

Técnicas Difusas y Evolutivas  
para el Control de Vehículos en  
Entornos Reales y Virtuales

Tesis Doctoral

Enrique Onieva Caracuel

Teresa de Pedro Lucio

David Alejandro Pelta



UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. de Ingenierías en Informática y Telecomunicación

Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia  
Artificial

Editor: Editorial de la Universidad de Granada  
Autor: Enrique Onieva Caracuel  
D.L.: GR 3788-2011  
ISBN: 978-84-694-4437-5

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**E.T.S. de Ingenierías en Informática y Telecomunicación**

**Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia  
Artificial**



**Técnicas Difusas y Evolutivas para el Control de  
Vehículos en Entornos Reales y Virtuales**

**Autor**

Enrique Onieva Caracuel

**Directores**

Teresa de Pedro Lucio

Programa Autopia. Centro de Automática y Robótica.

Universidad Politécnica de Madrid -

Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

David Alejandro Pelta

Dpto. de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial.

E.T.S. de Ingenierías en Informática y Telecomunicación.

Universidad de Granada.



La memoria titulada **Técnicas Difusas y Evolutivas para el Control de Vehículos en Entornos Reales y Virtuales**, que presenta D. Enrique Onieva Caracuel para optar al grado de Doctor en Informática, ha sido realizada en el Grupo AUTOPIA del Centro de Automática y Robótica de la Universidad Politécnica de Madrid y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en coordinación con el Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada, bajo la dirección de los Doctores Teresa de Pedro Lucio y David Alejandro Pelta, de los respectivos departamentos.

Enrique Onieva Caracuel

Teresa de Pedro Lucio

David Alejandro Pelta









## Dedicado a

Beatriz, por todo este tiempo a mi lado, su apoyo, ánimo y comprensión. Mis padres, por convertirme en la persona que soy ahora. Mi hermano, por estar ahí siempre.

## Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia e Innovación, por financiar mi formación doctoral por medio del programa de becas de Formación de Personal Investigador.

A los miembros del Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada, por los conocimientos aportados a mi formación.

A mis directores de tesis, Teresa de Pedro y David Pelta, por acompañarme durante esta aventura y haberme guiado con sus enseñanzas y conocimientos; por ser grandes profesionales y mejores personas, así como grandes amigos. A Teresa, por ser más que una directora, ser compañera y sabia consejera durante este periodo. A David, por la entera disponibilidad ofrecida, haciendo que todo sea más sencillo.

A los chicos de grupo AUTOPIA, por ese afán contagioso de ir un paso más allá. A Ricardo García, por esos momentos que empiezan con una hoja de papel en blanco y terminan con una solución brillante al problema; a Carlos González, por hacer cierto día tras día eso de que no te acostarás sin saber una cosa más; a Vicente Milanés, por la pasión y dedicación que pone en cada proyecto emprendido; a Javier Alonso, por su constante afán innovador; a Joshué Pérez, por buscar sencillez de las cosas más complejas; a Jorge Godoy, por el entusiasmo con el que afronta las cosas; a Jorge Villagrà, por su entrega y sabios consejos; a Roberto Sanz, por estar siempre dispuesto a cambiar el mundo. A todos ellos por la infinita amistad mostrada.

A José Luis Verdegay, por darme el primer empujón en mi carrera investigadora y gracias al cual, este trabajo no podría haberse realizado; por dejarme descubrir por mí mismo las cosas buenas y por avisarme de las malas. Así como por ofrecerme su amistad. Y a todo el grupo de Modelos de Decisión y Optimización, por acogerme, pese a la distancia, como uno más.

A Enrique Ruspini, por ayudarme y ser el enlace para la realización de mi estancia en el *SRI International's Artificial Intelligence Center*; así como a Charlie Ortiz y Benoit Morisset, que me guiaron durante

mi estancia allí, haciendo que fuera completamente satisfactoria. A Pier Luca Lanzi, Daniele Loiacono y Luigi Cardamone, por acogerme durante mi estancia en el *Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano*, por hacerme sentir como en casa y darme la oportunidad de trabajar con ellos.

En un ámbito más personal, son muchas las personas a las que he de agradecer su apoyo, ayuda y amistad. Gente del Centro de Automática y Robótica como Lola, Nacho, Jaime, Begoña, Rodolfo, Agustín, Raúl y tantos otros; Jose Carlos, Alberto, Javi, Jose, Álvaro y demás compañeros de carrera; y finalmente, los amigos que siempre han estado ahí desde la infancia como Javier, José, Yayi, Jose Ricardo, Genoveva, Antonio y muchos más. Gracias por todos los buenos momentos ya que han aportado mucho tanto a la presente tesis como a mí como persona.

---

*When you make the finding yourself  
- even if you're the last person on Earth  
to see the light - you'll never forget it.*

Carl Sagan

*In theory, theory and practice are  
the same. In practice, they are not.*

Atribuida a Albert Einstein

---

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>xvii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>3</b>
1.1 Propósito . . . . .	7
1.2 Difusión de Resultados . . . . .	8
1.3 Estructura del Trabajo . . . . .	13
<b>2 Estado del Arte</b>	<b>15</b>
2.1 Los Sistemas Inteligentes de Transporte . . . . .	15
2.1.1 El Transporte por Carretera . . . . .	18
2.1.2 Vehículos Inteligentes . . . . .	20
2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos . . . . .	23
2.3 Proyectos de Investigación Destacables . . . . .	32
2.4 Los Sistemas Inteligentes de Transporte en la Industria . .	38
2.5 El Grupo AUTOPIA . . . . .	43
2.5.1 La Zona de Conducción . . . . .	45
2.5.2 Los Coches . . . . .	47
2.5.3 La Arquitectura de Control . . . . .	50
2.5.4 ORBEX . . . . .	54
2.5.5 Líneas de Investigación . . . . .	59
<b>3 Control de Velocidad en Entornos Urbanos</b>	<b>63</b>
3.1 Motivación . . . . .	64

## CONTENIDO

---

3.2	Actuación sobre el Acelerador y Freno . . . . .	66
3.3	Sistema de Control Difuso . . . . .	68
3.3.1	Error de velocidad . . . . .	69
3.3.2	Aceleración . . . . .	71
3.3.3	Acelerador . . . . .	72
3.3.4	Freno . . . . .	73
3.3.5	Base de Reglas para el Acelerador . . . . .	73
3.3.6	Base de Reglas para el Freno . . . . .	74
3.4	Experimentación . . . . .	75
3.4.1	Adaptación a Cambios de Velocidad . . . . .	76
3.4.2	Mantenimiento de Velocidad Fija . . . . .	78
3.4.3	Comparación con un Humano . . . . .	80
3.5	Conclusiones . . . . .	81
<b>4</b>	<b>Ajuste del Control de Dirección con Algoritmos Genéticos</b>	<b>83</b>
4.1	Motivación . . . . .	84
4.2	Captura y Procesamiento de la Información . . . . .	86
4.2.1	Variables de Entrada y Salida . . . . .	86
4.2.2	Monitorización de Datos . . . . .	88
4.2.3	Procesamiento de los Datos . . . . .	89
4.3	Representación de los Controladores Difusos . . . . .	91
4.3.1	Representación del Conjunto de Etiquetas . . . . .	92
4.3.2	Representación de la Base de Reglas . . . . .	94
4.4	Método de Ajuste Genético . . . . .	96
4.4.1	Función Objetivo . . . . .	99
4.5	Experimentación y Resultados . . . . .	100
4.5.1	Controladores Obtenidos . . . . .	101
4.5.2	Experimentación . . . . .	105
4.5.3	Comparación con Conductores Humanos . . . . .	110
4.6	Conclusiones . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Conducción Competitiva en Entornos Simulados</b>	<b>113</b>
5.1	Motivación . . . . .	114
5.2	El Entorno de Simulación TORCS . . . . .	116
5.2.1	Información Sensorial . . . . .	118

## CONTENIDO

---

5.3	Arquitectura de Control Implementada . . . . .	121
5.3.1	Control de Marchas . . . . .	124
5.3.2	Velocidad Objetivo . . . . .	125
5.3.3	Control de Pedales . . . . .	128
5.3.4	Control de Volante . . . . .	129
5.3.5	Gestor de Oponentes . . . . .	132
5.3.6	Módulo de Aprendizaje . . . . .	134
5.4	Experimentación y Resultados . . . . .	137
5.4.1	Experimentación de Laboratorio . . . . .	138
5.4.2	El 2009 Simulated Car Racing Championship . . .	151
5.5	Conclusiones . . . . .	164
<b>6</b>	<b>Conclusions and Future Work</b>	<b>167</b>



## **CONTENIDO**

---

# Índice de Figuras

1.1	Clasificación de las técnicas englobadas por la Hard/Soft Computing. . . . .	5
2.1	Evolución del parque de vehículos en España. . . . .	18
2.2	Número de víctimas mortales de accidentes en España. . .	19
2.3	Vehículos autónomos utilizados en el proyecto VaMoRs-P (izquierda) y MuCAR-3 (derecha). . . . .	24
2.4	Vehículos del proyecto LaRA. . . . .	25
2.5	Vehículos autónomos MobLab (izquierda) y ARGO (derecha). 26	
2.6	Imágenes del viaje realizado por un vehículo autónomo del <i>VisLab</i> . . . . .	26
2.7	Vehículos utilizados por el grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla. . . . .	28
2.8	Vehículo <i>Stanley</i> , ganador del 2005 DARPA Grand Challenge. . . . .	28
2.9	Caravana de vehículos automáticos del PATH. . . . .	29
2.10	Vehículos autónomos de la Universidad Carnegie Mellon NavLab5 (izquierda) y NavLab11 (derecha). . . . .	30
2.11	Nissan ASV-4 equipado con sistemas de comunicación para la reducción de accidentes. . . . .	31
2.12	Vista interna del vehículo de pruebas desarrollado por PReVENT. . . . .	33
2.13	Vehículo (izquierda) y Interfaz (derecha) implementados por COOPERS. . . . .	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.14	Representación conceptual de las aspiraciones del proyecto GeoNet. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: Comunicación de la ruta más corta, información de la presencia de accidentes, altura permitida, abandono de carril dedicado, notificación de ruta alternativa por emergencia y descarga automática de mapas según localización. . . . .	35
2.15	Representación del marco de aplicación del proyecto REPOSIT. . . . .	36
2.16	Ejemplos de CyberCar. . . . .	38
2.17	Vista aérea de ZOCO. . . . .	45
2.18	Mejoras realizadas sobre ZOCO en los últimos años. Trazado adicional (arriba), Rotonda (centro) y Semáforos (abajo). . . . .	46
2.19	Plano esquemático de ZOCO. . . . .	47
2.20	Babieca y Rocinante. . . . .	48
2.21	Clavileño y Platero. . . . .	48
2.22	Molinero. . . . .	49
2.23	Fotografía de la instrumentación de Clavileño. . . . .	50
2.24	Módulos Funcionales del Paradigma de Control . . . . .	51
2.25	Arquitectura de control implementada en AUTOPIA. . . . .	52
2.26	Mapa de un recorrido que incluye curvas de diferentes radios. . . . .	53
2.27	Representación esquemática de un sistema difuso. . . . .	55
3.1	Esquema de funcionamiento del sistema de control del acelerador. . . . .	67
3.2	Esquema de funcionamiento del sistema de control del freno. . . . .	67
3.3	Válvula selectora entre sistema manual-automático (izquierda). Sistema de frenado electro hidráulico situado en el hueco de la rueda de repuesto del vehículo (derecha). . . . .	68
3.4	Diagrama de bloques para el control de velocidad . . . . .	70
3.5	Funciones de pertenencia difusas para la entrada <i>Error de Velocidad</i> . . . . .	71
3.6	Funciones de pertenencia difusas para la entrada <i>Aceleración</i> . . . . .	72
3.7	Singletons utilizados para codificar la salida <i>Acelerador</i> . . . . .	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.8	Singletons utilizados para codificar la salida <i>Freno</i> . . . . .	73
3.9	Superficie de control del acelerador del vehículo. . . . .	75
3.10	Superficie de control del acelerador del vehículo. . . . .	76
3.11	Resultados experimentales de la prueba con velocidades cambiantes. . . . .	77
3.12	Entradas y salidas del controlador en la prueba a 10 km/h. . . . .	78
3.13	Entradas y salidas del controlador en la prueba a 25 km/h. . . . .	79
3.14	Resultados experimentales de la prueba a 15 km/h (ar- riba) y 20 km/h (abajo). . . . .	80
4.1	Representación gráfica del error lateral y angular. . . . .	87
4.2	Esquema de Signos empleados a efectos de control. . . . .	88
4.3	Línea de referencia a seguir por los conductores. . . . .	89
4.4	Nube de puntos obtenida tras pruebas con conductores humanos. . . . .	89
4.5	Conjunto de entrenamiento utilizado para estimar el controlador difuso. . . . .	91
4.6	Representación de 3 etiquetas trapezoidales por medio de 4 valores reales. . . . .	92
4.7	Representación de 5 etiquetas trapezoidales por medio de 8 valores reales. . . . .	93
4.8	21 Singletons utilizados para codificar la salida. . . . .	94
4.9	Diagrama de flujo del funcionamiento del método de ajuste. . . . .	97
4.10	Ejemplo de modificación de una etiqueta para generar las poblaciones iniciales. . . . .	98
4.11	Ejemplo ( $\epsilon = 3$ ) de modificación de un consecuente para generar las poblaciones iniciales. . . . .	98
4.12	Conjuntos de etiquetas de controladores: $3M$ (arriba), $3C$ (centro) y $3T$ (abajo); Error lateral (izquierda) y Error angular (derecha). . . . .	102
4.13	Conjuntos de etiquetas de controladores: $5M$ (arriba), $5C$ (centro) y $5T$ (abajo); Error lateral (izquierda) y Error angular (derecha). . . . .	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.14	Superficies de control obtenidas. Controladores con tres (arriba) y con cinco (abajo) etiquetas por entrada. Controladores con base de reglas <i>Marginal</i> (izquierda), <i>Central</i> (centro) y <i>Total</i> (derecha).	105
4.15	Experimentación con controlador de base de reglas <i>Marginal</i> para 3 funciones de pertenencia por entrada.	106
4.16	Experimentación con controlador de base de reglas <i>Central</i> para 3 funciones de pertenencia por entrada.	106
4.17	Experimentación con controlador de base de reglas <i>Total</i> para 3 funciones de pertenencia por entrada.	107
4.18	Experimentación con controlador de base de reglas <i>Marginal</i> para 5 funciones de pertenencia por entrada.	107
4.19	Experimentación con controlador de base de reglas <i>Central</i> para 5 funciones de pertenencia por entrada.	108
4.20	Experimentación con controlador de base de reglas <i>Total</i> para 5 funciones de pertenencia por entrada.	108
4.21	Resultados comparativos (Error angular promedio) entre los conductores y los controladores difusos.	110
4.22	Resultados comparativos (Error lateral promedio) entre los conductores y los controladores difusos.	110
5.1	Entorno de Simulación TORCS	117
5.2	Esquema de la arquitectura diseñada para la competición en WCCI-2008	118
5.3	Esquema de funcionamiento del conjunto de sensores que miden distancias a los bordes.	119
5.4	Esquema de funcionamiento del conjunto de sensores que miden distancias a los oponentes.	120
5.5	Representación gráfica de los sensores de posicionamiento.	121
5.6	Esquema Global de la Arquitectura.	122
5.7	Representación gráfica de situación que requiere marcha atrás (izquierda) y momento en que la situación cesa (derecha).	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

5.8	Funciones de pertenencia utilizadas para codificar cada una de las variables de entrada. . . . .	127
5.9	Singletons utilizados para codificar la salida. . . . .	127
5.10	Representación gráfica de las acciones sobre los pedales. . .	129
5.11	Representación gráfica de la acción sobre el volante cuando el vehículo se encuentra fuera de la pista . . . . .	131
5.12	Representación gráfica de la acción sobre el volante cuando el vehículo utiliza marcha atrás. . . . .	131
5.13	Esquema de funcionamiento del reconocedor de salidas de vía. . . . .	135
5.14	Representación gráfica del detector de colisiones. . . . .	136
5.15	Representación gráfica de la detección de rectas largas. . .	137
5.16	Pistas utilizadas durante la competición de 2008 junto a sus longitudes y anchuras. . . . .	139
5.17	Pistas utilizadas durante la competición de 2008. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: <i>Ruudskogen, Street – 1, D – Speedway, CG Speedway 1, E – Track3</i> y <i>B – Speedway</i> . . . . .	140
5.18	Velocidad media (km/h) obtenida por el controlador propuesto frente al resto de entradas. . . . .	141
5.19	Comparativa de ambos controles de marchas sobre <i>D – Speedway</i> . Recorrido de dos vueltas. . . . .	145
5.20	Comparativa de ambos controles de marchas sobre <i>E – Track3</i> . Recorrido de dos vueltas. . . . .	145
5.21	Posición en carrera en solitario (azul) y en carrera con oponentes (rojo). En el eje X: $P = Presentado, i = Bot_i$ .	150
5.22	Aspecto del vehículo utilizado durante el campeonato. . .	155
5.23	Trazada de las pistas utilizadas durante la competición en el CEC-2009. . . . .	156
5.24	Captura de pantalla de las pistas <i>Michigan</i> (izquierda), <i>Alpine – 2</i> (centro) y <i>Corkscrew</i> (derecha). . . . .	156
5.25	Trazada de las pistas utilizadas durante la competición en el GECCO-2009. . . . .	158

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

5.26	Captura de pantalla de las pistas <i>Dirt – 3</i> (izquierda), <i>Alpine – 1</i> (centro) y <i>E – road</i> (derecha). . . . .	158
5.27	Trazada de las pistas utilizadas durante la competición en el CIG-2009. . . . .	161
5.28	Captura de pantalla de las pistas <i>Forza</i> (izquierda), <i>Migrants</i> (centro) y <i>Buzzard</i> (derecha). . . . .	161

# Índice de Tablas

2.1	Coordenadas UTM de ZOCO . . . . .	47
2.2	Modificadores Lingüísticos soportados por ORBEX . . . . .	57
3.1	Tabla comparativa entre el conductor humano y el sistema presentado. . . . .	80
4.1	Casos cubiertos por la base de reglas <i>Central</i> (C) y <i>Marginal</i> (M). Las etiquetas <i>MuyIZQ</i> y <i>MuyDER</i> no serán utilizada en controladores de 3 etiquetas por entrada. 95	95
4.2	Número de reglas para cada combinación (Número de Funciones de Pertenencia/Tipo de Base de Reglas) posible. 95	95
4.3	Representación tabular de la base de reglas del controlador <i>3M</i> (arriba), <i>3C</i> (centro) y <i>3T</i> (abajo). . . . .	103
4.4	Representación tabular de la base de reglas del controlador <i>5M</i> (arriba), <i>5C</i> (centro) y <i>5T</i> (abajo). . . . .	104
4.5	Distancia, tiempo y velocidades medias y máximas reg- istradas durante la experimentación. . . . .	109
5.1	Sensores de posicionamiento en la pista. . . . .	120
5.2	Sensores de estado de la carrera. . . . .	120
5.3	Sensores de información sobre el estado interno del vehículo.121	121
5.4	Valores máximos y mínimos para realizar cambios de marchas. . . . .	125
5.5	Tolerancias e incrementos utilizados para adelantar opo- nentes. . . . .	133



## ÍNDICE DE TABLAS

---

5.6	Tolerancias e incrementos utilizados para evitar colisiones con oponentes. . . . .	133
5.7	Comparación de distancia recorrida durante 200s con datos disponibles de la competición de 2008. . . . .	141
5.8	Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista <i>Ruudskogen</i> . . . . .	142
5.9	Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista <i>Street-1</i> . . . . .	143
5.10	Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista <i>D-Speedway</i> . . . . .	143
5.11	Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista <i>CG-Speedway1</i> . . . . .	143
5.12	Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista <i>E-Track3</i> . . . . .	143
5.13	Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista <i>B-Speedway</i> . . . . .	144
5.14	Tiempo en segundos requerido en completar 20 vueltas en cada uno de los circuitos y <i>posición</i> en la pista. . . . .	149
5.15	Número de adelantamientos y daño sufrido en cada una de las carreras. . . . .	151
5.16	Resultados de la fase clasificatoria en la competición del CEC-2009. . . . .	156
5.17	Resultados de la fase final de la competición del CEC-2009.	157
5.18	Resultados de la fase clasificatoria en la competición del GECCO-2009. . . . .	159
5.19	Resultados de la fase final de la competición del GECCO-2009. . . . .	159
5.20	Resultados de la fase clasificatoria en la competición del CIG-2009. . . . .	162
5.21	Resultados de la fase final de la competición del CIG-2009.	162
5.22	Resultados de carreras con oponentes obtenidos a lo largo del 2009 Simulated Car Racing Championship. . . . .	163
5.23	Posiciones obtenidas en las fases clasificatorias y final para cada uno de los cuatro primeros clasificados. . . . .	164





# Resumen

A pesar de que los vehículos son cada vez más seguros, el número de fallecidos en carretera aumenta año tras año. Por otro lado, nos encontramos con que las vías de circulación están cada vez más saturadas, y la posibilidad de construir más vías se hace poco a poco, menos posible. Esto hace que la tendencia actual sea la de añadir al vehículo sistemas con la capacidad de tomar el control en determinadas situaciones, con el fin de reducir el número de accidentes y permitir un mejor aprovechamiento de las vías de circulación. Todo ello con la vista puesta siempre en una futura automatización de todas las posibles situaciones derivadas de la conducción.

En esta tesis se presentan tres aplicaciones prácticas de la *Soft Computing* en el campo de los vehículos autónomos. En primer lugar se presenta un controlador difuso capaz de controlar el acelerador y freno de un vehículo autónomo a bajas velocidades, haciéndolo apto para su uso en entornos urbanos. En segundo lugar, mediante algoritmos genéticos, se optimizará un conjunto de controladores difusos encargados de controlar el volante del vehículo. En tercer lugar se diseñará e implementará una arquitectura de conducción completa, capaz de controlar un vehículo simulado en condiciones competitivas, dicha arquitectura dispondrá de un núcleo difuso encargado de calcular la velocidad máxima permitida en función de la trazada de la pista.

Las tres aplicaciones han sido diseñadas e implementadas con lógica difusa como base, dado que la conducción de vehículos no deja de ser una tarea fácilmente describable mediante sentencias del tipo *si el vehículo está desviado hacia la izquierda mueve el volante hacia la derecha*. Por

otra parte, las tres aplicaciones han sido probadas, reportando excelentes resultados. En los casos de vehículos reales (control de pedales y volante), la bondad de los controladores ha sido comparada con conductores humanos, mostrando que, si bien es sumamente difícil manejar un vehículo de manera óptima, las técnicas de *soft computing* permiten alcanzar (incluso mejorar) el comportamiento de las personas al volante. En el caso de la arquitectura para entornos competitivos simulados, ésta ha sido probada tanto con una amplia experimentación de laboratorio, donde se ha comparado con otras alternativas existentes, y compitiendo en un campeonato virtual, donde participaron hasta trece propuestas provenientes de distintos centros de investigación, así como haciendo uso de diferentes técnicas de inteligencia artificial y control; resultando la propuesta ganadora de tal evento.

# Abstract

In spite of the fact that vehicles are increasingly safe, the number of deaths in road accidents increases year by year, roads are becoming ever more saturated, and the possibility of building more is steadily becoming no longer a realistic option. For that reason, one of the current trends is the addition of systems to cars with the purpose of taking over control of the vehicle in certain situations, with the objective of reducing the number of accidents and allowing more efficient use of the roads. All this has the eventual aim of full automation of all the possible situations related to driving.

In this thesis, Soft Computing techniques are used in three practical applications in the field of autonomous vehicles. First, a fuzzy controller is presented that is capable of managing the throttle and brake pedals of an autonomous vehicle traveling at low speed, making it suitable for use in urban environments. Second, by means of genetic algorithms, a set of fuzzy controllers is optimized that are entrusted with the control of the steering wheel of the vehicle. Third, the design and implementation is presented of a complete driving architecture, capable of controlling a simulated vehicle in competitive environments. This architecture has a fuzzy based core, in charge of calculating the maximum permissible speed depending on the track shape.

The three applications were designed and implemented using fuzzy logic, since the task of driving vehicles can be easily described by means of sentences of the kind *if the vehicle deviates towards the left, then move the steering wheel towards the right*. All the applications have been extensively tested, with excellent results. In the cases involving real

vehicles (pedals and steering control), the performance of the controllers was compared with human drivers, concluding that, even if it is extremely difficult to handle a car in an optimal way, soft computing techniques allow one to reach (even to improve on) the performance of a person when driving. In the case of the architecture for competitive simulated environments, it was tested first by extensive laboratory experimentation in which it was compared with other existing proposals, and second by competing in a championship in which thirteen proposals took part, and ended up being the winner of the event.









# Capítulo 1

## Introducción

LA investigación y desarrollo de vehículos inteligentes es en la actualidad una disciplina bien asentada dentro del área de los *Sistemas Inteligentes de Transporte* (ITS). El objetivo de fabricar en serie vehículos que circulen sin conductor ya no se puede considerar tan utópico y se espera que estén disponibles en un plazo de unos 30 años. Aún así, sigue siendo necesario fomentar una investigación de base que, tratando los distintos aspectos de la conducción autónoma, tenga como propósito final la obtención de un vehículo capaz de conducirse automáticamente.

Uno de los objetivos fundamentales de los ITS es aplicar tecnologías de la información y la comunicación con el fin de obtener una conducción segura y eficiente. Hoy día, el desarrollo de este tipo de sistemas proporciona una oportunidad de mejorar la seguridad, eficiencia y comodidad en el transporte, ya sea por carretera, aéreo, marítimo o ferroviario (Jones 01).

Técnicas de control clásicas han sido, hasta hace poco, la manera más usual de manejar sistemas complejos relacionados con la conducción autónoma (Bünte 02; Richards 06). Una característica de esas técnicas es la necesidad de disponer de un modelo del sistema así como de un conjunto de ecuaciones que describan su comportamiento; ocasionalmente esto puede suponer una limitación cuando el sistema a controlar es demasiado complejo y no existe un modelo matemático asociado (Rajamani 06).

## 1. INTRODUCCIÓN

---

La linealización de sistemas complejos es un problema clásico en teoría de control (Ackermann 90). Dependiendo de la complejidad del sistema a modelar, un modelo puede ser más o menos realista pero con limitaciones en su eficiencia dependiendo de su realismo (Sussmann 94).

El compromiso entre eficiencia y complejidad es el principal factor en el control de este tipo de sistemas. Una forma de solventar problemas de control de sistemas no lineales es el uso de técnicas de inteligencia artificial.

La Lógica Difusa (Zadeh 65) surge de la necesidad de controlar sistemas de los que no se tiene más que descripciones lingüísticas, incompletas e inexactas basadas muchas veces en apreciaciones subjetivas de las variables de control (Zadeh 99). La lógica difusa se basa en el concepto de conjunto difuso, donde la idea principal es que el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto se define en el intervalo  $[0,1]$ , en lugar de a uno de los valores  $\{0,1\}$ . Desde sus inicios ha sido aceptada como una metodología satisfactoria para modelar y controlar sistemas complejos o no lineales (Takagi 85).

Los controladores difusos permiten un enfoque al control de este tipo de sistemas del mismo modo que lo haría una persona, no requiriendo del modelado matemático de los métodos de diseño más usuales (Driankov 93). Es por esto por lo que los controladores difusos representan una alternativa efectiva y razonable a las técnicas de control clásicas en lo que a sistemas complejos se refiere.

Por otra parte, las acciones involucradas en la conducción de un vehículo pueden ser fácilmente descritas mediante sentencias del tipo: *si el vehículo está desviado hacia la derecha entonces mueve el volante hacia la izquierda*. En la literatura, desde sus inicios, la lógica difusa ha probado ser eficaz y eficiente cuando es aplicada a problemas del mundo real (Larsen 80) (King 77) (Ross 04), lo que involucra una alta tolerancia a fallos, imprecisiones, ruido y no linealidades, así como un bajo tiempo de respuesta (Liu 09).

Hoy en día la lógica difusa se define en el contexto de la *Soft Computing*, el término *Soft Computing* es definido en primera instancia como un conjunto de metodologías cuyo objetivo es el de explotar la toler-

ancia a la imprecisión y la incertidumbre para conseguir manejabilidad, robustez y soluciones de bajo coste y mejores representaciones de la realidad (Zadeh 94).

Una definición más reciente (Verdegay 08) establece que la *Soft Computing* engloba un conjunto de técnicas y métodos que permiten tratar las situaciones prácticas reales de la misma forma que suelen hacerlo los seres humanos, es decir, en base a inteligencia, sentido común, consideración de analogías, aproximaciones, etc. De esta manera, se considera la *Soft Computing* como la antítesis de lo que se denomina *Hard Computing*. Según los autores:

*La Soft Computing es una familia de métodos de resolución de problemas cuyos primeros miembros serían el razonamiento aproximado y los métodos de aproximación funcional y de optimización, incluyendo los de búsqueda.*

En la figura 1.1 puede verse una diferenciación de los métodos que abarcan, respectivamente, la *Hard* y *Soft Computing*.

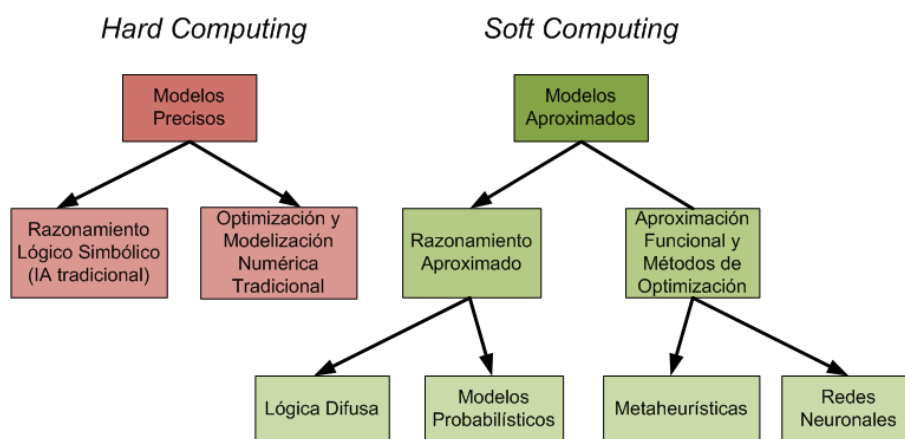


Figura 1.1: Clasificación de las técnicas englobadas por la Hard/Soft Computing.

Dentro de las metaheurísticas englobadas dentro de los métodos de aproximación/optimización, podemos encontrar, entre otros, métodos tales como el enfriamiento simulado (Kirkpatrick 83) (Cerny 85), la búsqueda

## 1. INTRODUCCIÓN

---

queda tabú (Glover 93) (Glover 03), el procedimiento de búsqueda adaptativo aleatorizado y avaricioso, conocido comúnmente por *GRASP* (acrónimo inglés *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (Feo 95), colonias de hormigas (Dorigo 05), optimización por colonias de partículas (Kennedy 95), búsqueda por vecindarios variables (Mladenovic 97) y computación evolutiva, la cual se basa en los principios de la selección natural, como se establece en (Holland 75), dentro de esta se han desarrollado multitud de métodos y algoritmos, entre los que destacan la programación evolutiva (Fogel 66), las estrategias evolutivas (Beyer 02) y los algoritmos genéticos (Goldberg 89).

