabo en el proyecto ARGO liderado por el profesor Alberto Broggi [Broggi 99a, Broggi 99b] donde mediante una cámara de visión y un ordenador embarcado recorrieron las carreteras italianas con el control de dirección completamente automatizado.

Cambio de carril esta maniobra busca encontrar un método que nos permita pasar al carril contiguo al que se ocupa por la derecha o por la izquierda. En [Rajamani 00] se presenta un sistema de control que permite, de forma automática, abandonar o incorporarse a un carril ocupado por vehículos automatizados mediante marcas magnéticas situadas en el centro de los carriles. En [Hatipoglu 03] se presenta un sistema basado en el seguimiento de marcas magnéticas ubicadas sobre las rayas que delimitan los carriles para realizar tanto el guiado como el cambio de carril. Encontramos implementaciones del cambio de carril basadas en lógica borrosa en [Hessburg 95, Naranjo 08]. Por último, un análisis detallado para el cálculo de la trayectoria a seguir durante un cambio de carril se puede encontrar en [Jula 00].

Adelantamiento esta maniobra puede ser dividida en una secuencia de las dos detalladas con anterioridad, esto es, una maniobra de cambio de carril, seguida de una maniobra de mantenimiento del nuevo carril para concluir con un nuevo cambio de carril retornando a la referencia inicial. La trayectoria óptima para realizar esta maniobra de manera correcta se presenta en [Naranjo 08]. Dentro del grupo AUTOPIA, se implementó en el pasado un sistema basado en lógica borrosa para llevar a cabo la maniobra de adelantamiento [Naranjo 05a].

Evitación de colisión la mayoría de las implementaciones de esta maniobra se han hecho en vehículos. La maniobra de cambio de carril ha sido usada como respuesta a una situación de emergencia derivando en los denominados cambio de carril de emergencia (ELC, del inglés Emergency Lane Change) [Shiller 98] o asistente de carril de emergencia (ELA, del inglés Emergency Lane Assist) [Eidehall 07]. Estudios realizados demuestran que la distancia mínima o el TTC a partir del cual un obstáculo no puede ser evitado a partir de una velocidad inicial dada es de un segundo [Shiller 98]. En [Swaroop 99] se presenta una maniobra en la que un vehículo va siguiendo a otro guía y realiza el cambio de carril siguiendo las pautas marcadas por el vehículo guía. El principal objetivo buscado con esta

maniobra es evitar un posible riesgo mediante la aplicación automática de una acción sobre el volante de los vehículos.

5.4.2. Consideraciones previas

Como se ha comentado con anterioridad, el estudio sobre la detección del peatón y la distancia al mismo esta fuera del alcance de esta tesis doctoral. En [Parra 07, Llorca 09] se detalla tanto el sistema instalado en el vehículo prototipo como el método utilizado para llevar a cabo la detección del peatón.

Un PC conectado en red con el ordenador de control embarcado en el vehículo es el encargado de determinar la distancia al peatón que es transmitida al ordenador central mediante la conexión cableada Ethernet.

Teniendo en cuenta la fusión de ambos sistemas y la complejidad y riesgo de la maniobra, se fijaron unas especificaciones previas para acotar la aplicación real. Estas consideraciones preliminares son:

1. El vehículo autónomo se encuentra circulando en un tramo recto de carretera y en el carril derecho de la misma.
2. El peatón detectado se encuentra en el mismo carril por el que circula el vehículo.
3. El carril izquierdo se encuentra despejado de tráfico o cualquier otro tipo de obstáculo.
4. Tanto el carril derecho como el izquierdo son lo suficientemente largos para permitir la realización de la maniobra.
5. La velocidad de circulación sera constante durante toda la maniobra para apreciar el comportamiento del sistema automático de evasión, esto es, no se permite modificar la velocidad del vehículo para no influir en el desarrollo de la maniobra implementada.

5.4.3. Sistema de evasión

Para llevar a cabo una maniobra que garantice la seguridad de los peatones y la de los ocupantes del vehículo, la trayectoria realizada debe ser muy suave para evitar un excesivo desplazamiento lateral del vehículo que pudiera causar la salida de la carretera y el consiguiente accidente.

El sistema de control parte de la detección de la distancia al peatón mediante el sistema de visión y, por tanto, del TTC. Esta variable se usará como señal de disparo de nuestro sistema de evitación de peatones y su valor será fijado en 2,5 segundos.

Una vez fijado la señal de disparo de nuestro sistema de evasión, pasamos a detallar las dos variables usadas en el controlador borroso diseñado para llevar a cabo la maniobra.

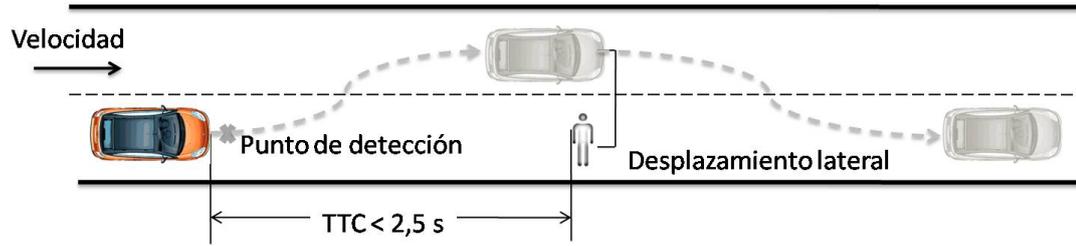


Figura 5.27: Representación gráfica de las variables de entrada al controlador borroso para la maniobra de evasión.

Velocidad (V) a la que circula el vehículo equipado con el sistema de visión. La función de esta variable es condicionar la actuación sobre el volante, esto es, a mayor velocidad menor acción sobre la dirección ya que un movimiento brusco a velocidades elevadas podría provocar la salida de la vía.

Desplazamiento lateral (Dlateral) necesario para evitar la colisión. Su función será marcar una nueva línea de referencia a la que el vehículo debe llegar. En la Fig. 5.27 se muestra una representación gráfica de las variables involucradas para la realización de la maniobra.

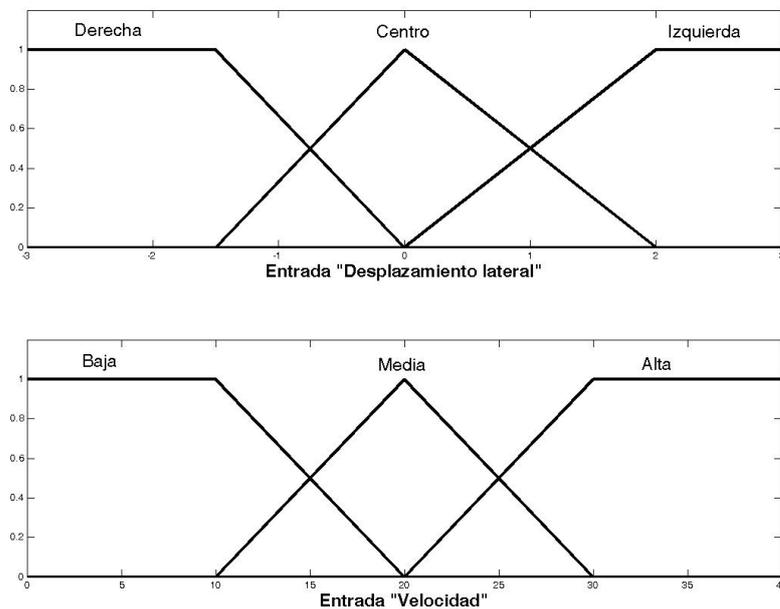


Figura 5.28: Funciones de pertenencia de las variables de entrada al controlador borroso para evasión de peatones.

En la realización de esta maniobra, se abandona el carril de referencia para pasar al carril contiguo. Teniendo esto en cuenta, se desplazó la línea de referencia a seguir una distancia igual

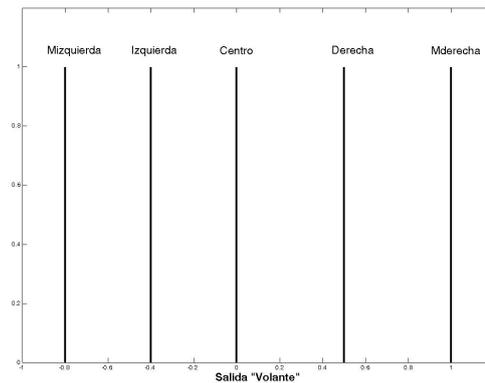


Figura 5.29: Funciones de pertenencia de la variable de salida del controlador borroso para evasión de peatones definidas como singletons de Sugeno.

a la anchura del carril. El planteamiento para esta maniobra es trazar un triángulo virtual cuyos vértices son la posición del vehículo en el instante de disparo de la maniobra de evasión -dada por un $TTC < 2,5s$ -, la posición del peatón y la futura posición de seguridad del vehículo en el carril contiguo al que se encuentra el peatón.

Para la maniobra de mantenimiento de carril o cambio del mismo, las variables de entrada usadas son en el error lateral y angular del vehículo respecto a la línea de referencia [Naranjo 05a]. En este caso, el error angular tiene una importancia mínima en la realización de la maniobra y cobra mayor importancia la velocidad del vehículo para obtener un movimiento suave de cambio de dirección.

En la Fig. 5.28 se muestran las funciones de pertenencia de las variables de entrada para el sistema de control. La variable 'Desplazamiento lateral' contiene tres funciones de pertenencia asociadas a tres variables lingüísticas. Las etiquetas 'Derecha' e 'Izquierda' marcan la máxima desviación del vehículo respecto a la referencia actual, a la izquierda -realización de la maniobra de evasión- o a la derecha de la actual -realización de la maniobra de retorno al carril de referencia. La etiqueta 'Centro' marca en el carril de referencia la posición del vehículo. Debemos hacer notar que las funciones de pertenencia borrosas definidas son asimétricas. La razón es debida a que hemos supuesto previamente que el vehículo se encuentra circulando por el carril derecho y el peatón se encuentra en el mismo carril. Con esta premisa, el primer movimiento del volante debe ser lo más fuerte posible, dentro de unos márgenes de seguridad y confort, para evadir rápidamente una posible colisión con el peatón. Consideramos una distancia de seguridad en el desplazamiento lateral superior a los 2 metros. En cuanto al retorno al carril de referencia, se realiza de manera más suave ya que esta maniobra sólo se llevará a cabo si no hay tráfico en sentido contrario con lo que se puede suavizar la maniobra de regreso buscando un mayor confort.

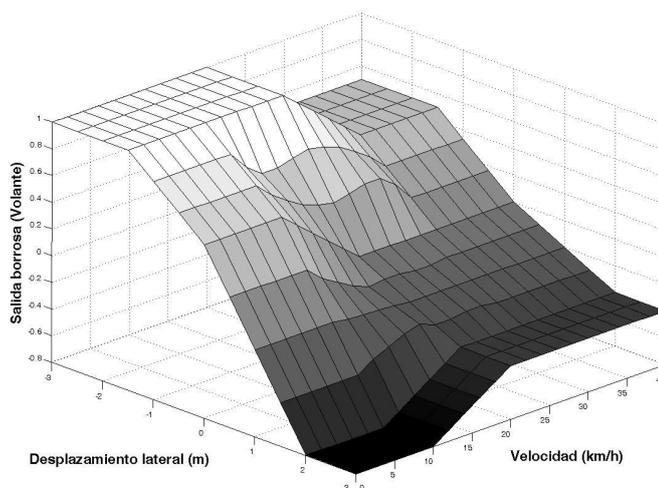


Figura 5.30: Superficie de control del controlador de dirección borroso diseñado para la maniobra de evasión de peatones.

Dlateral / V	Baja	Media	Alta
Derecha	Mderecha	Mderecha	Derecha
Centro	Derecha	Centro	Centro
Izquierda	Mizquierda	Izquierda	Izquierda

Tabla 5.4: Reglas borrosas para la maniobra de evasión.

La segunda variable de entrada al controlador borroso es la velocidad del vehículo. Esta variable, al igual que la anterior, cuenta con tres funciones de pertenencia con tres etiquetas lingüísticas para distinguir entre tres posibles niveles de velocidad del vehículo. Así, cada una de las etiquetas sirve para marcar un nivel de velocidad que habilita la velocidad de giro del volante. En este caso, las funciones de pertenencia borrosas son totalmente simétricas.

En la Fig. 5.29 se muestra la salida del controlador borroso diseñado, esto es, la acción sobre la dirección del vehículo. Se puede observar como se ha dividido en cinco singletons la salida del controlador con valores máximos de -1 y 1 para un movimiento de la dirección a la izquierda o a la derecha respectivamente. Con esta definición de la salida, se permite la máxima velocidad de giro del volante en el tramo de evasión y se limita este movimiento al 80 % en el tramo de retorno al carril de referencia. La base de reglas se muestra en la Tabla 5.4.

La Fig. 5.30 muestra la superficie de control para la variable de salida 'Volante' en función de las variables de entrada 'Desplazamiento Lateral' y 'Velocidad' de acuerdo a las reglas mostradas en la Tabla 5.4. La suavidad en la variación a lo largo de la superficie sugiere que las reglas diseñadas no presentan saltos bruscos y son convenientes para el control.