Las técnicas de computación evolutiva en general, y los Algoritmos Genéticos en particular, son métodos de búsqueda de propósito general que usan principios basados en poblaciones genéticas naturales para evolucionar soluciones a problemas. La idea principal es mantener una población de cromosomas, los cuales representan soluciones candidatas a un problema dado, dicha población evoluciona con el tiempo mediante un proceso de competición y variación controlada. Cada cromosoma de la población tiene asociado un *fitness* que determinará qué cromosomas son usados para crear otros nuevos mediante operadores de cruce y mutación.

Todas estas metodologías, englobadas dentro del área de la *Soft Computing* han demostrado estar especialmente indicadas cuando tratamos de emular el comportamiento humano al controlar sistemas complejos, tales como la conducción.

El trabajo aquí presentado se engloba dentro del denominado Programa AUTOPIA, formado por una serie de proyectos dedicados a la investigación en el campo de la conducción automática de vehículos. Este programa trata de recoger la experiencia acumulada en el ámbito de la robótica móvil en el *Centro de Automática y Robótica*<sup>1</sup>, centro mixto entre la *Universidad Politécnica de Madrid* y el *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* (UPM-CSIC). Principalmente, la filosofía de trabajo se orienta al empleo de técnicas de Soft Computing para el control de vehículos, en concreto de métodos de lógica difusa (Naranjo 07).

Dentro de los Sistemas de Transporte Inteligentes, el presente trabajo

---

<sup>1</sup><http://www.car.upm-csic.es/>

se centra en el transporte por carretera y, concretando más, en vehículos inteligentes, lo que pasa por el diseño, desarrollo y prueba de vehículos autónomos. Estos vehículos deben estar equipados con la instrumentación necesaria para controlar unos o todos los actuadores de un vehículo sin la intervención externa de la misma manera que para percibir el entorno. Se trabajará en la implantación de técnicas de soft computing para el desempeño de tareas de control de vehículos, tanto en entornos reales como simulados.

### 1.1 Propósito

A pesar de que los vehículos son cada vez más seguros, el número de accidentes y fallecidos en carretera aumenta año tras año. Por otro lado, nos encontramos con que las vías de circulación están cada vez más saturadas, y la posibilidad de construir más vías se hace poco a poco, menos posible. Es por ello que la tendencia actual es la de añadir al vehículo sistemas con la capacidad de tomar el control en determinadas situaciones, con el fin de reducir el número de accidentes y permitir un mejor aprovechamiento de las vías de circulación. Todo ello con la vista puesta siempre en una futura automatización de todas las posibles situaciones derivadas de la conducción.

El objetivo global de la presente tesis es la demostración de cómo las técnicas de *Soft Computing* pueden resultar de gran utilidad cuando son aplicados a diferentes problemas derivados de la conducción autónoma de vehículos.

Objetivos específicos del trabajo aquí presentado se orientan hacia dos ramas bien diferenciadas: 1) La utilización de técnicas avanzadas de *Soft Computing*, principalmente lógica difusa y algoritmos genéticos, para la realización del guiado de vehículos inteligentes de conducción segura, precisa y lo más parecida a la que realizaría un conductor humano. 2) La exploración de la lógica difusa en entornos de simulación de vehículos competitivos, que permiten la realización de estrategias difícilmente replicables en vehículos reales y en instalaciones al alcance de grupos de investigación.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Ambos objetivos son abordados mediante tres aplicaciones prácticas de la *Soft Computing* sobre vehículos inteligentes bien diferenciadas:

1. El diseño e implementación de un doble controlador difuso capaz de actuar cooperativamente sobre el acelerador y freno de un vehículo industrial, controlando su velocidad en un rango apropiado para una conducción en zonas urbanas. Este problema ha sido levemente tratado tanto desde el punto de vista académico como industrial, dadas las fuertes no linealidades que presenta un vehículo a tales velocidades, pero supone un gran avance en lo que a se refiere a seguridad, comodidad y confort en la conducción en cascos urbanos.
2. El ajuste mediante algoritmos genéticos iterativos de la base de reglas y conjunto de etiquetas que definen un controlador difuso capaz de controlar el volante de un vehículo industrial. El ajuste se basará, no sólo en una buena imitación del comportamiento humano al volante del vehículo y un buen seguimiento de la ruta deseada, sino también buscará el confort de sus posibles ocupantes mediante la suavidad en las acciones llevadas a cabo.
3. El diseño e implementación de una arquitectura de control completa capaz de manejar un vehículo simulado en situaciones competitivas, que requieren contemplar comportamientos tales como circular a la mayor velocidad posible o adelantar a oponentes de manera arriesgada en situaciones peligrosas. Vistos los buenos resultados se decidió participar con la propuesta en el *2009 Simulated Car Racing Championship*, que englobó tres competiciones de coches simulados en tres congresos internacionales del más alto nivel donde cosechó excelentes resultados en la práctica de la conducción competitiva.

### 1.2 Difusión de Resultados

La participación del doctorando en diferentes proyectos, tanto nacionales como internacionales, así como la realización de estancias internacionales, ha permitido colaborar con grupos de centros internacionales como *TNO*



## 1.2 Difusión de Resultados

---

en Holanda, *INRIA* en Francia, *SRI International*, en Estados Unidos, *Politecnico di Milano* en Italia, al igual que con diferentes centros y universidades nacionales, permitiendo así el intercambio de ideas y opiniones con diferentes investigadores.

Fruto de la realización de la tesis aquí presentada, así como de los proyectos, estancias y colaboraciones realizadas, han surgido diferentes publicaciones en revistas de diversos campos como la mecánica, el control, la inteligencia artificial, la robótica o el transporte.

Directamente relacionadas con la presente tesis, se han derivado diferentes publicaciones, que pasamos a citar a continuación.

### Publicaciones en Revistas

---

TÍTULO Throttle and Brake Pedals Automation for Populated Areas  
AUTORES E. Onieva, V. Milanés, C. González, T. de Pedro, J. Perez, J. Alonso  
PUBLICACIÓN ROBOTICA  
ESTADO Publicado. Vol. 28, pp. 509-516, 2010

---

TÍTULO Soft Computing Techniques for Autonomous Driving  
AUTORES E. Onieva, V. Milanés, J. Perez, J. Alonso, T. de Pedro  
PUBLICACIÓN Mathware and Soft Computing  
ESTADO Publicado. Vol. 16, pp. 45-58, 2009

---

TÍTULO Estimación de un Control Lateral Difuso de Vehículos  
AUTORES E. Onieva, V. Milanés, J. Perez, T. de Pedro  
PUBLICACIÓN Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial  
ESTADO Publicado. Vol. 7, No. 2, pp. 91-98, 2010

---

TÍTULO Automatic lateral control for unmanned vehicles via genetic algorithms  
AUTORES E. Onieva, J.E. Naranjo, V. Milanés, J. Alonso, R. García, J. Pérez  
PUBLICACIÓN Applied Soft Computing  
ESTADO Publicado. Vol. 11, pp. 1303-1311, 2011

---

TÍTULO The 2009 Simulated Car Racing Championship  
AUTORES D. Loiacono, P.L. Lanzi, J. Togelius, E. Onieva, D.A. Pelta, M.V. Butz, T.D. Lönneker, L. Cardamone, D. Perez, Y. Sáez, M. Preuss, J. Quadflieg  
PUBLICACIÓN IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games  
ESTADO Publicado. Vol. 2, No. 2, pp. 131-147, 2010

---

TÍTULO Electro-Hydraulic Braking System for Autonomous Vehicles  
AUTORES V. Milanés, C. Gonzalez, J. Naranjo, E. Onieva, T. de Pedro  
PUBLICACIÓN International Journal of Automotive Technology  
ESTADO Publicado. Vol. 11, pp. 89-95, 2010

## 1. INTRODUCCIÓN

---

---

TÍTULO Control de Velocidad Adaptativo para Entornos Urbanos Congestionados  
AUTORES V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez, T. de Pedro, C. Gonzalez  
PUBLICACIÓN Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial  
ESTADO Publicado. Vol. 6, pp. 66-73, 2009

---

TÍTULO Sistema de ayuda a la conducción en curvas para vehículos reales  
AUTORES J. Pérez, V. Milanés, J. Villagrà, E. Onieva, C. González  
PUBLICACIÓN DYNA  
ESTADO Aceptado y Pendiente de Publicación

---

TÍTULO A fuzzy-rule-based driving architecture for non-player characters in a car racing game  
AUTORES E. Onieva, D. A. Pelta, V. Milanés, J. Pérez  
PUBLICACIÓN Soft Computing  
ESTADO Aceptado y Pendiente de Publicación

---

### Publicaciones en Congresos

---

TÍTULO A modular parametric architecture for the TORCS racing engine  
AUTORES E. Onieva, D. Pelta, J. Alonso, V. Milanés, J. Pérez  
CONGRESO IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, 2009

---

TÍTULO Ajuste Genético de Controladores Difusos para Conducción Autónoma  
AUTORES E. Onieva, V. Milanés, J. Alonso, J. Pérez, T. de Pedro  
CONGRESO XIV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, 2008<sup>1</sup>

---

TÍTULO Reglas Difusas para el Control de un Vehículo en la 2009 Simulated Car Racing Competition: un Enfoque Ganador  
AUTORES E. Onieva, D. Pelta, J. Pérez, J. Alonso, V. Milanés  
CONGRESO XV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy, 2010<sup>2</sup>

---

TÍTULO Autonomous car fuzzy control modeled by iterative genetic algorithms  
AUTORES E. Onieva, J. Alonso, J. Pérez, V. Milanés, T. de Pedro  
CONGRESO IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2009

---

TÍTULO Conducción Autónoma en Circuito de Dificil Maniobrabilidad  
AUTORES V. Milanés, E. Onieva, T. de Pedro, R. García, J. Alonso, J. Pérez, C. González  
CONGRESO XXIX Jornadas de Automática, 2008

---

TÍTULO Electric power controller for steering wheel management in electric cars  
AUTORES V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. González, T. de Pedro  
CONGRESO Compatability and Power Electronics, 2009

---

<sup>1</sup>Mención de Honor al Mejor Artículo Escrito por un Estudiante.

<sup>2</sup>Premio al Mejor Artículo Escrito por un Estudiante.

## 1.2 Difusión de Resultados

---

---

TÍTULO Design and Implementation of a Neuro-Fuzzy System for Longitudinal Control of Autonomous Vehicles  
AUTORES J. Pérez, A. and Gajate, V. Milanés, E. Onieva, M. Santos  
CONGRESO IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2010

---

Publicaciones relacionadas en menor medida con el trabajo aquí presentado se pasan a citar a continuación.

### Publicaciones en Revistas

---

TÍTULO Comunicaciones Inalámbricas en Sistemas Inteligentes de Transporte  
AUTORES V. Milanés, J. Alonso, E. Onieva, J. Pérez, C. Gonzalez, T. de Pedro, R. García  
PUBLICACIÓN Automática e Instrumentación  
ESTADO Publicado. Vol. 411, pp. 76-80, 2009

---

TÍTULO Sistema de Asistencia a la conducción basado en una red de comunicaciones de bajo coste  
AUTORES V. Milanés, E. Onieva, B. Vinagre, C. Gonzalez, J. Pérez, J. Alonso  
PUBLICACIÓN DYNA  
ESTADO Publicado. Vol. 85, pp. 245-254, 2010

---

TÍTULO Controller for Urban Intersections Based on Wireless Communications and Fuzzy Logic  
AUTORES V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. Gonzalez  
PUBLICACIÓN IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems  
ESTADO Publicado. Vol. 11, No. 1, pp. 243-248, 2010

---

TÍTULO Lateral Power Controller for Unmanned Vehicles  
AUTORES V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. Gonzalez, T. de Pedro  
PUBLICACIÓN Electrical Review  
ESTADO Publicado. Vol. 86, pp. 207-211, 2010

---

TÍTULO Adelantamiento con vehículos autónomos en carreteras de doble sentido  
AUTORES J. Pérez, V. Milanés, J. Alonso, E. Onieva, T. de Pedro  
PUBLICACIÓN Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial  
ESTADO Publicado. Vol. 7, No. 3, pp. 25-33, 2010

---

TÍTULO Cascade Architecture for Lateral Control in Autonomous Vehicles  
AUTORES J. Pérez, V. Milanés, E. Onieva, C. González  
PUBLICACIÓN IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems  
ESTADO Aceptado y Pendiente de Publicación

---

TÍTULO Cartography For Cooperative Manoeuvres, Autopia's new Cartography System for Cooperative Manoeuvres among Autonomous Vehicles  
AUTORES J. Alonso, V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez, C. González, T. de Pedro

## 1. INTRODUCCIÓN

---

PUBLICACIÓN Journal of Navigation  
ESTADO Aceptado y Pendiente de Publicación

---

### Publicaciones en Congresos

---

TÍTULO A Frame for an Urban Traffic Control Architecture  
AUTORES T. de Pedro, R. García, C. González, J. Alonso, E. Onieva, V. Milanés, J. Pérez  
CONGRESO Bioinspired Applications in Artificial and Natural Computation, 2009

---

TÍTULO Overtaking opponents with blocking strategies using fuzzy logic  
AUTORES E. Onieva, L. Cardamone, D. Loiacono, P.L. Lanzi  
CONGRESO IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, 2010<sup>1</sup>

---

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, R. García  
CONGRESO V Simposio de Control Inteligente, 2009

---

TÍTULO An experiment to improve the safety and the flow of traffic in a cross-roads by V2V communications  
AUTORES J. Alonso, E. Onieva, R. García, T. de Pedro  
CONGRESO Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2009

---

TÍTULO V2I-Based Architecture for Information Exchange among Vehicles  
AUTORES V. Milanés, J. Godoy, J. Pérez, B. Vinagre, C. González, E. Onieva, J. Alonso  
CONGRESO 7th Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2010

---

TÍTULO Modularity, adaptability and evolution in the AUTOPIA architecture for control of autonomous vehicles  
AUTORES J. Pérez, A. and Gajate, V. Milanés, E. Onieva, M. Santos  
CONGRESO IEEE International Conference on Mechatronics, 2009

---

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, C. González  
CONGRESO XXIX Jornadas de Automática, 2008

---

---

<sup>1</sup>Seleccionado para la sesión *Best Papers* dentro del congreso.

### 1.3 Estructura del Trabajo

La memoria aquí presentada sigue la siguiente estructura:

En el **Capítulo 2** se presenta el estado actual de las técnicas y tecnologías en lo que se refiere a los Sistemas de Transporte Inteligente, tanto desde el punto de vista comercial como en el sector de la investigación. Se hará hincapié tanto en los grupos y proyectos de investigación más relevantes del área a nivel mundial como en la visión de dichos sistemas por los fabricantes de automóviles más importantes. Finalmente, se presentará el grupo *AUTOPIA*, dentro del cual se desarrolla el trabajo presentado.

En el **Capítulo 3** se presenta el diseño, implementación y prueba de un doble controlador difuso capaz de actuar cooperativamente sobre los pedales de acelerador y freno de un vehículo industrial con el fin de mantener una velocidad prefijada. Se prueba la aptitud del controlador para situaciones de control a bajas velocidades, situaciones no contempladas por los actuales sistemas de control de velocidad instalados en algunos vehículos, haciéndolo así práctico para entornos urbanos. Por otra parte se mide el grado de bondad frente a un conductor humano, cuando éste realiza la misma tarea.

En el **Capítulo 4** se implementa un doble algoritmo genético iterativo capaz de inferir controladores difusos capaces de controlar el volante de un vehículo. Los controladores deben de imitar el comportamiento humano al volante, así como proporcionar una conducción confortable para los posibles ocupantes del vehículo, por medio de la garantía del mantenimiento de acciones de control suaves.

En el **Capítulo 5** se presenta una arquitectura completa de control de vehículos. Su diseño modular permite la modificación o adición de módulos o comportamientos. La arquitectura se orienta a entornos competitivos simulados, por lo que contempla situaciones de circulación a altas velocidades o adelantamientos *poco rigurosos*. La propuesta es presentada a un campeonato a nivel mundial donde compite con propuestas de todo el mundo, con excelentes resultados.

El **Capítulo 6** concluye el trabajo presentado y comenta las reflexio-

## 1. INTRODUCCIÓN

---

nes extraídas a lo largo de todo el trabajo, así como se detallan futuras líneas de investigación.

Finalmente se recoge la **Bibliografía** necesaria para alcanzar los conocimientos sobre los temas aquí tratados que ha utilizado el doctorando y que han sido referenciados a lo largo de la presente tesis.

## Capítulo 2

# Estado del Arte

EN este capítulo se presenta una revisión del estado del arte en lo referente a Sistemas de Transporte Inteligentes, así como a Vehículos Inteligentes, rama en la que se centra la presente tesis.

En la **sección 2.1** se hará una presentación general de los sistemas inteligentes de transporte, profundizando en el transporte por carretera y, dentro de éste, en los vehículos inteligentes. En la **sección 2.2** se hará una revisión y presentación de los grupos y organizaciones dedicadas a la investigación del área, presentando sus principales intereses. En la **sección 2.3** se enumerarán y explicarán objetivos de los proyectos más relevantes dentro de este ámbito. En la **sección 2.4** se hará una revisión de cómo las principales marcas fabricantes de vehículos incorporan algunos de los sistemas inteligentes en sus productos. Finalmente, en la **sección 2.5** se presenta el grupo *AUTOPIA*, marco de trabajo de la presente tesis, donde se detallarán los vehículos, la instrumentación, las instalaciones y el motor de inferencia difuso utilizados para el desarrollo del presente trabajo.

### 2.1 Los Sistemas Inteligentes de Transporte

Los Sistemas Inteligentes de transporte (ITS, Intelligent Transportation Systems) son el enlace entre tecnologías de la información y la comunicación con los vehículos y redes que transportan personas o mercancías.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

Definiciones de este término hechas por diferentes organismos e instituciones de gran relevancia son:

### **Departamento de Transporte de EEUU:**

*Los ITS consisten en la aplicación de la tecnología avanzada de computación, electrónica y comunicaciones para incrementar la seguridad y la eficiencia del transporte de superficie.*

### **IEEE Intelligent Transportation Systems Council:**

*Los ITS son aquellos que emplean conceptos de tecnología e ingeniería de sistemas para desarrollar y mejorar todo tipo de sistemas de transporte.*

### **Ministerio de Fomento Español:**

*Los ITS se pueden definir como un conjunto de aplicaciones avanzadas dentro de la tecnología informática, electrónica y de comunicaciones que, desde un punto de vista social, económico y medioambiental, están destinadas a mejorar la movilidad, seguridad y productividad del transporte, optimizando la utilización de las infraestructuras existentes, aumentando la eficiencia del consumo de energía y mejorando la capacidad del sistema de transportes.*

Las primeras aplicaciones de sistemas inteligentes aplicadas al transporte se desarrollaron en los años sesenta, principalmente para el transporte aéreo. Desde entonces, la aplicación de las tecnologías asociadas a los ITS se ha venido desarrollando con más o menos intensidad para las diferentes áreas o tipos de transporte:

1. **Infraestructura y servicios comunes:** el elemento principal de este área son los Sistemas Globales de Posicionamiento por Satélite o GNSS, los cuales proporcionan servicios de localización a escala global así como todo un mundo de aplicaciones asociadas, desde sistemas de control de flotas hasta la conducción automática. Esta tecnología desarrollada con fines militares la dominan los Estados



## 2.1 Los Sistemas Inteligentes de Transporte

---

Unidos con el sistema GPS, y Rusia con el sistema GLONASS. Además, la Unión Europea ha presentado un programa autónomo de radio-navegación por satélite denominado GALILEO<sup>1</sup>, se trata de un sistema global de navegación por satélite con el objeto de evitar la dependencia de los sistemas GPS y GLONASS. Al contrario de estos dos, será de uso civil. El sistema se espera poner en marcha en 2014 después de sufrir una serie de reveses técnicos y políticos para su puesta en marcha.

2. **Sistemas de información para el transporte:** el desarrollo de sistemas de información que estudien la oferta y la demanda en el ámbito del transporte es esencial para la planificación de futuras políticas de transporte así como para la especificación de los futuros focos de interés. En esta área, se englobaría la definición de arquitecturas, datos, estructuras de datos y modelos de aplicación a la hora de diseñar sistemas de información globales en el ámbito del transporte. El desarrollo de las tecnologías de la información está muy íntimamente ligado al de los sistemas inteligentes de transporte, como corrobora la propia definición de éstos.
3. **Transporte intermodal:** por transporte intermodal entendemos la combinación de diferentes medios de transporte a fin de lograr que los desplazamientos de personas o mercancías alcancen su destino. La finalidad principal de esta área es la obtención de un transporte sostenible mediante la coordinación exhaustiva de los diferentes medios disponibles.
4. **Transporte por carretera:** los accidentes de tráfico son en la actualidad una de las principales causas de mortalidad en los países desarrollados. Es por ello que la principal finalidad de esta área de trabajo es el desarrollo de sistemas que aumenten la seguridad en los vehículos públicos y privados a fin de reducir el alto índice de siniestralidad actual. Como aspectos secundarios se pueden incluir, entre otros, la mejora de las condiciones del tráfico o del impacto medioambiental.

---

<sup>1</sup>Agencia Espacial Europea <http://www.esa.int/export/esaCP/Spain.html>

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

5. **Transporte ferroviario:** aplicación de sistemas de comunicaciones y gestión de tráfico ferroviario a fin de mejorar su eficiencia y seguridad.
6. **Transporte aéreo:** especificación y evaluación de sistemas de control de tráfico aéreo, definiendo procesos de validación y asistiendo al desarrollo de sistemas de guiado de superficie en aeropuertos y sistemas de control.
7. **Transporte marítimo:** sistemas de gestión de tráfico marítimo y sistemas de información. El objetivo fundamental es el de la interconexión y coordinación de los diferentes sistemas de control de tráfico marítimo a fin de proporcionar operaciones marítimas eficientes y seguras.

En la siguiente sección se detallarán los aspectos referentes al *transporte por carretera*, ya que es el área en la que se engloba el presente trabajo dentro de los ITS.

### 2.1.1 El Transporte por Carretera

El transporte por carretera es, hoy en día, uno de los campos más importantes de los ITS. La creciente demanda en la utilización de transporte por carretera está causando en la actualidad que las infraestructuras existentes se encuentren al límite de su capacidad. En la figura 2.1 puede verse una evolución del parque de vehículos existente en España desde el año 1996 hasta el 2004 (DGT 05).

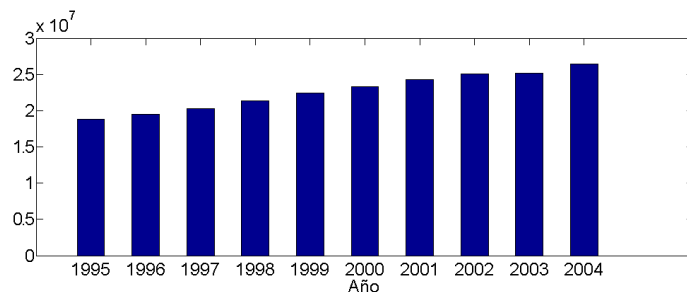


Figura 2.1: Evolución del parque de vehículos en España.

## 2.1 Los Sistemas Inteligentes de Transporte

---

Por otra parte, una de las mayores preocupaciones de los gobiernos es la de reducir el número de víctimas en carretera. Sólo en España, más de 2000 personas fallecieron durante 2008 por accidentes de tráfico (DGT 09), la figura 2.2 muestra una evolución de este número.

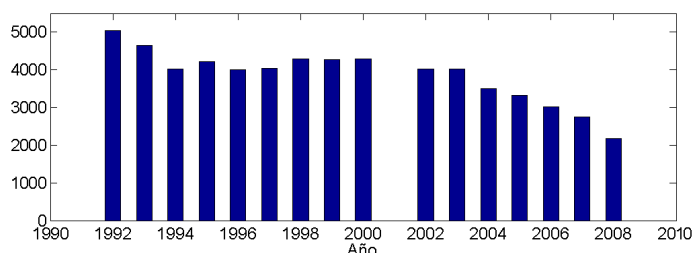


Figura 2.2: Número de víctimas mortales de accidentes en España.

La aplicación de ITS a este ámbito puede suponer una importante mejora para la resolución de la problemática asociada al transporte por carretera, principalmente en lo que se refiere a seguridad y congestión. Encontramos dos posibles vertientes tecnológicas a la hora de abordar dichos problemas:

1. **Infraestructuras inteligentes**, cuya finalidad es la de mejorar la seguridad del transporte público y privado desde el entorno de circulación de los vehículos, proporcionando instalaciones y servicios para el transporte más eficientes. Ejemplos de áreas de interés son:

- Centralizaciones semafóricas.
- Pago electrónico de peajes.
- Prevención de accidentes.
- Información de tráfico y viaje.
- Gestión de flotas.
- Sistemas de información meteorológica.
- Comunicaciones de vehículos con infraestructura.
- Gestión integral de túneles.
- Gestión de emergencias.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

2. **Vehículos inteligentes**, los cuales se centran en mejorar la seguridad y movilidad de los vehículos, implantando en ellos sensores, equipos informáticos y de comunicaciones para aumentar el grado de seguridad de la conducción, así como para mitigar las consecuencias de los accidentes que pudieran ocurrir. Algunas de las áreas de interés en el campo son:

- Sistemas de asistencia a la conducción.
- Vehículos autónomos.
- Seguridad pasiva.
- Seguridad activa.
- Percepción del entorno del vehículo.
- Interacción hombre-máquina.
- Control del vehículo.
- Sensores.

El presente trabajo se sitúa dentro de los vehículos inteligentes, que pasamos a ver en más detalle a continuación.

### 2.1.2 Vehículos Inteligentes

La implementación de vehículos inteligentes puede llevarse a cabo desde dos puntos de vista bien diferenciados:

- **Con sistemas autónomos**, equipados con toda la instrumentación e inteligencia necesaria para llevar a cabo una tarea.
- **Con sistemas cooperativos**, en los que parte, o toda la información se encuentra distribuida en el entorno.

Generalmente, se combinan ambos enfoques, de forma que los sistemas autónomos prestan servicios en todas las circunstancias y situaciones, beneficiándose de la información adicional obtenida cuando están disponibles elementos cooperativos, mejorando así el rendimiento del sistema.

## 2.1 Los Sistemas Inteligentes de Transporte

---

Las actividades desarrolladas en el área de vehículos inteligentes pueden ser agrupadas dentro de tres categorías.

1. Las **asistencias pasivas a la conducción** incluyen, básicamente, funciones de aviso ante potenciales peligros y/o reducción de riesgos de lesiones en caso de accidente.
2. Las **asistencias activas a la conducción**. Incluyen algunas acciones de control sobre los elementos implicados en la conducción del vehículo.
3. Los **vehículos autónomos** son aquellos sistemas que tienen capacidad para tomar el control completo de los vehículos, realizando una conducción muy similar a la humana, pero sin los errores e imprudencias que las personas podemos cometer.

Entre las aplicaciones de asistencia pasiva a la conducción se encuentran sistemas tales como:

- *Visión nocturna* (Schreiner 99), que posibilitan una mayor nitidez para conducción nocturna.
- *Control de luces inteligentes*, que modifican la altura (Bevilacqua 10) u orientación (Sivak 05) de las luces en función del entorno del vehículo.
- *Sensores de distancia marcha atrás* (Chen 09) o *cámara trasera* (Trivedi 07), que asisten al conductor a la hora de aparcar marcha atrás.
- *Alertas de salida de carril* (Clanton 09; Hsiao 09), que emiten un sonido o estímulo al conductor en caso de salida involuntaria de vía.
- *Monitorización del estado de los neumáticos* (Velupillai 07).
- *Sistemas de alerta de colisión* (Polychronopoulos 07).

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

- Finalmente, como asistencias pasivas más evidentes se encuentra la investigación en elementos comunes en los vehículos de hoy en día como son los *airbags*, el *cinturón de seguridad*, ya sea para minimizar daños en accidentes o como dispositivo de alerta al conductor (Arimitsu 07).

Algunas de las aplicaciones en lo que refiere a asistencia activa a la conducción pasan por:

- *Cambio de marchas automático* (Pettersson 00). Es el sistema más básico y que más tiempo lleva disponible en determinados vehículos, el cual es capaz de manejar el embrague y la caja de marchas de una forma automática. La tendencia actual es la de orientar el cambio de marchas a una *conducción ecológica*, a la vez que eficiente (Casavola 10).
- *Control de crucero* (Ioannou 93). Su objetivo es el de mantener fija una velocidad dada por el conductor.
- *Control de crucero adaptativo* (Rajamani 02), que añade al anterior la posibilidad de mantener una distancia de seguridad con el vehículo precedente.
- *Control de crucero adaptativo cooperativo* (van Arem 06), que incluye comunicación con los vehículo situados delante y detrás con el fin de mejorar el sistema.
- *Parada y Arranque* (Martinez 07), apropiados para una conducción en atasco, ya que implementa paradas y arranques según la necesidad del tráfico.

Dentro de las aplicaciones y asistencias dentro del marco de los vehículos inteligentes, cabría hacer una reflexión en función de las metodologías utilizadas para este fin.

Determinados sistemas, más que llamarse *inteligentes* dependen de cuestiones *tecnológicas*, esto podría aplicarse a gran parte de las asistencias pasivas, ya que, en determinados casos, su objetivo es la

## 2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos

---

instalación de sensores en el vehículo con el fin de mejorar la percepción que el conductor tiene del entorno que lo rodea. Ejemplos son la instalación de cámaras o sensores de distancia, siempre que su función sea únicamente informativa.

En la literatura pueden encontrarse trabajos que utilizan técnicas de soft computing sobre la información proveniente de estos sensores (principalmente de las cámaras) podemos encontrarlas en, entre otras: (Fang 03), donde se utiliza una arquitectura *sensorial - perceptual - conceptual* de redes neuronales con el fin de procesar vídeo con el fin de dar *avisos inteligentes* al conductor en condiciones de baja visibilidad. En (Bajaaj 05) nuevamente se hace uso de redes neuronales, pero en este caso, con el fin de realizar tareas de reconocimiento de señales. En (Tunstel 03) se mezcla lógica difusa y aprendizaje aproximado para planificar trayectorias en función de información visual para navegación de un vehículo explorador.

En lo referente a aplicaciones más orientadas al control de vehículos, son múltiples las aplicaciones de la soft computing para controlar una o varias de las tareas involucradas en la conducción. Como ejemplos de este tipo de aplicaciones encontramos, entre otras: lógica difusa en control de vehículos (Valavanis 06), control de suspensión (Zheng 10) o control de cruce (Pananurak 08); ajuste, por algoritmos genéticos de un controladores para realizar tareas de seguimiento en vehículos (Chumsamutr 03), aparcamiento (Pennacchio 05), control de suspensión (Caponetto 03) o control de cruce adaptativo (Sotelo 04) o uso de redes neuronales para maniobras de aparcamiento (Gorinevsky 96) o control en caravana (Hsu 04).

## 2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos

A lo largo de esta sección se detallaran algunos de los grupos de investigación más importantes a nivel mundial en el campo de los sistemas inteligentes de transporte, y de los vehículos inteligentes en particular.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

En 1987, junto a prestigiosos fabricantes europeos, la **Universität der Bundeswehr** creó dentro del proyecto *PROMETHEUS* (acrónimo inglés, *PROgram for European Traffic with HighEst and Unprecedented Safety*), el vehículo automatizado *VaMoRs* guiado por visión artificial (Dickmanns 87), capaz de circular por autopistas convencionales a velocidades de hasta 130 km/h.

A este proyecto le siguió el proyecto *VITA* (acrónimo inglés, *Vision Technology Application*), cuyo vehículo era capaz de realizar estrategias para seguimiento de carril, detección de obstáculos y cambios de carril, nuevamente haciendo uso de la visión como principal fuente de información (Ulmer 92).

El proyecto continuó con los proyectos *VaMoRs-P*, donde se equipó un vehículo Mercedes 500 (figura 2.3, izquierda) con doble sistema de visión estéreo (Dickmanns 94), *VITA II* y *VaMP*, continuaciones del anterior (Thomanek 96).

Desde 2006 el grupo trabaja en el proyecto *MuCAR-3*, la tercera generación de vehículos basada el VW Touareg (figura 2.3, derecha) en la que mantiene la visión como sensor principal (von Hundelshausen 08), fusionada con un sensor láser (Manz 09).



Figura 2.3: Vehículos autónomos utilizados en el proyecto *VaMoRs-P* (izquierda) y *MuCAR-3* (derecha).

El **Centro de Investigación de FIAT** (CRF) nace en 1976 como centro de referencia para la innovación, la investigación y el desarrollo del Grupo Fiat. Actualmente es un centro de excelencia que forma parte de una red de más de 150 universidades y centros de investigación y más de 1000 colaboradores industriales en el mundo entero.

Es un grupo particularmente activo en el área de investigación para



## 2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos

---

la movilidad sostenible, sus investigaciones se centran en la reducción de emisiones contaminantes, así como del consumo de los vehículos. Aunque su línea de investigación no está directamente ligada a los vehículos inteligentes, sí disponen de vehículos capaces de circular sin conductor siguiendo, mediante visión artificial y odometría, una trayectoria pintada en el pavimento (Malan 07).

Actualmente trabajan en el desarrollo de un vehículo *CyberPanda*, capaz de realizar por sí mismo maniobras como la conducción en caravana, aparcamiento o detección de obstáculos.

El programa **LaRA** (acrónimo francés, *La Route Automatisée*) está dedicado a analizar la seguridad actual y futura del transporte por carretera en Francia (Blosseville 00), separando cuatro tipos de circulación: 1) carreteras locales, 2) carreteras rurales, 3) carreteras interurbanas y 4) las redes de carreteras que rodean las grandes ciudades. Los vehículos utilizados pueden verse en la figura 2.4.

La filosofía que sigue el programa es ayudar a los conductores a mejorar la seguridad y eficiencia del transporte por carretera, con el objetivo final de prescindir completamente del conductor humano, al menos en situaciones acotadas o controladas como pueden ser la circulación por autopistas dedicadas.



Figura 2.4: Vehículos del proyecto LaRA.

La **Universidad de Parma** lleva desde 1989 investigando los vehículos autónomos. Formó parte del proyecto *PROMETHEUS* con su propio vehículo *MobLab*, una furgoneta Fiat Ducato (figura 2.5, izquierda), capaz de realizar maniobras como control de cruce, detección de obstáculos

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

o control lateral por medio de visión artificial (Cumani 95).

Tras la experiencia acumulada con *MobLab* se consiguió desarrollar, dentro del proyecto *ARGO*, uno de los primeros vehículos autónomos del mundo (figura 2.5, derecha); controlado igualmente por visión artificial (Broggi 99).



Figura 2.5: Vehículos autónomos MobLab (izquierda) y ARGO (derecha).

Recientemente **VisLab**, una *spin-off* de la Universidad de Parma dedicada a la conducción autónoma que colabora estrechamente con ésta, ha cubierto la ruta Parma-Shangai (unos 13.000 km) durante un viaje de tres meses, donde un vehículo autónomo recibía posiciones GPS de un vehículo tripulado situado delante de él y realizaba la tarea de seguir al vehículo predecesor durante todo el viaje, escoltados por fuerzas de seguridad. En la figura 2.6 pueden verse algunas imágenes del viaje; más información puede encontrarse en la web<sup>1</sup>.



Figura 2.6: Imágenes del viaje realizado por un vehículo autónomo del *VisLab*.

El **Instituto Universitario de Investigación del Automóvil** (INSIA), es un centro perteneciente la Universidad Politécnica Madrid,

<sup>1</sup> *The VisLab Intercontinental Autonomous Challenge*: <http://viac.vislab.it/>

## 2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos

---

adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales e integrado en el parque científico y tecnológico de la UPM. Cuenta con relevantes estudios en accidentología, transporte, seguridad pasiva en autobuses, autocares y vehículos industriales e ingeniería de vehículos.

El INSIA tiene abiertas diversas líneas de investigación, levemente relacionadas con lo que es el control del vehículo, entre ellas cabe destacar las siguientes: mejora de la seguridad en autobuses, 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, predicción de los impactos del transporte por carretera en la seguridad y medio ambiente, sistemas alternativos de propulsión, impacto medioambiental de los vehículos automóviles.

La **Organización Holandesa para Investigación Aplicada** cuenta con el departamento *TNO Automotive*, dedicado a la investigación en automoción. Principalmente en el análisis de accidentes y desarrollo de asistencias al conductor para su prevención y reducción de sus consecuencias. Aunque disponen de un vehículo automatizado, han desarrollado un complejo motor de simulación, que les permite analizar los efectos de los accidentes, así como estudiar el desarrollo de sistemas relacionados con la seguridad (Ploeg 08) sin necesidad de poner vidas en riesgo o dañar propiedad alguna.

Dentro de la **Escuela de Industriales de Sevilla**, el grupo de *Robótica, Visión y Control* centra algunas de sus investigaciones en el guiado de vehículos autónomos, incluyendo vehículos pesados a alta velocidad (camiones de 16 Toneladas a 100 Km/h y "dumpers" de 60 Toneladas a 40 Km/h), y vehículos articulados (González-Cantos 09) (Cuesta 04). Vehículos con los que trabajan pueden verse en la figura 2.7.

Aunque no se trate de un grupo de investigación en sí, cabe destacar el **DARPA Urban Challenge**, que promueve la investigación y desarrollo de vehículos autónomos para su uso militar. Atrae a grupos de todo el mundo por medio de una competición de vehículos autónomos organizada y financiada por la *Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada en Defensa* (DARPA), la organización central de investigación

## 2. ESTADO DEL ARTE

---



Figura 2.7: Vehículos utilizados por el grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla.

del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, que reparte premios que oscilan entre el medio millón y los dos millones de dólares a las propuestas más innovadoras.

Este programa es la continuación de dos competiciones de vehículos autónomos precedentes 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, recorriendo el primer clasificado unos 11 kilómetros.

En la edición de 2005, cuatro vehículos concluyeron con éxito la prueba completando una ruta de 213 kilómetros invirtiendo un total de diez horas en realizarla. La ganadora fue la *Universidad de Standford* (Thrun 07) con el vehículo *Stanley* (figura 2.8).



Figura 2.8: Vehículo *Stanley*, ganador del 2005 DARPA Grand Challenge.

En la última de las competiciones, celebrada en 2007, los vehículos maniobraron en un entorno que simula una ciudad, con el objetivo

## 2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos

---

de realizar misiones de suministro militar mientras se interacciona con el tráfico existente evitando obstáculos e intersecciones peligrosas. La competición se dividió en una serie de rondas clasificatorias que culminaron en un evento final cuya última edición se desarrolló el 3 de noviembre de 2007 en Victorville, California. Información sobre los participantes puede encontrarse en un número especial dedicado a la competición (DARPA 07).

El consorcio americano **PATH** (*Partners for Advanced Transit and Highways*) está formado por la Universidad de California en colaboración con el Departamento de Transportes de California y 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 sistemas inteligentes de transporte mejorando la seguridad, flexibilidad, movilidad y administración de los sistemas de transporte en California, Estados Unidos y en todo el mundo.

Su objetivo a largo plazo es resolver los problemas de tráfico mediante la automatización total o parcial de los vehículos. Su trabajo se centra en el establecimiento de vías cerradas para el uso exclusivo de vehículos autónomos. Su principal foco de atención está en las caravanas de vehículos autónomos (Sheikholeslam 93), principalmente en autopistas (Shladover 92). En 1997 tuvo lugar una demostración con ocho vehículos autónomos capaces de circular por una autopista con una distancia de separación entre ellos fijada a 6.5 metros de distancia (figura 2.9).



Figura 2.9: Caravana de vehículos automáticos del PATH.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

El proyecto **NAVLAB** de la Universidad Carnegie Mellon trabaja en la construcción de y funcionamiento de coches, camiones y autobuses capaces de realizar una conducción autónoma. Desde su creación en 1984, han producido una serie de once vehículos, desde el Navlab1 hasta el Navlab11. 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 (Thorpe 88).

Navlab1 alcanzó una velocidad de 32km/h en conducción automática y Navlab2 de 88 km/h. En 1995 el Navlab5 circuló desde Washington a California por autopista, controlando de forma automática la dirección (durante el 98,8% del recorrido) y manual la velocidad, como parte del experimento *No Hands Across America*. En la figura 2.10 pueden verse el Navlab 5 y 11 respectivamente.



Figura 2.10: Vehículos autónomos de la Universidad Carnegie Mellon NavLab5 (izquierda) y NavLab11 (derecha).

Actualmente, la Universidad Carnegie Mellon está desarrollando el proyecto *CTA Robotics* en el que investigan sobre la capacidad del vehículo para interpretar el entorno en el que se encuentra y hallar la manera óptima de moverse a través de él (Wang 07).

El **Ministerio de Transporte Japonés** se ocupa de regular la seguridad de la industria del vehículo. Por otra parte promueve activamente la investigación en ITS por medio de diferentes programas y proyectos. El programa más relevante es el *Advanced Safety Vehicle* (ASV), bajo sus auspicios todos los grandes fabricantes japoneses de automóviles han desarrollado técnicas para mejorar la seguridad, como



## 2.2 Grupos de Investigación en Vehículos Autónomos

---

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.

En 2007 ha comenzado la cuarta fase del programa *ASV* y 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.



Figura 2.11: Nissan ASV-4 equipado con sistemas de comunicación para la reducción de accidentes.

El **Laboratorio de investigación de ITS** creado por el gobierno australiano es un consorcio de universidades del país y el sector privado que tiene como objetivo desarrollar, evaluar y modelar los avances en las tecnologías de transporte; mejorando así 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. Han realizado experimentos con prototipos en los que intervienen varios vehículos que confluyen en un cruce, siendo capaces de salir de la intersección sin colisionar de manera coordinada.

### 2.3 Proyectos de Investigación Destacables

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

En noviembre del 2000 la **Demo 2000 Cooperative Driving** presentó una caravana de 5 vehículos circulando en modo autónomo (Tsugawa 01a). Los vehículos disponían de un GPS para localización, láser-radar para detección de obstáculos o vehículos, una unidad de comunicación y una pantalla para ver otros vehículos. El protocolo de comunicación utilizado se basa en una comunicación dedicada de corto alcance a 5.8 GHz (Tsugawa 01b). Los vehículos circularon entre 40 y 60 km/h de acuerdo con el protocolo de la demostración que incluyó maniobras de parada y arranque, cambios de carril e incorporaciones.

El proyecto **PREVENT** de la industria europea contribuye a la seguridad en carretera. Está centrado en aplicaciones de seguridad que ayuden a los conductores a evitar accidentes o, en el peor de los casos, mitigar sus consecuencias por medio de avisos al conductor. Para ello, se fusiona un amplio rango de sensores, tales como infrarrojos, cámaras, radar, giróscopos o acelerómetros, para obtener un entorno virtual del vehículo. Los mapas digitales y los dispositivos de localización se utilizan para identificar con precisión la posición de un vehículo y así poder interpretar su entorno. Las comunicaciones permiten enviar información desde un vehículo a otros o a la infraestructura, así como recibir información de seguridad que complementa la adquirida en tiempo real (Matthias 06). En la figura 2.12 se muestra una fotografía del panel de avisos desarrollado por PREVENT.

**COOPERS** (*CO-OPerative SystEms for Intelligent Road Safety*) es un proyecto del 6º Programa Marco de la Unión Europea. Se centra en el desarrollo a largo plazo de aplicaciones innovadoras para la gestión del tráfico de forma cooperativa entre el vehículo y la infraestructura (Frotscher 08). Evalúa la bondad de las tecnologías de comunicación actuales en un escenario de flujo infraestructura-vehículo bidireccional.



## 2.3 Proyectos de Investigación Destacables



Figura 2.12: Vista interna del vehículo de pruebas desarrollado por PReVENT.

La unidad embarcada en este proyecto consiste en una puerta de comunicación para todas las tecnologías definidas, así como un ordenador embarcado en los vehículos que incluye una unidad de posicionamiento robusta. En la figura 2.13 se muestra una imagen del vehículo utilizado por el proyecto, así como de la interfaz de mensajes al conductor.

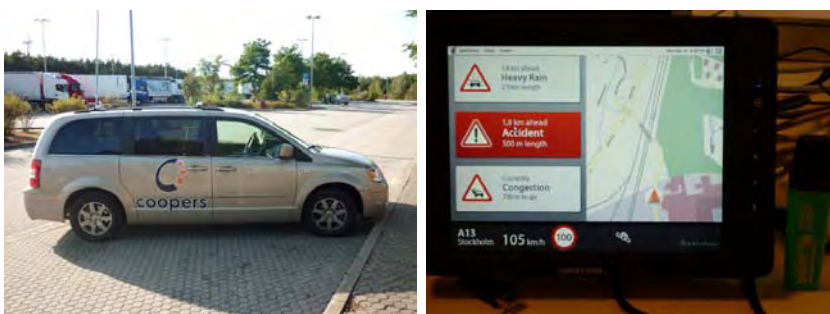


Figura 2.13: Vehículo (izquierda) y Interfaz (derecha) implementados por COOPERS.

**CVIS** (*Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems*) es un proyecto europeo cuyo objetivo es el 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 (*Communications Architecture for Land Mobile environment*), estándar ISO (Ernst 07). CVIS desarrolla un *router* móvil para enlazar continuamente vehículos con equipos y servidores instalados en la carretera. Ha realizado un terminal multi-canal que mantiene comuni-

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

cación a Internet continua bajo un amplio rango de operadores (celulares, WiFi, infrarrojos y microondas de corto alcance) (Koenders 08). CVIS también desarrolla una arquitectura abierta para conectar en el vehículo sistemas de gestión del tráfico con servicios telemáticos en la carretera. Su objetivo final es el de desarrollar una solución innovadora que permita a cada vehículo comunicar y cooperar directamente con la infraestructura y con otros vehículos de forma segura y efectiva.

**SAFESPOT** es un proyecto que busca estudiar cómo pueden cooperar los vehículos y las carreteras inteligentes con el fin de aumentar la seguridad (Vivo 07). El objetivo principal es el de prevenir accidentes por medio del desarrollo de un *Asistente de Seguridad Marginal*, el cual detecta con anticipación las posibles situaciones peligrosas y adelante en el tiempo y en el espacio la alerta o ayuda a los conductores. El asistente consiste principalmente en un sistema cooperativo basado en comunicaciones vehículo-vehículo e infraestructura-vehículo (Bonnet 07).

El proyecto **HAVE-IT** investiga en conducción automática a largo plazo, por medio del desarrollo, validación y demostración de las etapas intermedias hacia la conducción completamente automática. Para ello, en primer lugar, trata de optimizar el reparto de tareas entre el conductor y el sistema de asistencia, para después incrementar la tolerancia a fallos mediante una arquitectura que incluya una gestión redundante (basada en el proyecto predecesor *SPARC*) y desarrollar aplicaciones altamente automatizadas, aumentando así la seguridad del sistema. Se calcula que los resultados intermedios desprendidos de este proyecto pueden ser explotados en 3 ó 5 años y definirán la base ideal para la integración de la próxima generación sistemas de asistencia al conductor.

El proyecto **GeoNet** pretende definir un protocolo para direccionamiento y enrutamiento geográfico con soporte para IPv6 y adecuado para establecer una comunicación segura y estable entre coches e infraestructura (Mariyasagayam 08). GeoNet no sólo aprovechará el trabajo de proyectos previos sino que también proporciona soporte para integrar su solución. Una vez que GeoNet rellene la brecha existente para implementar redes geo-direccionadas, los futuros sistemas cooperativos podrán centrarse en la arquitectura, el desarrollo de aplicaciones y pruebas de

## 2.3 Proyectos de Investigación Destacables

campo. Geonet utiliza los vehículos del grupo *Lara* (figura 2.4). En la figura 2.14 pueden verse de manera conceptual algunos de los resultados que GeoNet pretende obtener.

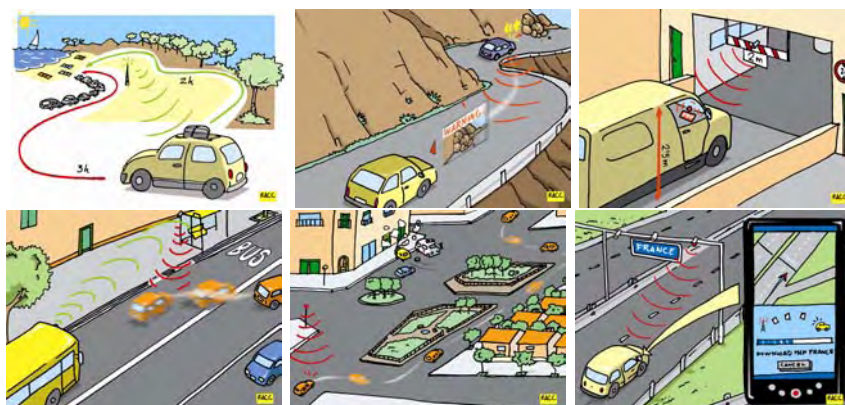


Figura 2.14: Representación conceptual de las aspiraciones del proyecto GeoNet. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: Comunicación de la ruta más corta, información de la presencia de accidentes, altura permitida, abandono de carril dedicado, notificación de ruta alternativa por emergencia y descarga automática de mapas según localización.

**COMeSafety** (*COMmunication for eSafety*) proporciona y mantiene una plataforma para intercambiar información y presentar resultados de investigación en el campo. Publicaciones regulares, congresos y noticias prensa completan sus esfuerzos de divulgación. COMeSafety ha organizado enlaces y sesiones de trabajo con el fin de reforzar la cooperación entre Europa y el resto del mundo, reuniendo en un foro común a investigadores y fabricantes.

**GALLANT** fue un proyecto del 5º Programa Marco cuyo objetivo era integrar *Galileo* en los sistemas de asistencia a conductor. GALLANT muestra los beneficios del uso de GNSS certificados para la mejora de la movilidad y la seguridad de las carreteras. El proyecto estudió el funcionamiento de Galileo en un control de crucero predictivo, el cual adaptaba la velocidad del vehículo en función de la posición proporcionada por Galileo, así como de las características de la carretera. Se simuló el uso de Galileo así como el sistema en su conjunto para evaluar las prestaciones esperadas en distintos escenarios.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

**REPOSIT** (*RE*lative *PO*Sitioning for *coll*ision avoidance *sys*TEms) fue un proyecto del 6º Programa Marco con el objetivo de mostrar la factibilidad de una nueva tecnología de fusión entre datos provenientes de GPS relativos y comunicaciones vehículo-vehículo. Se centró en intersecciones y colisiones longitudinales, donde mostró que podría producir mejoras sobre las aplicaciones más novedosas. Una representación del sistema puede verse en la figura 2.15. El sistema desarrollado por REPOSIT es capaz de conocer con alta precisión las posiciones de los vehículos en la carretera y de alertar al conductor de peligros potenciales. Para ello un módulo recibe toda la información de los vehículos del entorno, infiere si puede existir un riesgo y, en caso afirmativo, emite una alarma para advertir al conductor con anticipación y así aumentar el tiempo del que dispone el conductor para reaccionar.

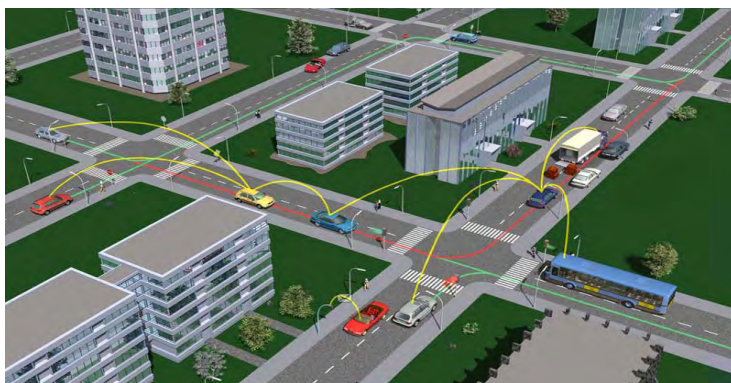


Figura 2.15: Representación del marco de aplicación del proyecto REPOSIT.

El proyecto **INTRO** trata los problemas de seguridad y capacidad de las carreteras combinando técnicas sensoriales y bases de datos locales en tiempo real. La seguridad y capacidad incrementarán informando con rapidez a las autoridades y usuarios de la carretera de los problemas emergentes, así, entre sus objetivos se cuentan: 1) Validar las redes de advertencia en tiempo real ante cambios de climáticos locales y repentinos (por ejemplo presencia de lluvia o hielo). 2) Optimizar las respuestas del conductor a los nuevos tipos de información usando simuladores de comportamiento. 3) Fusionar varios tipos de datos

### 2.3 Proyectos de Investigación Destacables

---

sensoriales para mejorar en tiempo real la seguridad y predicción de peligros. 4) Usar y combinar tecnologías sensoriales existentes en pavimentos para prevenir accidentes, mejorar el flujo de tráfico y extender el tiempo de vida de las infraestructuras, planificando mejor su mantenimiento.

El objetivo de **I-WAY** (*Intelligent co-operative system in cars for road safety*) es desarrollar un sistema sensorial capaz de monitorizar y reconocer la condición psicológica del conductor, así como las condiciones de la carretera en cualquier situación (Rusconi 07). Se centra en la mejora de la percepción del conductor y sus reacciones en situaciones críticas dando información en tiempo real de otros vehículos y de elementos de la infraestructura en las proximidades. La clave del I-WAY es un sistema cooperativo para seguridad de la carretera donde los vehículos no sólo reciben sino que recaban información. Logrando así, una mayor eficacia en el transporte y un incremento de la seguridad.

El proyecto **CYBERCARS-2** surge del pensamiento de que a medio plazo circularán por ciudades y carreteras sistemas de transporte basados en vehículos completamente automáticos. CYBERCARS-2 estudia la cooperación entre vehículos autónomos y vehículos operados por personas basándose en comunicaciones de corto alcance. El trabajo en CYBERCARS-2 se centra en la futura etapa transición entre vehículos con asistencias (o parcialmente automatizados), que ofrecen un modo automático en situaciones y lugares específicos, como caravanas y estacionamientos automatizados, y un modo manual en situaciones regulares y vehículos completamente automatizados. Esta etapa representará un paso intermedio anterior a la existencia masiva de vehículos completamente autónomos, donde vehículos automatizados deberán *convivir* con vehículos conducidos manualmente.

El proyecto **HeavyRoute** estudia, desarrolla e implementa sistemas de planificación de ruta y conducción on-line; así como ayudas al conductor de vehículos pesados con información específica y criterios relevantes relacionados con la seguridad y el entorno. Se espera validar la monitorización y gestión de vehículos pesados en infraestructuras críticas, especialmente puentes. El proyecto usa datos (geometría

## 2. ESTADO DEL ARTE

---



Figura 2.16: Ejemplos de CyberCar.

y características de la vía) del mapa estándar para aplicaciones de navegación, características de la carretera semi-estándar relacionadas con el transporte de mercancías pesadas y características adicionales no estándar obtenidas de modelos especializados.

### 2.4 Los Sistemas Inteligentes de Transporte en la Industria

En esta sección se presenta la situación actual de los sistemas inteligentes de transporte en el mercado. La gran mayoría de marcas incluyen, en mayor o menor medida, sistemas de ayuda al conductor o sistemas que toman el control de vehículo parcialmente.

Nótese que muchos fabricantes comparten sistemas, o incorporan su propia versión de sistemas existentes en otros vehículos, es por ello que trataremos de centrarnos únicamente en las innovaciones de cada marca sobre el resto, en lo que respecta a incorporación de tecnologías de la información y la comunicación. Por otra parte, los sistemas implantados por las compañías suelen estar protegidos por el *secreto industrial*,

## 2.4 Los Sistemas Inteligentes de Transporte en la Industria

---

haciendo que, el conocimiento de las técnicas subyacentes utilizadas sea de acceso difícil o imposible.

Uno de los aspectos más destacados de la marca **ALFA ROMEO** es la cantidad de sistemas de ayuda a la conducción que incorpora, capaces de intervenir en el funcionamiento del motor, los frenos, la dirección, el cambio y las suspensiones, para optar por una de las tres configuraciones: *dynamic* (para una conducción superdeportiva), *normal* (para circulación urbana) y *all weather* (para condiciones de baja adherencia).

Las ayudas a la conducción de **AUDI** son capaces de visualizar parte del entorno del vehículo y, a partir de los datos recopilados, tomar decisiones y actuar en consecuencia. El ACC (*control de crucero adaptativo*) se encarga de regular la velocidad teniendo en cuenta la distancia con respecto al vehículo precedente. El ABG (*Audi Braking Guard*) avisa al conductor si se va a producir una colisión por alcance con el vehículo precedente; en ese caso, si el conductor no reacciona, el sistema presiona el sistema de frenos de forma brusca para que el piloto lo perciba y, cuando éste reacciona y frena, aunque sea de forma indecisa, el vehículo realizará una frenada de máxima intensidad. El AVS (*Audi Valvelift System*) es un sistema de distribución variable que logra un óptimo llenado de las cámaras de combustión de los cilindros reduciendo el consumo y aumentando la prestación.

Entre los dispositivos presentados por el grupo **BMW** destaca el *Car2x*, un servicio de comunicación entre automóviles e infraestructura de tráfico; en estos momentos los investigadores del proyecto *PreVENT* (sección 2.3) colaboran estrechamente con BMW en llevar a la práctica el *Car2x*. Por otra parte, a través del sistema *BMW ConnectedDrive* se tiene acceso a Internet desde el vehículo; una de las posibilidades de esto, entre otras, es poder configurar el climatizador a través del teléfono móvil, pudiendo así establecer la temperatura deseada antes de subir al coche.

Entre las innovaciones de **Chrysler** encontramos el *Hill Start Assist*. Se trata de una asistencia *inteligente* que mantiene el coche con presión en los frenos tras arrancar; este sistema será de gran ayuda en conducción urbana y rural, especialmente en áreas de fuertes pendientes. El avanzado

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

sistema de frenos con cuatro discos y ABS ofrece una rápida respuesta manteniendo el control sobre la dirección al frenar sobre superficies deslizantes. Otro sistema relacionado con el anterior es la asistencia en frenada de emergencia (*BAS*) que, en función de la velocidad y la presión que el conductor aplica sobre el freno, interviene con el fin de acortar las distancias de frenada.

**Citroën** incluye sistemas de ayuda al estacionamiento delantero y trasero. Por otra parte, el sistema *NaviDrive* es un sistema telemático de última generación. Este sistema reagrupa las prestaciones del teléfono GSM, audio y navegación GPS. Este sistema ofrece también el servicio *Citroën Urgencia*, que permite, en caso de accidente o enfermedad, la localización del vehículo mediante GPS y el acceso a los servicios de urgencia.

Una de las últimas aportaciones de **FIAT** es el desarrollo, en colaboración con *Microsoft*, del nuevo sistema *EcoDrive*, que ayuda a los conductores a conducir de un modo más ecológico y económico. Este dispositivo permite grabar en una memoria USB datos sobre el consumo de combustible y emisión de gases de todos los viajes realizados para así analizar el estilo de conducción. El sistema infiere consejos para el conductor sobre cómo conducir con un efecto menor sobre el medio ambiente.

En sus últimos modelos, **FORD** ha incluido el *Sistema de Protección Inteligente*. Éste combina una estructura resistente, diseñada para soportar choques, y elementos que disminuyen las probabilidades de heridas en caso de impacto, como airbags frontales, laterales, de cortina y para las rodillas del conductor, un sistema de protección del cuello, limitadores de carga, asientos antideslizantes y pedales colapsables, entre otros. La marca incorporará en todos sus modelos dos nuevos sistemas de ayuda a la conducción denominados *Blind Spot Mirror* y *Cross Traffic Alert*, los cuales alertarán al conductor de la presencia de otros vehículos en los puntos ciegos y ángulos muertos a la hora de cambiar de carril o cruzar una intersección.

Uno de los sistemas de ayuda a la conducción de **GENERAL MOTORS** mantiene automáticamente una distancia de seguridad con



## 2.4 Los Sistemas Inteligentes de Transporte en la Industria

el vehículo precedente en todas las circunstancias del tráfico, desde los atascos de arranque-parada, hasta la conducción a alta velocidad por autopista. Con este sistema, la marca se puso un paso por delante a todas las aplicaciones existentes en los modelos de producción, ya que muy pocos implementaban este tipo de sistemas, conocidos como *Stop&Go*.

**HONDA** diseñó el sistema CMBS (*Collision Mitigation Brake System*), una revolucionaria tecnología de seguridad que completa el sistema de control de crucero adaptativo. Se trata de un sistema de frenado activo que funciona como sigue: si la distancia con el vehículo predecesor se reduce y hace probable una colisión, el sistema emite avisos al conductor; de acuerdo con la respuesta del conductor, si el sistema establece que la probabilidad de impacto ha bajado, se desactiva, pero si la respuesta del conductor ha sido insuficiente para reducir el riesgo de colisión, el sistema frena ligeramente para prevenir al conductor de la necesidad de intervenir. Finalmente, cuando se excede una distancia mínima y la colisión se vuelve inevitable, el sistema acciona de drástico los frenos y tensa los cinturones con pretensores electrónicos, para así reducir la velocidad de impacto y limitar las consecuencias de la colisión.

**LOTUS** apuesta fuertemente por el medio ambiente; con el uso de nuevos materiales renovables biodegradables como el cáñamo, la lana y el sisal natural se consigue mitigar el impacto medioambiental del vehículo. Por otra parte, utilizando procesos de fabricación más limpios. Ha desarrollado un sistema de pintura a base de agua; éste incluye imprimación, color y capa de laca... y se consigue un gran ahorro en el consumo de energía debido a la baja temperatura que requiere todo el proceso de pintado. Finalmente, algunos modelos incluyen paneles solares que contribuyen a disminuir el gasto eléctrico del vehículo.