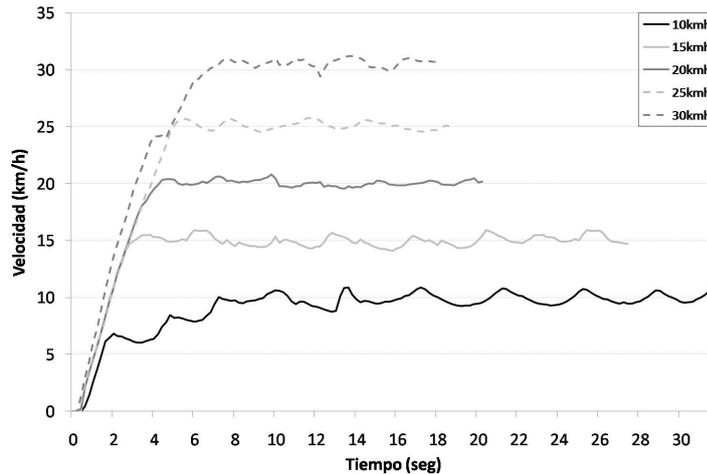


Figura 5.31: Velocidad del vehículo durante cada uno de los experimentos de la maniobra de evasión.

5.4.4. Fase de experimentación

Para validar el controlador presentado, se realizaron diversos experimentos de evasión a diferentes velocidades -10, 15, 20, 25 y 30 km/h. Para evitar cualquier tipo de influencia por parte de un conductor humano, se fijó una referencia de velocidad automática. En la Fig. 5.31 se muestran las velocidades durante cada uno de las pruebas. En ellas, se ve la aceleración del vehículo hasta alcanzar la velocidad de referencia que mantiene con un error inferior ± 1 km/h. a en todos los casos.

Para la realización de la maniobra, la zona seleccionada fue la recta más larga (algo menos de 200 m) de la intersección de las pistas del IAI-CSIC. El vehículo circula en todos los casos por el carril derecho -de 3 metros de ancho- dejando el carril izquierdo para evitar el obstáculo.

En la Fig. 5.32 se muestra el comportamiento del control de dirección para cada una de las velocidades fijadas. La parte superior de la figura muestra la maniobra de evasión a la velocidad más baja probada -10km/h- que presenta la mayor dificultad desde el punto de vista del control ya que las limitaciones físicas para girar el volante dificultan una rápida reacción en una distancia tan corta. Sin embargo, como se aprecia en la gráfica, el sistema diseñado es capaz de evitar la colisión con la suficiente seguridad. El resto de gráficas muestran la realización de la maniobra a velocidades mayores donde la acción sobre la dirección se va suavizando a medida que la velocidad aumenta. En la Fig. 5.33 se puede ver con detalle las distintas maniobras realizadas a las diferentes velocidades y como el movimiento del volante es más suave a medida que la velocidad del vehículo se incrementa.

De los experimentos, se pueden extraer dos conclusiones principales. En primer lugar, se ha logrado desarrollar un sistema capaz de evitar atropellos a peatones con la suficiente seguridad gracias a la acción automática sobre la dirección del vehículo. En segundo lugar, se han evitado

movimientos bruscos de la dirección durante la maniobra de evasión que pudieran provocar la salida del vehículo de la vía, incrementando aún más la suavidad en la maniobra en el retorno al carril de referencia.

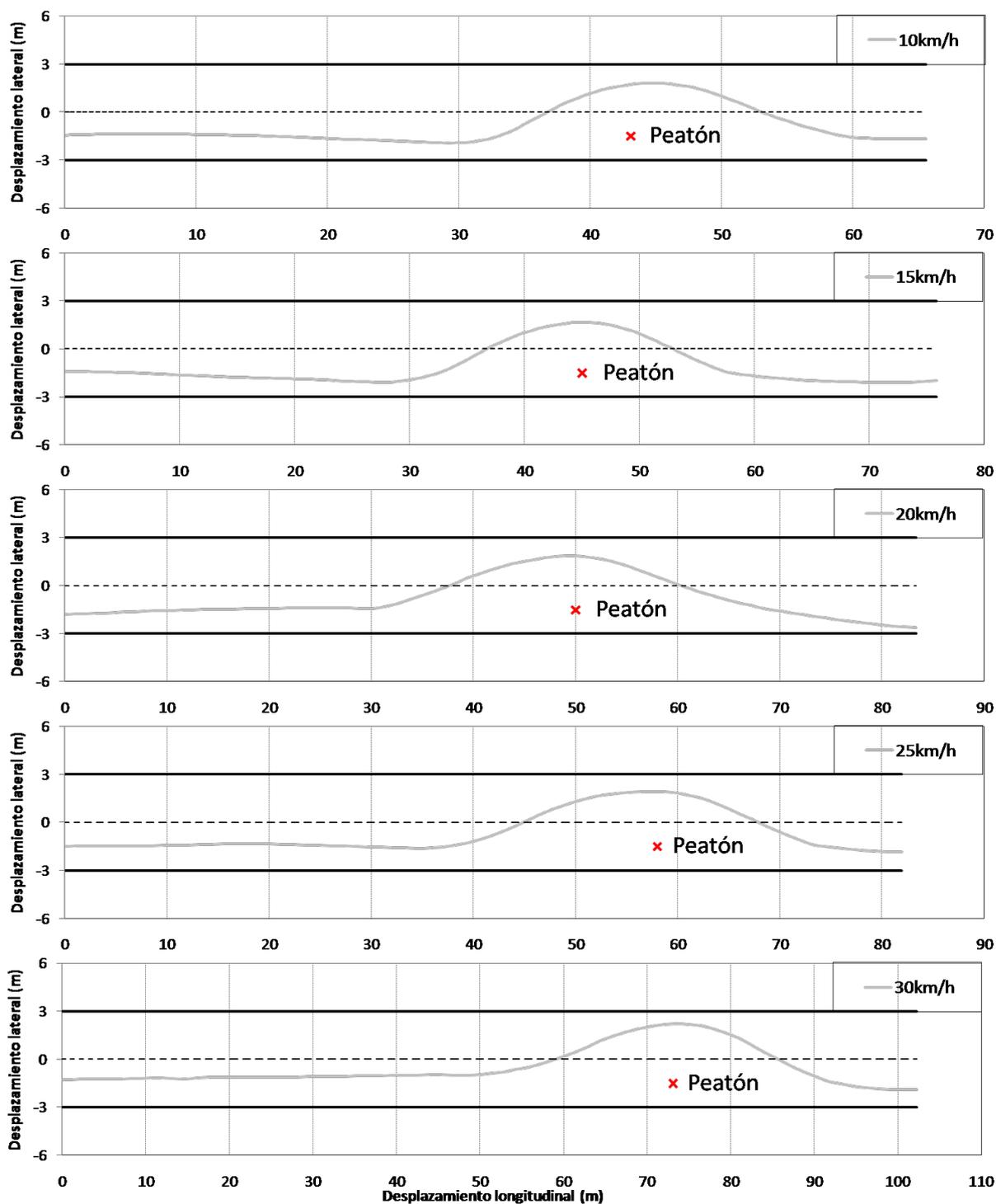


Figura 5.32: Resultados de la maniobra automática de evasión a diferentes velocidades.

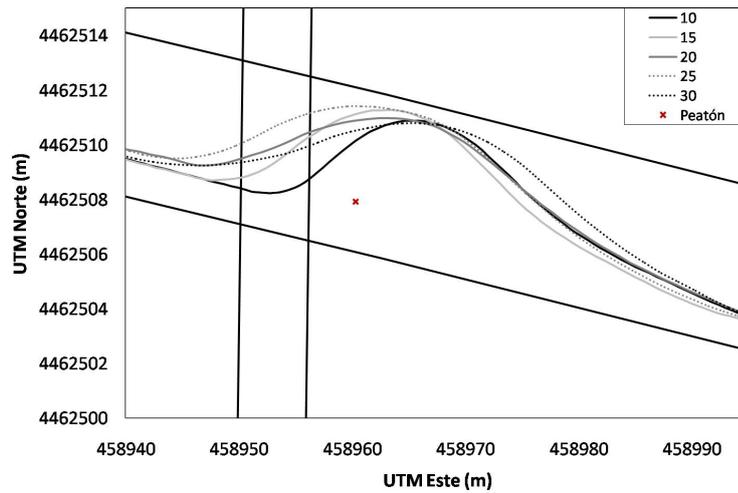


Figura 5.33: Trayectorias de todas las maniobras de evasión a distintas velocidades en coordenadas UTM.

En la Fig. 5.34 se muestra la evolución de los valores de tiempo de colisión y distancia longitudinal en el momento del comienzo de la maniobra de evasión así como el desplazamiento lateral en el momento de alcanzar al peatón. En todos los casos, la distancia es suficiente para garantizar la seguridad del peatón.

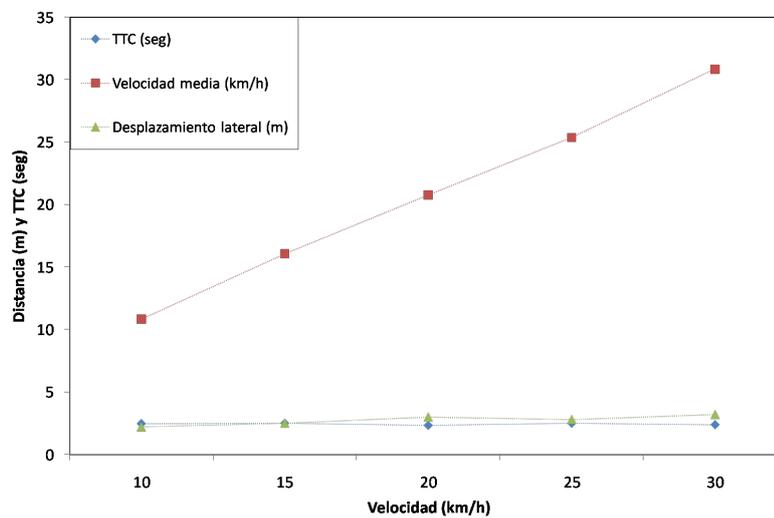


Figura 5.34: Valor medio del TTC, distancia longitudinal (m) y distancia lateral coche-peatón al inicio de la maniobra automática de evasión.

Por último, se muestra un resumen (Tabla 5.5) de los resultados obtenidos con el sistema autónomo a diferentes velocidades donde se puede observar el buen comportamiento del sistema diseñado.

TTC (sec)	Velocidad media (km/h)	Desplazamiento lateral (m)
2.46	10.84	2.2
2.49	16.07	2.5
2.33	20.78	3
2.49	25.38	2.8
2.38	30.85	3.2

Tabla 5.5: Resumen del tiempo de colisión, velocidad media y desplazamiento lateral para los experimentos realizados en la maniobra de evasión.

5.5. Información desde la infraestructura

En esta maniobra incluida en nuestra arquitectura de control, se presenta la incorporación de señales recibidas desde la infraestructura para gestionar el control de velocidad del vehículo. La inclusión de señales provenientes de la infraestructura es una posible solución a una de las mayores causas de accidentes en circulación tanto urbana como en carretera: el exceso de velocidad por parte de los conductores. El sistema desarrollado se basa en una sencilla red de comunicación de datos de sensores de bajo coste que a su vez establece comunicación con la unidad central de control.

El sistema aquí expuesto combina la información sensorial proveniente de la infraestructura -sensores Zigbee- con la comunicación de esta información a los vehículos para, en función de las condiciones, adecuar la velocidad. El sistema ha sido probado en el circuito de pruebas del IAI-CSIC mediante el vehículo prototipo experimental con la instrumentación necesaria para llevar a cabo el control longitudinal del vehículo -pedales de acelerador y freno- de forma automática. Se han realizado tres experimentos de circulación real: una adecuación de velocidad ante una curva peligrosa, un control automático de un paso de peatones y un cruce de vehículos que muestran el buen comportamiento del sistema diseñado.

5.5.1. Revisión bibliográfica

En los últimos años el desarrollo de los sistemas ADAS ha provocado un significativo descenso en el número de accidentes en zonas urbanas. A pesar de lograr el objetivo impulsado por la Unión Europea en 2001 [ECT 09] de reducir hasta un 50 % el número de fallecidos en accidentes de tráfico, el informe presentado por la Dirección General de Tráfico en el mes de septiembre, demuestra que casi el 75 % de los accidentes de tráfico se producen en circulación urbana o carreteras secundarias [DGT 09b]. El principal motivo aludido por las autoridades es el exceso de velocidad y la distracción al volante que unidas provocan el mayor número de accidentes.

Los sistemas desarrollados por los fabricantes de automóviles en los últimos años pretenden fundamentalmente facilitar la labor al conductor en circulación a altas velocidades. Entre ellos, podemos destacar el control de crucero [Ioannou 93], en el que el conductor puede fijar la veloci-

dad de circulación del vehículo centrando su conducción en el manejo del volante, y su extensión en el control de cruceo adaptativo [Pananurak 09] donde el vehículo es capaz de adecuar su velocidad a la del vehículo precedente a velocidades superiores a los 30km/h. La última evolución es el control de cruceo inteligente [Echegaray 08] (ICC, del inglés Intelligent Cruise Control) que funciona para velocidades superiores a los 10 km/h.

En la misma línea, han surgido diversos sistemas que avisan al conductor de situaciones de inminente peligro ya sea mediante señales visuales, sonoras o hápticas. Cabe citar los sistemas de aviso de salida del carril que alertan sobre un posible abandono del carril actual [Cerone 07] o los sistemas de detección de ángulo muerto [Collado 04] que avisan sobre un posible riesgo en el caso de realizar un cambio de carril. Estos sistemas, presentan el inconveniente de la dependencia del factor humano, esto es, en su capacidad de respuesta al estímulo en función de diversas variables como la edad del conductor o su fatiga [Dragone 09].

La investigación orientada en esta dirección está fundamentada en que, en algún momento, deberán coexistir vehículos guiados por conductores humanos y vehículos automatizados; debiendo por tanto existir algún sistema de comunicación que envíe la información más relevante ya sea directamente a los vehículos o a un centro de control situado en la infraestructura.