Entre las innovaciones en confort creadas por **JAGUAR** existen, por ejemplo: un sistema de cuatro sensores ocultos en los paneles laterales detectan el movimiento de la mano de los pasajeros cuando van a abrir las puertas, en este momento, surgen los tiradores que hasta el momento se mantenían ocultos. Un sensor adicional en el salpicadero, hace aparecer, al percibir la cercanía de la mano del conductor o del pasajero, una pantalla TFT de 7 pulgadas dividida en dos partes y que puede ser

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

manejada por conductor y acompañante sin que las intenciones de uno interfieran con las del otro. Jaguar ha bautizado este sistema como *DualView*.

**LAND ROVER** apuesta por la potencia y la adaptabilidad a cualquier tipo de terreno. Así pues, el sistema *Terrain Response* permite enfrentarse con seguridad a las circunstancias más extremas; este sistema adapta las respuestas del motor, la transmisión, el acoplamiento central y los sistemas del chasis del vehículo a las demandas del terreno. El *control de descenso de pendientes* (HDC) permite tomar pendientes reduciendo el peligro y garantizando un arranque suave en pendiente. El *control de estabilidad en giro* (RSC) es la tecnología de prevención del vuelco más sofisticada jamás utilizada; combina la velocidad de las ruedas, el ángulo de la dirección y un sensor de la inclinación del vehículo para ofrecer una rápida respuesta sobre la suspensión del vehículo.

**MERCEDES** tiene en cuenta el tipo de conducción de cada conductor; éste es monitorizado con más de 40 sensores, guardando en memoria los diferentes estilos de conducción. Cuando la lectura de los parámetros da como resultado que el conductor está acusando el cansancio, una luz en el cuadro de mandos avisa al conductor de su estado con la palabra *Brake* (frenar), así como con avisos acústicos.

La marca japonesa **MITSUBISHI** incorpora en sus vehículos sistemas como: ACD (*Active Center Differential*), AYC (*Active Yaw Control*) o ASC (*Active Stability Control*). Todos ellos están orientados a asistir al conductor en las situaciones más adversas, diferenciando tipos carretera como son de *asfalto, tierra y nieve*.

**NISSAN** ha desarrollado un nuevo sistema llamado *ECO-pedal*, el cual detecta los excesos de presión que el conductor realiza sobre el acelerador y activa un mecanismo de control que los corrige haciendo retroceder el pedal; De esta forma se consigue ahorrar la energía que se habría malgastado.

La marca alemana **OPEL** anunció la incorporación a los nuevos modelos del dispositivo *Opel Eye*. Se trata de una cámara que es capaz de avisar al conductor de algunas señales verticales, como límites de velocidad. La cámara también comprueba que el conductor se mantenga

en el carril elegido de la autopista.

El sistema de avisos *anti-distracción* de **SAAB** se activa cuando se detecta que el conductor no presta la debida atención a la carretera y muestra un mensaje, a la vez que activa una alarma. Para ello utiliza dos de cámaras infrarrojas que apuntan permanentemente hacia el conductor y envían sus imágenes a un ordenador; este estudia los movimientos que realizan los globos oculares del conductor y analiza su nivel de atención sobre la actividad que desarrolla al volante, calculando si sus párpados se cierran durante más tiempo del habitual o si su mirada se desvía de la carretera.

## 2.5 El Grupo AUTOPIA

El Grupo AUTOPIA se desarrolla en España en el desaparecido *Instituto de Automática Industrial*, actualmente en el *Centro de Automática y Robótica*, de la *Universidad Politécnica de Madrid* y el *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* (UPM-CSIC). La línea de investigación principal se orienta hacia la conducción automática de vehículos.

Desde sus inicios en 1998, ha centrado su trabajo en la aplicación de técnicas de control, desarrolladas primero para robots móviles, en vehículos autónomos reales. Estas técnicas se basan principalmente en lógica difusa, dado que permite el uso de reglas relativamente sencillas para emular el comportamiento humano en conducción de vehículos (*Si el vehículo está desviado hacia la derecha mueve el volante hacia la izquierda*). El objetivo final es lograr una conducción completamente autónoma, así como mejorar la seguridad en la conducción, principalmente en entornos urbanos y frente a situaciones de alto riesgo.

El Grupo ha contado con la financiación proveniente de diversos proyectos de investigación, entre los que cabe destacar:

- **ORBEX** (*ORdenador Borroso EXperimental*). Financiado por la CICYT, se definió e implementó el núcleo de un sistema de inferencia difusa, el cual se emplea en la actualidad para dar soporte a los diferentes sistemas de navegación de los vehículos. La estructura del sistema se definirá en detalle más adelante, debido

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

a que forma la base de los sistemas difusos presentados a lo largo de la tesis.

- **ZOCO** (ZOna de CONducción). Igualmente financiado por la CICYT y que permitió la construcción de la pista de experimentación en la cual se llevan a cabo las pruebas del presente trabajo. También se detallarán los aspectos de la pista de pruebas más adelante, debido a los cambios sufridos en los últimos años.
- **COVAN** y **GLOBO**, financiados respectivamente por la Comunidad Autónoma de Madrid y la CICYT, sirvieron para comprar e instrumentar dos furgonetas *Citroën Berlingo* eléctricas con las que se llevaron a cabo los primeros experimentos de conducción autónoma (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 desarrollaron sistemas para reconocer el entorno de los vehículos mediante diferentes técnicas.
- **CYBERCARS-2** fue un proyecto financiado por la Comunidad Europea, trataba sobre la realización de maniobras cooperativas entre vehículos de diferente naturaleza y en él participaron hasta once instituciones del sector del transporte.
- **MARTA** y **GUIADE** fueron financiados por el Ministerio de Fomento y están en desarrollo; buscan encontrar aplicaciones reales en automoción junto a grandes empresas españolas del sector.
- **CITYELEC** es un 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.

### 2.5.1 La Zona de Conducción

La pista de pruebas de la que dispone el grupo (*ZOCO*) está dedicada exclusivamente a tareas de investigación, es decir, en ella no hay ningún otro tráfico de vehículos, lo que se ha hecho por razones de seguridad. Tiene una forma reticulada, como las manzanas o cuadras de una ciudad, con algunas irregularidades, con calles de seis metros de ancho, permitiendo así, la circulación en ambos sentidos. En la figura 2.17 podemos ver una vista aérea de *ZOCO*<sup>1</sup> tal y como se encontraba tiempo atrás.



Figura 2.17: Vista aérea de *ZOCO*.

En la actualidad, se ha modificado la trazada de determinadas zonas para así lograr un conjunto más amplio de curvas, se ha añadido una pequeña rotonda, así como se han añadido semáforos en el cruce central. En la figura 2.18 pueden verse imágenes del estado actual de la zona de pruebas disponible.

Las calles originales de *ZOCO* fueron nombradas para así poder definir recorridos mediante el uso de cartografías. Las calles *horizontales* tienen nombres de personajes dedicados a la automatización mientras que las verticales están dedicadas a antiguos científicos y personajes que diseñaron y crearon instrumentos de navegación.

Estos nombres de calles permiten especificar los recorridos que han de hacer los coches de una manera simbólica, estos recorridos son

<sup>1</sup>Fuente: <http://maps.google.es>

## 2. ESTADO DEL ARTE

---



Figura 2.18: Mejoras realizadas sobre ZOCO en los últimos años. Trazado adicional (arriba), Rotonda (centro) y Semáforos (abajo).

transformados por un intérprete en un conjunto de maniobras elementales (Alonso 11). Evidentemente, el intérprete ha de poseer un mapa de ZOCO. La figura 2.19 muestra un plano esquemático de ZOCO.

ZOCO también dispone de una estación base de posicionamiento global diferencial basado en información geográfica vía satélite, DGPS, que puede ser utilizado por sistemas móviles embarcados en los coches para obtener su posición con una precisión inferior al centímetro (Milanés 08b), (Milanés 08a). En la tabla 2.1 se muestran las coordenadas UTM de los puntos más relevantes de ZOCO.

## 2.5 El Grupo AUTOPIA

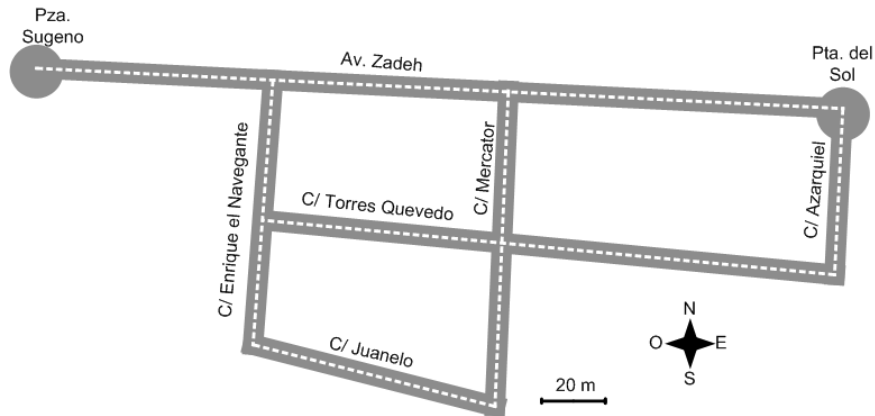


Figura 2.19: Plano esquemático de ZOCO.

También existe una estación central de coordinación sobre la que se prueban las estrategias, normalmente basadas en lógica difusa, que luego son transferidas a los coches (Godoy 10).

Punto	Latitud Norte (m)	Longitud Este (m)
<i>Puerta del Sol</i>	4462550.89	459059.8
<i>Cruce (Zadeh - Mercator)</i>	4462556.52	458953.91
<i>Cruce (Zadeh - Enrique)</i>	4462561.23	458882.06
<i>Plaza Sugeno</i>	4462564.74	458808.31
<i>Cruce (Azarquel - Quevedo)</i>	4462499.55	459056.88
<i>Cruce (Quevedo - Mercator)</i>	4462510.23	458953.13
<i>Cruce (Quevedo - Enrique)</i>	4462517.51	458877.4
<i>Cruce (Mercator - Juanelo)</i>	4462459.75	458951.86
<i>Cruce (Enrique - Juanelo)</i>	4462479.49	458873.76

Tabla 2.1: Coordenadas UTM de ZOCO

### 2.5.2 Los Coches

La flota de vehículos disponibles está compuesta por cinco vehículos, que pasamos a describir a continuación.

Dos furgonetas eléctricas *Citroën Berlingo*, llamadas *Babieca* y *Rocinante*, que pueden verse en la figura 2.20. Son impulsadas por un motor eléctrico de 15 Kw que puede alcanzar velocidades de hasta

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

90 Km/h; en pruebas de conducción automática se han alcanzado velocidades de 60 Km/h.



Figura 2.20: Babieca y Rocinante.

Por otro lado dos *Citroën C3 Pluriel*, uno de ellos descapotable, llamado *Clavileño* (Milanés 10b), y el otro llamado *Platero*; ambos se muestran en la figura 2.21. *Clavileño* será el vehículo utilizado para realizar la experimentación de todo lo planteado a lo largo de la presente memoria.



Figura 2.21: Clavileño y Platero.

Finalmente, la última adquisición del grupo ha consistido en un prototipo de mini-autobús eléctrico para transporte público con el que se pretenden extrapolar las técnicas y resultados obtenidos a los sistemas públicos de transporte. Éste puede verse en la figura 2.22.

Como se comentó anteriormente, *Clavileño* (figura 2.21) es el vehículo utilizado durante la experimentación realizada en la presente tesis. El vehículo está instrumentado para actuar sobre el acelerador y freno; los detalles de esta instrumentación se explicarán en el capítulo de control



## 2.5 El Grupo AUTOPIA

---



Figura 2.22: Molinero.

de velocidad (sección 3.2). También lo está para actuar sobre el volante, como se explicará en el capítulo de control de dirección (sección 4.2).

En lo que respecta a la información sensorial que el vehículo es capaz de leer de su entorno, ésta está formada principalmente por un receptor GPS. Este, junto con la corrección diferencial suministrada por la estación base instalada en ZOCO vía WLAN (*Wireless Local Area Network*), permiten lecturas de posicionamiento de precisiones inferiores al centímetro.

En el caso de que, o bien el GPS embarcado, o la comunicación con la estación base falle, una IMU (*Inertial Measurement Unit*) instalada junto a la palanca de cambios será capaz de dar la posición, usando para ello las aceleraciones frontales y laterales experimentadas por el coche, aunque con una precisión menor. Gracias a esto, el vehículo conocerá su posición en todo momento con una precisión centimétrica.

Por otra parte, el ordenador del vehículo dispone de un mapa GPS con la trayectoria a seguir, gracias a lo cual, y conociendo la posición actual se pueden inferir variables tales como el error lateral y angular respecto a la ruta deseada en un instante dado, así como la velocidad deseada en un determinado tramo de carretera. El vehículo puede obtener otra serie de variables, bien mediante la lectura del bus CAN<sup>1</sup> (*Control Area Network*) del vehículo, tales como la velocidad, aceleración,... o bien

---

<sup>1</sup>Red interna del vehículo donde circulan mensajes y órdenes, tales como subir bajar ventanillas, cambiar a tercera marcha, intermitentes encendidos,...

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

puede recibir órdenes de control o información adicional por medio de la WLAN. Una vista del sistema de navegación instalado en el maletero de Clavileño puede verse en la figura 2.23.

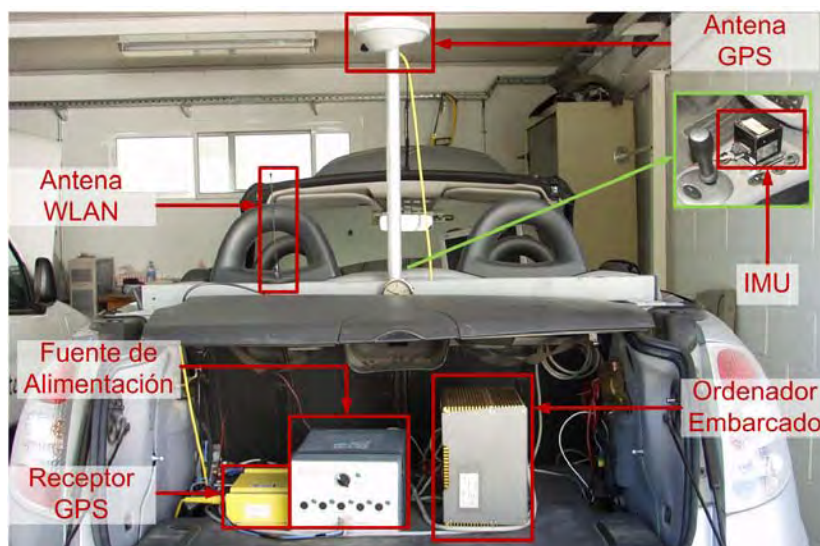


Figura 2.23: Fotografía de la instrumentación de Clavileño.

### 2.5.3 La Arquitectura de Control

Una vez tomadas todas las entradas necesarias del amplio abanico disponible, el ordenador será el encargado de inferir y ejecutar las correspondientes acciones de planificación y control de los actuadores del vehículo, por medio de lógica difusa.

Desglosando la tarea de la conducción humana como si de un sistema de control se tratase, podemos distinguir 3 niveles de actividad diferentes:

1. **Nivel de Control:** implica mantener el vehículo en una trayectoria determinada y dentro de unos límites de velocidad concretos mediante acciones como girar el volante, pisar el acelerador, el freno. . . esto es lo que llamaremos, el control lateral y longitudinal, respectivamente.
2. **Nivel de Maniobra:** abarca todas las maniobras propias de la

## 2.5 El Grupo AUTOPIA

conducción, tales como mantener la distancia de seguridad, hacer un stop, adelantar. . .

3. **Nivel de Planificación:** conlleva tareas tales como la selección de la mejor ruta a seguir en función de determinados criterios, entre otras.

Entre los niveles también existe una diferencia en lo que respecta a la escala temporal en la que se desarrollan; el ciclo de control abarca unos milisegundos, el táctico unos segundos y el de planificación implica una duración mucho mayor. Por último, una vez tomada la decisión de control, es preciso emplear la capacidad motora para trasladar la acción al vehículo, para lo que para lo que un conductor humano utiliza brazos y piernas.

Podemos apreciar que, la tarea de la conducción humana encaja a la perfección con uno de los paradigmas tradicionales de la arquitectura de control: la arquitectura jerárquica. Una arquitectura jerárquica se descompone en tres módulos funcionales agrupados en niveles, que son ejecutados de forma secuencial, como puede verse en la figura 2.24.

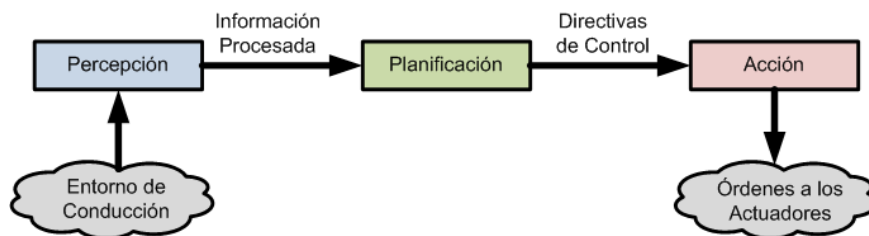


Figura 2.24: Módulos Funcionales del Paradigma de Control

Una vez especificada la arquitectura de control, desarrollaremos cada uno de los niveles funcionales del paradigma y analizaremos la aplicación al sistema de conducción usado en AUTOPIA (Naranjo 06a), (Perez 09b), tanto los módulos funcionales de control como los flujos de datos entre ellos, tal y como se muestra en la figura 2.25.

La **percepción**, así como los datos de entrada usados para controlar el vehículo variarán según el coche con el que estemos trabajando, así como de la tarea o maniobra a llevar a cabo, en nuestro caso, el trabajo

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

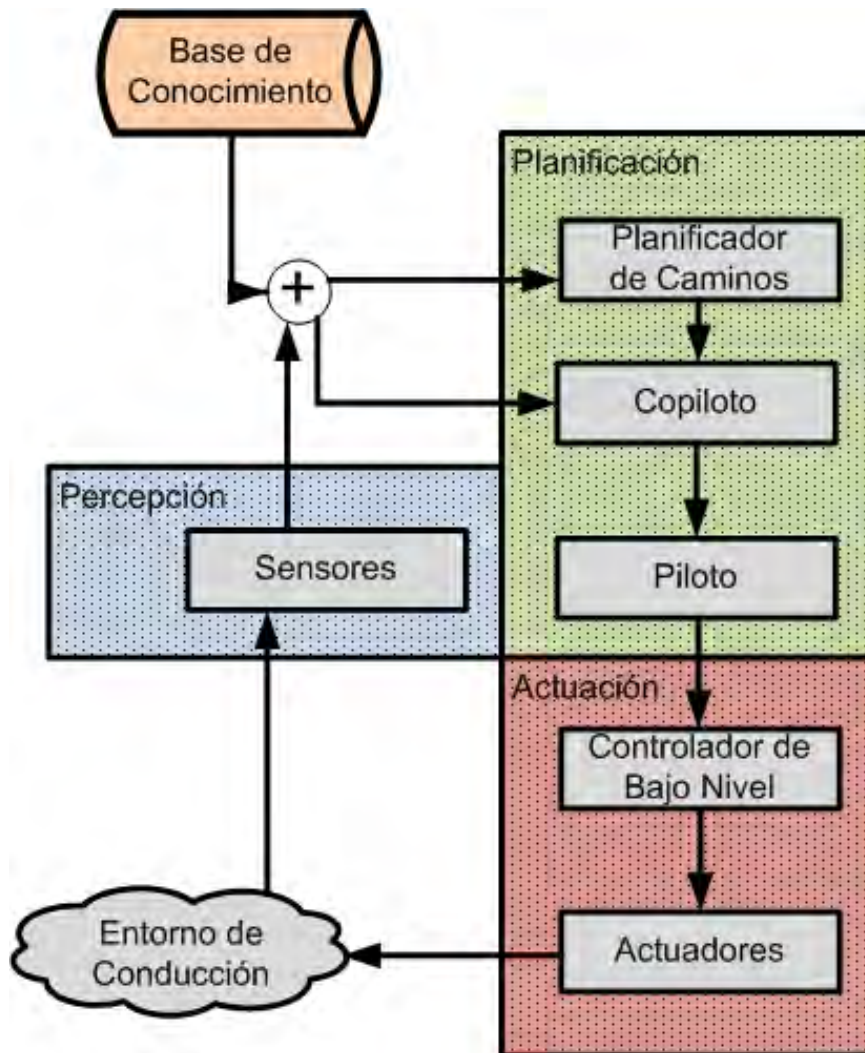


Figura 2.25: Arquitectura de control implementada en AUTOPIA.

aquí presentado se desarrolla para controlar el volante y pedales de *Clavileño* (figura 2.21).

La **base de conocimiento** está formada por un mapa de carreteras (o del entorno donde el vehículo vaya a circular) y, por un conjunto de normas de tráfico en las que basar la conducción. Parte de este conocimiento es estático, como son los mapas de carreteras, señalización

## 2.5 El Grupo AUTOPIA

de tráfico<sup>1</sup>, y parte dinámico, como las posiciones de los obstáculos, velocidades de los demás vehículos, etc. Se utiliza un sistema de representación de curvas avanzado capaz de representar rectas y curvas como secuencias de segmentos de distinta longitud (Naranjo 04), tal y como vemos en la figura 2.26. Además, estos mapas cuentan con una velocidad de referencia, asociada a cada segmento, a modo de señal de limitación de velocidad, que será utilizada como consigna de velocidad por el sistema de control de velocidad.

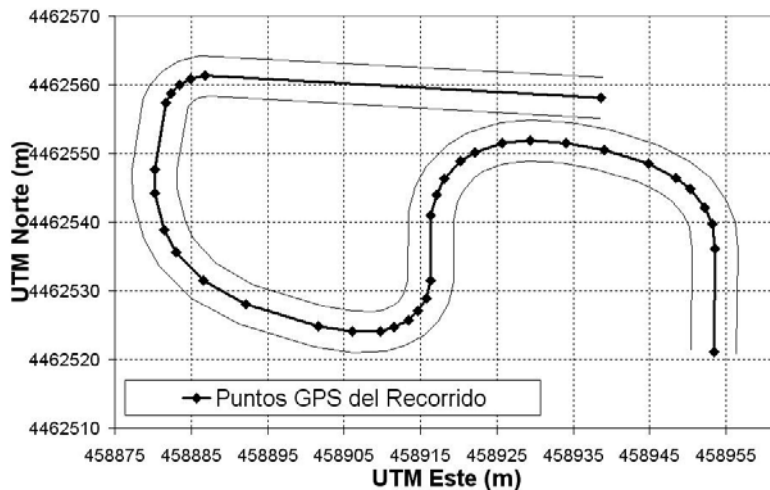


Figura 2.26: Mapa de un recorrido que incluye curvas de diferentes radios.

El **planificador del camino** consistirá en un módulo que establece la ruta a seguir por el vehículo automático por asignación directa, es decir, por asignación del usuario, de la misma forma que un cliente indica a un taxista por donde desea ir. Esto es así debido a que la planificación de caminos no forma parte del trabajo realizado por el grupo.

El **copiloto** decide por un lado qué tipo de maniobra realizar (control de crucero, detenerse, adelantar...) y, por el otro, partiendo del mapa y de la información obtenida del receptor GPS, aplicará las correspondientes transformaciones a los datos de entrada, para así generar información

<sup>1</sup>Puede no ser estático en casos especiales, tales como obras en la vía, indicaciones especiales de un agente de tráfico o la presencia de elementos extraños en la vía, por ejemplo, un vehículo accidentado.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

adaptada a efectos de control que servirán como datos de entrada para los siguiente módulos.

El **piloto** está formado por un conjunto de controladores difusos que realizan la función de conducción a bajo nivel. Recibe los parámetros de entrada del copiloto, y generará una salida dirigida a los actuadores del vehículo, permitiendo así su conducción. Este es el módulo de menor nivel de la etapa de planificación y se puede decir que los controladores difusos asociados son el auténtico núcleo de los sistemas de conducción. Básicamente hay dos controladores, capaces de manejar las dos principales variables de control de un vehículo; estas son la velocidad y la dirección, denominados control longitudinal y lateral, respectivamente.

El piloto es el módulo que presenta el mayor interés para la realización de este trabajo, ya que se trata del módulo encargado de aplicar el control difuso a partir de las entradas del vehículo, con el fin de llevar a cabo la conducción. La definición y aplicación de los controladores difusos se obtiene mediante la aplicación de *ORBEX*, descrito en detalle más adelante.

El **controlador de bajo nivel** está compuesto por las tarjetas de control y la interfaz electrónica de los actuadores; recibe las instrucciones del piloto y, mediante hardware, manda a los actuadores la consigna apropiada para que cumplan su misión.

Los **actuadores** son el acelerador, freno y volante, aunque la implementación requerida para actuar sobre ellos difiere en función del vehículo utilizado.

### 2.5.4 ORBEX

Como se comentó con anterioridad, los controladores difusos que emplea el *piloto* en la arquitectura de control están definidos utilizando la librería de modelado difuso ORBEX (García 98). El entorno ha sido usado por el grupo AUTOPIA para el modelado y ejecución en tiempo real de los controladores difusos que controlan 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

## 2.5 El Grupo AUTOPIA

la conducción a la situación actual del tráfico. Dichas estrategias pueden ser definidas e implementadas mediante reglas difusas del tipo *SI...ENTONCES...*

Un controlador o Sistema Basado en Reglas Difusas (SBRD) sigue un esquema tal y como podemos ver en la figura 2.27, y está formado por los siguientes elementos:

- La fase de **fuzzificación** convierte un valor real (crisp) a un valor difuso.
- La **base de datos** contiene la definición lingüística de las variables, esto es, las etiquetas difusas con las que codificaremos cada una de las variables.
- La **base de reglas** o de conocimiento contiene el conjunto de acciones a realizar en función del estado, en forma de reglas del tipo *SI ... ENTONCES ....*
- El **motor de inferencia** realiza el proceso de razonamiento para estimar la salida en función de las entradas.
- La fase de **defuzzificación** convierte la salida difusa a un valor real (crisp).

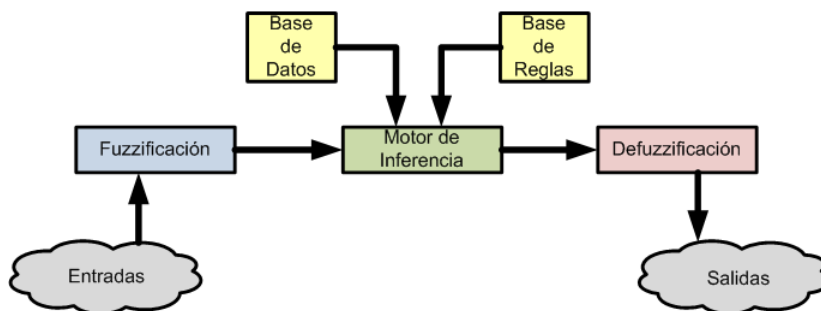


Figura 2.27: Representación esquemática de un sistema difuso.

ORBEX trabaja con controladores difusos que utilizan funciones de pertenencia trapezoidales para la codificación de las variables de entrada, y *singletons* para la codificación de variables de salida. Esto permite

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

tomar decisiones de control en un período de tiempo muy corto, con muy buena precisión y garantizando la estabilidad del sistema; cualidades más que deseables para sistemas de tiempo real, donde el tiempo de inferencia es un aspecto vital, como puede ser la conducción automática de un vehículo (Sugeno 99).