Los principales inconvenientes de los sistemas hasta ahora presentados se deben a la inclusión de un sistema de comunicaciones más un sistema de posicionamiento para poder transmitir la ubicación del vehículo guiado por un conductor humano. Así por ejemplo, sistemas como los de aviso de llegada a curva (CWS, del inglés Curve Warning System) o de control inteligente de la velocidad (ISA, del inglés Intelligent Speed Assistance) requieren la inclusión de un sistema de posicionamiento y un mapa para determinar la trayectoria futura. A pesar de ser una intrusión mínima, requiere de la instalación de ciertos sistemas en el vehículo y la perfecta actualización de los mapas del navegador. Por otra parte, sólo un mapa generado dinámicamente podría advertir de situaciones temporales como accidentes, carreteras obstruidas, etc.

El enfoque aquí presentado se centra en el objetivo de conocer los parámetros necesarios para que el vehículo automático tome sus decisiones sin necesidad de realizar ninguna modificación al vehículo manual. Para ello, se va a utilizar un sistema de comunicación y sensores Zigbee instalados en la infraestructura. Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema aquí presentado se han realizado tres experimentos. Los dos primeros consisten en adecuar la velocidad del vehículo según las condiciones del entorno (una curva peligrosa o un paso de peatones) y el segundo de ellos consiste en el paso de una intersección en el que, mediante dos sensores colocados en la infraestructura, podemos saber si hay algún vehículo en la zona de riesgo de colisión, tomando así las acciones oportunas para evitar un posible accidente.

5.5.2. Sensores Zigbee

A la hora de elegir un sistema de comunicaciones nos hemos decantado por la tecnología Zigbee por su gran alcance, por su capacidad de transmitir información de sensores y por la información relevante que nos permite obtener de la infraestructura (estado de la carretera, flujo de vehículos, visibilidad, etc.).

ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbricas diseñado por la ZigBee Alliance. Está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (Wireless Personal Area Network, WPAN) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y una larga vida útil de sus baterías.

Zigbee Alliance es un consorcio iniciado por Philips, Honeywell, Invensys y seguido por Motorola, Mitsubishi y hasta 25 empresas para crear un sistema estándar de comunicaciones inalámbrico y bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos de domótica, automatización de edificios, control industrial, periféricos de PC y sensores médicos. Los miembros de esta alianza justifican el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo del Bluetooth. Puede transmitir con un simple protocolo de 20kB/s hasta 250Kbps trabajando a una frecuencia de 2,4GHz, bajo consumo y rangos entre 10 y 300 metros, aunque las condiciones físicas ambientales son las que determinan las distancias de trabajo.

IEEE 802.15.4 es un simple protocolo de paquetes de datos para redes inalámbricas ligeras. ZigBee, se conoce con otros nombres como "HomeRF Lite", y también puede usar las bandas libres ISM de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU). Una red ZigBee puede estar formada por hasta 255 nodos, los cuales tienen dormido el "transceiver" ZigBee la mayor parte del tiempo, para mantener un bajo consumo [C.Liu 08].

Se definen tres tipos de dispositivos que pueden actuar en una red Zigbee.

Coordinador que puede ser o bien el director de una red en árbol o servir como enlace con otras redes. Cada red sólo puede tener un coordinador y es el elemento de más alto nivel.

Router puede servir bien para transmitir información al coordinador o como interconexión entre dispositivos separados en la red.

Terminador su misión es enviar la información que contienen sus sensores bien a un router o directamente a un coordinador. Estos dispositivos pueden ser activados o desactivados de manera inalámbrica, prolongando así su vida útil.



Figura 5.35: Tamaño de los sensores utilizados en la infraestructura.

Nombre	Tamaño	Alcance en exteriores	Consumo inactivo
Imote2	36×48×9mm	30 m	390 uA
IRIS	58×32×7mm	250 m	8 uA
MicaZ	58×32×7mm	90 m	15 uA
TelosB	65×31×6mm	90 m	5 uA
WeBee 3	31×14×3mm	30 m	0,5 uA
KMote	40×22×8mm	150 m	7 uA
SunSPOT	64×38×25mm	100 m	36 uA

Tabla 5.6: Características de dispositivos Zigbee comerciales

En la Tabla 5.6 se muestran algunos de los modelos que se pueden encontrar en el mercado. El modelo empleado para nuestra aplicación será el IRIS de Crossbow debido fundamentalmente a su gran alcance que lo convierten en el dispositivo idóneo para aplicaciones en exteriores. Así pues, los dispositivos seleccionados de esta serie son: estación base/Gateway modelo BU2110BA como controlador del sistema, tarjeta de radio modelo XM2110CA como router y la tarjeta de sensores MTS310CB para la captación de las señales del exterior. Esta tarjeta está montada sobre el router como se muestra en la Fig. 5.35. En la imagen se puede apreciar la comparación de tamaños de la estación base con la tarjeta de sensores montada sobre la tarjeta de radio con respecto a un móvil convencional.

5.5.3. Sistema implementado

Una vez seleccionado el modelo más apropiado para la aplicación que queremos desarrollar, vamos a pasar a detallar su inclusión en la arquitectura de control. El sistema esta basado en una

comunicación entre los sensores ubicados en la infraestructura y la unidad central de control que mandará la información sensorial recibida del entorno al vehículo y, en función de las condiciones del tráfico, éste tomará las decisiones de control oportunas con la información obtenida tanto de los sensores embarcados en el vehículo como de los colocados en la infraestructura.

En la Fig. 5.36 se muestra un ejemplo del objetivo buscado con la inclusión de este tipo de sistemas de comunicación en la infraestructura. En la gráfica se observa al vehículo automático en cuatro posiciones distintas ante un caso habitual en circulación en carretera: una curva peligrosa. Suponemos que el vehículo va circulando a una velocidad prefijada por el sistema de control. En la gráfica, se observa cómo en la posición 1, el vehículo se encuentra alejado de la zona de riesgo y no capta ninguna señal sensorial en su zona de cobertura. Posteriormente, en la posición 2, vemos que el vehículo capta la señal del segundo sensor. En ese instante, el vehículo es informado sobre una situación peligrosa y que debe reducir significativamente su velocidad. En la posición 3, el vehículo ha sobrepasado la zona de riesgo y detecta una nueva señal que le advierte de que efectivamente la zona de posible accidente ha finalizado, retomando por tanto la velocidad de referencia que llevaba el vehículo en la posición 1. Finalmente, en la posición 4, el vehículo no detecta ninguna señal y prosigue su marcha a la velocidad de cruce.

Con este sistema de funcionamiento, podríamos mejorar no sólo la seguridad en curvas peligrosas sino en cualquier circunstancia de tráfico como pueden ser intersecciones, pasos de peatones, rotondas, etc.

La información recibida desde la infraestructura, vendrá dada por una tarjeta de sensores modelo MTS310CB de Crossbow que está equipada con sensores de luz, temperatura, acústico, sonoro, acelerómetro de dos ejes y magnetómetro de dos ejes. Se realizaron pruebas experimentales para comprobar el funcionamiento de cada uno de los sensores. Teniendo en cuenta el ciclo de control del vehículo automático [Milanés 08b] que viene marcado por el receptor GPS y que está fijado en 5 Hz, se consideró como principal objetivo obtener la máxima actualización posible de las señales de los sensores para tomar acciones de control en función de las mismas. Con esta premisa, se realizaron pruebas con todos los sensores en funcionamiento obteniendo una velocidad máxima de refresco de un segundo. Este valor, teniendo en cuenta las velocidades de un vehículo en circulación urbana, se considero inadmisibles. Distintas pruebas experimentales determinaron que el uso de un único sensor -el sensor de luz- permitía una mayor frecuencia de trabajo y el refresco era similar al ciclo de ejecución del programa de control. Por tanto, se sacrificó la cantidad de información sensorial por una mayor velocidad de respuesta.

De esta forma, si el vehículo entra en la zona de cobertura de algún sensor, recibe esta información por parte de la unidad central de control. Si no se recibe ninguna señal de la infraestructura, el vehículo continúa con la velocidad prefijada por el programa de control y que había sido cargada a la vez con la cartografía digital a seguir. Si recibe alguna señal exterior, toma las acciones oportunas para incrementar o decrementar la velocidad con la intención de

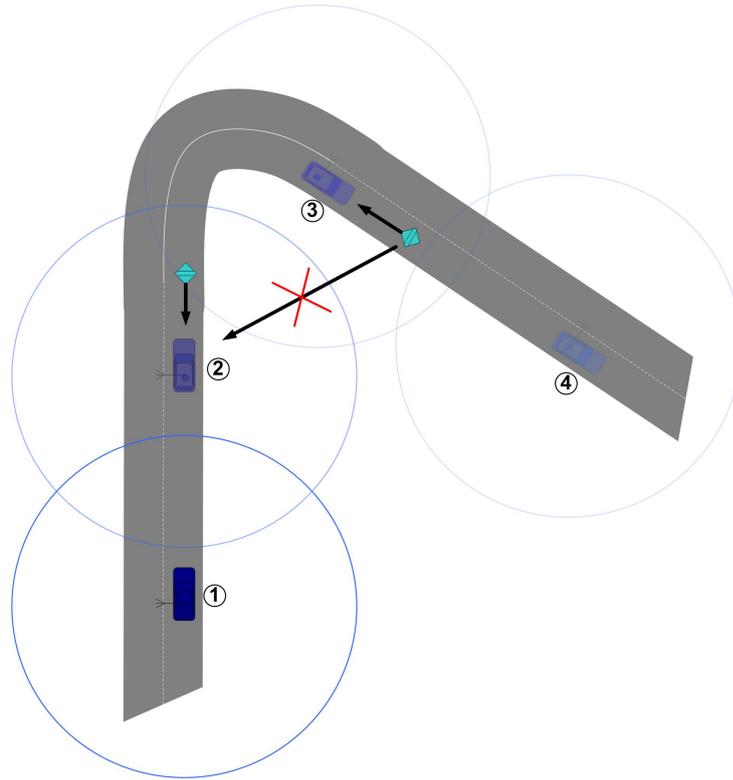


Figura 5.36: Recepción de la información sensorial colocada en la infraestructura.

aumentar la seguridad y eficacia del tráfico.

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación empleado, se realizaron diversas pruebas en un entorno real para comprobar la cobertura y el comienzo de la comunicación entre la estación base Zigbee ubicada en la unidad local de control y los sensores instalados en la infraestructura.

5.5.4. Experimentación

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, se han realizado tres experimentos en circunstancias reales de tráfico. El primero de ellos consiste en la llegada a una curva peligrosa no señalizada y que el conductor no es capaz de prever. Mediante dos sensores ubicados en la infraestructura, la estación base recibe la información de la entrada y salida del vehículo de la curva adaptando su velocidad a las necesidades de la carretera. El segundo experimento es una aplicación práctica para entornos urbanos que es causa de un gran número de accidentes: un paso de peatones. El sistema diseñado consiste en un pulsador cuya activación interviene directamente sobre el sistema de frenos del vehículo deteniendo su marcha. Pasados unos segundos y si el sistema no ha vuelto a activarse, el vehículo prosigue su camino. Finalmente, presentamos un experimento donde se muestra la interacción con otros vehículos no automatizados: una intersección. En este caso, se define un área de seguridad antes y después del cruce y se han

colocado dos sensores en dichos puntos. Si existe un vehículo entrando o circulando por dicha zona, el vehículo automático se detiene antes de la intersección. La marcha se reanuda cuando nos aseguramos que no existe ningún vehículo en la intersección.

5.5.4.1. Primer experimento: Curva peligrosa

Para este primer experimento hemos fijado una velocidad automática de circulación de 20km/h. En la Fig. 5.37 se muestra en el sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (en inglés Universal Transverse Mercator, UTM) la posición del vehículo en la carretera de circulación y la ubicación de los sensores Zigbee con una aspa. En la parte superior de la Fig. 5.38 se muestra la velocidad de referencia del vehículo -marca en negro- y la velocidad real de circulación que lleva el vehículo a lo largo del experimento -marca gris. En la parte central, se muestra el valor de la salida de cada uno de los sensores Zigbee. En dicha gráfica se puede apreciar como el primero -marca en negro-, situado inicialmente a 80m del vehículo manda su información al vehículo desde el principio de la maniobra. El segundo sensor situado a la salida de la curva -marca gris- no es recibido hasta una distancia sensiblemente más cercana. La tardía detección no afecta al sistema de control que lo detecta con la suficiente antelación. En la gráfica inferior se muestra la salida normalizada del control longitudinal -acelerador y freno- del vehículo automático.

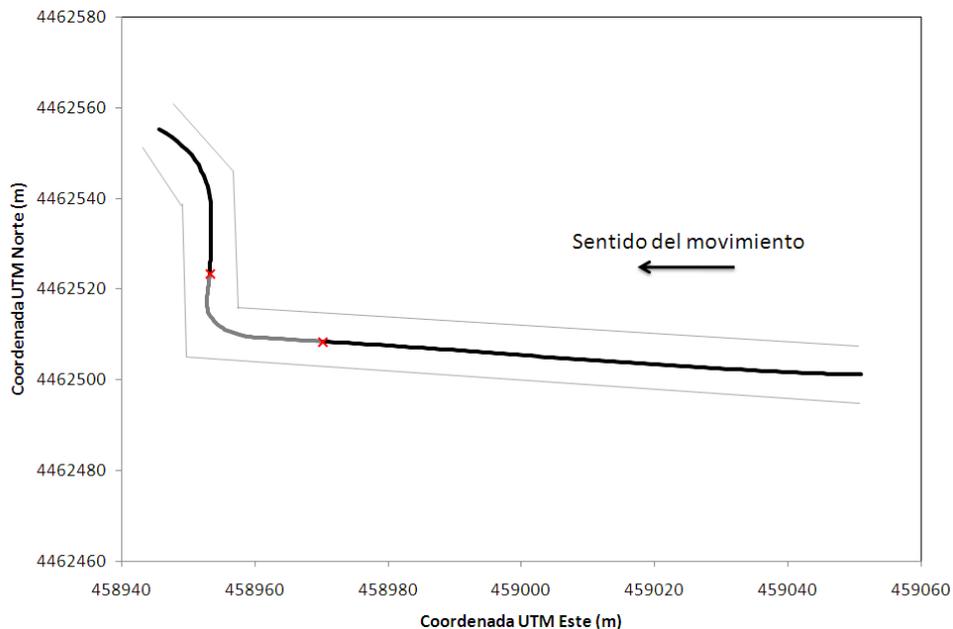


Figura 5.37: Representación en coordenadas UTM de la maniobra de curva peligrosa. Las aspas marcan las posiciones de los sensores Zigbee y el color gris el tramo considerado de riesgo.