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

- Las variables de entrada al sistema con sus respectivas particiones difusas o etiquetas lingüísticas. 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 siguiendo el siguiente formato, donde  $(A,B,C,D)$  define una función de pertenencia trapezoidal:

```
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 (singleton). 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 de 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 de la siguiente forma. Para describir las reglas, ORBEX permite el uso de la siguiente sintaxis, que le hace ser muy potente y flexible en la definición de reglas, uso de modificadores aunque en este trabajo,



## 2.5 El Grupo AUTOPIA

---

principalmente trabajaremos con reglas del tipo:

SI Entrada<sub>1</sub> Valor<sub>1</sub> Y In<sub>2</sub> Valor<sub>2</sub> ENTONCES Salida<sub>1</sub> Salida

Más formalmente, la gramática para generar reglas en formato ORBEX es la siguiente:

Sentencia = SI prótasis ENTONCES apódosis  
 Prótasis = sujeto predicado {(Y | O) sujeto predicado }  
 Predicado = [ NO ] ( [ modificador | comparador ] |  
                   ENTRE adjetivo Y adjetivo )  
 Modificador = POCO | MUY | EXTRA  
 Comparador = MAYORQUE | MENORQUE  
 Apódosis = sujeto adjetivo { , sujeto adjetivo }  
 Sujeto = variable difusa  
 Adjetivo = subconjunto difuso

Como podemos ver en la gramática, se permite el uso de modificadores lingüísticos, éstos se presentan en la tabla 2.2, cada uno con su función de cómputo asociada, donde  $\mu$  representa el grado de pertenencia del valor de la variable de entrada a un determinado subconjunto difuso.

Modificador	Cálculo
<i>POCO</i>	$\sqrt{\mu}$
<i>MUY</i>	$\mu^2$
<i>EXTRA</i>	$\mu^3$
<i>MAYORQUE(a)</i>	$\mu_{>a} = 1 - \mu_a$
<i>MENORQUE(a)</i>	$\mu_{<a} = 1 - \mu_a$
<i>ENTRE(a,b)</i>	MAYORQUE(a) x MENORQUE(b)
<i>NO</i>	$1-\mu$

Tabla 2.2: Modificadores Lingüísticos soportados por ORBEX

Un ejemplo de controlador simple, definido en ORBEX, podría ser el siguiente:

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

Entradas:

Input1 {Low 0 0 0 5 Medium 0 5 5 10 High 5 10 10 10}

Input2 {Low 0 0 2.5 5 Medium 2.5 5 5 7.5 High 5 7.5 10 10}

Salidas:

Output1 {Low -1 Medium 0 High 1}

Reglas Contexto

SI Input1 Low Y Input2 Low ENTONCES Output1 High

SI Input1 NO Low ENTONCES Output1 Low

SI Input2 Medium ENTONCES Output1 Medium

SI Input2 High ENTONCES Output1 Low

Otro aspecto a tener en cuenta sobre es el proceso de inferencia usado por ORBEX. Una vez establecido el valor de las variables de entrada, el sistema realiza el proceso de *fuzzyficación*, que asigna un valor de pertenencia a cada subconjunto o partición difusa de la variable según el valor crisp asignado a la variable. Una vez hecho esto, se procede a la inferencia, que sigue el siguiente procedimiento estándar para cada una de las reglas:

1. Se calcula primero el grado de cumplimiento de la primera condición
2. Se asigna este cumplimiento a una variable temporal  $\{W\}$
3. Se calcula el grado de cumplimiento de la segunda condición
4. Se calcula el conectivo lógico  $\{Y/O\}$  mediante las t-normas y s-normas mínimo y máximo
5. Se guarda el resultado en la variable temporal  $\{W\}$
6. Se calcula el grado de cumplimiento de la tercera condición
7. Se calcula el conectivo lógico  $\{Y/O\}$  mediante las t-normas y s-normas mínimo y máximo
8. Así, en general para  $N$  condiciones y conectivos lógicos.

El valor final de la variable temporal  $\{W\}$  representará el grado de satisfacción del antecedente de la regla y que este valor será el peso que

se asigne al consecuente de la regla. Una vez realizado el proceso de inferencia, se pasa al proceso de *defuzzyficación*, que consiste en la suma ponderada de los singletons de la variable de salida, según la siguiente fórmula:

$$\frac{\sum P_i w_i}{\sum w_i} \quad (2.1)$$

donde  $w_i$  es el peso correspondiente a la partición difusa singleton  $P_i$ .

### 2.5.5 Líneas de Investigación

Desde sus inicios, el grupo ha tenido a la lógica difusa como piedra angular en lo que se refiere al control del vehículo (García 04), principalmente para las tareas básicas derivadas de la conducción, como son: el control del volante y de los pedales.

En lo que respecta al control de pedales, en (Onieva 10b) se presenta el diseño de dos controladores difusos que actúan cooperativamente sobre el acelerador y freno de *Clavileño* a bajas velocidades. Referente al control del volante, en (Naranjo 04) se presenta el diseño de un controlador difuso sencillo; por otra parte en (Milanés 08c) se orienta el diseño a recorridos de baja maniobrabilidad, donde la velocidad debe ser excesivamente baja; (Alonso 05) presenta un estudio de la conducción en curvas.

La incorporación de métodos de optimización, principalmente algoritmos genéticos, permitió realizar un ajuste fino de los controladores a cargo del volante de los vehículos. En (Onieva 08) y (Onieva 09a) se presenta una primera aproximación, donde el algoritmo genético está a cargo de optimizar tanto las etiquetas como las reglas del controlador difuso encargado de llevar a cabo la tarea; (Onieva 09b) aumenta la complejidad del controlador, añade una tercera entrada que evalúa la posición actual del volante y actúa en consecuencia, con el fin de suavizar las acciones. Finalmente en (Onieva 11a) se optimiza, añadiendo conocimiento experto, un controlador difuso realimentado, mientras que en (Onieva 10c) se optimiza una gama de controladores *reactivos*. Esta línea de investigación supone un cambio en la filosofía de *conducir como una persona* basado

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

en lógica difusa hacia *imitar el comportamiento humano al volante*, por medio de los sistemas genético-difusos; ya que los controladores son en todos los casos obtenidos a partir de las acciones de conductores humanos y, finalmente comparados con ellos.

Maniobras más complejas pueden ser realizadas haciendo uso de estos controladores de base, por ejemplo, como cambios de carril; (Naranjo 08) muestra un estudio de lo que la maniobra de cambio de carril supone, así como un controlador difuso implementado con tal fin. El cambio de carril supone una de las subtareas involucradas en el adelantamiento entre vehículos. En (Alonso 07a) y (Alonso 07b) se estudia la maniobra de adelantamiento desde el punto de vista de la cooperación a llevar a cabo entre los vehículos. En (Pérez 08) se utiliza comunicaciones vehículo-vehículo para llevar a cabo la tarea de adelantar en carreteras de doble sentido donde, la presencia de un vehículo circulando por el carril contrario puede desembocar en una situación en la que sea necesario realizar una maniobra de *abortar adelantamiento*. También se implementa un controlador difuso que disminuye la velocidad en caso de requerirse el abortar la maniobra, detallado en (Perez 10).

Otra línea de investigación son los cruces, y la coordinación requerida entre varios vehículos autónomos con el fin de llevarse a cabo sin riesgos. En (Alonso 09a) y (Alonso 09b) se analiza el problema desde el punto de vista de la coordinación por medio de comunicaciones vehículo vehículo. Por otra parte, en (Milanés 10c) se realiza la maniobra sin necesidad de coordinación, suponiendo un escenario en el que un vehículo conducido manualmente se cruza con un vehículo autónomo; en este caso, el vehículo autónomo debe adaptar su velocidad en función de las *desconocidas* acciones del vehículo conducido manualmente.

El uso de entornos simulados ha permitido al grupo la experimentación del control de vehículos en situaciones altamente inconcebibles en la realidad, como son las de conducción competitiva. En (Onieva 09c) se presenta una primera aproximación a arquitectura de control en estos entornos, trabajo que es complementado con (Onieva 11b), donde se completa el diseño. Dicha arquitectura compitió con propuestas provenientes de todo el mundo, resultando ganadora, los detalles de la competición

## 2.5 El Grupo AUTOPIA

---

se detallan en (Loiacono 09). Por otra parte, se diseñó un controlador difuso para realizar la tarea de adelantar a vehículos los cuales intentan *bloquear* la maniobra en (Onieva 10a).

El objetivo final de esta y otras líneas abiertas viene a ser, como en el caso del resto de grupos y proyectos, el conseguir una conducción completamente autónoma. Citando a Ricardo García Rosa, cofundador del grupo AUTOPIA, en (García 07):

*¿Para qué es necesario un conductor humano?, de una manera sencilla y quizás exagerada: para nada.*

## **2. ESTADO DEL ARTE**

---

## Capítulo 3

# Control de Velocidad en Entornos Urbanos

EL mantener una velocidad excesiva o inapropiada es una de las principales causas de accidentes en entornos urbanos (Commission 06). De hecho, es la causa de un tercio de los accidentes fatales o muy graves en carretera y la principal causa de accidentes urbanos que involucran a peatones (Commission 01). En el artículo 50<sup>1</sup> del Código de Circulación puede leerse:

*La velocidad máxima que no deberán rebasar los vehículos en vías urbanas y travesías se establece, con carácter general, en 50 kilómetros por hora, salvo para los vehículos que transporten mercancías peligrosas, que circularán como máximo a 40 kilómetros por hora. Estos límites podrán ser rebajados en travesías especialmente peligrosas por acuerdo de la autoridad municipal con el titular de la vía, y en las vías urbanas, por decisión del órgano competente de la corporación municipal.*

Aunque esta sea la norma general de circulación, existen algunos casos especiales. En áreas tales como zonas escolares la velocidad está limitada por lo general a 20 km/h. Por otra parte, la presencia de badenes

---

<sup>1</sup>Real Decreto 1428/2003. Boletín Oficial del Estado (BOE). Vol. 306. pag. 45684 a 45772. 23 Diciembre 2003.

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---

o pasos peatonales elevados hace que la velocidad se deba reducir, en muchos casos hasta valores inferiores a 20 km/h para no provocar daños al vehículo o incómodos *saltos* a sus ocupantes.

Es por ello que el control de bajas velocidades es un factor clave para la seguridad y el confort de los ocupantes de un vehículo a la hora de circular por entornos urbanos. A lo largo del presente capítulo se presentará un sistema de control de velocidad capaz de controlar cooperativamente el acelerador y freno de un vehículo a velocidades inferiores a 30 km/h, lo que lo hace apropiado para entornos urbanos.

En la **sección 3.1** se presenta un análisis de las deficiencias de las alternativas actuales al problema del control de bajas velocidades, así como el relativo *vacío* de investigación referente a dicha temática. En la **sección 3.2** se explica la instrumentación necesaria para conseguir actuar sobre los pedales del vehículo. En la **sección 3.3** se presenta el sistema difuso propuesto, explicando y justificando cada uno de los parámetros que lo definen. En la **sección 3.4** se presentan los resultados experimentales obtenidos, comparando las medidas de bondad del controlador con las de un conductor humano; concluyendo en la **sección 3.5** que el sistema presentado constituye una buena solución para relevar a los conductores de la tediosa tarea de controlar la velocidad en entornos urbanos.

#### 3.1 Motivación

La adecuación de la velocidad y su influencia en la seguridad ha sido tomada en cuenta por la industria del automóvil, y así como múltiples sistemas se han diseñado para adaptar automáticamente la velocidad del vehículo dependiendo del entorno, también es cierto que muchos de ellos son inapropiados para su uso en áreas urbanas.

Los controles de velocidad modernos se inventaron en 1945 por el inventor ciego e ingeniero mecánico Ralph Teetor. Su idea nació de la frustración de ir en el vehículo con su abogado, quien frenaba y aceleraba continuamente según hablaba. El primer vehículo con el sistema de Teetor fue el Chrysler Imperial en 1958. Este sistema calculaba la



velocidad sobre la carretera basándose en las rotaciones del palier y usaba una bobina para variar la posición del acelerador según fuera necesario.

Hoy en día el Control de Crucero del Audi A4 permite la selección de la velocidad deseada únicamente entre 35 km/h y 190 km/h; el nuevo Ford Mondeo presente un ajuste de la velocidad de crucero para cualquier velocidad superior a 32 km/h; por otro lado, el control de crucero del Honda Accord únicamente se activa a velocidades mayores de 30 km/h.

Este tipo de sistemas son de gran utilidad en carreteras o autovías, pero en entornos urbanos donde situaciones como la necesidad de realizar paradas constantemente, el tener que mantener velocidades muy bajas o circulación en atascos hacen que la velocidad permitida baje y oscile por debajo de las velocidades de activación de este tipo de sistemas, haciéndolos inapropiados en estos casos.

Para mejorar la implementación de los mencionados sistemas comerciales, se requiere de un control sobre ambos pedales del vehículo, cosa que no hacen la mayoría de los sistemas comerciales y, en caso de ser necesario, la caja de cambios.

Múltiples estudios han abordado este problema; soluciones propuestas para el manejo de los pedales de un vehículo se han basado en complejos modelos matemáticos de sistemas longitudinales (Brady 82; Laumond 98) sobre los que se han aplicado técnicas tales como redes neuronales (Pomerleau 91), algoritmos genéticos (Stafylopatis 98) o lógica difusa (Driankov 01; Sugeno 89).

Por lo general, este tipo de aplicaciones están enfocadas hacia su uso en carretera, por lo que han sido probadas para velocidades de crucero de entre 60 y 100 km/h ya que, a bajas velocidades, esta clase de sistemas se comporta de forma diferente, así como muy difícilmente modelable mediante métodos matemáticos (Marsden 01), ya que las consecuencias de las acciones sobre los pedales se incrementan, afectando fuertemente a las dinámicas del vehículo (Piao 03).

Otra alternativa son los sistemas de parada y arranque (conocidos como *Stop&Go*); son capaces de trabajar bajos rangos de velocidades, deteniendo el vehículo cuando es necesario (Acarman 06). Por lo general, este tipo de sistemas se basan en espacios de tiempo entre vehículos

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---

(Naranjo 06b; Wu 06), pero no son útiles para funciones de control de crucero; situaciones en las que la velocidad debe ser reducida sin la presencia de un vehículo delante, tal como en zonas escolares, donde la velocidad debe ser lo suficientemente baja como para disponer de suficiente tiempo de reacción ante situaciones impredecibles como la aparición de un peatón o un semáforo cambiando a rojo.

Las deficiencias de las alternativas actuales, así como el *vacío* de investigación referente al control de bajas velocidades fue lo que motivó el diseño, implementación y prueba de un sistema de control de bajas velocidades basado en lógica difusa, el cuál será descrito en su totalidad a continuación.

#### 3.2 Actuación sobre el Acelerador y Freno

En lo que se refiere a la actuación necesaria para llevar a cabo un control de velocidad, se debe tener en cuenta únicamente el manejo de los pedales de acelerador y freno, dado que el vehículo utilizado (*Clavileño*) dispone de su propio sistema de cambio de marchas automático implementado por Citroën.

En lo que respecta al control del **acelerador**, se cortaron las dos señales de tensión que genera el acelerador y se conmutaron por otras generadas por el ordenador embarcado del vehículo.

Cuando el conmutador cambia de posición para activar el sistema de control automático, recibe una señal de una tarjeta externa de conexiones (modelo ADAM-3937) a la que se han derivado las señales analógicas de control provenientes de una tarjeta PCI 1720<sup>1</sup> de salidas analógicas. Esta tarjeta se encarga de enviar las tensiones generadas por el controlador con el fin de regular la aceleración del vehículo. En la figura 3.1 puede verse un esquema del sistema.

Para el control del **freno**, se intervino la caja del ABS (del inglés *Antilock Braking System*) con un sistema de actuación que consta de una válvula con una salida, conectada directamente al ABS para respetar el circuito original. El sistema consta de dos entradas: la primera conectada

---

<sup>1</sup><http://www.advantech.com.tw/products/PCI-1720/mod.1-2MLH37.aspx>

### 3.2 Actuación sobre el Acelerador y Freno

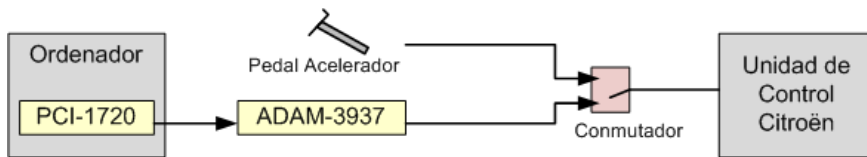


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del sistema de control del acelerador.

al circuito inicial de freno, que permite su accionamiento convencional, y la segunda conectada a un sistema electro-hidráulico diseñado para el accionamiento automático del freno desde el ordenador embarcado. La válvula selectora se muestra en la figura 3.3 (izquierda).

El sistema electro-hidráulico está formado, a su vez, por otras tres válvulas. Una *limitadora* que impide superar la presión máxima, fijada experimentalmente en 100 bares, que se puede ejercer sobre el freno, una *todo/nada* que permite el paso de líquido de freno y una *proporcional* que regula su caudal. La válvula proporcional está controlada a través de un módulo CAN (del inglés, *Controller Area Network*) con una salida analógica. Además, el dispositivo CAN incluye una salida a relé para controlar la apertura y cierre de la válvula todo/nada. El módulo CAN es alimentado por una batería auxiliar a la propia del vehículo. Las salidas son controladas a través del PC embarcado en el vehículo por medio de un conversor CAN-USB. Todos los detalles de este sistema pueden encontrarse en (Milanés 10a). En la figura 3.3 (derecha) se muestra una fotografía del sistema una vez montado en el vehículo.

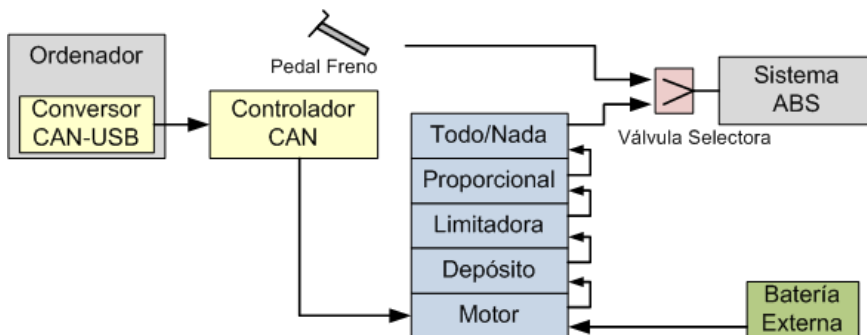


Figura 3.2: Esquema de funcionamiento del sistema de control del freno.

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---



Figura 3.3: Válvula selectora entre sistema manual-automático (izquierda). Sistema de frenado electro hidráulico situado en el hueco de la rueda de repuesto del vehículo (derecha).

Ambos sistemas, para controlar el freno y el acelerador están implementados en el vehículo y pueden actuar conjunta o independientemente. Por otra parte, el funcionamiento de los sistemas de actuación no impide que un usuario pueda actuar sobre los pedales en caso de emergencia, o desactivarlos para realizar una conducción manual cuando lo desee. Con el sistema automático activado, el ordenador generará ordenes de control en el intervalo  $[0,1]$  que se traducirán en porcentaje de presión a aplicar sobre el correspondiente pedal.

#### 3.3 Sistema de Control Difuso

El sistema de control ha sido montado sobre *Clavileño* haciendo uso de sensores referentes a posición y velocidad. El conocimiento de la posición del vehículo nos proporcionará la velocidad máxima permitida en el tramo en el cual se encuentra circulando, que, unida a la velocidad, nos permitirá inferir una correcta secuencia de acciones sobre los pedales del vehículo con el fin de alcanzar o mantener la velocidad deseada.

Para ello, se utilizan las señales provenientes del receptor GPS, la unidad inercial (IMU) y el bus CAN del vehículo. Gracias a dichas entradas obtendremos los valores de las dos variables utilizadas como entradas del sistema:

- *Error de velocidad*: la diferencia entre la velocidad actual y la

velocidad deseada.

- *Aceleración*: la derivada respecto del tiempo de la velocidad actual en un determinado instante.

El controlador difuso inferirá dos valores de salida, uno representando la acción sobre el *acelerador* y otro sobre el *freno*. Estos valores de salida están normalizados en la forma que un valor 1 se corresponderá con aplicar máxima presión sobre el correspondiente pedal, mientras que 0 lo hará con no aplicar acción alguna sobre el pedal.

Resultados empíricos prueban que valores superiores a 0.5 sobre el acelerador producen aceleraciones muy altas sobre el vehículo, por lo que serán evitados con el fin de obtener un control confortable para los ocupantes del vehículo; por otra parte, valores superiores a 0.2 sobre el freno pueden producir deceleraciones bruscas, llegando incluso a ser peligrosas (Milanés 10a).

En la figura 3.4 se muestra un diagrama de bloques del sistema implementado para controlar la velocidad del vehículo. En él puede verse cómo las entradas son procesadas por el ordenador embarcado del vehículo. Por la combinación entre señal GPS e inercial se obtiene un posicionamiento del vehículo con precisión de 2cm (Milanés 08a). Por otra parte, la velocidad actual del vehículo se obtiene mediante la lectura del bus CAN del mismo que, junto a la señal de reloj universal dada por el GPS nos permitirá calcular la aceleración. Una vez inferidas las salidas por el controlador difuso, éstas serán enviadas a los correspondientes actuadores del vehículo.

La obtención y codificación de los valores de entrada y salida, así como el proceso de inferencia difusa son explicados en detalle en las siguientes subsecciones.

#### 3.3.1 Error de velocidad

Como se comentó anteriormente, esta variable es el resultado de la diferencia entre la velocidad deseada y actual en km/h, determinada en la ecuación 3.1. En caso de tener valores positivos, la velocidad deseada será mayor que la actual, por lo que se deberán aplicar acciones sobre el

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

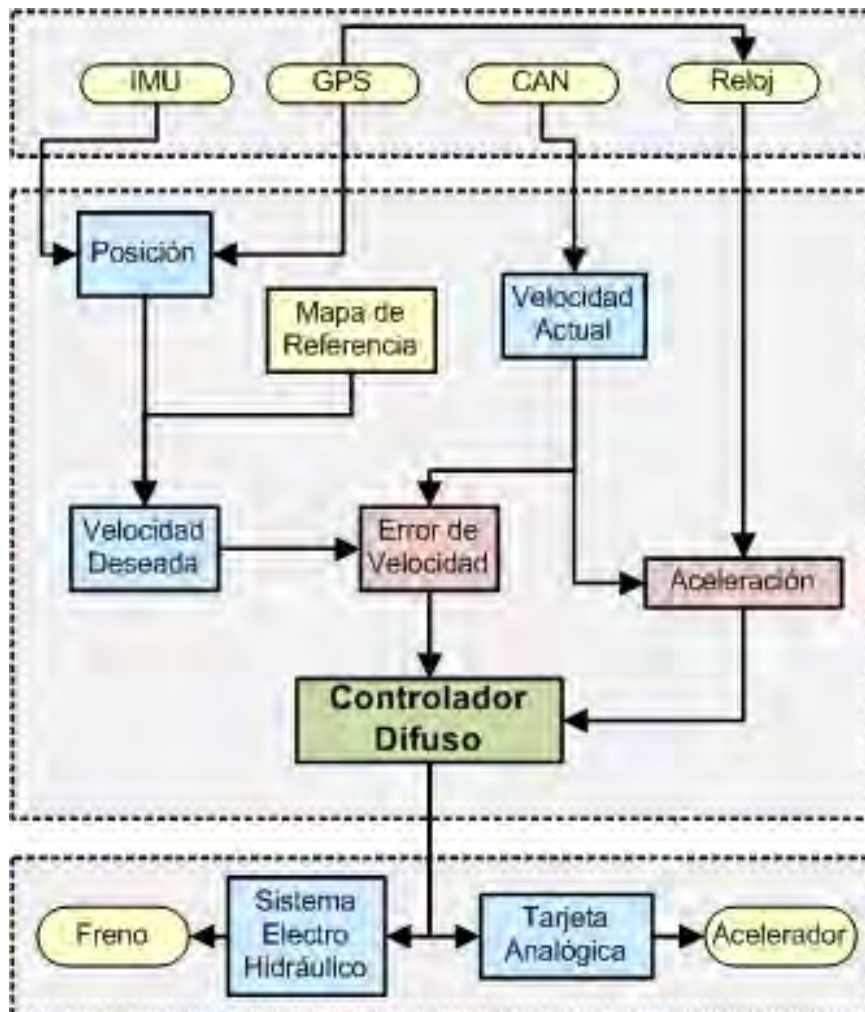


Figura 3.4: Diagrama de bloques para el control de velocidad

acelerador; en caso negativo, se deberán realizar acciones sobre el freno (o sobre ninguno de los pedales para hacer uso del *freno de motor*<sup>1</sup>).

$$Error\ de\ Velocidad = Velocidad\ Deseada - Velocidad\ Actual \quad (3.1)$$

La *Velocidad Actual* es calculada haciendo uso de la *velocidad de giro*

<sup>1</sup>Acto de usar el movimiento necesitado de energía de un motor de combustión para disipar energía y detener un vehículo.

### 3.3 Sistema de Control Difuso

de las ruedas traseras del vehículo leída del bus CAN del vehículo y tomando como *Velocidad Actual* la media de ambos valores.

La *Velocidad Deseada* es obtenida de un mapa de referencias guardado en el ordenador embarcado en el vehículo. En concreto, una vez se obtiene la posición del vehículo, el ordenador embarcado toma la velocidad de referencia de una tabla en la que cada segmento tiene asociada una velocidad permitida.

Con el fin de representar esta entrada del controlador difuso, se ha utilizado tres funciones de pertenencia trapezoidales como pueden verse en la figura 3.5. Las funciones de pertenencia representan los valores lingüísticos *positivo*, cuando la velocidad es mayor de la deseada, *negativo*, en caso contrario y *cero*, cuando la velocidad actual y deseada son aproximadamente la misma.

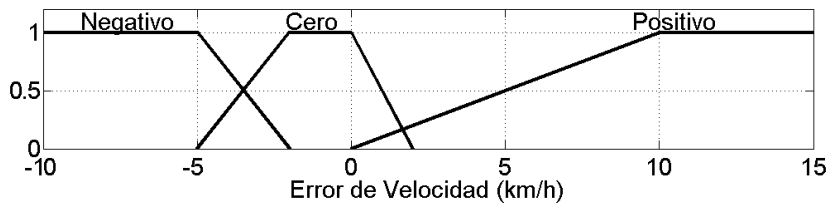


Figura 3.5: Funciones de pertenencia difusas para la entrada *Error de Velocidad*.

Las etiquetas han sido inferidas de una manera experimental. La falta de simetría en los trapecios se debe a las asimetrías propias de los pedales del vehículo, ya que, la aceleración producida al pisar el acelerador no será inversa a la deceleración al pisar el freno. Por otra parte la modificación de la etiqueta *positivo* permitió obtener una degradación de la salida que va al freno del vehículo, obteniendo así, frenadas más suaves.

#### 3.3.2 Aceleración

Representa la derivada respecto al tiempo de la velocidad actual del vehículo, tal y como se muestra en la ecuación 3.2. También será codificada por el controlador difuso por medio de tres funciones de pertenencia trapezoidales, las cuales se muestran en la figura 3.6; las etiquetas lingüísticas definidas para esta entrada son *positiva* cuando el

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---

coche está acelerando, *negativa* cuando está decelerando y *cero* cuando la velocidad es aproximadamente constante.

$$Aceleracion = \frac{Velocidad Actual_t - Velocidad Actual_{t-1}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

El valor  $\Delta t$  se obtiene de la señal de tiempo universal tomada de la señal GPS, la cual es refrescada con una frecuencia de 5Hz.

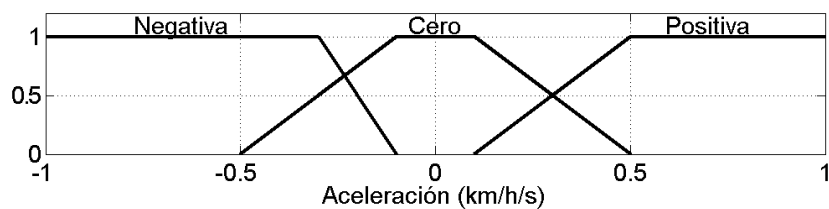


Figura 3.6: Funciones de pertenencia difusas para la entrada *Aceleración*.

Nuevamente podemos ver una pequeña asimetría en las etiquetas, ésta permite que la acción del acelerador sea ligeramente mayor cuando el vehículo está decelerando a lo que sería la acción sobre el freno cuando está acelerando.

#### 3.3.3 Acelerador

Esta salida del sistema estará definida por un número en el intervalo  $[0,1]$  que representará el porcentaje de presión aplicada sobre el susodicho pedal; así pues, un *Acelerador* = 0 representará no aplicar presión sobre el pedal mientras *Acelerador* = 1 representará aplicar presión máxima.

El valor de la variable se enviará a una tarjeta analógica conectada al circuito interno de aceleración del vehículo. Dicha tarjeta enviará incrementos de voltaje al controlador interno del vehículo en el rango de 0 a 5 V.

Como se comentó anteriormente, valores superiores a 0.5 pueden producir situaciones no deseables sobre el vehículo; es por ello que se han utilizado cuatro singletons situados en los puntos 0, 0.1, 0.2 y 0.4 etiquetados como *a00*, *a01*, *a02* y *a04* respectivamente. Una



representación gráfica de los singletons de salida puede verse en la figura 3.7.

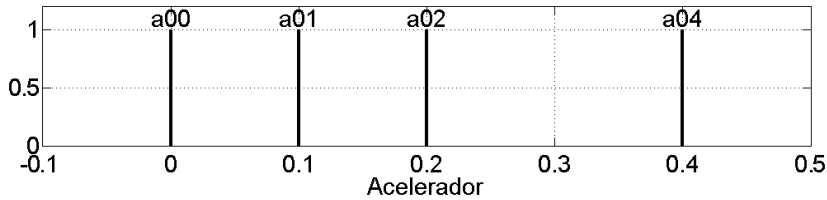


Figura 3.7: Singletons utilizados para codificar la salida *Acelerador*.

#### 3.3.4 Freno

Esta salida estará codificada por tres singletons definidos en el intervalo  $[0,0.2]$ . El valor final de salida inferido por ORBEX para *Freno* representará la presión normalizada a enviar por el sistema electro hidráulico al sistema interno de frenado del vehículo.

Los singletons utilizados para codificar esta variable de salida pueden verse en la figura 3.8. Las etiquetas  $f00$ ,  $f01$  y  $f02$  denotarán los singletons en los valores 0, 0.1 y 0.2 respectivamente.

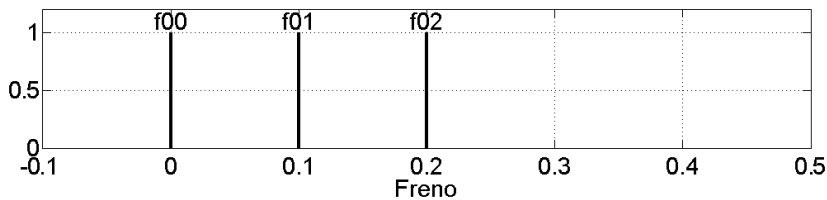


Figura 3.8: Singletons utilizados para codificar la salida *Freno*.

#### 3.3.5 Base de Reglas para el Acelerador

El conocimiento básico sobre la conducción nos dice que el acelerador no debe usarse en caso de que el vehículo circule a mayor velocidad de la permitida o deseada. Si tenemos en cuenta la aceleración, la acción sobre el acelerador debe ser mayor cuanto menor sea la aceleración, con el fin de compensar la pérdida de velocidad. Las reglas que forman el núcleo del controlador del acelerador están enumeradas a continuación.

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---

R<sub>1</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Positivo **entonces** *Acelerador a00*

R<sub>2</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Negativo Y *Aceleración* **es** Positivo  
**entonces** *Acelerador a01*

R<sub>3</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Negativo Y *Aceleración* **es** Cero  
**entonces** *Acelerador a02*

R<sub>4</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Negativo Y *Aceleración* **es** Negativo  
**entonces** *Acelerador a04*

R<sub>5</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Cero Y *Aceleración* **es** Positivo  
**entonces** *Acelerador a00*

R<sub>6</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Cero Y *Aceleración* **es** Cero  
**entonces** *Acelerador a01*

R<sub>7</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Cero Y *Aceleración* **es** Negativo  
**entonces** *Acelerador a01*

La regla 1 representará que no se deberá utilizar el acelerador cuando la velocidad es superior a la deseada. En caso la velocidad sea aproximadamente igual a la deseada (reglas 5, 6 y 7) no se utilizará el acelerador cuando la aceleración sea positiva, mientras que se hará levemente en otro caso. Cuando la velocidad sea menor a la deseada (reglas 2, 3 y 4), el acelerador se usará con mayor intensidad cuanto menor sea la aceleración.

La superficie de control que se obtiene para el control del acelerador se muestra en la figura 3.9.

#### 3.3.6 Base de Reglas para el Freno

Únicamente se hará uso del freno en el caso de que el vehículo esté circulando a mayor velocidad de la deseada, es decir, en el caso de que el error de velocidad sea positivo; la intensidad de frenada en este caso será mayor cuando mayor sea la aceleración. Las reglas que forman el núcleo del controlador del freno están enumeradas a continuación.

R<sub>8</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Negativo **entonces** *Freno f00*

R<sub>9</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Cero **entonces** *Freno f00*

R<sub>10</sub>: **si** *Error Vel.* **es** Positivo Y *Aceleración* **es** Positivo  
**entonces** *Freno f02*

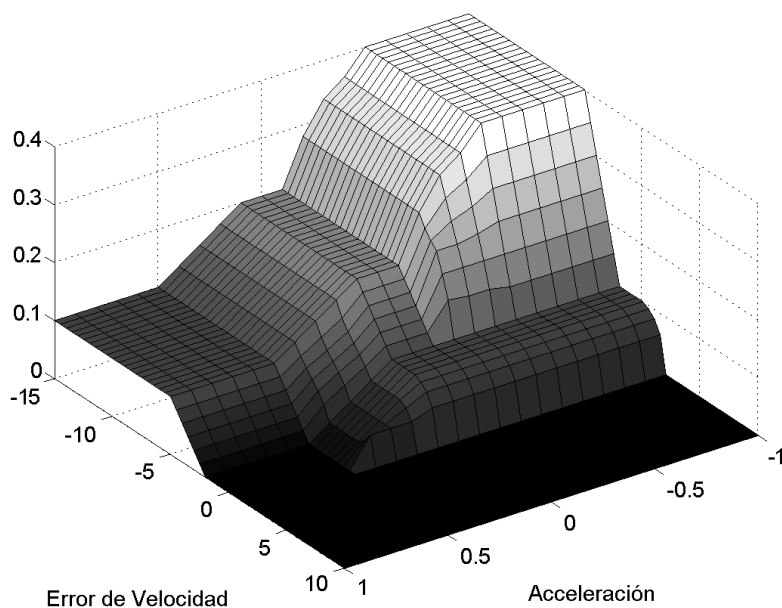


Figura 3.9: Superficie de control del acelerador del vehículo.

$R_{11}$ : **si** *Error Vel.* **es** Positivo Y *Aceleración* **es** Cero

**entonces** *Freno* f01

$R_{12}$ : **si** *Error Vel.* **es** Positivo Y *Aceleración* **es** Negativo

**entonces** *Freno* f01

Como se ha comentado con anterioridad, así como las acciones sobre el acelerador son asimétricas con las del freno, ambas bases de reglas lo son. En este caso el freno no deberá de usarse cuando la velocidad sea menor o igual a la deseada (reglas 8 y 9); por otra parte, en caso la velocidad sea mayor a la deseada, el freno se usará con mayor intensidad si la aceleración es positiva (regla 10) y con menor en otro caso (reglas 11 y 12).

La superficie de control obtenida para el control del acelerador se muestra en la figura 3.10.

### 3.4 Experimentación

Diversas pruebas han sido llevadas a cabo con el fin de comprobar el buen funcionamiento del controlador presentado a lo largo del capítulo. Dado

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---

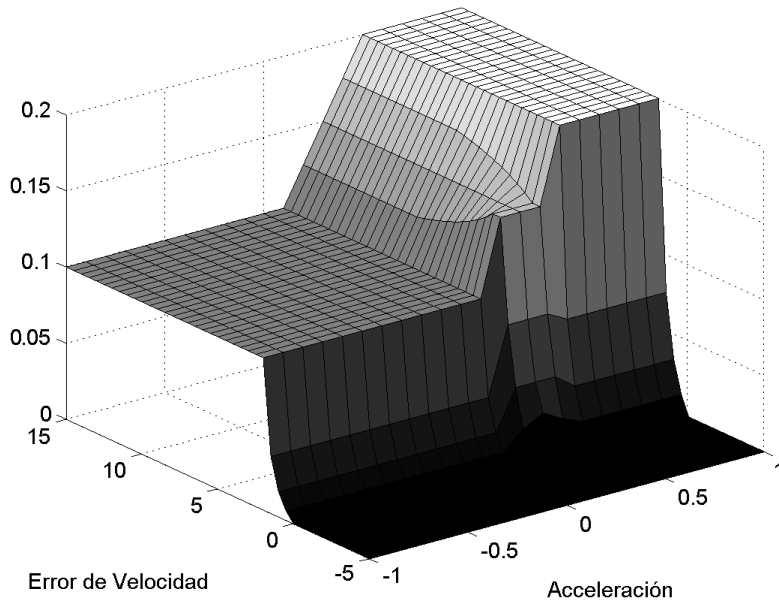


Figura 3.10: Superficie de control del acelerador del vehículo.

que dichos experimentos no requieren de una forma concreta de manejar el volante, éste ha sido manejado de manera manual e independiente del sistema presentado.

El principal objetivo de los experimentos aquí presentados es comprobar el buen funcionamiento del controlador bajo dos tareas diferentes: 1) mantener una velocidad constante y 2) realizar cambios de velocidad adecuadamente. Se llevarán a cabo un total de cinco pruebas de las cuales cuatro de ellas están enfocadas a mantener una velocidad constante de 10, 15, 20 y 25 km/h respectivamente, más una prueba adicional en la que el controlador ha sido sometido a cambios en la velocidad deseada.

#### 3.4.1 Adaptación a Cambios de Velocidad

El primero de los experimentos consiste en someter al controlador a varios cambios de velocidad en un rango entre 10 y 40 km/h. En la figura 3.11 pueden verse los resultados de este experimento.

Los resultados parecen buenos desde un punto de vista cualitativo, ya que, desde un punto de vista cuantitativo habría que definirse apropi-

### 3.4 Experimentación

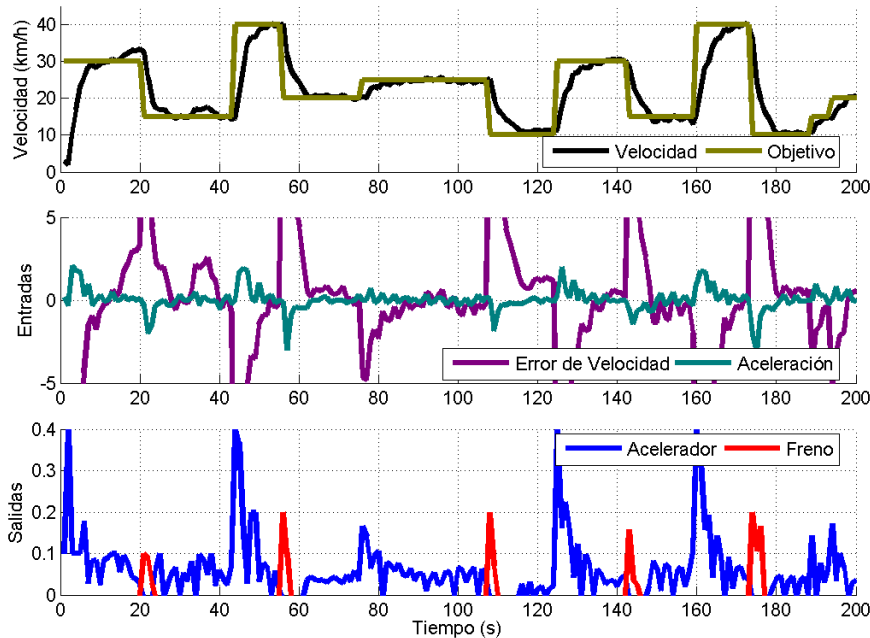


Figura 3.11: Resultados experimentales de la prueba con velocidades cambiantes.

adadamente el estado transitorio a partir del cual medir errores medios así como establecer unos baremos adecuados para poder cuantificar el confort de los ocupantes del vehículo.

Como podemos ver en la figura 3.11, valores del acelerador del 40% únicamente se obtienen durante un periodo de tiempo muy corto justo después de un cambio brusco en la velocidad objetivo; se dan al comienzo, aproximadamente cerca a los segundos 45, 125 y 150, donde la velocidad objetivo cambia de 15 a 40 y de 10 a 30 km/h. Estos cambios bruscos en la velocidad objetivo provoca acciones sobre el acelerador bruscas pero dichas acciones únicamente son mantenidas durante un período de tiempo corto (un par de segundos) tras el cual el controlador aprovecha la aceleración adquirida para alcanzar la velocidad objetivo de una manera suave.

Un caso muy similar ocurre con el freno, acciones del 20% sobre éste únicamente se dan durante un período de tiempo muy corto justo tras un cambio brusco en la velocidad objetivo.

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

---

#### 3.4.2 Mantenimiento de Velocidad Fija

Cuatro experimentos se han realizado con el fin de evaluar el controlador en la tarea del mantenimiento de una velocidad prefijada. Dichos experimentos han sido realizados con velocidades objetivo de 10, 15, 20 y 25 km/h respectivamente.

A modo ilustrativo, mostraremos en detalle los experimentos realizados con velocidades objetivo de 10 y 25 km/h, ya que son los casos en los que se contempla la menor y mayor velocidad objetivo; mientras que, para los otros dos experimentos, se mostrarán gráficamente las velocidades obtenidas durante la prueba.

La figura 3.12 muestra las entradas, salidas y velocidad del vehículo en el experimento de mantener una velocidad constante de 10km/h. La prueba fue realizada en su totalidad con la primera marcha del vehículo, ya que el cambio automático no requirió subir dicha marcha durante el experimento.

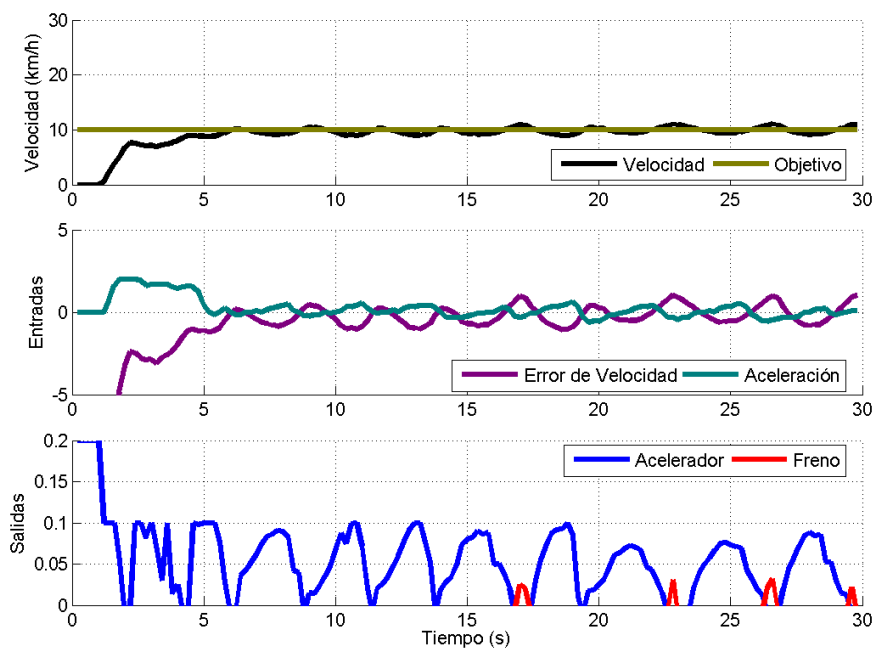


Figura 3.12: Entradas y salidas del controlador en la prueba a 10 km/h.

Por otra parte, la figura 3.13 muestra las entradas, salidas y velocidad

### 3.4 Experimentación

del vehículo manteniendo una velocidad constante de 25km/h. Hay que hacer notar que llegados aproximadamente a los 18 km/h, el cambio de marchas automático del vehículo pasó de primera a segunda marcha, continuando así durante el resto del experimento. Como puede verse comparando con la figura 3.12, acciones sobre el freno son menores y menos frecuentes que en el experimento a 10 km/h; esto es debido a que acciones sobre el acelerador a bajas velocidades afectan más a la velocidad y aceleración del vehículo y, llegados a ciertos valores el freno debe activarse si el objetivo es mantener una determinada velocidad.

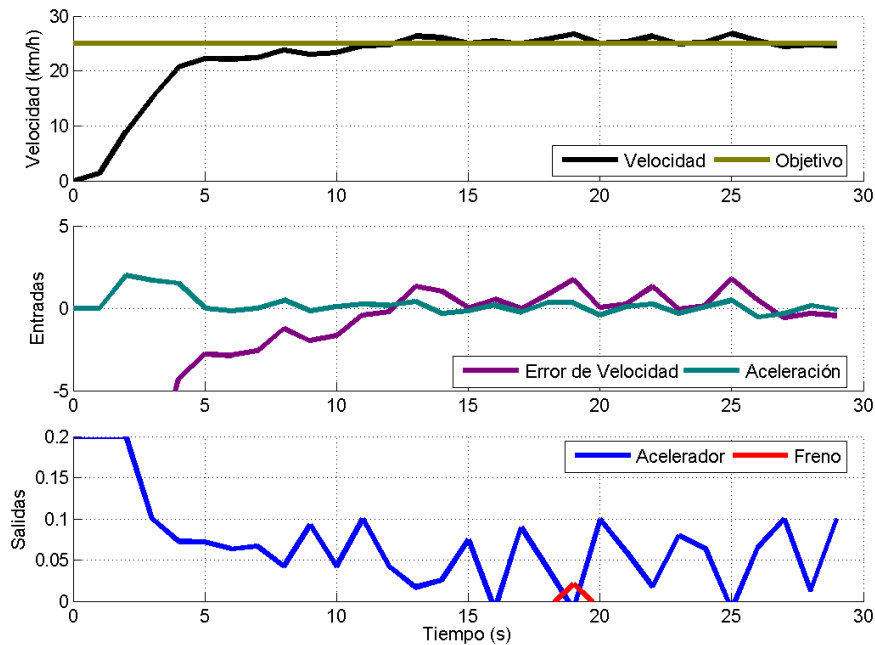


Figura 3.13: Entradas y salidas del controlador en la prueba a 25 km/h.

Para finalizar, en la figura 3.14 se ven las velocidades obtenidas en las pruebas a 15 y 20 km/h, dichas pruebas han sido llevadas a cabo únicamente con la primera marcha del vehículo debido a que el cambio automático no *decidió* subir a segunda. En la figura puede apreciarse nuevamente un buen comportamiento a nivel cualitativo; la valoración cuantitativa del controlador vendrá en el siguiente apartado donde se compararán medidas obtenidas por el controlador difuso con medidas obtenidas por un conductor humano.

### 3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS

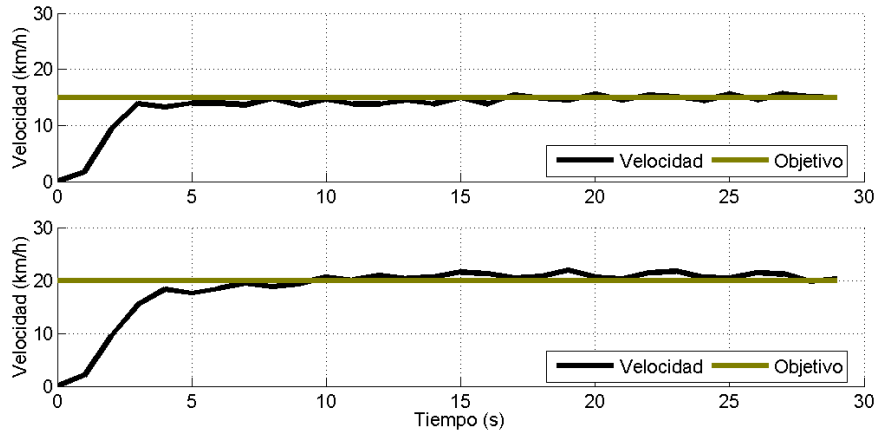


Figura 3.14: Resultados experimentales de la prueba a 15 km/h (arriba) y 20 km/h (abajo).

		Humano (km/h)	Controlador (km/h)
<i>Error de Velocidad</i>	a 10km/h	$\pm 0.63$	$\pm 0.71$
=	a 15km/h	$\pm 0.88$	$\pm 0.98$
=	a 20km/h	$\pm 0.72$	$\pm 0.84$
=	a 25km/h	$\pm 1.22$	$\pm 0.9$

Tabla 3.1: Tabla comparativa entre el conductor humano y el sistema presentado.

#### 3.4.3 Comparación con un Humano

Los experimentos de mantener una velocidad de 10, 15, 20 y 25 km/h han sido repetidos, pero esta vez con un conductor humano, el cual realizó el seguimiento de dichas velocidades objetivo durante 30 segundos y siguiendo el mismo tramo de vía utilizado por el controlador difuso.

La tabla 3.1 se muestra una comparación entre los errores de velocidad medios una vez pasados los 5 primeros segundos del experimento, con lo que conseguimos medir el ajuste de velocidad eliminando el estado de transición (ya que el vehículo comienza la prueba parado).

La tabla muestra pequeñas diferencias en las medidas obtenidas por ambos *pilotos*, en la mayoría de los casos despreciables.

Hay que notar que el controlador difuso tiene mayores problemas a



la hora de mantener los 15 km/h; esto puede ser debido a que la *frontera* del cambio de marchas automático entre primera y segunda marcha está cercano a esa velocidad<sup>1</sup> por lo que el control de velocidad se hace más inestable, observando la tabla vemos que el conductor humano también tiene más error en esa situación del que tiene a 10 ó 20 km/h.

Por otra parte, y aunque el error cometido por el conductor humano es ligeramente menor en experimentos de velocidad menor a 20 km/h (todos ellos en primera marcha), el comportamiento en el experimento a 25 km/h muestra la diferencia más notable entre ambos, siendo el controlador difuso más preciso en el control a dicha velocidad.

### 3.5 Conclusiones

A lo largo del presente capítulo se ha presentado una aplicación real de la lógica difusa a los sistemas de transporte inteligente, centrándonos en un área como es el control automático a velocidades bajas.

Se ha diseñado y puesto a prueba un controlador difuso capaz de llevar a cabo el control automático de la velocidad de un vehículo real en el rango de 10 a 30 km/h mediante el manejo cooperativo de los pedales de acelerador y freno.

El controlador se ha diseñado con el fin de mantener una velocidad constante así como realizar cambios de velocidades con el fin de adaptarse a necesidades propias de entornos urbanos. Otra de las premisas de diseño usadas ha sido que el controlador debe dar acciones de control suaves, para así evitar aceleraciones bruscas, que pueden llegar a ser incómodas, incluso peligrosas, para los ocupantes del vehículo.

Los experimentos realizados se llevaron a cabo en la pista de pruebas del Centro de Automática y Robótica. Los resultados muestran que, una vez superada una etapa de transición, el controlador es capaz de mantener la velocidad deseada con un error medio inferior a  $\pm 1 \text{ km/h}$  y una aceleración máxima de  $2.5 \text{ km/h/s}$ , asegurando así un control confortable para posibles ocupantes.

---

<sup>1</sup>No se dispone de la especificación técnica del cambio de marchas, pero se supone que dicho control no dependerá únicamente de la velocidad, lo hará también de otras variables como pueden ser las revoluciones por minuto del motor, etcétera.

### **3. CONTROL DE VELOCIDAD EN ENTORNOS URBANOS**

---

La comparación del controlador implementado con un conductor real muestra pequeñas diferencias, casi despreciables, entre ambos pilotos. Es por ello que la propuesta se considera válida para relevar al conductor de la tediosa tarea de controlar velocidades bajas a la hora de conducir en entornos urbanos.

## Capítulo 4

# Ajuste del Control de Dirección con Algoritmos Genéticos

EL control automático del volante de un vehículo a motor representa un paso clave hacia la creación de un vehículo completamente autónomo. Desde el punto de vista industrial, año a año aparecen sistemas integrados en vehículos que, en mayor o menor medida, hacen uso del volante del vehículo.

Aunque su aplicación práctica masiva queda aún lejos, una posible aplicación más cercana consistiría en utilizar la información y la experiencia acumulada en el desarrollo de sistemas automáticos a fin de generar otro tipo de elementos, únicamente informativos para el conductor y que sean capaces de advertirnos de situaciones de peligro o aumentar nuestro conocimiento sobre el entorno de circulación a la hora de comenzar la maniobra que se desee desarrollar.

Aparte del desarrollo tecnológico requerido para la llegada de un vehículo completamente autónomo, se deben considerar cambios psicológicos, como *confiar en un vehículo que circula sólo* o legislativos, para *permitir o regular su circulación*.

Aún así, el control total de la dirección de un vehículo es uno de

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

los temas que más espectacularidad y expectación divulgativa ha venido generando en los últimos años. A lo largo de las siguientes secciones se presentará un enfoque basado en algoritmos genéticos y lógica difusa para imitar el comportamiento de una persona al volante de un vehículo en la tarea de seguir una trayectoria prefijada.

La **sección 4.1** analiza diferentes enfoques existentes al problema, así como justifica y motiva el aquí presentado. En la **sección 4.2** se presenta el proceso de recopilación y procesamiento de datos de comportamiento creado para transformar acciones tomadas por un conductor en datos procesables por método de ajuste. La **sección 4.3** presenta la codificación utilizada para representar controladores difusos con el fin de poder ser optimizados por el método de ajuste. En la **sección 4.4** se explica las características del método de ajuste genético en dos fases implementado. La **sección 4.5** muestra los controladores difusos obtenidos, y los resultados al ponerlos a controlar el vehículo en la pista de pruebas; por otra parte, se medirá y comparará el ajuste en el seguimiento de trayectorias con los obtenidos por conductores humanos. Finalmente, la **sección 4.6** presenta las conclusiones obtenidas a lo largo de todo el proceso.

### 4.1 Motivación

El control de la dirección, al contrario que el de la velocidad, no tiene en su automatización justificaciones de tipo de seguridad como el control de cruceo adaptativo (del inglés, *Adaptive Cruise Control*, ACC), o de confort como el control de cruceo (*Cruise Control* en inglés, CC).

En todo caso, se puede encontrar una posible aplicación en maniobras de emergencia, como por ejemplo algunos sistemas *pre-crash* en los que en el último momento antes del impacto, el volante gira para que el golpe no sea totalmente frontal (Hillenbrand 06; Kim 07), o como asistencia en maniobras de aparcamiento (Jeong 10), entre otros.

La automatización total de un vehículo para que sea completamente autónomo es un objetivo que se encuentra aún a un largo camino de maduración para salir a la calle. Sin embargo, a efectos de investigación

básica, este es uno de los campos de tratados por el área de los Sistemas de Transporte Inteligentes con más futuro.

Desde el punto de vista industrial, encontramos diversas aplicaciones que requieren, en mayor o menor medida, del manejo del volante. El Toyota Avensis incorpora un sistema de mantenimiento dentro del carril (también llamados *LKA*, acrónimo inglés de *Lane Keeping Assist*), que mueve la dirección de forma ligera cuando el coche está a punto de salirse del carril por el que circula, sistemas basados en el mismo principio se incorporan también en el Honda Inspire, entre otros. Por otra parte, sistemas de aparcamiento autónomo están disponibles en modelos de las casas Audi, Lexus, Toyota y Volkswagen.

El control de la dirección es el paso previo necesario a la automatización total y, el estudio de la forma de llevar a cabo este manejo con el fin de que se parezca a la forma en que lo realizan los seres humanos, está comenzando a ser un sujeto de estudio cada vez de mayor importancia.

Desde el punto de vista de la investigación, el control total de la dirección de un vehículo es uno de los temas que más espectacularidad y expectación divulgativa genera. Parte de esta expectación es debida a la *DARPA Grand Challenge* (Armstrong 04; Crane 07; Wooden 07), una competición de coches autónomos organizada por el departamento de defensa de los Estados Unidos de América.

Técnicas utilizadas para abordar este problema de control automático pasan por aprendizaje por refuerzo (Riedmiller 07), lógica difusa (Li 09; Zhang 01; Sotelo 01) y redes neuronales (Wu 08); haciendo uso, por lo general de visión artificial (Xie 06) o sistemas de posicionamiento (Wang 03) como principal sistema sensorial.

La lógica difusa surge del deseo de describir sistemas complejos mediante descripciones lingüísticas (Zadeh 65; Zadeh 99). Se trata de una metodología bien conocida para modelar sistemas complejos o fuertemente no lineales (Takagi 85), no requiriendo del modelado matemático de los métodos de diseño de controladores más usuales (Driankov 93).

Normalmente, la generación de las funciones de pertenencia y base de reglas de un controlador difuso han sido tareas hechas por ensayo y error

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

o por personas expertas. Una tarea como esta representa un candidato natural para ser abordada de una manera automática, y los algoritmos genéticos representan una buena opción.

Los Algoritmos Genéticos (Holland 75) son métodos de búsqueda de propósito general que usan principios basados en poblaciones para evolucionar soluciones a problemas (Goldberg 89). La idea principal es mantener una población de individuos los cuales representan una solución candidata a un problema dado, que evoluciona con el tiempo mediante competición y variación controlada. Cada individuo de la población tiene asociado un nivel o función de ajuste que determinará qué individuos son usados para crear otros nuevos por medio de operadores genéticos.