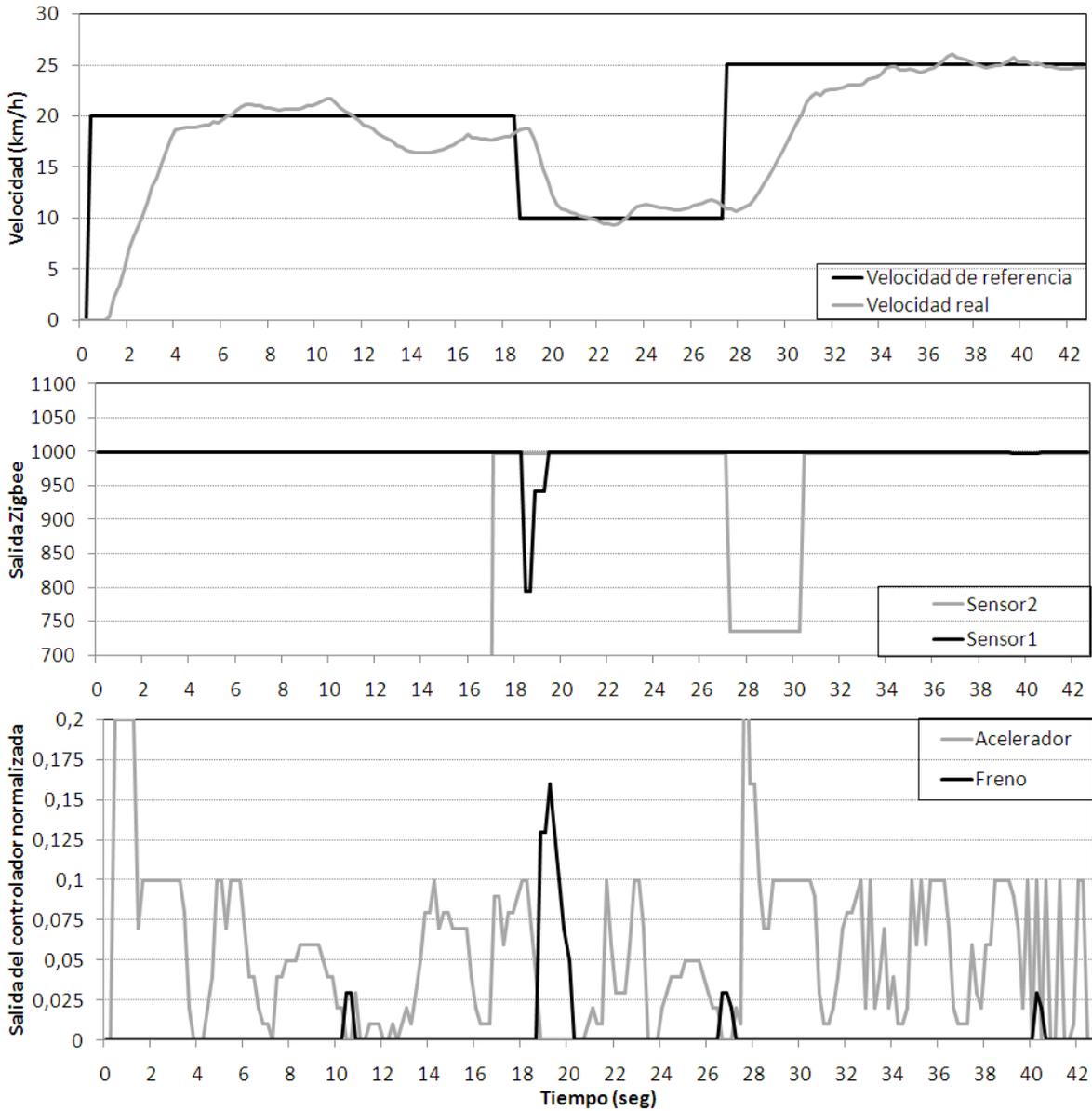


Figura 5.38: Velocidad de referencia y real del vehículo, salida de los sensores de luz Zigbee, Salida normalizada del controlador longitudinal.

En la parte superior de la Fig. 5.38 se aprecia como el vehículo comienza el experimento detenido. Una vez inicia la marcha, alcanza la velocidad de referencia fijada por el sistema de control y la mantiene hasta alcanzar el primer sensor. En la gráfica central vemos como algo después del segundo 18 el vehículo pasa por encima del primer sensor de luz recibiendo el programa de control una variación brusca de su valor de salida que es considerada como que el vehículo se encuentra en ese punto. Vemos como, una vez detectada esa incidencia, la velocidad de referencia es bajada hasta los 10km/h durante el tramo que dura la curva -como se puede ver marcado en gris en la Fig. 5.37. Una vez pasada la zona de riesgo, sobre el segundo 27 se

recibe la información del segundo sensor de indicación de fin de riesgo. De forma automática, la velocidad de referencia es modificada hasta los 25km/h y se produce una fuerte aceleración que se ve reflejada en la salida del controlador borroso que se muestra en la parte inferior de la Fig. 5.38.

5.5.4.2. Segundo experimento: Paso de peatones

En este caso el vehículo circula a una velocidad inicial de 30 km/h que posteriormente aumenta hasta los 35 km/h (gráfica superior de la Fig. 5.40). En ese instante se detecta que hay un peatón en el paso de peatones cercano. Esta detección, se realiza mediante un pulsador ubicado en el paso de peatones y cuya activación se ve reflejada en la gráfica central de la Fig. 5.40. El sensor Zigbee se activa y manda una señal que modifica la velocidad de consigna hasta los 0 km/h para que pare en la posición predeterminada para ese sensor. Se estima un tiempo de 10 segundos para el paso del peatón desde que el valor del sensor retorna al valor inicial. Si no se vuelve a modificar el valor del sensor Zigbee el vehículo retoma la velocidad de referencia a una velocidad algo inferior a la que llevaba de referencia para mayor seguridad. La parte inferior de la gráfica muestra la salida normalizada del controlador borroso. En la Fig. 5.39 tenemos las coordenadas UTM de la maniobra con la ubicación del paso de peatones y con las aspás las posiciones a intervalos regulares mientras el coche se detiene completamente.

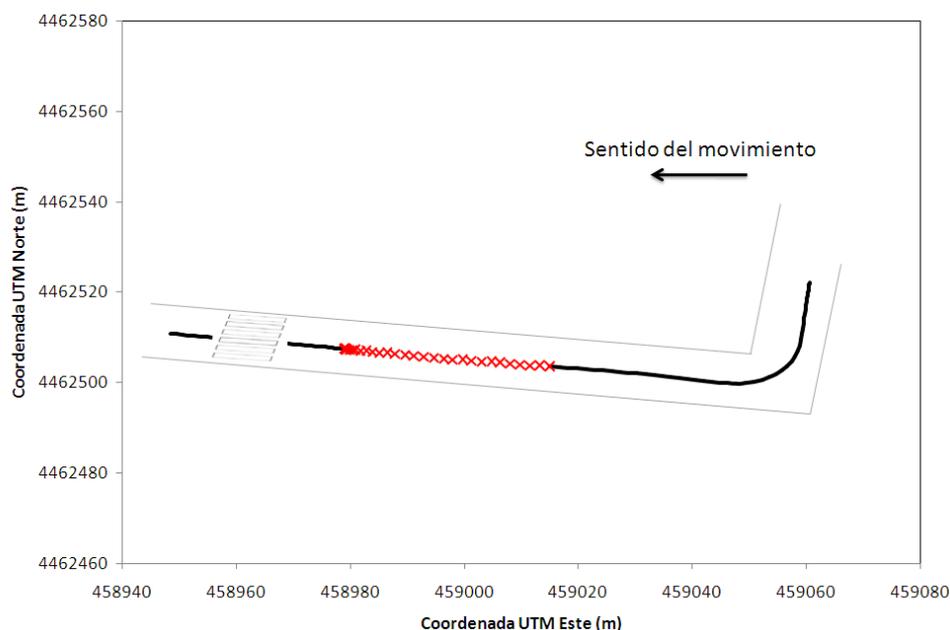


Figura 5.39: Maniobra del paso de peatones en coordenadas UTM. Las aspás indican el momento en el que detecta que un peatón está pasando y hace disminuir su velocidad hasta detenerse.

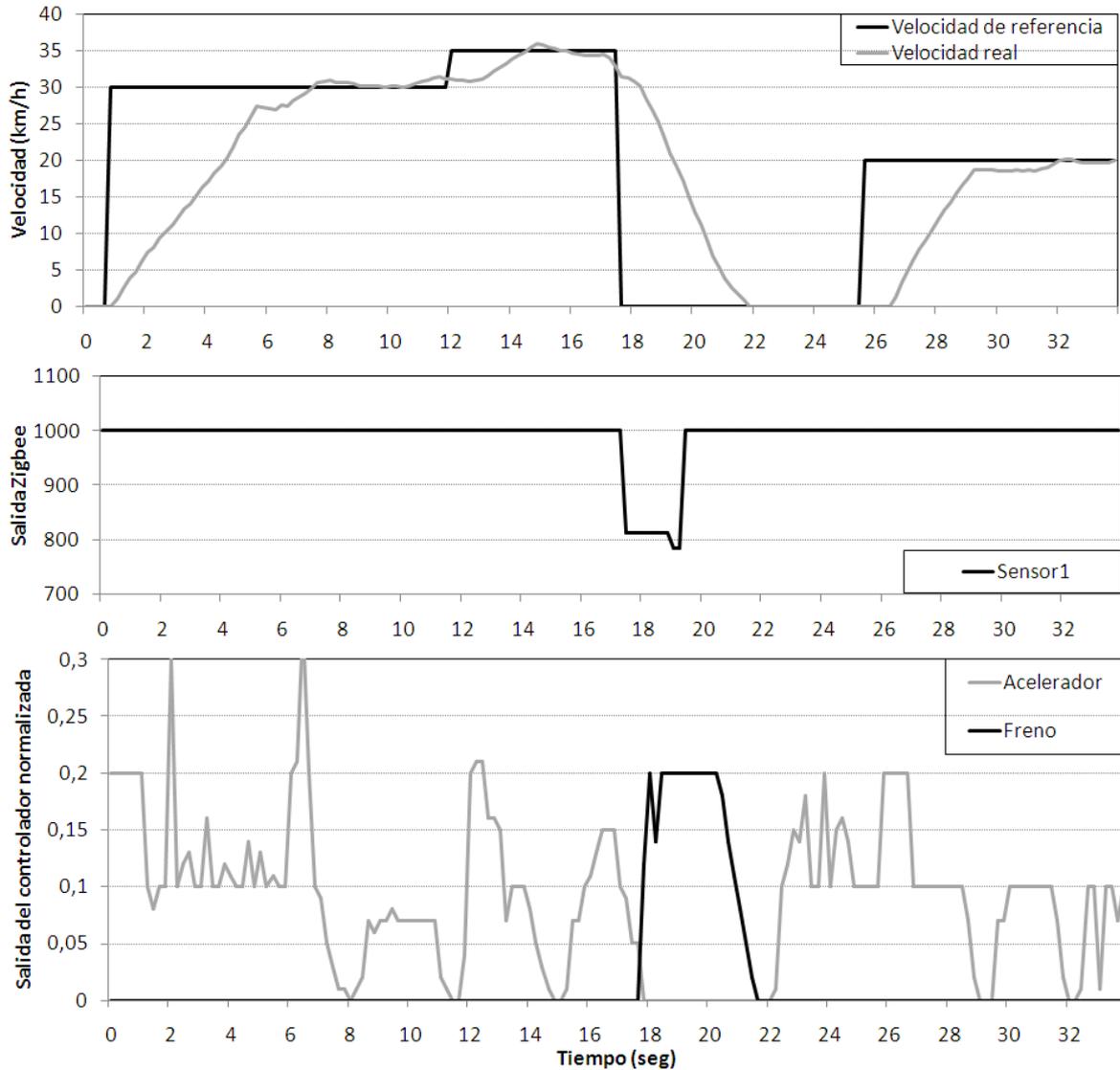


Figura 5.40: Velocidad real y de referencia, salida del sensor zigbee ubicado en el paso de peatones y salida del controlador longitudinal para un paso de peatones.

5.5.4.3. Tercer experimento: Intersección de vehículos

Este experimento, trata de evitar la colisión con un vehículo que se aproxima a una intersección con prioridad de paso. A diferencia del sistema presentado en el punto 6.3, en esta ocasión el vehículo conducido manualmente no se encuentra equipado con ningún sensor ni sistema de comunicaciones del que recibir información. Mediante el uso de sensores en la infraestructura, podemos definir un área de seguridad en la que el vehículo automático se debe detener si existe algún coche dentro de la misma. De esta forma, la unidad central de control recibe la información desde la infraestructura y avisa al vehículo automático de la ocupación de esta zona, disminuyendo éste la velocidad hasta recibir la información del sensor ubicado en la salida del cruce que

determina que no hay ningún vehículo ocupando la intersección.