El creciente interés por el área de los sistemas de transporte inteligentes, así como de la industria automovilística, por el control del volante como paso previo necesario a la implementación del vehículo completamente autónomo motivó el desarrollo de un controlador difuso, así como un método de ajuste basado en algoritmos genéticos con el fin de controlar el volante de un vehículo de la forma que un conductor humano lo haría. El proceso seguido para este fin está descrito en detalle a continuación.

### 4.2 Captura y Procesamiento de la Información

Para conseguir la imitación del comportamiento humano al volante de un vehículo, en primer lugar debemos recopilar información sobre la manera en la que éste actúa sobre tal. Para ello, en la presente sección se describen las variables que son monitorizadas mientras éste conduce, el proceso de monitorización en sí, y el tratamiento de los datos para hacerlos tratables por el método de ajuste de controladores difusos.

#### 4.2.1 Variables de Entrada y Salida

Para el modelado de controladores difusos, se monitorizarán las siguientes variables:

- *Error Lateral*: es la distancia de un punto determinado del vehículo

## 4.2 Captura y Procesamiento de la Información

a la línea de referencia. Se conoce también como deriva. Hay que tener en cuenta que la posición obtenida por el GPS corresponde con la posición de la antena, que se encuentra situada encima del eje posterior del vehículo. Por tanto, se realizará la transformación pertinente para calcular la posición del centro del morro del coche en la dirección y sentido de avance del vehículo.

- *Error Angular*: es el ángulo formado por el vector director del coche con respecto a la línea de referencia.
- *Posición Actual del Volante*: indicará la posición angular en la que se encuentra el volante en un determinado instante.

Una representación gráfica del error lateral y angular, puede verse en la figura 4.1.

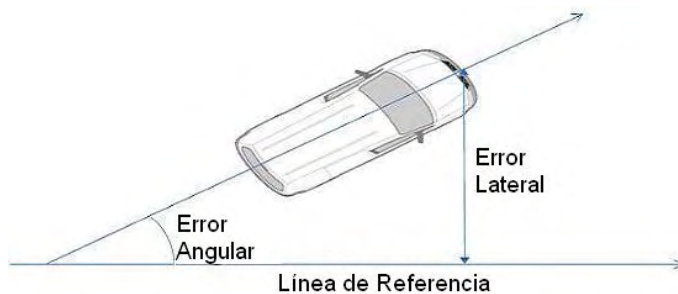


Figura 4.1: Representación gráfica del error lateral y angular.

Tanto para el error lateral como para el angular, es importante tener en cuenta el signo de su valor, ya que nos indicará en qué semiplano nos encontramos de los dos definidos por la línea de referencia de la calle en la que circulamos. Éste es un dato imprescindible para llevar a término un control coherente, es decir, nos determinará si nos encontramos desviados hacia la derecha o la izquierda de la línea de referencia. Gráficamente podemos verlo en la figura 4.2.

Por otra parte, la salida del controlador será la posición absoluta del volante, normalizada entre -1 y 1, representando, respectivamente, un giro de  $-540^\circ$  (giro máximo hacia la derecha, o en sentido horario) y  $540^\circ$  (giro máximo hacia la izquierda, o en sentido anti horario). El valor

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

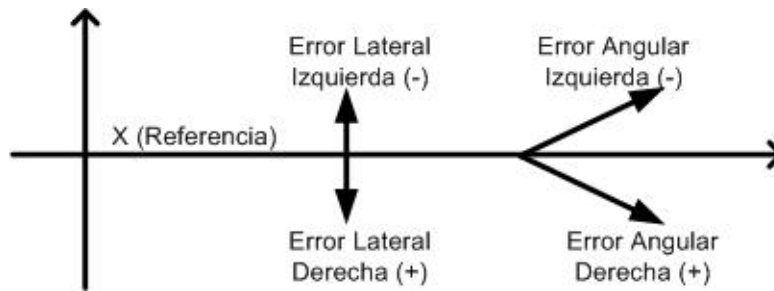


Figura 4.2: Esquema de Signos empleados a efectos de control.

inferido se traduce en un voltaje a emitir por el ordenador que actúa sobre el circuito interno al vehículo de la dirección asistida, haciendo que éste mueva el volante hasta la posición deseada.

##### 4.2.2 Monitorización de Datos

El mapa GPS, que especifica la ruta a seguir, es construido automáticamente tras su seguimiento con un vehículo equipado con un receptor GPS. Una vez finalizado el recorrido, los puntos más significativos de la ruta son seleccionados mediante un algoritmo genético (Serrano 05) para formar parte del mapa de referencia.

La ruta obtenida tras este proceso se muestra en la figura 4.3, solapada con una vista aérea de la pista de pruebas; está compuesta de seis tramos curvos (tres hacia la derecha y tres hacia la izquierda) y siete tramos rectos.

Dos conductores humanos siguieron dicha ruta, mientras el ordenador embarcado mostraba por pantalla información referente a las medidas de error, con el fin de minimizarlos. Por otra parte, los valores de error, así como las posiciones del volante adoptadas por los conductores fueron almacenados. Tras esto, se obtuvo un gran conjunto de datos, el cual debe ser reducido con el fin de generar un conjunto de entrenamiento a pasar al método de ajuste. Una nube de puntos con los datos obtenidos puede verse en la figura 4.4 donde se muestran los errores angular y lateral, así como la posición del volante adoptada por el conductor.



## 4.2 Captura y Procesamiento de la Información



Figura 4.3: Línea de referencia a seguir por los conductores.

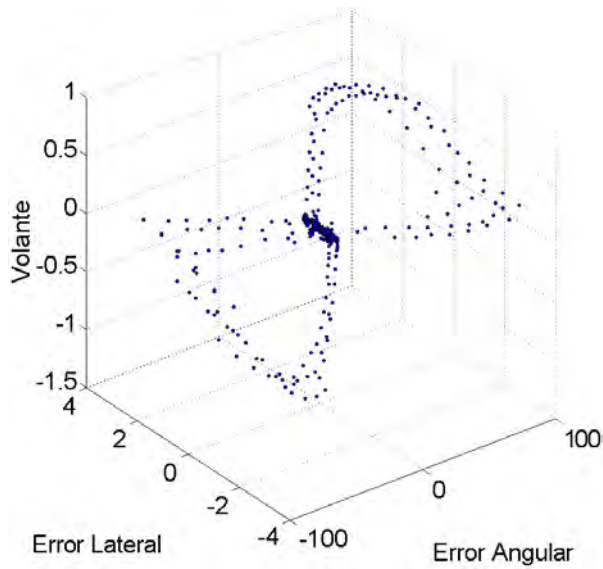


Figura 4.4: Nube de puntos obtenida tras pruebas con conductores humanos.

### 4.2.3 Procesamiento de los Datos

El gran conjunto de puntos obtenidos nos proveen de una superficie de control aproximada en la parte central del espacio de trabajo, ya que representa las situaciones que más veces se han repetido. El peso de dicha zona puede hacer poco valorado la medida de ajuste en zonas más extremas del espacio. Por otra parte, la reducción del número de

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

puntos en dicha zona hará el proceso de medida de ajuste menos pesado computacionalmente, por lo que la ejecución del método de ajuste se verá acelerada.

Para simplificar el conjunto de datos y homogeneizar su distribución, los valores se han normalizado en el intervalo  $[-1,1]$ ; para ello, se ha asumido un límite para el error lateral de  $\pm 5$  metros y de  $\pm 180$  grados para el error angular. Tras lo que se ha aplicado una *rejilla*  $21 \times 21$  sobre la nube de puntos; es decir una rejilla  $\{-1, -0.9, \dots, 0, 0.1, \dots, 0.9, 1\} \times \{-1, -0.9, \dots, 0, 0.1, \dots, 0.9, 1\}$ . A cada punto de la rejilla se ha asignado como salida el valor medio de salida de los puntos más cercanos.

Algunos puntos del espacio de entrada aún no quedan cubiertos y los valores en casos extremos serán *desconocidos* para el método de ajuste. Por ello, se añadirán puntos obtenidos gracias al conocimiento que cualquier persona tiene sobre el control del volante:

- $(x, y, 1) \forall x, y = 0.7, 0.8, 0.9, 1$ . Lo que quiere decir: *Si el error angular es mayor de 70 grados y el error lateral mayor que 3.5 metros, ambos hacia la izquierda, entonces gira el volante completamente hacia la derecha.*
- $(x, y, -1) \forall x, y = -0.7, -0.8, -0.9, -1$ . Que representan la situación especular a la anterior.

Tras este proceso se ha obtenido el conjunto de puntos que representará el conjunto de entrenamiento a pasar al método de ajuste para poder medir la bondad de los controladores. La nube de puntos obtenida puede verse en la figura 4.5.

Gracias al conjunto de entrenamiento obtenido, el proceso de ajuste genético será capaz de inferir un controlador que se ajuste a las acciones tomadas por el humano, dejando margen de actuación sobre la superficie de control con el fin de obtener una conducción confortable.

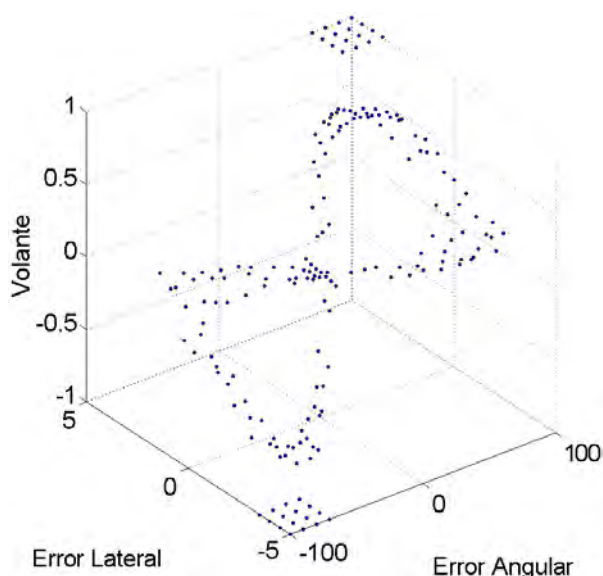


Figura 4.5: Conjunto de entrenamiento utilizado para estimar el controlador difuso.

### 4.3 Representación de los Controladores Difusos

Es natural el pensar que el controlador difuso encargado de manejar el volante de un vehículo debe ser perfectamente *simétrico*; lo cual significaría que, la acción tomada ante unos determinados valores de las variables de entrada debe ser opuesta a la tomada ante valores opuestos. Por otra parte, debería de ser *ordenada*; es decir, que si el error es mayor, la acción tomada debe ser mayor.

No obstante, éste no es el caso debido a que el objetivo es el de imitar el comportamiento humano y por ello debe ser capaz de detectar diversos modos de conducción, por ejemplo, debería poder detectar si el conductor circula cerca del borde derecho de la calzada, ya que se puede tratar de una conducción a baja velocidad ante situaciones de emergencia.

La representación del controlador difuso para su ajuste genético está dividida en dos: representación del conjunto de etiquetas y representación de la base de reglas. La primera de ellas será simétrica, mientras que la segunda será únicamente ordenada; esto permitirá

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

obtener controladores con un alto grado de legibilidad, pero con la flexibilidad suficiente como para ajustarse a cualquier situación.

### 4.3.1 Representación del Conjunto de Etiquetas

Para generar las funciones de pertenencia que definen el conjunto de etiquetas, se han utilizado dos métodos. Uno para generar controladores con tres funciones de pertenencia por entrada y otro para generarlos con cinco.

Para representar tres funciones de pertenencia trapezoidales, se utilizan cuatro valores reales ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ). Los dos primeros representan una etiqueta lingüística central que denota la ausencia de error o desviación (*NO*), mientras que los dos últimos valores representan errores hacia la derecha o izquierda respectivamente (*DER* y *IZQ*), tal y como puede verse en la figura 4.6.

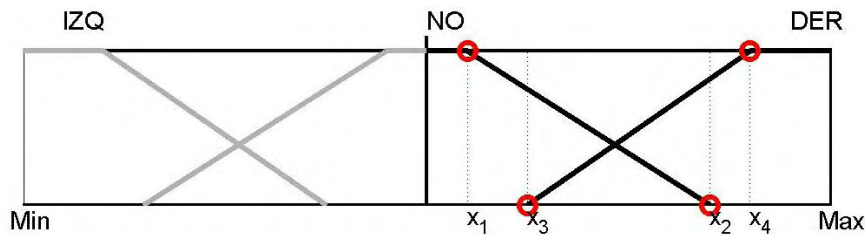


Figura 4.6: Representación de 3 etiquetas trapezoidales por medio de 4 valores reales.

Para representar cinco funciones de pertenencia, se utilizan ocho valores reales ( $x_1, x_2, \dots, x_8$ ). Los dos primeros representan la etiquetas *NO*, los cuatro siguientes para representar las presencia de error leve hacia la derecha/izquierda(etiqueta *DER* y *IZQ*) y los dos últimos valores para representar las etiquetas *MuyDER* y *MuyIZQ*, que denotan error agudo hacia la correspondiente dirección. Esta codificación puede verse gráficamente en la figura 4.7.

Con el fin de asegurar la coherencia de las etiquetas, aparte de que los valores deben ser positivos, el proceso de ajuste deberá respetar una serie de restricciones. Las siguientes se aplicaran para controladores de tres etiquetas por entrada:

### 4.3 Representación de los Controladores Difusos

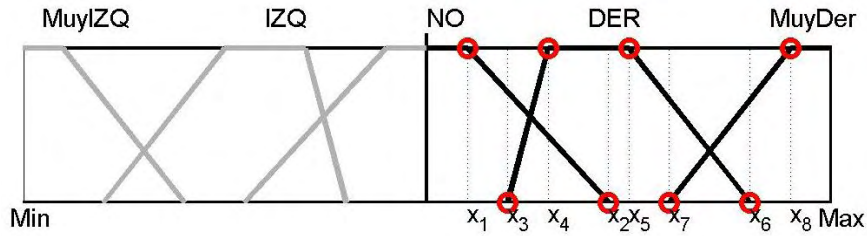


Figura 4.7: Representación de 5 etiquetas trapezoidales por medio de 8 valores reales.

1.  $(x_1 < x_2), (x_3 < x_4)$
2.  $(x_1 < x_4)$
3.  $(x_3 < x_2)$

Mientras que las siguientes restricciones se aplicarán en controladores con cinco etiquetas por entrada:

1.  $(x_1 < x_2), (x_3 < x_4 < x_5 < x_6), (x_7 < x_8)$
2.  $(x_1 < x_4), (x_5 < x_8)$
3.  $(x_3 < x_2), (x_7 < x_6)$
4.  $(x_2 < x_7)$

En ambas listas de restricciones, tenemos que (1) garantiza funciones de pertenencia trapezoidales (o triangulares); (2) garantiza el no solapamiento de etiquetas; (3) garantiza la cobertura de todo el universo de entrada  $y$ ; finalmente, (4) evita la aparición de etiquetas no coherentes.

La salida del controlador, que representará la posición deseada normalizada del volante, será codificada por medio de 21 singletons uniformemente distribuidos en el intervalo  $[-1, 1]$ , tal y como puede verse en la figura 4.8. Valores menores que cero ( $D[X]$ ) denotan movimientos del volante hacia la derecha mientras que valores positivos ( $I[X]$ ) lo hacen hacia la izquierda; el número representa la intensidad del giro. Así pues  $D10$  representa girar el volante lo máximo hacia la derecha mientras que

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

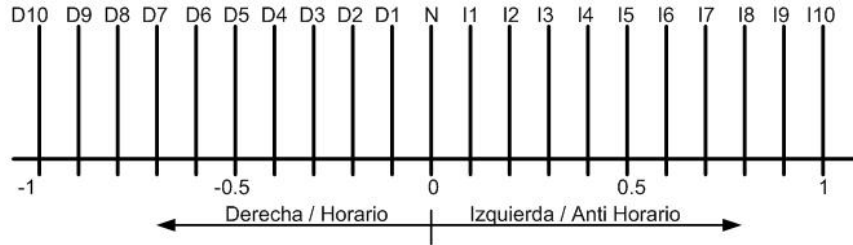


Figura 4.8: 21 Singletons utilizados para codificar la salida.

*I5* representa hacerlo medio giro hacia la izquierda. *N* representa el mantener el volante centrado.

Los singletons utilizados para codificar la salida no serán modificados por el proceso de ajuste, el cual sí estará a cargo de asignar uno u otro como consecuentes de conjuntos de reglas predefinidos y que se presentan a continuación.

### 4.3.2 Representación de la Base de Reglas

Tres bases de reglas diferentes serán utilizadas por el método de ajuste; éste trabajará con los consecuentes de las reglas, cambiando el singleton asociado como valor de salida para una determinada regla, con el fin de encontrar la mejor configuración posible de reglas.

Sin importar si el controlador utiliza tres ó cinco etiquetas para codificar las entradas, se han definido 3 conjuntos de reglas diferentes llamados *Marginal*, *Central* y *Total*, respectivamente. El *Marginal* está compuesto por reglas de antecedente simple; el *Central* por reglas de antecedente compuesto (operador *Y*) y el *Total* por la unión de las reglas de *Marginal* y *Central*.

De una forma más gráfica, los casos cubiertos por cada una de las bases de reglas vienen representadas en la tabla 4.1, donde cada celda (X,Z) representa una regla de la forma: SI (Angular es X) Y (Lateral es Z) ENTONCES Volante es VOL, donde VOL será uno de los 21 singletons presentados anteriormente. La tabla 4.2 muestra el número de reglas total del conjunto, dependiendo del número de funciones de pertenencia de la entrada, así como del tipo de base de reglas utilizada.

### 4.3 Representación de los Controladores Difusos

Lat\Ang	$\emptyset$	{MuyIZQ}	IZQ	NO	DER	{MuyDER}
$\emptyset$		M	M	M	M	M
{MuyIZQ}	M	C	C	C	C	C
IZQ	M	C	C	C	C	C
NO	M	C	C	C	C	C
DER	M	C	C	C	C	C
{MuyDER}	M	C	C	C	C	C

Tabla 4.1: Casos cubiertos por la base de reglas *Central* (C) y *Marginal* (M). Las etiquetas *MuyIZQ* y *MuyDER* no serán utilizadas en controladores de 3 etiquetas por entrada.

Base\Funciones	Tres	Cinco
Marginal	6	10
Central	9	25
Total	15	35

Tabla 4.2: Número de reglas para cada combinación (Número de Funciones de Pertenencia/Tipo de Base de Reglas) posible.

Al igual que con las funciones de pertenencia, la base de reglas estará sometida a restricciones que el método de ajuste deberá respetar con del fin de mejorar la aplicación del método, así como para mantener interpretabilidad en los controladores.

En concreto, para cada par de reglas  $R_1$  y  $R_2$ , si el antecedente de  $R_1$  es *mayor* que el antecedente de  $R_2$ , el singleton utilizado como consecuente de  $R_1$  debe ser *mayor o igual* que el de  $R_2$ . Por ejemplo, si existe la regla *SI (Lateral es IZQ) ENTONCES (Volante es D2)*, otra regla que fuera *SI (Lateral es MuyIZQ) ENTONCES (Volante es VOL)* debe tener  $VOL \in \{D2, D3, \dots, D10\}$ .

De este modo, para representar la base de reglas se utilizará un vector de números enteros entre 1 y 21 con tantos registros como reglas contenga la base de reglas, un valor ( $x$ ) en una determinada posición ( $i$ ) representará: *utilizar el singleton  $x$ -ésimo como valor de salida en la regla  $i$ -ésima.*

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### 4.4 Método de Ajuste Genético

Como hemos visto en la sección anterior, un controlador difuso estará representado en dos partes bien diferenciadas: 1) Una matriz real de dos filas de 4 ó 8 columnas se utiliza para representar las funciones de pertenencia (una fila por variable de entrada) y 2) un vector de 6, 9, 15, 10, 25 ó 35 valores enteros en  $[1,21]$  se utiliza para la representación de la base de reglas.

El ajuste es llevado a cabo por medio de una repetición iterativa de dos fases bien diferenciadas, cada una de ellas implementada como un algoritmo genético (AG). Uno de ellos responsable de la mejora del conjunto de etiquetas (CE) y la otra para la mejora de la base de reglas (BR) del controlador.

Se realizará un ajuste de la base de reglas, y obtendremos la mejor BR posible para un CE determinado, posteriormente, realizaremos un ajuste del CE, usando como BR la obtenida anteriormente; el CE obtenido, será nuevamente usado para ajustar la BR, y así sucesivamente. El algoritmo utilizado para el modelado del sistema deseado se representa gráficamente en la figura 4.9, donde  $It$  será el número de iteraciones a dar por el método y un controlador completo es representado de la forma [Etiquetas + Reglas].

El ajuste genético, ya sea del conjunto de etiquetas o la base de reglas, seguirá el esquema de un algoritmo genético estacionario (Holland 75); gracias a ello, conseguiremos un avance progresivo de la función ajuste de la población, gracias a la creación, en cada generación de una única pareja de individuos. Ambos algoritmos genéticos han sido implementados haciendo uso de los siguientes operadores:

- *Selección*: en cada generación, se seleccionarán dos cromosomas para ser cruzados mediante torneo binario, consistente en hacer competir a una pareja de individuos y seleccionar aquel con mayor aptitud.
- *Operador de Cruce*: BLX- $\alpha$  (Herrera 98) aplicado sobre cada valor del individuo permitirá obtener dos cromosomas a partir



#### 4.4 Método de Ajuste Genético

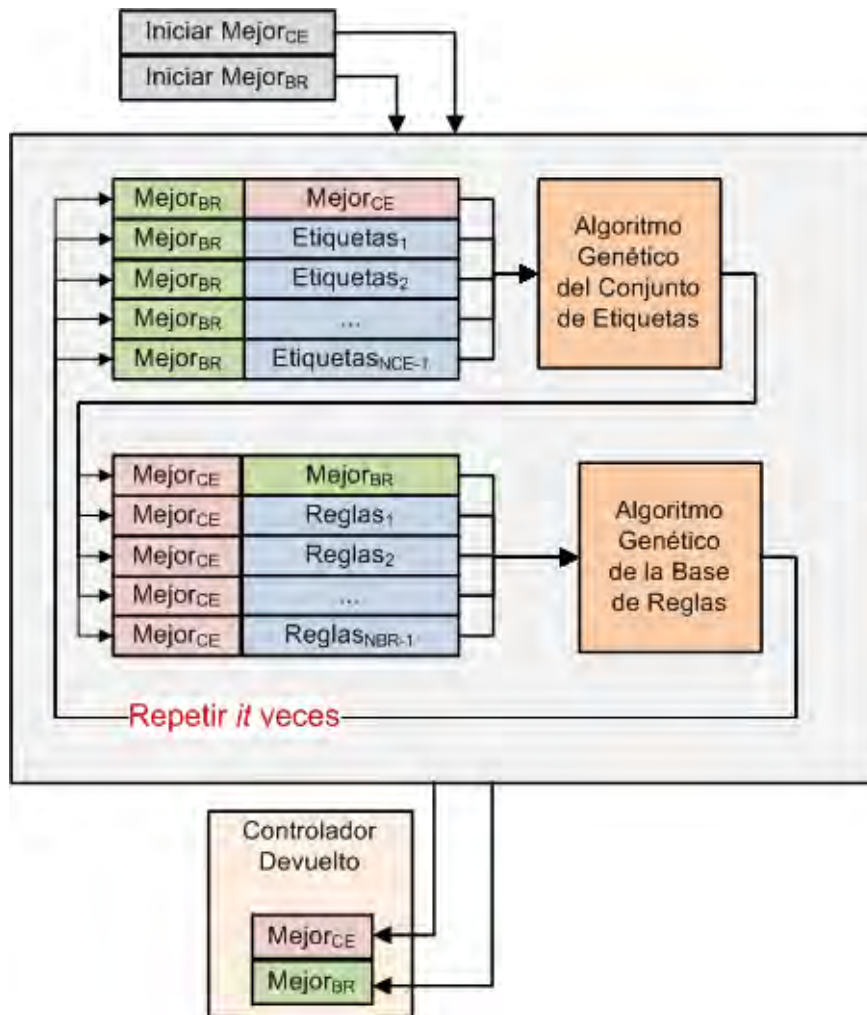


Figura 4.9: Diagrama de flujo del funcionamiento del método de ajuste.

de dos padres durante la etapa de optimización del conjunto de etiquetas, mientras que se utilizará cruce simple durante la etapa de optimización de la base de reglas.

- *Operador de Mutación:* cada posición de los individuos generados por cruce será sometido a un cambio aleatorio según una ratio o probabilidad de mutación,  $p_m$ .
- *Método de Reemplazamiento:* cada nuevo cromosoma generado

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

reemplazará al peor individuo de la población siempre y cuando el valor de su función objetivo sea mayor.

- *Iniciación:* a cada punto del individuo  $v_i$  será asignado a un valor aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo  $[m_i \pm \epsilon]$  con una probabilidad  $\rho$ . Gracias a esto generamos una población de individuos ligeramente diferentes al mejor encontrado hasta el momento. En la primera iteración se considerarán como mejores, individuos aleatorios, siempre que respeten las restricciones de interpretabilidad y coherencia. Las figuras 4.10 y 4.11 muestran gráficamente ejemplos de modificación del mejor individuo para obtener las poblaciones iniciales.

Cada uno de los algoritmos genéticos trabajará sobre una población de tamaño  $N_{CE}$  o  $N_{BR}$  y será ejecutado durante un número  $G_{CE}$  o  $G_{BR}$  generaciones, respectivamente.

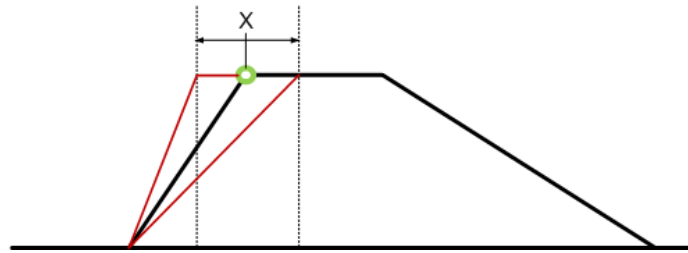


Figura 4.10: Ejemplo de modificación de una etiqueta para generar las poblaciones iniciales.

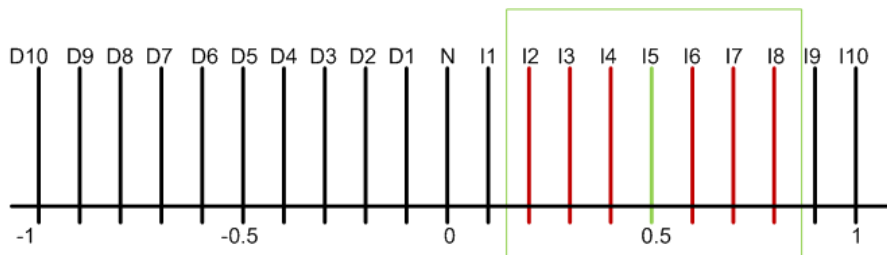


Figura 4.11: Ejemplo ( $\epsilon = 3$ ) de modificación de un consecuente para generar las poblaciones iniciales.

### 4.4.1 Función Objetivo

Con el fin de medir la calidad de un determinado individuo se considerarán dos aspectos:

- El ajuste entre las acciones de control obtenidas y las acciones tomadas por el conductor humano en la fase de captura de información (sección 4.2).
- El requisito de presentar una superficie de control suave, para evitar así, giros de volante bruscos que puedan resultar incómodos, o incluso peligrosos para posibles ocupantes del vehículo.

El ajuste se cuantificará por medio del error cuadrático medio entre la salida del controlador y la salida deseable (conjunto de entrenamiento):

$$ECM = \frac{1}{2N} \sum_{(l=1\dots N)} (F(x_{lateral}^l, x_{angular}^l) - y^l)^2 \quad (4.1)$$

, donde  $F(x_{lateral}^l, x_{angular}^l)$  es la salida obtenida a partir del controlador cuando se considera el ejemplo  $l$ -ésimo como entrada e  $y^l$  es la salida conocida deseada. Cuanto más cercano a cero sea este valor, mejor será el rendimiento del controlador para el problema dado.

Para medir la suavidad de la superficie de control se obtendrá la salida del controlador ante una entrada de modo rejilla  $((i, j), \forall i, j = [-1, -0.9, \dots, 0, \dots, 0.9, 1])$ , tomando  $Dist$  como la mayor diferencia de salida entre dos puntos adyacentes en la rejilla.

Una vez calculados  $ECM$  y  $Dist$ , realizaremos la suma ponderada de ambas, bajo un factor  $v$ , así pues, el valor de la función objetivo final será:

$$v \cdot ECM + (1 - v) \cdot Dist \quad (4.2)$$

, para  $v=0.75$  con el fin de dar mayor importancia al ajuste del controlador frente a su suavidad.

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### 4.5 Experimentación y Resultados

Los siguientes aspectos han sido tenidos en cuenta a la hora de configurar los parámetros utilizados para la presente experimentación: siempre existirá una copia del mejor individuo en la población; se genera una población nueva antes de la mejora de cada parte de un controlador difuso (base de reglas/funciones de pertenencia); cada parte del controlador se optimiza por separado.

Teniendo lo anterior presente, se considera que los parámetros deben cumplir:

- Los tamaños de las poblaciones deben ser pequeños dado que existe una copia del mejor individuo siempre, así conseguiremos que dicho individuo pueda ser seleccionado para su cruce frecuentemente, incluso cuando se genera una nueva población.
- Se utilizarán valores de número de generaciones igualmente bajos dado que ejecutaremos dos algoritmos iterativamente y se considera preferible en realizar múltiples iteraciones cortas frente a realizar pocas iteraciones largas.
- Dada la explicación anterior, se asignará a  $It$  un valor alto.
- El parámetro  $\alpha$  del cruce  $BLX - \alpha$  será mejor que 0.5 con el fin de dar más importancia a la explotación de buenas zonas del espacio de búsqueda frente a la exploración de nuevas zonas (tarea realizada a ir generando nuevas poblaciones en cada iteración).

Dadas estas consideraciones, se optó por la configuración de parámetros explicada a continuación.  $It = 100$ ,  $N_{BR} = N_{CE} = 10$ ,  $G_{BR} = G_{CE} = 20$  y  $p_m = 0.25$ . Por otra parte, utilizaremos  $\alpha = 0.2$  para el cruce BLX implementado por el algoritmo genético sobre el conjunto de etiquetas. Las probabilidades de modificar el valor del mejor individuo para generar poblaciones de etiquetas/reglas serán  $\rho_{CE} = 0.5$  y  $\rho_{BR} = 0.75$ ; mientras que las alteraciones máximas sobre el mejor individuo serán de  $\epsilon_{CE} = 0.2$  y  $\epsilon_{BR} = 3$ .

### 4.5.1 Controladores Obtenidos

Una vez procesados los datos tal y como se describió en la sección 4.2, el método descrito en la sección 4.4 se aplicó para obtener un conjunto de controladores difusos que reflejen el comportamiento del conductor humano. Las figuras 4.12 y 4.13 muestran respectivamente las funciones de pertenencia obtenidas para 3 y 5 etiquetas. Las tablas 4.3 y 4.4 muestran de una manera tabular las bases de reglas obtenidas.

Los controladores presentados, serán denominados a partir de ahora como  $3M$ ,  $3C$  y  $3T$  para controladores con tres etiquetas por entrada y base de reglas *Marginal*, *Central* y *Total*, respectivamente y  $5M$ ,  $5C$  y  $5T$  para controladores con cinco etiquetas.

Como podemos ver en los controladores de tres etiquetas por entrada (figura 4.12 y tabla 4.3), el controlador  $3C$  ha inferido una codificación de las entradas muy brusca, haciendo las etiquetas casi rectangulares para el error lateral. Por otro lado, el controlador  $3M$  muestra un diseño en sus etiquetas muy simple, y casi regular, el trapecio central se ha convertido casi en un triángulo y etiquetas contiguas tienen el punto de corte a prácticamente 0.5 de valor de verdad para ambas variables.