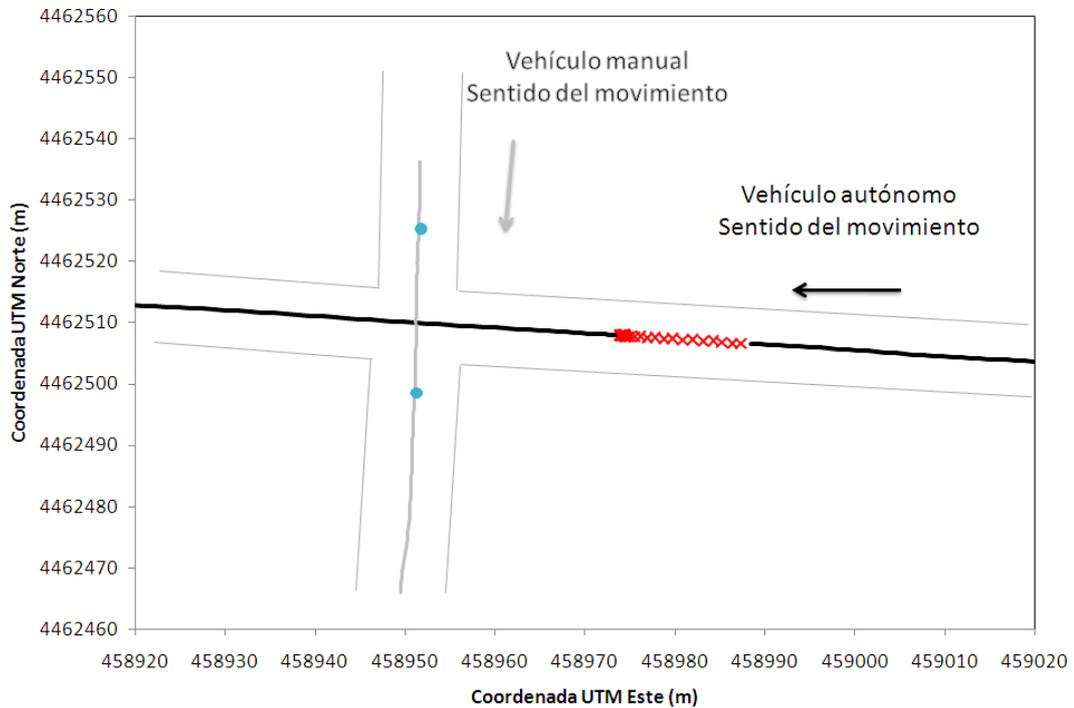


Figura 5.41: Coordenadas UTM del movimiento de ambos vehículos en la aproximación a la intersección. Las marcas azules indican la ubicación de los sensores Zigbee y las aspas rojas el tiempo en el que el vehículo manual se encuentra entre ellas y por tanto el vehículo automático disminuye su velocidad.

En este caso hemos colocado los sensores Zigbee antes y después de la intersección. Inicialmente no se recibe información de ninguno de ellos debido a la lejanía del coche automático (parte inicial de la gráfica central de la Fig. 5.42, vemos como la información del sensor1 comienza a ser recibida en el segundo 5 y la del sensor2 alrededor del 12). Una vez empieza a recibir la información, un vehículo activa el primer sensor alrededor del seg. 14. El coche automático recibe la señal interpretándola como un coche que viene por su derecha y comienza a frenar hasta detener el vehículo antes de la intersección. Una vez recibida la señal del segundo sensor, retoma la marcha a una velocidad más elevada (5.41) a la que llevaba previamente para asegurar que, mientras él se encuentre en la intersección, ningún otro vehículo por el carril preferente llegará a ella.

Los experimentos realizados demuestran la facilidad para incluir nueva información en nuestra arquitectura de control y la importancia de obtener datos desde la infraestructura que pueden ser usados para mejorar el control de los vehículos.

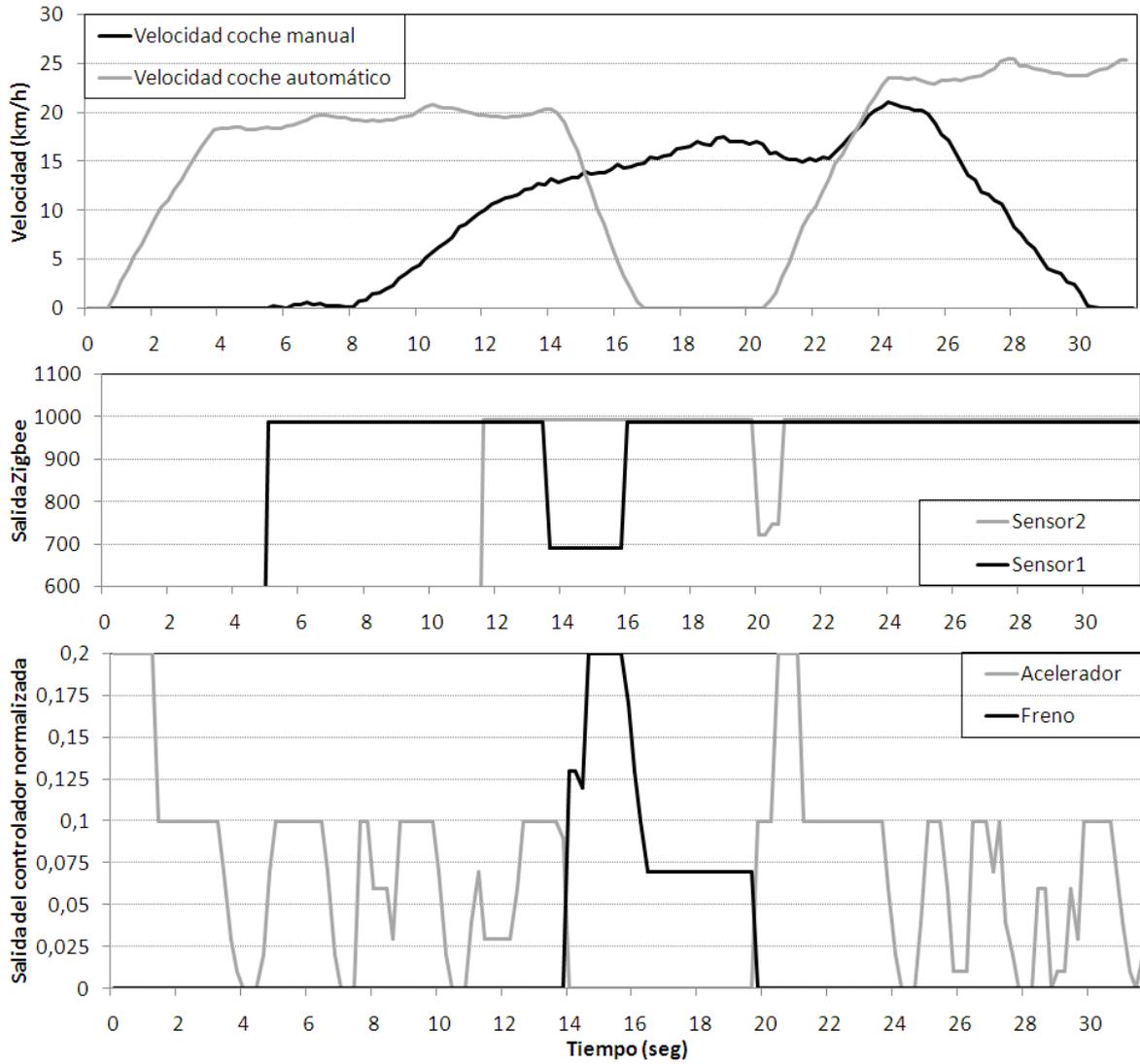


Figura 5.42: Velocidad del vehículo automático y manual, salidas de los dos sensores Zigbee ubicados en la infraestructura y salida del controlador borroso.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

El transporte por carretera ha absorbido prácticamente la totalidad del crecimiento de la movilidad de las últimas décadas y, prueba de ello, es que la facturación del sector supone el 20 % del PIB de los países de la Unión Europea, constituyendo este campo uno de los de mayor estudio y expansión en los últimos años.

Este trabajo de tesis ha presentado una solución a los principales problemas derivados del significativo aumento del tráfico y de la consiguiente congestión de las carreteras así como del número de accidentes y fallecidos en las mismas. A través de un sistema global de control del tráfico gestionado mediante estaciones locales de control que se comunican entre ellas, se busca transmitir toda la información relacionada con la zona de cobertura propia de cada una de estas estaciones. Así pues, el sistema presentado es capaz de recibir y tratar datos provenientes desde los vehículos que circulan en su entorno, de posibles dispositivos ubicados en la infraestructura y de las señales y paneles de tráfico que encontramos a lo largo de la infraestructura.

Para la consecución del objetivo planteado, se ha desarrollado una arquitectura abierta basada en cinco niveles y que comprende los pasos necesarios para implementar el sistema propuesto.

Teniendo en cuenta el amplio desarrollo de los sistemas de comunicación inalámbricos en la actualidad, el sistema planteado puede llegar a ser una realidad en pocos años basado en una combinación de diferentes tecnologías -telefonía móvil, WiMAX, RFID, Zigbee, Bluetooth, WiFi, DSRC, etc.

Además de la arquitectura planteada se han presentado diversos experimentos con vehículos reales realizando maniobras propias de entornos de circulación como pueden ser la conducción en atascos, la gestión de intersecciones, una frenada de emergencia, la evitación de un peatón o la modificación de la velocidad de circulación en caso de una situación peligrosa. Todas estas maniobras, prueban la modularidad de la arquitectura y la validación de la misma.

Además, todas estas mejoras se han incluido buscando un objetivo: el desarrollo de los vehículos automáticos y su coexistencia con los vehículos convencionales actualmente en circulación. Por este motivo, también se ha trabajado en la mejora de los sistemas de control y guiado del programa AUTOPIA, mejorando las prestaciones iniciales con la inclusión de un nuevo sistema

de guiado y el desarrollo de un nuevo sistema automatizado de frenos.

Se exponen a continuación las principales conclusiones derivadas de la realización de esta tesis desde cada uno de los campos asociados.

Control del tráfico

1. Se ha diseñado y validado un sistema de control global del tráfico que permite, mediante estaciones locales de control interconectadas en red con las estaciones adyacentes, la gestión del tráfico en su zona de cobertura sin realizar modificaciones en la infraestructura existente.

Mejoras al control de vehículos autónomos

2. Un sistema de posicionamiento basado en la combinación de sensores inerciales y propioceptivos del vehículo ha sido implementado para suplir al GPS en el caso de que se produzcan fallos en la señal. El sistema ha sido validado experimentalmente y permite pensar en un guiado automático en zonas urbanas sin problemas.
3. Un sistema electro-hidráulico de frenado diseñado para funcionar en paralelo con el circuito original ha sido implementado. Sus características mejoran las prestaciones del vehículo y aumentan la seguridad. El sistema incrementa significativamente la sensibilidad a la hora de realizar el control sobre el freno. Esto ha sido validado mediante un sistema de control de velocidad con excelentes prestaciones.
4. Se ha dotado al sistema de control del vehículo dotándolo de la capacidad de analizar diversas situaciones del tráfico y realizar la acción más oportuna en función de las circunstancias en las que se encuentre. El sistema desarrollado es modular permitiendo la inclusión de nuevos sistemas de control que analicen situaciones del tráfico diferentes.

Mejoras en el control de maniobras cooperativas

5. Se ha diseñado y validado un sistema automático para conducción en atascos.
6. Se ha diseñado y validado un sistema para evitación de colisiones entre vehículos que, ante movimientos bruscos inesperados del vehículo precedente, es capaz de detener el vehículo de forma segura y confortable.
7. Se ha diseñado un sistema para la gestión de maniobras entre vehículos en entornos no estructurados mediante sencillas operaciones matemáticas que ha sido validado a través de un sistema de control de intersecciones que aumenta la seguridad e incrementa el flujo de vehículos en cruces. Las posibles aplicaciones futuras de este sistema

para maniobras en rotondas o incorporaciones a vías rápidas constituye, a juicio del autor, una importante mejora de cara a que los vehículos automáticos puedan circular en cualquier tipo de situación del tráfico.

8. Se ha diseñado, en colaboración con investigadores de la Universidad de Alcalá, un sistema de evitación de peatones en conducción urbana. El sistema propuesto ha sido validado mediante experimentos reales.
9. Se ha diseñado y desarrollado un sistema de bajo coste mediante sensores ubicados en la infraestructura que pueden mandar una señal de aviso al conductor o, como en el sistema presentado, actuar directamente sobre el vehículo para evitar posibles accidentes. Esta red de sensores presenta como principal ventaja la facilidad de introducir un nuevo elemento que advierta de una situación temporal como obras o un posible accidente. Por último, la combinación de este sistema con una cartografía digital podría solventar los problemas que ésta presenta de actualización dinámica.
10. Como última aportación, el autor quiere destacar que la versatilidad de la arquitectura propuesta ha sido validada no sólo en las instalaciones del IAI-CSIC sino en diferentes demostraciones europeas como las realizadas en Versalles a finales de 2007 y, fundamentalmente, la realizada en La Rochelle a finales de 2008 con motivo de la demostración final del proyecto Cybercars-2 donde se usaron los sistemas desarrollados por el doctorando para llevar a cabo las maniobras cooperativas con el resto de vehículos del proyecto.

A pesar de los avances presentados, queda un largo camino por recorrer hasta encontrar vehículos completamente automatizados en las carreteras. Si bien algunos de los sistemas aquí presentados podrían quedar en un paso previo como sistemas de aviso al conductor a través de señales visuales o sonoras, la inclusión de estos sistemas en la cadena de producción comercial se antoja aún prematuro.

Las líneas futuras de investigación se pueden dividir en tres grandes bloques. En primer lugar, el desarrollo y mejora de las capacidades de conducción autónoma de los vehículos mediante la mejora de los sistemas actuales. Este objetivo, va ligado a la inclusión de un mayor número de sensores y a la consiguiente fusión sensorial para complementar las deficiencias de los otros. En segundo lugar, el desarrollo de los sistemas de comunicaciones para señales ubicadas en la infraestructura de forma que los vehículos actualmente en circulación, sin la inclusión de ningún sistema nuevo, puedan transmitir datos que ayuden a evitar colisiones. Por último, el desarrollo de maniobras cooperativas que abarquen un gran número de vehículos de forma que cubran todas las posibilidades que podamos encontrar en condiciones habituales del tráfico. Queda abierto el

trabajo para el control en rotondas o incorporaciones a vías rápidas, si bien estos sistemas serían fácilmente portables a la arquitectura propuesta.

Bibliografía

- [Abdelazim 04] T. Abdelazim, W. Abdel-Hamid, N. El-Sheimy and E. H. Shin. *Experimental results of an adaptive fuzzy network Kalman filtering integration for low cost navigation applications*. En Proc. IEEE Annual Meeting of the Fuzzy Information Processing NAFIPS '04, volume 2, pp. 844–849, 27–30 June 2004.
- [Abou-Jaoude 03] R. Abou-Jaoude. *ACC radar sensor technology, test requirements, and test solutions*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 115–122, Sept. 2003.
- [Alcalde 00] S. Alcalde. Instrumentación de un vehículo eléctrico para una conducción autónoma. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [Alfaro-Cid 08] E. Alfaro-Cid, E. W. McGookin, D. J. Murray-Smith and T. I. Fossen. *Genetic Programming for the Automatic Design of Controllers for a Surface Ship*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 311–321, June 2008.
- [Alonso 07] J. Alonso, J. Jiménez, J.E. Naranjo, J.I. Suárez and B. Vinagre. *Cooperative Maneuver Study Between Autonomous Cars: Overtaking*. En EUROCAST, pp. 1151–1158, 2007.
- [Alonso 09] J. Alonso, V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez and R. García. *Safe Crossroads via Vehicle to Vehicle Communication*. En EUROCAST, pp. 421–428, 2009.
- [Amditis 10] A. Amditis, E. Bertolazzi, M. Bimpas, F. Biral, P. Bosetti, M. Da Lio, L. Danielsson, A. Gallione, H. Lind, A. Saroldi and A. Sjogren. *A Holistic Approach to the Integration of Safety Applications: The INSAFES Subproject Within the European Framework Programme 6 Integrating Project PReVENT*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010.
- [Atev 05] S. Atev, H. Arumugam, O. Masoud, R. Janardan and N. P. Papanikolopoulos. *A vision-based approach to collision prediction at traffic intersections*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 416–423, Dec. 2005.
- [Athanasas 03] K. Athanasas, C. Bonnet, H. Fritz, C. Scheidler and G. Volk. *VALSE- validation of safety-related driver assistance systems*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 610–615, 9–11 June 2003.
- [Baber 05] J. Baber, J. Kolodko, T. Noel, M. Parent and L. Vlacic. *Cooperative autonomous driving: intelligent vehicles sharing city roads*. IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 12, No. 1, pp. 44–49, March 2005.
- [Bauermann 08a] I. Bauermann and E. Steinbach. *RDTC Optimized Compression of Image-Based Scene Representations (Part I): Modeling and Theoretical Analysis*. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 17, No. 5, pp. 709–723, May 2008.
- [Bauermann 08b] I. Bauermann and E. Steinbach. *RDTC Optimized Compression of Image-Based Scene Representations (Part II): Practical Coding*. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 17, No. 5, pp. 724–736, May 2008.

- [BECHTEL 93] BECHTEL. *Compendium of Executive Summaries from the Maglev System Concept Definition Final Reports*. Technical report, U.S. Department of Transportation, Mar. 1993.
- [Ben 09] Z. Ben, S. Lei and C. Dan. *A Study on the Traffic Intersection Vehicle Emission Base on Urban Microscopic Traffic Simulation Model*. En Proc. First International Workshop on Education Technology and Computer Science ETCS '09, volume 2, pp. 789–794, 7–8 March 2009.
- [Bertolazzi 10] E. Bertolazzi, F. Biral, M. Da Lio, A. Saroldi and F. Tango. *Supporting Drivers in Keeping Safe Speed and Safe Distance: The SASPENCE Subproject Within the European Framework Programme 6 Integrating Project PReVENT*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010.
- [Blythe 04] P.T. Blythe and A. Curtis. *Advanced Driver Assistance Systems: Gimmick or Reality*. En 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services, Nagoya, Japan, 2004.
- [Bouraoui 06] L. Bouraoui, S. Petti, A. Laouiti, T. Fraichard and M. Parent. *Cybercar Cooperation for Safe Intersections*. En Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC '06, pp. 456–461, 17–20 Sept. 2006.
- [Britting 71] K.R. Britting. *Inertial navigation systems analysis*. John Wiley & Sons Inc, New York, 1971.
- [Broggi 99a] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli and G. Conte. *Automatic vehicle guidancen: The experience of argo autonomous vehicle*. En Singapore: World Scientific, 1999.
- [Broggi 99b] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C. Lo and B. Piazzzi. *The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems*. International Journal of Intelligent Control Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 409–441, 1999.
- [Brookhuis 01] K. A. Brookhuis, D. de Waard and W. H. Janssen. *Behavioural impacts of Advanced Driver Assistance Systems: an overview*. European Journal of Transport and Infrastructure Research, Vol. 1, No. 3, pp. 245–253, 2001.
- [Bu 07] F. Bu and H. Tan. *Pneumatic Brake Control for Precision Stopping of Heavy-Duty Vehicles*. IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 53–64, 2007.
- [Celentano 03] G. Celentano, R. Iervolino, S. Porreca and V. Fontana. *Car Brake System Modeling for Longitudinal Control Design*. En IEEE Conference on Control Applications, volume 1, pp. 25–30, 2003.
- [Cerone 07] V. Cerone, M. Milanese and D. Regruto. *Experimental results on combined automatic lane keeping and driver's steering*. En Proc. American Control Conference ACC '07, pp. 3126–3131, 9–13 July 2007.
- [Chang 08] T. H. Chang, C. S. Hsu, C. Wang and L. K. Yang. *Onboard Measurement and Warning Module for Irregular Vehicle Behavior*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 501–513, Sept. 2008.
- [Chang 09a] C. Chang, C. Chou, C. Lin and M. Lee. *A WAVE/DSRC-based intersection collision warning system*. En Proc. International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops ICUMT '09, pp. 1–6, 12–14 Oct. 2009.
- [Chang 09b] C. Chang and Y. Chou. *Development of Fuzzy-Based Bus Rear-End Collision Warning Thresholds Using a Driving Simulator*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 360–365, June 2009.
- [Chen 08] Z. Chen, D. Ngai and C. K. and N. Yung. *Pedestrian Behavior Prediction based on Motion Patterns for Vehicle-to-Pedestrian Collision Avoidance*. En Proc. 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC 2008, pp. 316–321, 12–15 Oct. 2008.

- [Choi 01] W. Choi and D. Swaroop. *Assessing the safety benefits amongst vehicles during an due to coordination emergency braking maneuver*. En Proceedings of the American Control Conference, 2001.
- [Civilis 06] A. Civilis. *Prediction of crossroad passing using artificial neural networks*. En Proc. 7th International Baltic Conference on Databases and Information Systems, pp. 229–234, 2006.
- [C.Liu 08] C.Liu and C. Fan. *Zigbee- Research into Integrated Real-Time Located Systems*. En Proc. IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference APSCC '08, pp. 942–947, 9–12 Dec. 2008.
- [Collado 04] J.M. Collado, C. Hilario, A. de la Escalera and J.M. Armingol. *Model Based Vehicle Detection for Intelligent Vehicles*. En IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 572–577, 2004.
- [Cooper 08] J. Cooper and D. L. Strayer. *Effects of Simulator Practice and Real World Experience on Cell-phone-Related Driver Distraction*. Human Factors, Vol. 50, pp. 893–902, 2008.
- [Crane 06] C.. Crane, D.G. Armstrong, R. Touchton, T. Galluzzo, S. Solanki, J. Lee, D. Kent, M. Ahmed, R. Montane, S. Ridgeway, S.J. Velat, G. Garcia, M. Griffis, S. Gray, J. Washburn and G. Rou. *Team CIMAR's NaviGator: An unmanned ground vehicle for the 2005 DARPA grand challenge*. Journal of Field Robotics, Vol. 23, No. 8, pp. 599–623, 2006.
- [Cummings 07] P. Cummings and D.C. Grossman. *Antilock Brakes and the Risk of Driver Injury in a Crash: A Case-Control Study*. Accident Analysis & Prevention, Vol. 39, pp. 995–1000, 2007.
- [De Micheli 93] E. De Micheli and A. Verri. *Vehicle Guidance From One Dimensional Optical Flow*. En Proc. Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp. 183–188, 14-16 July 1993.
- [DGT 09a] DGT. *Balance de Seguridad Vial 2008*. Technical report, Ministerio del Interior, 2009.
- [DGT 09b] DGT. *Información de accidentes*. Technical report, Ministerio del Interior, Agosto 2009.
- [Dickmanns 87] E. D. Dickmanns and A. Zapp. *Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision*. En Proc. Selected Papers 10th Triennial World Congr. Int. Fed. Autom. Control, pp. 221–226, 1987.
- [Dickmanns 93] E. D. Dickmanns, R. Behringer, C. Brudigam, D. Dickmanns, F. Thomanek and V. van Holt. *An all-transputer visual autobahn-autopilot/copilot*. En Proc. Fourth International Conference on Computer Vision, pp. 608–615, 11–14 May 1993.
- [Dragone 09] D. Dragone. *I am getting tired: Effort and fatigue in intertemporal decision-making*. Journal of Economic Psychology, Vol. 3, No. 4, pp. 552–562, 2009.
- [Echegaray 08] S. Echegaray and L. Wenbin. *The modular design and implementation of an intelligent cruise control system*. En Proc. IEEE International Conference on System of Systems Engineering SoSE '08, pp. 1–6, 2–4 June 2008.
- [ECT 01] ECT. *White Paper. European Transport Policy for 2010. Time to Decide*. Technical report, European Commission Transport, 2001.
- [ECT 06] ECT. *Mid-term Review of the European Commission 2001 Transport White Paper. Keep Europe Moving: Sustainable Mobility for our Continent*. Technical report, European Commission Transport, June 2006.
- [ECT 09] ECT. *Final Review of the European Commission 2001 Transport White Paper. A sustainable future for transport*. Technical report, European Commission Transport, 2009.

- [Eidehall 07] A. Eidehall, J. Pohl, F. Gustafsson and J. Ekmark. *Toward Autonomous Collision Avoidance by Steering*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 84–94, March 2007.
- [Enzweiler 09] M. Enzweiler and D. M. Gavrila. *Monocular Pedestrian Detection: Survey and Experiments*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 31, No. 12, pp. 2179–2195, Dec. 2009.
- [Farahmand 09] A. S. Farahmand and L. Mili. *Cooperative decentralized intersection collision avoidance using Extended Kalman Filtering*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 977–982, 3–5 June 2009.
- [Farrell 98] J. Farrell, M. Barth, R. Galijan and J. Sinko. *GPS/INS Based Lateral And Longitudinal Control Demonstration: Final Report*. Technical report, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 1998.
- [Fuerstenberg 06] K. C. Fuerstenberg and B. Roessler. *Advanced Intersection Safety - The EC project INTERSAFE*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 89–93, 2006.
- [Gail 01] J. Gail, M. Lorig, C. Gelau, D. Heuzeroth and W. Sievert. *Optimization of Rear Signal Pattern for Reduction of Rear-End Accidents During Emergency Braking Manoeuvres*. Technical report, Federal Highway Research Institute, 2001.
- [Gajate 09] A. Gajate and R. Haber. *Control Neuroborroso en Red. Aplicación al Proceso de Taldrado de Alto Rendimiento*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 6, No. 1, pp. 31–38, Enero 2009.
- [Galán 00] R. Galán, A. Jiménez, R. Sanz and F. Matía. *Control Inteligente*. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, Vol. 10, pp. 43–48, 2000.
- [Gandhi 07] T. Gandhi and M. M. Trivedi. *Pedestrian Protection Systems: Issues, Survey, and Challenges*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 413–430, Sept. 2007.
- [Garcia 98] R. Garcia and T. de Pedro. *Modeling a fuzzy coprocessor and its programming language*. Mathware and Soft Computing, Vol. 5, No. 2-3, pp. 167–174, 1998.
- [Garcia 00] R. Garcia and T. de Pedro. *First Application of the ORBEX Coprocessor: Control of Unmanned Vehicles*. Mathware and Soft Computing, Vol. 7, No. 2-3, pp. 265–273, 2000.
- [Garcia 02] R. Garcia, T. de Pedro, J. E. Naranjo, J. Reviejo and C. Gonzalez. *Frontal and lateral control for unmanned vehicles in urban tracks*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, volume 2, pp. 583–588, 17–21 June 2002.
- [Gavrila 99] D. M. Gavrila. *The visual analysis of human movement: a survey*. Comput. Vis. Image Underst., Vol. 73, No. 1, pp. 82–98, January 1999.
- [Gerdes 97] J.C. Gerdes and J.K. Hedrick. *Vehicle Speed and Spacing Control Via Coordinated Throttle and Brake Actuation*. Control Eng. Practice, Vol. 5, No. 11, pp. 1607–1614, 1997.
- [Gerónimo 09] D. Gerónimo, A. López, A. Sappa and T. Graf. *Survey on Pedestrian Detection for Advanced Driver Assistance Systems*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009. Accepted for future publication Pattern Analysis and Machine Intelligence.
- [Gholamhossein 08] M. Gholamhossein and H. Khaloozadeh. *Automotive radar data filtering approach for Adaptive Cruise Control systems*. En Proc. 3rd International Conference on Sensing Technology ICST 2008, pp. 10–14, Nov 2008.
- [González 02] C. González, J. Reviejo, J.E. Naranjo, R. García and T. de Pedro. *Sistema de Ayuda a la Plantación de Viñas basado en Navegación por Satélite*. En X Congreso Latinoamericano de Control Automático, México, December 2002.

- [Graefe 93] V. Graefe. *Vision For Intelligent Road Vehicles*. En Proc. Intelligent Vehicles '93 Symposium, pp. 135–140, 14-16 July 1993.
- [Hatipoglu 03] C. Hatipoglu, U. Ozguner and K. A. Redmill. *Automated lane change controller design*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 4, No. 1, pp. 13–22, March 2003.
- [Heckman 07] N. Heckman, J. Lalonde, N. Vandapel and M. Hebert. *Potential negative obstacle detection by occlusion labeling*. En Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2007, pp. 2168–2173, Oct. 29 2007–Nov. 2 2007.
- [Hessburg 94] T. Hessburg and M. Tomizuka. *Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance*. IEEE Control Systems Magazine, Vol. 14, No. 4, pp. 55–63, Aug. 1994.
- [Hessburg 95] T. Hessburg and M. Tomizuka. *Fuzzy logic control for lane change maneuvers in lateral vehicle guidance*. Technical report, Univ. Calif, Berkeley, CA, Calif PATH Working Paper, 1995.
- [Hofmann 03] U. Hofmann, A. Rieder and E. D. Dickmanns. *Radar and vision data fusion for hybrid adaptive cruise control on highways*. Machine Vision and Applications, Vol. 14, No. 1, pp. 42–49, April 2003.
- [Hong 06] D. Hong, P. Yoon, H. Kang, I. Hwang and K. Huh. *Wheel Slip Control Systems Utilizing the Estimated Tire Force*. En Proceedings of the 2006 American Control Conference, pp. 5873–5878, 2006.
- [Ioannou 93] P. A. Ioannou and C. C. Chien. *Autonomous intelligent cruise control*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 4, pp. 657–672, Nov. 1993.
- [Jansson 02] J. Jansson, J. Johansson and F. Gustafsson. *Decision making for collision avoidance systems*. Technical report 2002-01-0403, Society of Automotive Engineering, 2002.
- [Jula 00] H. Jula, E. B. Kosmatopoulos and P. A. Ioannou. *Collision avoidance analysis for lane changing and merging*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 49, No. 6, pp. 2295–2308, Nov. 2000.
- [Kaempchen 09] N. Kaempchen, B. Schiele and K. Dietmayer. *Situation Assessment of an Autonomous Emergency Brake for Arbitrary Vehicle-to-Vehicle Collision Scenarios*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 678–687, Dec. 2009.
- [Kayacan 09] E. Kayacan, Y. Oniz and O. Kaynak. *A Grey System Modeling Approach for Sliding-Mode Control of Antilock Braking System*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 8, pp. 3244–3252, Aug. 2009.
- [Kesting 08] A. Kesting, M. Treiber, M. Schönhof and D. Helbing. *Adaptive cruise control design for active congestion avoidance*. Transportation Research: Part C, Vol. 16, pp. 668–683, 2008.
- [Kim 96] H. Kim, J. Dickerson and B. Kosko. *Fuzzy Throttle and Brake Control for Platoons of Smart Cars*. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 84, pp. 209–234, 1996.
- [King 07] T. I. King, W. J. Barnes, H. H. Refai and J. E. Fagan. *A Wireless Sensor Network Architecture for Highway Intersection Collision Prevention*. En Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC 2007, pp. 178–183, Sept. 30 2007–Oct. 3 2007.
- [Korkmaz 07] G. Korkmaz, E. Ekici and F. Ozguner. *Black-Burst-Based Multihop Broadcast Protocols for Vehicular Networks*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 5, pp. 3159–3167, Sept. 2007.
- [Krabbes 97] M. Krabbes, H. J. Bohme, V. Stephan and H. M. Gross. *Extension of the ALVINN-architecture for robust visual guidance of a miniature robot*. En Proc. Second EU-ROMICRO workshop on Advanced Mobile Robots, pp. 8–14, 22–24 Oct. 1997.

- [Kuchar 00] J. K. Kuchar and L. C. Yang. *A review of conflict detection and resolution modeling methods*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 1, No. 4, pp. 179–189, Dec. 2000.
- [Kunchev 06] V. Kunchev, L. Jain, V. Ivancevic and A. Finn. *Path Planning and Obstacle Avoidance for Autonomous Mobile Robots: A Review*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 537–544, 2006.
- [Labayrade 05] R. Labayrade, C. Royere and D. Aubert. *A collision mitigation system using laser scanner and stereovision fusion and its assessment*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 441–446, 6–8 June 2005.
- [Li 06a] L. Li and F. Wang. *Cooperative Driving at Blind Crossings Using Intervehicle Communication*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, No. 6, pp. 1712–1724, Nov. 2006.
- [Li 06b] Z. Li, K. Wang, L. Li and F. Wang. *A Review on Vision-Based Pedestrian Detection for Intelligent Vehicles*. En Proc. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety ICVES 2006, pp. 57–62, December 13–15, 2006.
- [Li 09] Z. Li, N. Li and F. Liu. *An Effective Calculating Method of Signalized Intersection Delay*. En Proc. International Conference on Digital Image Processing, pp. 211–215, 7–9 March 2009.
- [Liang 03] H. Liang, K. Chong, T. No and S. Yi. *Vehicle Longitudinal Brake Control Using Variable Parameter Sliding Control*. Control Engineering Practice, Vol. 11, pp. 403–411, 2003.
- [Lignon 06] S. Lignon, J-J. Sinou and L. Jézéquel. *Stability analysis and synthesis control of brake systems*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 4, No. 54, pp. 1073–1087, 2006.
- [Lin 09] T.W. Lin, S.L. Hwang and P.A. Green. *Effects of time-gap settings of adaptive cruise control (ACC) on driving performance and subjective acceptance in a bus driving simulator*. Safety Science, Vol. 47, No. 5, pp. 620–625, 2009.
- [Lindley 07] Jeffrey Lindley. *Highway Safety Solutions for Saving Lives*. Technical report, Federal Highway Administration, Septiembre 2007.
- [Liu 09] Y. Liu and W. Huang. *The Optimal Design of Signalized Intersection Based on Variable Approach-Lane Control*. En Proc. Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation ICICTA '09, volume 3, pp. 826–829, 10–11 Oct. 2009.
- [Llorca 08] D.F. Llorca. *Sistema de detección de peatones mediante visión estereoscópica para la asistencia a la conducción*. PhD thesis, Universidad de Alcalá, 2008.
- [Llorca 09] D. F. Llorca, M. A. Sotelo, I. Parra, J. E. Naranjo, M. Gavilán and S. Álvarez. *An Experimental Study on Pitch Compensation in Pedestrian-Protection Systems for Collision Avoidance and Mitigation*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 469–474, Sept. 2009.
- [Maciuca 97] D. Maciuca and J.K. Hedrick. *Nonsmooth Dynamic Surface Control of Non-Lipschitz Nonlinear Systems with Application to Brake Control*. En Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications, pp. 711–716, 1997.
- [Maciuca 98] D. Maciuca and J.K. Hedrick. *Nonsmooth Estimation and Adaptive Control with Application to Automotive Brake Torque*. En Proceedings of the American Control Conference, pp. 2253–2257, 1998.
- [Mamdani 74] E.H. Mamdani. *Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant*. Proc. Inst. Elect. Eng., Vol. 121, No. 12, pp. 1585–1588, 1974.
- [Milanés 08a] V. Milanés, J.E. Naranjo, C. Gonzalez, J. Alonso and T. de Pedro. *Autonomous vehicle based in cooperative GPS and inertial systems*. Robotica, Vol. 26, No. 5, pp. 627–633, Sept. 2008.

- [Milanés 08b] V. Milanés, J.E. Naranjo, C. González, J. Alonso, R. García and T. de Pedro. *Sistema de Posicionamiento para Vehículos Autónomos*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 5, No. 4, pp. 36–41, 2008.
- [Milanés 08c] V. Milanés, E. Onieva, T. de Pedro, R. García, J. Alonso, J. Pérez and C. González. *Conducción Autónoma en Circuito de Difícil Maniobrabilidad*. En XXIX Jornadas de Automática, Septiembre 2008.
- [Milanés 09a] V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez, T. de Pedro and C. González. *Control de velocidad basado en lógica borrosa para entornos urbanos congestionados*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 6, No. 4, pp. 61–68, Octubre 2009.
- [Milanés 09b] V. Milanés, J. Perez, E. Onieva, C. Gonzalez and T. de Pedro. *Electric power controller for steering wheel management in electric cars*. En Proc. CPE '09. Compatibility and Power Electronics, pp. 444–449, May 2009.
- [Milanés 10a] V. Milanés, C. González, J.E. Naranjo, E. Onieva and T. de Pedro. *Electro-hydraulic braking system for autonomous vehicles*. International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 89–95, Feb. 2010.
- [Milanés 10b] V. Milanés, J. Perez, E. Onieva, C. Gonzalez and T. de Pedro. *Lateral Power Controller for Unmanned Vehicles*. Electrical Review, Vol. 86, No. 1, pp. 207–211, Jan. 2010.
- [Milanés 10c] V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva and González C. *Controller for urban intersections based wireless communications and fuzzy logic*. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 243–248, March 2010.
- [Miller 01] H. J. Miller and S. Shaw. Geographic information systems for transportation: Principles and applications. Oxford University Press, 2001.
- [Moeslund 06] Thomas B. Moeslund, Adrian Hilton and Volker Krüger. *A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis*. Computer Vision and Image Understanding, Vol. 104, No. 2-3, pp. 90–126, November 2006.
- [Moon 09] S. Moon, I. Moon and Kyongsu Y. *Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance*. Control Engineering Practice, Vol. 17, pp. 442–455, 2009.
- [Morrel 58] J. S. Morrel. *The mathematics of collision avoidance in the air*. Journal of the Institute of Navigation, Vol. 11, 1958.
- [Muller 92] R. Muller and G. Nocker. *Intelligent cruise control with fuzzy logic*. En Proc. Intelligent Vehicles '92 Symposium, pp. 173–178, 29 June-1 July 1992.
- [Murali 08] B. Murali and T. Mordica. *Development of an autonomous vehicle for the DARPA urban challenge*. En Proceedings of the International Instrumentation Symposium, pp. 543–554, 2008.
- [Naranjo 05a] J. E. Naranjo. *Sistema de Conducción Automática de Vehículos basado en Lógica Borrosa y Sistemas Globales de Posicionamiento por Satélite: Programa Autopia*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [Naranjo 05b] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. de Pedro and R. E. Haber. *Power-steering control architecture for automatic driving*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 406–415, Dec. 2005.
- [Naranjo 06] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia and T. de Pedro. *ACC+Stop&Go maneuvers with throttle and brake fuzzy control*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, No. 2, pp. 213–225, June 2006.
- [Naranjo 07] J.E. Naranjo, R. García, C. González, T. de Pedro, J. Alonso and J. Vinuesa. *Cross-road Cooperative Driving Based on GPS and Wireless Communications*. En EUROCAST, pp. 1073–1080, 2007.

- [Naranjo 08] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia and T. de Pedro. *Lane-Change Fuzzy Control in Autonomous Vehicles for the Overtaking Maneuver*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 438–450, Sept. 2008.
- [Naranjo 09] J. E. Naranjo, L. Bouraoui, R. Garcia, M. Parent and M. A. Sotelo. *Interoperable Control Architecture for Cybercars and Dual-Mode Cars*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 146–154, March 2009.
- [Obradovic 07] D. Obradovic, H. Lenz and M. Schupfner. *Fusion of Sensor Data in Siemens Car Navigation System*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 1, pp. 43–50, Jan. 2007.
- [Onieva 10] E. Onieva, V. Milanés, J. Perez and T. de Pedro. *Estimación de un Control Lateral Difuso de Vehículos*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 7, No. 2, Abril 2010.
- [Panaturak 09] W. Panaturak, S. Thanok and M. Parnichkun. *Adaptive cruise control for an intelligent vehicle*. En Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics ROBIO 2008, pp. 1794–1799, 22–25 Feb. 2009.
- [Park 06] E.J. Park, D. Stoikov, L. Falcao and A. Suleman. *A performance Evaluation of an Automotive Magnetorheological Brake Design with a Sliding Mode Controller*. Mechatronics, Vol. 16, pp. 405–416, 2006.
- [Parra 07] I. Parra, D. F. Llorca, M. A. Sotelo, L. M. Bergasa, P. Revenga, J. Nuevo, M. Ocaña and M. A. García. *Combination of Feature Extraction Methods for SVM Pedestrian Detection*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 292–307, June 2007.
- [Pauwelussen 08] J. Pauwelussen and M. Minderhoud. *The effects of deactivation and (re)activation of ACC on driver behaviour analyzed in real traffic*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 257–262, 4-6 June 2008.
- [Perez 09] J. Perez, C. Gonzalez, V. Milanés, E. Onieva, J. Godoy and T. de Pedro. *Modularity, adaptability and evolution in the AUTOPIA architecture for control of autonomous vehicles*. En Proc. IEEE International Conference on Mechatronics ICM 2009, pp. 1–5, 14–17 April 2009.
- [Petersen 06] A. Petersen, Barrett. R. and S. Morrison. *Driver-Training and Emergency Brake Performance in Cars with Antilock Braking Systems*. Safety Science, Vol. 44, pp. 905–917, 2006.
- [Pingyuan 09] X. Pingyuan and S. Yandong. *Dynamic Simulation on the Belt Conveyor on Emergency Braking*. En Proc. Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation ICICTA '09, volume 2, pp. 34–36, 10–11 Oct. 2009.
- [Pomerleau 95a] D. Pomerleau. *RALPH: rapidly adapting lateral position handler*. En Proc. Intelligent Vehicles '95 Symposium, pp. 506–511, 25–26 Sept. 1995.
- [Pomerleau 95b] D. Pomerleau. *Ralph: Rapidly adapting lateral position handler*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 1995.
- [Rajamani 00] R. Rajamani, Han-Shue Tan, Boon Kait Law and Wei-Bin Zhang. *Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, No. 4, pp. 695–708, July 2000.
- [Rakha 07] H. Rakha, I. El-Shawarby and J. R. Setti. *Characterizing Driver Behavior on Signalized Intersection Approaches at the Onset of a Yellow-Phase Trigger*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 630–640, Dec. 2007.
- [Rezaei 05] S. Rezaei and R. Sengupta. *Kalman filter based integration of DGPS and vehicle sensors for localization*. En Proc. IEEE International Conference Mechatronics and Automation, volume 1, pp. 455–460, 29 July–1 Aug. 2005.

- [Rossetter 02] E. J. Rossetter and J. C. Gerdes. *Performance guarantees for hazard based lateral vehicle control*. En Proc. IMECE Conference, 2002.
- [Rumar 99] K. Rumar, D. Fleury, J. Kildebogaard, G. Lind, V. Mauro, J. Berry., O. Carsten, T. Heijer, R. Kulmala, K. Machata and I. Zackor. *Intelligent Transportation Systems and road safety*. Technical report, European Transport Council, Brussels, 1999.
- [Sahin 09] M.A. Sahin and K. Leblebicioglu. *A standard expert system for weapon target assignment problem*. En Proceedings of the 2009 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems, pp. 221–224, 2009.
- [Salgado 05] P. Salgado and J. B. Cunha. *Greenhouse climate hierarchical fuzzy modeling*. Control Engineering Practice, Vol. 13, No. 5, pp. 613–628, 2005.
- [Sato 09] T. Sato and M. Akamatsu. *Analysis of drivers' preparatory behaviour before turning at intersections*. IET Intelligent Transport Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 379–389, December 2009.
- [Schulze 08] M. Schulze, T. Mäkinen, J. Irionan dM. Flament and T. Kessel. *Preventive and Active Safety Applications (PReVENT)*. Technical report, Daimler AG, 2008.
- [Sebatian 07] E. Sebatian and M.A. Sotelo. *Control en Modo Deslizante Adaptativo Borroso de las Variables Cinemáticas del Vehículo Subacuático Snorkel*. Revista iberoamericana de automática e informática industrial, Vol. 4, No. 1, pp. 58–69, 2007.
- [Serrano 05] J. I. Serrano, J. Alonso, M. D. del Castillo and J. E. Naranjo. *Evolutionary Optimization of Autonomous Vehicles Traces*. En IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 1332–1339, September 2005.
- [Sheikholeslam 92] S. Sheikholeslam and C. A. Desoer. *Design of Decentralized Adaptive Controllers for a Class of Interconnected Nonlinear Dynamical Systems: Part I*. Technical report, Institute of Transportation Studies University of California, Berkeley, 1992.
- [Shen 07] Y. Shen, Z. Zhu and E. Mao. *Double-Fuzzy Kalman Filter Based on GPS/IMU/MV Sensor Fusion for Tractor Autonomous Guidance*. En Proc. IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp. 61–65, 18–21 Aug. 2007.
- [Shiller 98] Z. Shiller and S. Sundar. *Emergency lane-change maneuvers of autonomous vehicles*. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 120, No. 1, pp. 37–44, 1998.
- [Solomon 05] I. Solomon, L. Hernández, A. del Pozo and J. Barrera-Cortés. *Control Neuronal con Término Integral para un Proceso de Fermentación*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 2, No. 1, pp. 64–69, Enero 2005.
- [Song 04] B. Song and J. K. Hedrick. *Design and Experimental Implementation of Longitudinal Control for Automated Transit Buses*. En Proceeding of the 2004 American Control Conference, pp. 2751–2756, 2004.
- [Song 05] J. Song. *Performance Evaluation of a Hybrid Electric Brake System with a Sliding Mode Controller*. Mechatronics, Vol. 15, pp. 339–358, 2005.
- [Song 06] G. Song, M. Jiang and G. Zhao. *The Research of an Intelligent Braking Control System*. En 7th IEEE International Conference on Computer Aided Industrial Design and Conceptual Design, 2006.
- [Sotelo 01] M. A. Sotelo. *Sistema de navegación global aplicado al guiado de un vehículo autónomo terrestre en entornos exteriores parcialmente conocidos*. PhD thesis, Universidad de Alcalá, 2001.
- [Sotelo 04] M. A. Sotelo, D. Fernandez, J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. de Pedro and J. Reviejo. *Vision-based adaptive cruise control for intelligent road vehicles*. En Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), volume 1, pp. 64–69, 28 Sept.-2 Oct. 2004.

- [Stein 03] G. P. Stein, O. Mano and A. Shashua. *Vision-based ACC with a single camera: bounds on range and range rate accuracy*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 120–125, 9–11 June 2003.
- [Sugasawa 96] F. Sugawara, H. Ueno, M. Kaneda, J. Koreishi, R. Shirato and N. Fukuhara. *Development of Nissan's ASV*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 254–259, 19–20 Sept. 1996.
- [Sugeno 95] M. Sugeno, H. Winston, I. Hirano and S. Kotsu. *Intelligent control of an unmanned helicopter based on fuzzy logic*. En Proc. Amer. Helicopter Soc., 51st Annu. Forum, Houston, pp. 791–803, 1995.
- [Swaroop 99] D. Swaroop and S. M. Yoon. *The design of a controller for a following vehicle in an emergency lane change maneuver*. Technical report, Univ. Calif, Berkeley, CA, Calif PATH Working Paper, 1999.
- [Takagi 85] T. Takagi and M. Sugeno. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15, No. 1, pp. 116–132, 1985.
- [Tan 02] H. S. Tan, B. Bougler and W. B. Zhang. *Automatic steering based on roadway markers - from highway driving to precision docking*. Vehicle System Dynamics, Vol. 37, No. 5, pp. 315–339, 2002.
- [Thorpe 90] C. E. Thorpe. Vision and navigation: The carnegie mellon navlab. Kluwer, 1990.
- [Toledo-Moreo 07] R. Toledo-Moreo, M. A. Zamora-Izquierdo and A. F. Gomez-Skarmeta. *Multiple Model based Lane Change Prediction for Road Vehicles with Low Cost GPS/IMU*. En Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC 2007, pp. 473–478, Sept. 30 2007–Oct. 3 2007.
- [Tsugawa 79] S. Tsugawa, T. Yatabe, T. Hirose and S. Matsumoto. *An automobile with artificial intelligence*. En Proc. International Joint Conferences on Artificial Intelligence, pp. 893–895, 1979.
- [Urmson 08] C. Urmson, J. Anhalt, H. Bae, J. Bagnell, C. Baker, R.E. Bittner, T. Brown, M.N. Clark, M. Darms, D. Demitrish, J. Dolan, D. Duggins, D. Ferguson, T. Galatali, C.M. Geyer, M. Gittleman, S. Harbaugh, M. Hebert, T. Howard, S. Kolski, M. Likhachev, B. Litkouhi, A. Kelly, M. McNaughton, N. Miller, J. Nickolaou, K. Peterson, B. Pilonick, R. Rajkumar, P. Rybski, V. Sadekar, B. Salesky, Y. Seo, S. Singh, J.M. Snider, J.C. Struble, A. Stentz, M. Taylor, W.L. Whittaker, Z. Wolkowicki, W. Zhang, and J. Ziglar. *Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge*. Journal of Field Robotics, Vol. 25, No. 8, pp. 425–466, 2008.
- [Varaiya 93] P. Varaiya. *Path planning and obstacle avoidance for autonomous mobile robots: A review*. IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 38, No. 2, pp. 195–207, 1993.
- [Venture 06] G. Venture, P. Ripert, W. Khalil, M. Gautier and P. Bodson. *Modeling and Identification of Passenger Car Dynamics Using Robotics Formalism*. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 349–359, 2006.
- [Wang 05] J. Wang, S. Schroedl, K. Mezger, R. Ortloff, A. Joos and T. Passegger. *Lane Keeping Based on Localization Technology*. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 351–356, 2005.
- [Wang 09a] W. Wang, I. Li, M. Chen, S. Su and S. Hsu. *Dynamic Slip-Ratio Estimation and Control of Antilock Braking Systems Using an Observer-Based Direct Adaptive Fuzzy Neural Controller*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 5, pp. 1746–1756, May 2009.
- [Wang 09b] Y. Wang, Y. Zou, H. Shi and H. Zhao. *Video Image Vehicle Detection System for Signaled Traffic Intersection*. En Proc. Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems HIS '09, volume 1, pp. 222–227, 12–14 Aug. 2009.

- [Wedel 07] A. Wedel and U. Franke. *Monocular Video serves RADAR-based Emergency Braking*. En Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 93–98, 13–15 June 2007.
- [WHO 04] WHO. *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. Technical report, World Health Organization, 2004.
- [Wu 09a] J. Wu, A. Abbas-Turki and A. El Moudni. *Discrete Methods for Urban Intersection Traffic Controlling*. En Proc. IEEE 69th Vehicular Technology Conference VTC Spring 2009, pp. 1–5, 26–29 April 2009.
- [Wu 09b] J. Wu, A. Abbas-Turki and A. El Moudni. *Intersection traffic control by a novel scheduling model*. En Proc. IEEE/INFORMS International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics SOLI '09, pp. 329–334, 22–24 July 2009.
- [Wu 09c] Z. Wu, Y. Liu and G. Pan. *A Smart Car Control Model for Brake Comfort Based on Car Following*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 42–46, March 2009.
- [Wunderlich 08] R. Wunderlich, C. Liu, I. Elhanany and T. UrbanikII. *A Novel Signal-Scheduling Algorithm With Quality-of-Service Provisioning for an Isolated Intersection*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 536–547, Sept. 2008.
- [Xia 10] T. Xia, M. Yang, R. Yang and C. Wang. *CyberC3: A Prototype Cybernetic Transportation System for Urban Applications*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 142–152, March 2010.
- [Xiao 07] H. Xiao, S. Li, Q. Shen, H. Li and Q. Wang. *Automatic Positioning of Spinning Projectile in Trajectory Correction Fuze via GPS/IMU Integration*. En Proc. International Conference on Mechatronics and Automation ICMA 2007, pp. 717–722, 5–8 Aug. 2007.
- [Xu 09] Y. W. Xu, X. B. Cao and T. Li. *Extended Kalman filter based pedestrian localization for collision avoidance*. En Proc. International Conference on Mechatronics and Automation ICMA 2009, pp. 4366–4370, 9–12 Aug. 2009.
- [Yan 09] F. Yan, M. Dridi and A. El Moudni. *Autonomous vehicle sequencing algorithm at isolated intersections*. En Proc. 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems ITSC '09, pp. 1–6, 4–7 Oct. 2009.
- [Yang 01] Z. Yang and D. Guan. *Study on the scheme of traffic signal timing for priority vehicles based on navigation system*. En Proc. IEEE International Vehicle Electronics Conference IVEC 2001, pp. 249–254, 25–28 Sept. 2001.
- [Yi 00] J. Yi, L. Alvarez, R. Horowitz and C.C. de Wit. *Adaptive emergency braking control using a dynamic tire/road friction model*. En Proc. 39th IEEE Conference on Decision and Control, volume 1, pp. 456–461, 12–15 Dec. 2000.
- [Yi 05] J. Yi, L. Alvarez and R. Horowitz. *Adaptive Emergency Braking Control with Underestimation of Friction Coefficient*. IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 381–392, 2005.
- [Yoon 07] B. Yoon, J. Na and J. Kim. *Navigation method using multi-sensor for UGV(Unmanned Ground Vehicle)*. En Proc. International Conference on Control, Automation and Systems ICCAS '07, pp. 853–856, 17–20 Oct. 2007.
- [Zadeh 65] L.A. Zadeh. *Fuzzy Sets*. Information and Control, Vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [Zadeh 73] L. A. Zadeh. *Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes*. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-3, pp. 28–44, 1973.
- [Zhou 06] X. Zhou and H.S. Mahmassani. *Dynamic origin-destination demand estimation using automatic vehicle identification data*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 105–114, 2006.

- [Zou 09] Y. Zou, H. Shi, Y. Wang, G. Shi and H. Zhao. *A Robust Traffic Parameter Extraction Approach for Surveillance System at Urban Intersection*. En Proc. 2nd International Congress on Image and Signal Processing CISP '09, pp. 1–5, 17–19 Oct. 2009.