En lo que respecta a las bases de reglas, vemos cómo  $3M$  ha inferido más importancia al error lateral que angular, asignando a éste más acciones máximas del volante mientras que con el error lateral, el volante sólo es movido un 80%. La bases de reglas  $3M$  y  $3C$  son simétricas mientras que la de  $3T$  no lo es.

Respecto a los controladores de cinco etiquetas (figura 4.13 y tabla 4.4), nuevamente el que implementa la base de reglas central ( $5C$ ) presenta una codificación de las etiquetas del error lateral casi rectangular, cosa que ocurre, en menor medida con  $5T$  para las etiquetas (MuyIZQ-IZQ) y (DER-MuyDER). Respecto a las bases de reglas, ninguna de ellas es totalmente simétrica, aunque en muchas reglas especulares, las acciones sí lo son.

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

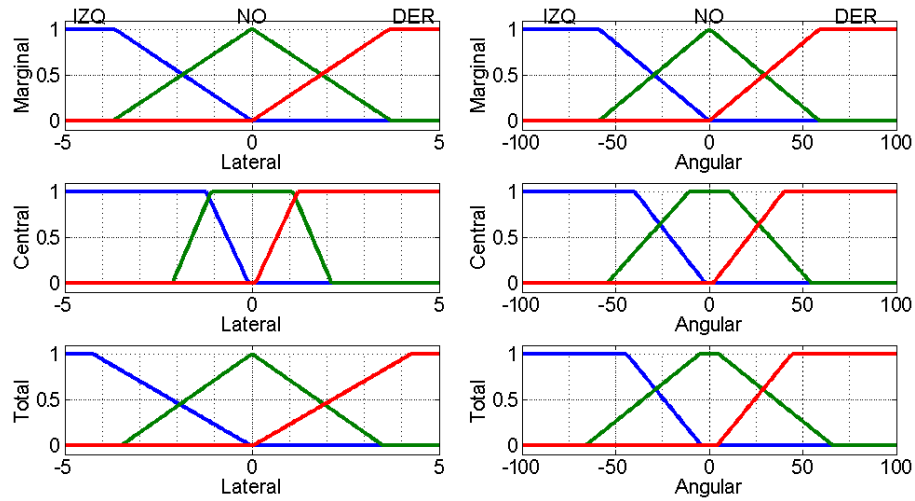


Figura 4.12: Conjuntos de etiquetas de controladores:  $3M$  (arriba),  $3C$  (centro) y  $3T$  (abajo); Error lateral (izquierda) y Error angular (derecha).

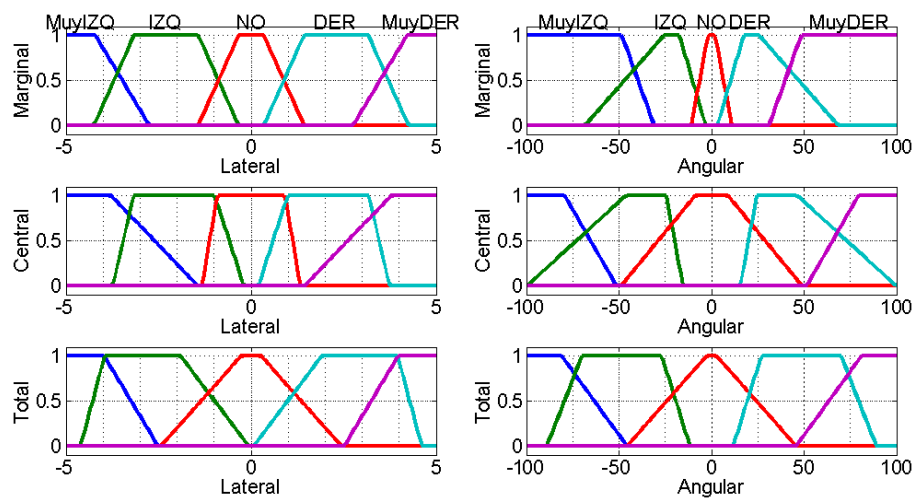


Figura 4.13: Conjuntos de etiquetas de controladores:  $5M$  (arriba),  $5C$  (centro) y  $5T$  (abajo); Error lateral (izquierda) y Error angular (derecha).

## 4.5 Experimentación y Resultados

---

Lat\Ang	$\emptyset$	IZQ	NO	DER
$\emptyset$		I8	NO	D8
IZQ	I10			
NO	NO			
DER	I10			

Lat\Ang	$\emptyset$	IZQ	NO	DER
$\emptyset$				
IZQ		I10	D4	NO
NO		D5	NO	I5
DER		NO	I4	I10

Lat\Ang	$\emptyset$	IZQ	NO	DER
$\emptyset$		D10	NO	I10
IZQ	D10	D10	D8	D6
NO	NO	D3	NO	I4
DER	I9	I8	I8	I9

Tabla 4.3: Representación tabular de la base de reglas del controlador  $3M$  (arriba),  $3C$  (centro) y  $3T$  (abajo).

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

Lat\Ang	$\emptyset$	MuyIZQ	IZQ	NO	DER	MuyDER
$\emptyset$		D5	I1	I4	I7	I10
MuyIZQ	D10					
IZQ	D9					
NO	D4					
DER	I1					
MuyDER	I5					

Lat\Ang	$\emptyset$	MuyIZQ	IZQ	NO	DER	MuyDER
$\emptyset$						
MuyIZQ		D8	D6	D3	I2	D1
IZQ		D5	D5	D2	NO	I1
NO		D2	D5	NO	I4	I4
DER		D2	D2	I1	I5	I7
MuyDER		I1	D2	I3	I8	I10

Lat\Ang	$\emptyset$	MuyIZQ	IZQ	NO	DER	MuyDER
$\emptyset$		D5	D3	I1	I8	I10
MuyIZQ	D7	D9	D3	D2	D5	I1
IZQ	D10	D10	D2	I5	I4	I1
NO	D2	D7	D6	NO	I2	I4
DER	I3	D3	NO	I4	I8	I8
MuyDER	I10	D7	D6	D2	D3	I8

Tabla 4.4: Representación tabular de la base de reglas del controlador  $5M$  (arriba),  $5C$  (centro) y  $5T$  (abajo).

Finalmente, la figura 4.14 se muestran las superficies de control de los 6 controladores obtenidos en el presente trabajo, donde puede apreciarse, de una manera cualitativa, la suavidad de las superficies, libre de saltos bruscos. El siguiente paso consiste en la prueba de los controladores en un entorno real como es ZOCO (sección 2.5), tal y como se presentará en la siguiente sección.



## 4.5 Experimentación y Resultados

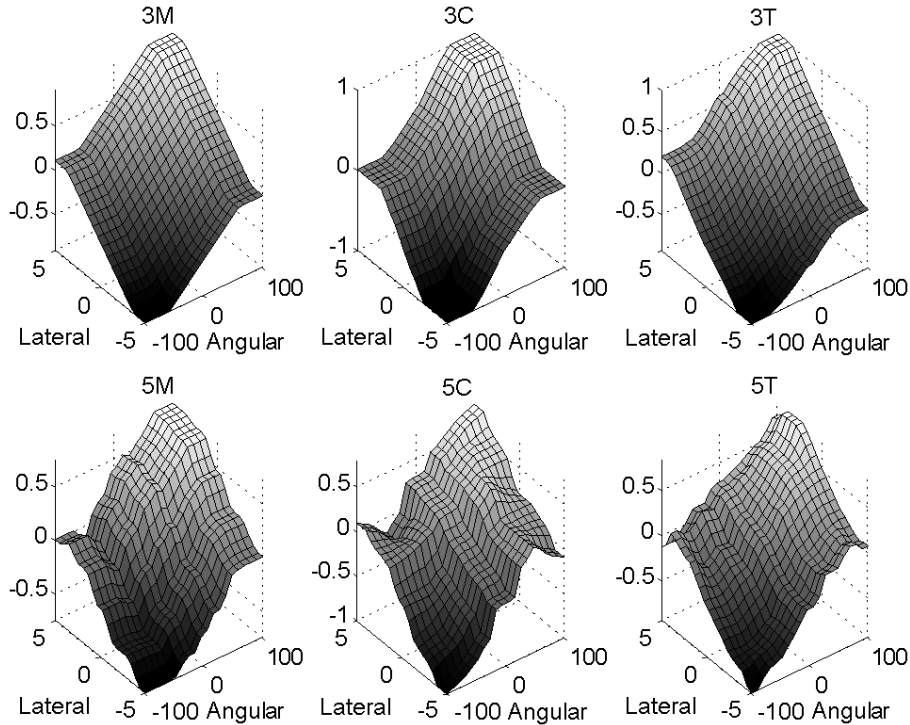


Figura 4.14: Superficies de control obtenidas. Controladores con tres (arriba) y con cinco (abajo) etiquetas por entrada. Controladores con base de reglas *Marginal* (izquierda), *Central* (centro) y *Total* (derecha).

### 4.5.2 Experimentación

Los controladores obtenidos en la sección previa fueron probados en ZOCO utilizando la referencia GPS mostrada en la Figura 4.3. Por cuestiones de seguridad, los pedales fueron controlados manualmente; velocidades medias oscilan cercanas a 15 km/h con máximas de 20 km/h (hasta de 32 km/h, en el último de los experimentos).

Los resultados se muestran en términos de coordenadas UTM Norte-Este, mostrando la línea de referencia y la trayectoria seguida por el vehículo cuando es manejado por cada uno de los controladores. Las correspondientes rutas seguidas, así como las velocidades alcanzadas se muestran en las figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 y 4.17. Las posiciones se muestran con respecto al punto UTM (Norte: 458869.75, Este: 4462455.98), con el fin de lograr un mejor entendimiento de las

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

gráficas. Los puntos marcados con círculos dan una referencia para comprender los gráficos de velocidad.

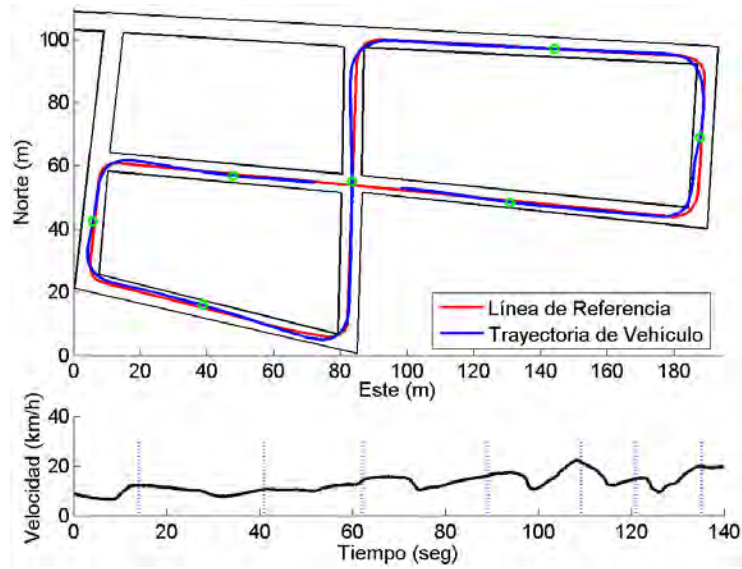


Figura 4.15: Experimentación con controlador de base de reglas *Marginal* para 3 funciones de pertenencia por entrada.

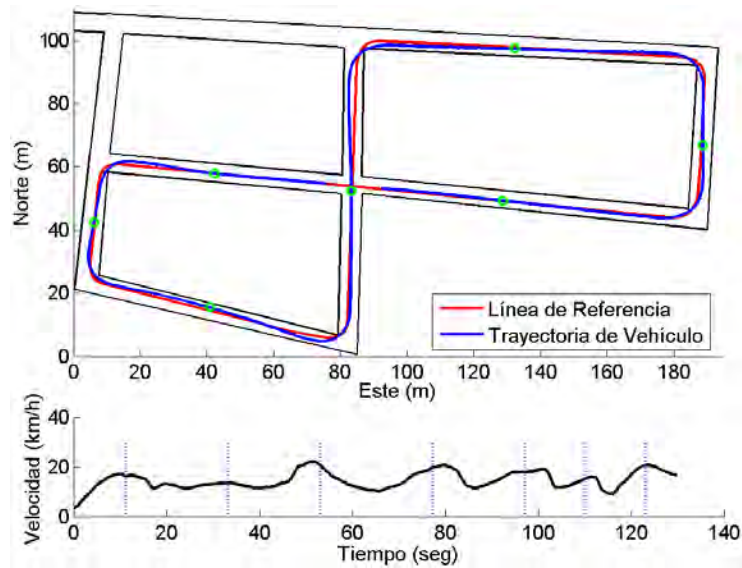


Figura 4.16: Experimentación con controlador de base de reglas *Central* para 3 funciones de pertenencia por entrada.

## 4.5 Experimentación y Resultados

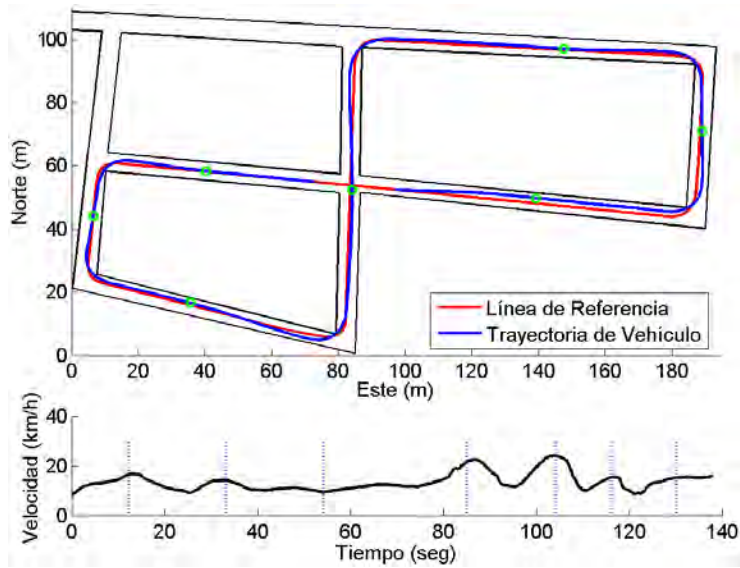


Figura 4.17: Experimentación con controlador de base de reglas *Total* para 3 funciones de pertenencia por entrada.

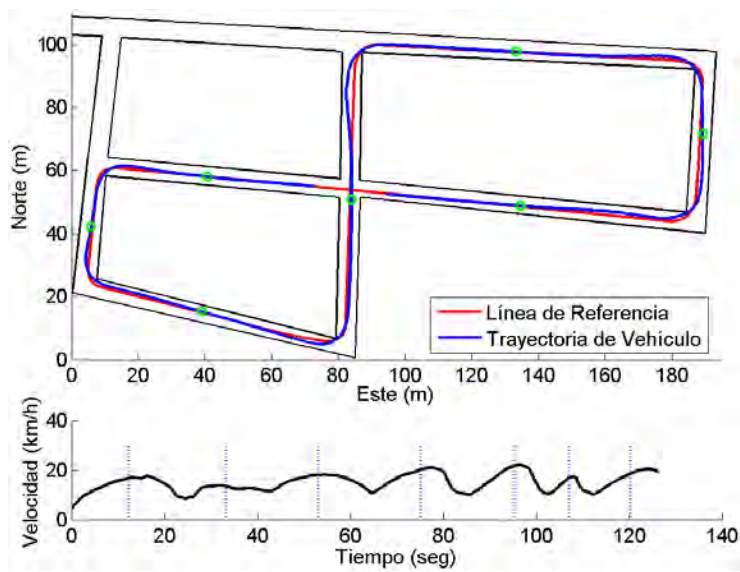


Figura 4.18: Experimentación con controlador de base de reglas *Marginal* para 5 funciones de pertenencia por entrada.

#### 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

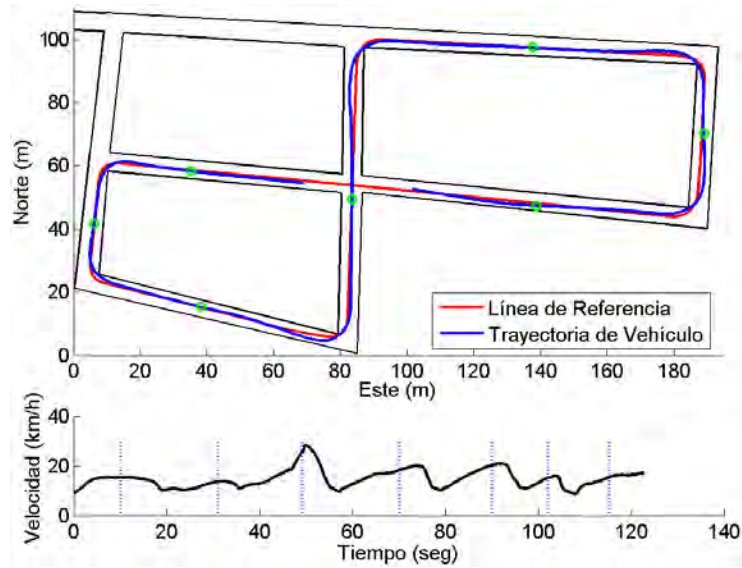


Figura 4.19: Experimentación con controlador de base de reglas *Central* para 5 funciones de pertenencia por entrada.

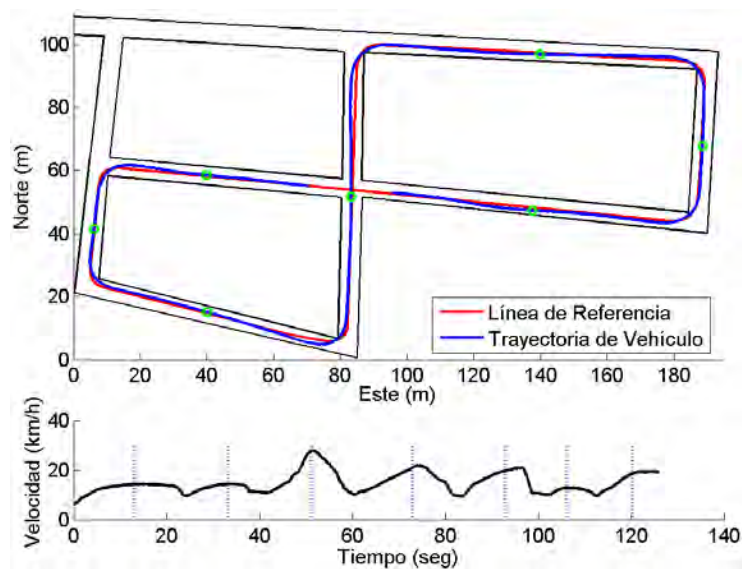


Figura 4.20: Experimentación con controlador de base de reglas *Total* para 5 funciones de pertenencia por entrada.

Desde un punto de vista cualitativo, la figura 4.15 (3M) muestra peor comportamiento durante las dos primeras curvas, que parece mejorar

## 4.5 Experimentación y Resultados

---

durante el resto del recorrido, con muy buen ajuste en tramos rectos. Un caso muy similar se observa en la figura 4.16 (3C), con la excepción de su relativo buen comportamiento en las dos primeras curvas. Ambos controladores serán comparados en términos de error lateral y angular. En la figura 4.17, en comportamiento en curvas parece ser más preciso que el mostrado por controladores previos; no ocurre lo mismo para tramos rectos. La figura 4.18 muestra resultados parecidos a los anteriores. En la figura 4.19 es donde aparentemente se puede encontrar el mejor comportamiento: se puede apreciar la reducción de error en curvas combinado con un seguimiento de rectas aceptable. Finalmente, la trayectoria mostrada en la figura 4.20 parece ser más preciso que el resto.

En las figuras 4.15 hasta 4.20 se puede observar que, cualitativamente los controladores presentan un buen comportamiento, con excepciones en determinados tramos para determinados controladores. Además, la mayoría de ellos parecen capaces de seguir un segmento recto, mientras que parecen tener el defecto de que, tras una curva, el vehículo parece desviarse ligeramente de la línea de referencia. Aunque esto puede deberse a las velocidades relativamente altas para tomar curvas de unos 90 grados (véase la tabla 4.5.2) combinado con el carácter reactivo del modelo de controlador utilizado. Una vez que el vehículo está en un tramo curvo, no tiene conocimiento de dónde se encontrará el siguiente punto de referencia que, por lo general estará cercano, así que se mantiene el giro de volante hasta que el siguiente punto GPS es procesado, una vez pasada la curva.

	<b>3M</b>	<b>3C</b>	<b>3T</b>	<b>5M</b>	<b>5C</b>	<b>5T</b>
Distancia(m)	433.9	444.7	437.3	441.0	428.6	434.6
Tiempo(s)	139.8	129.8	138.0	126.2	122.8	126.0
Velocidad Media (km/h)	12.8	14.6	13.5	14.9	14.8	14.8
Velocidad Máxima (km/h)	22.4	22.1	24.0	22.1	28.6	27.9

Tabla 4.5: Distancia, tiempo y velocidades medias y máximas registradas durante la experimentación.

## 4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### 4.5.3 Comparación con Conductores Humanos

Finalmente, las figuras 4.21 y 4.22 muestran resultados cuantitativos obtenidos durante la experimentación, mostrando el error angular y lateral obtenido por los conductores humanos usados en la fase de captura de información (*H1* y *H2*) en comparación con los controladores difusos obtenidos. A primera vista, no se aprecian diferencias significativas entre los resultados obtenidos por los controladores y los conductores.

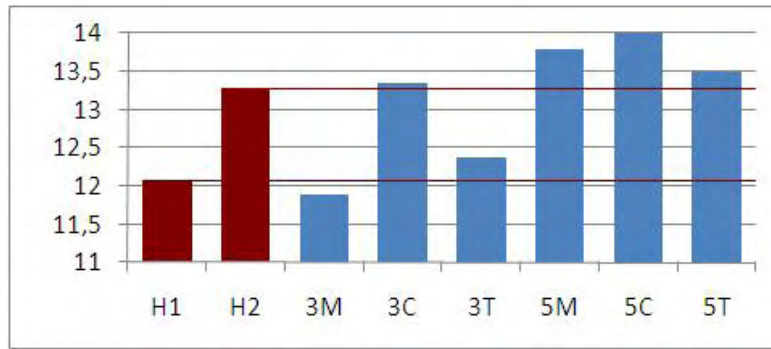


Figura 4.21: Resultados comparativos (Error angular promedio) entre los conductores y los controladores difusos.

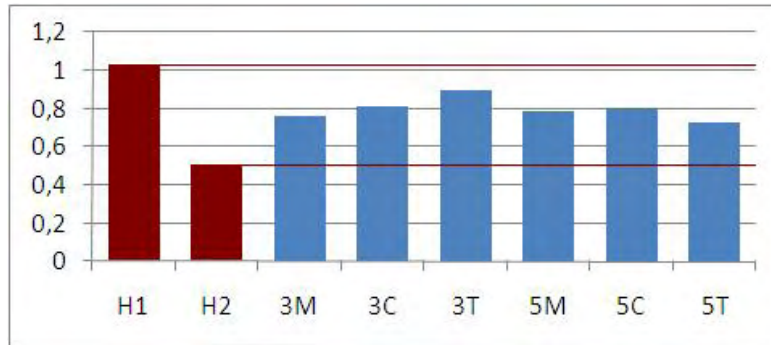


Figura 4.22: Resultados comparativos (Error lateral promedio) entre los conductores y los controladores difusos.

El controlador *3M* es capaz de mejorar el error angular de ambos conductores. Todos los controladores son capaces de mejorar el error lateral del primer conductor mientras que ninguno mejora el error lateral del segundo de ellos. No se observan diferencias significativas al comparar

controladores basados en modelos con cinco funciones de pertenencia entre ellos; el de base de reglas total ( $5T$ ) obtiene mejores valores que sus respectivos con bases de reglas marginal o central ( $5M$  y  $5C$ ) en ambos casos.  $5T$  obtiene el mejor error lateral (de los controladores difusos), pero sin diferencias notables cuando se compara con, por ejemplo  $3M$  o  $5M$ . Los resultados cuantitativos muestran al controlador  $3M$  como uno de los mejores, siendo sin embargo, el más simple de todos.

## 4.6 Conclusiones

En el presente capítulo se ha presentado de ajuste de controladores difusos basado en algoritmos genéticos para el control de dirección de un vehículo. Para la generación de controladores, se ha requerido similitud entre las salidas proporcionadas por el controlador y acciones humanas sobre el volante, así como suavidad en la superficie de control, con el fin de garantizar el confort y seguridad de los ocupantes del vehículo.

El método implementado se compone de dos etapas que se ejecutan independiente e iterativamente la una respecto a la otra, más una etapa previa de captura y procesamiento de datos. En la etapa de captura y procesamiento de información se obtienen datos de las acciones realizadas por dos conductores humanos al seguir una trayectoria, por otra parte, se ha aprovechado el conocimiento del diseñador, definiendo datos no contemplados durante la experimentación, tal y como pueden ser acciones al volante en situaciones extremas (*si el error es máximo a la derecha, gira el volante lo máximo hacia la izquierda, etc*).

La etapa de optimización trata de ajustar, por separado, las etiquetas y la base de reglas de un controlador difuso capaz de inferir las mismas salidas que los conductores humanos, ante una configuración de entradas similar. Ambos ajustes se ejecutan por dos algoritmos genéticos, uno de ellos encargado de inferir el mejor conjunto de etiquetas posible y el otro de inferir la mejor base de reglas, que se ejecutan independientemente pero intercambiando datos entre sí; en este caso, cada algoritmo provee al otro del mejor individuo encontrado, para así lograr, la mejor relación Etiquetas-Reglas posible.

#### **4. AJUSTE DEL CONTROL DE DIRECCIÓN CON ALGORITMOS GENÉTICOS**

---

Se han realizado pruebas para controladores con 3 y 5 etiquetas lingüísticas por variable de entrada y con 3 bases de reglas diferentes, resultando un total de 6 controladores, con diferente grado de complejidad. Los controladores han sido puestos a prueba en el circuito del Centro de Automática y Robótica mostrando un excelente comportamiento en rectas y curvas, con ligeras deficiencias en transiciones curva-recta que se consideran debidas al carácter reactivo de los controladores.

Todos los controladores presentan una superficie de control sin grandes saltos, dando así una conducción agradable a efectos de los ocupantes del vehículo, incluso a velocidades relativamente altas.



## Capítulo 5

# Conducción Competitiva en Entornos Simulados

LA Inteligencia Artificial se ha aplicado a los juegos ha desde sus inicios. Tradicionalmente, los juegos medían la habilidad del jugador artificial para mover fichas en un tablero o jugar con cartas, todo ello, enmarcado en un conjunto de reglas que hacía que el proceso de generar un árbol de decisión fuera simplemente cuestión de tiempo. Primeros ejemplos del interés de la IA por los juegos son programas como *Deep Blue* (Campbell 02) para ajedrez y *Chinook* (Schaeffer 07) para damas.

Desde la aparición de *Pong*<sup>1</sup> en 1972 se ha producido un fenomenal crecimiento en complejidad, diversidad y calidad de los videojuegos (Lucas 09). Este realismo presenta a investigadores un entorno para la aplicación de técnicas de aprendizaje, planificación, control, etc. sobre escenarios continuos de gran similitud con el mundo real (Laird 02a).

Un ejemplo que nos interesa por la cercanía a nuestra investigación es la simulación de carreras de coches. Los entornos de simulación actuales implementan con gran detalle la inercia, aerodinámica y demás aspectos físicos involucrados, dotando así a los simuladores de gran realismo, lo que permite la realización de pruebas de mayor riesgo o complejidad.

---

<sup>1</sup>Pong fue un videojuego de la primera generación de videoconsolas publicado por *Atari*, creado por Nolan Bushnell y lanzado el 29 de noviembre de 1972. Está basado en el deporte de tenis de mesa.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un controlador capaz de manejar un vehículo en situaciones competitivas. La arquitectura de conducción se compone de seis módulos, siendo cada uno de ellos responsable de una acción considerada clave para el desempeño de la tarea.

La experimentación se ha llevado a cabo en dos etapas. Primeramente corriendo sin oponentes, donde el objetivo es circular tan rápido como sea posible sin salir de la pista ni chocar contra las barreras y, en segundo lugar participando en el *2009 Simulated Car Racing Championship*, donde el modelo aquí presentado ganó sobre más de 10 enfoques diferentes.

En la **sección 5.1** se motiva el trabajo dentro del marco del reto que supone para la inteligencia artificial. La **sección 5.2** presenta el entorno de simulación utilizado, un híbrido a medio camino entre videojuego de carreras y simulador de conducción. La **sección 5.3** detalla la arquitectura propuesta, haciendo hincapié en cada uno de los módulos que la conforman. La **sección 5.4** presentará los resultados obtenidos, tanto en una amplia validación del sistema con pruebas de laboratorio, como durante la participación en la *2009 Simulated Car Racing Championship*. Finalmente, en la **sección 5.5** se presentarán las conclusiones obtenidas a lo largo de todo el trabajo.

### 5.1 Motivación

El área de los videojuegos representa un campo de aplicación excelente para las técnicas de inteligencia artificial gracias al alto grado de realismo del que son dotados los simuladores hoy en día. Es por ello que se han ido popularizando dentro de la comunidad científica; estos representan un reto que hace posible el desarrollo de nuevos métodos, medir su eficacia y demostrar una vez más las impresionantes posibilidades de la Inteligencia Artificial sin la necesidad de poner vidas o propiedades en riesgo.

En particular, la nueva generación de videojuegos utiliza técnicas de inteligencia artificial para la creación de contenidos, adaptación de luminosidad, control de cámaras o, como el ejemplo más obvio, el control

automático de jugadores (*Non Player Characters*, NPC) (Laird 02b). Ejemplos del uso de inteligencia artificial para diseño de NPC pueden encontrarse en diversos estilos de juego (estrategia, puzzle o juegos continuos), tales como Tetris (Siegel 96), Pac Man (Rosca 96) o Quake (Schloman 07).

Juegos de carreras en particular, o simuladores de coches en general, vienen recibiendo gran atención debido a dos razones: 1) han evolucionado hasta el punto de poder implementar la física y dinámica implicada de una manera muy similar al mundo real, haciendo posible la evaluación de técnicas y métodos hasta ahora reservados al campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte (Bourg 02), 2) permiten simular sistemas y situaciones que, desde un punto de vista real serían sumamente costosos o peligrosos.

En los últimos años, el surgimiento de un gran número de interfaces de programación de aplicaciones (*Application Program Interface*, API) para determinados videojuegos ha incrementado el interés de investigadores en el área, así como propiciado el surgimiento de competiciones en entornos simulados con el fin de comparar la adecuación y competitividad de diversas técnicas.

Las primeras competiciones que hicieron uso de juegos de carreras tuvieron lugar en 2007, en los congresos *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2007)*<sup>1</sup> y *Computational Intelligence and Games Symposium (CIG-2007)*<sup>2</sup>. Las carreras usaron un modelo computacional gráfica y mecánicamente simple, que propició un alto grado de participación (Togelius 08).

En 2008, en el *IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI-2008)*<sup>3</sup>, la competición se basó en TORCS<sup>4</sup> (*The Open Racing Car Simulator*). TORCS permitió simular carreras complejas tanto desde un punto de vista competitivo, ya que todos los competidores corrían en la misma pista, como físico, ya que TORCS simula con un alto grado de realismo las dinámicas de un vehículo. Esto dió lugar a la

---

<sup>1</sup><http://cec2007.nus.edu.sg/staticPages/Competitions.html>

<sup>2</sup><http://julian.togelius.com/cig2007competition/>

<sup>3</sup><http://www2.mae.cuhk.edu.hk/wcci2008/>

<sup>4</sup><http://torcs.sourceforge.net/>

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

primera *Simulated Car Racing Competition*, cuyos detalles, participantes y resultados se detallan en (Loiacono 08).

En febrero de 2009 se anunció el primer campeonato completo en carreras de coches simulados, llamado el *2009 Simulated Car Racing Championship*, el cual consistiría en tres competiciones separadas que serían llevadas a cabo durante los congresos: *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2009)*<sup>1</sup>, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2009)*<sup>2</sup>, y *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games (CIG-2009)*<sup>3</sup>.

El creciente interés por los videojuegos de carreras, su realismo y la posibilidad de probar estrategias de control no aplicables en vehículos reales, tales como estrategias competitivas, adelantamientos peligrosos o conducción a altas velocidades; por otra parte, el interés en las competiciones de carreras de coches simulados, así como la posibilidad de participar en el *2009 Simulated Car Racing Championship* para comparar el enfoque propuesto con propuestas de investigadores de todo el mundo motivó el desarrollo de una arquitectura de control siguiendo las técnicas y métodos que se hubieran seguido en un entorno real. Dicha arquitectura se presenta y valida a continuación.

### 5.2 El Entorno de Simulación TORCS

El simulador TORCS está escrito en C++ y disponible bajo licencia GPL a través de la web<sup>4</sup>, la figura 5.1 muestra algunas capturas de pantalla de TORCS. Aspectos que lo hacen interesante desde un punto de vista académico son, entre otros:

- Es totalmente configurable y fácilmente extensible para implementar e incorporar nuevas funciones.
- Está disponible para los sistemas operativos más comunes, como *Linux*, *MacOS* y *Windows*.

---

<sup>1</sup><http://www.cec-2009.org/>

<sup>2</sup><http://www.sigevo.org/gecco-2009/>

<sup>3</sup><http://www.ieee-cig.org/2009/>

<sup>4</sup><http://torcs.sourceforge.net/>

## 5.2 El Entorno de Simulación TORCS

---

- Implementa una física motora (aerodinámica, consumo de combustible, tracción,...) altamente sofisticada, así como buenos gráficos 3D.
- Existe la posibilidad de usar cualquiera de los más de 30 circuitos disponibles, de características dispares (anchura, longitud, superficie ...) y cualquiera de los casi 50 coches de diferentes características motoras (aerodinámicas, tipo de tracción, manejabilidad, ...).
- Existe una amplia comunidad de usuarios en la red aportando nuevas pistas, vehículos o controladores.
- Facilita la aplicación de cualquier técnica de aprendizaje u optimización para la generación de nuevos controladores gracias a que ofrece una amplia gama de *sensores* a partir de los cuales inferir acciones de control.



Figura 5.1: Entorno de Simulación TORCS

De hecho, controladores, pistas y vehículos se implementan como módulos independientes, por lo que es sencillo el crear uno propio e introducirlo en el entorno.

Con la aparición de las competiciones basadas en TORCS, la organización puso a disposición de los participantes una arquitectura cliente-servidor que permite intercambiar información entre el controlador y el

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

entorno mediante conexiones UDP (acrónimo de *User Datagram Protocol*); por lo que el controlador recibe información sensorial del entorno y envía órdenes de control. En la figura 5.2 puede verse un esquema de la arquitectura.

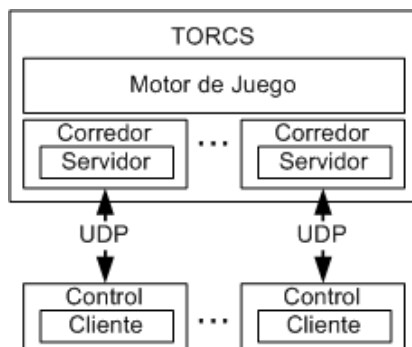


Figura 5.2: Esquema de la arquitectura diseñada para la competición en WCCI-2008

Gracias a esto, un controlador recibirá la información sensorial necesaria para hacer el proceso de toma de decisiones, inferirá la estrategia a seguir y devolverá al servidor acciones de control sobre los actuadores del vehículo. Las variables que determinan las acciones de control son: *volante*, que toma valores en  $[-1,1]$ , *acelerador* y *freno* definidos en  $[0,1]$  y *marcha* que toma valores  $-1$  para marcha atrás, y  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  para el resto de marchas.

En la siguiente sección se explica toda la información sensorial de la que se dispuso para generar el controlador.

### 5.2.1 Información Sensorial

Los sensores más importantes, y que aportan más información sobre el estado del entorno que rodea al vehículo están formados por dos conjuntos de sensores *láser*.

El primero de ellos medirá distancias entre el vehículo y los bordes de la pista; el conjunto está formado por 19 sensores orientados a  $\{\pm 90, \pm 80, \dots, 0\}$  grados con relación a la dirección del vehículo que miden la distancia al borde de la pista; no permiten la lectura de

## 5.2 El Entorno de Simulación TORCS

distancias mayores a 100 metros y en el caso en que el vehículo se encuentre fuera de la pista, sus valores no serán fiables. A partir de ahora denotaremos  $P_d$  como la medida del sensor orientado a  $d$  grados. En la figura 5.3 se puede ver una representación gráfica del abanico de medidas obtenido.

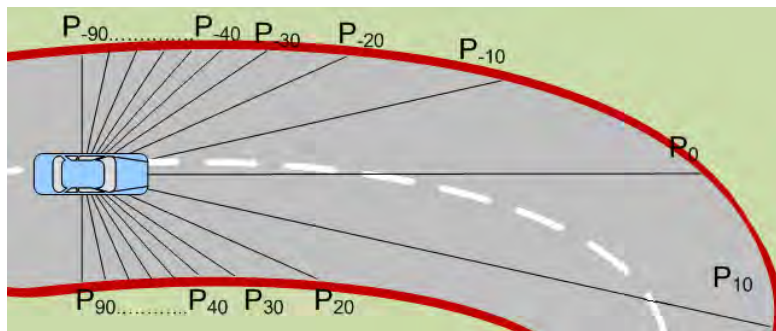


Figura 5.3: Esquema de funcionamiento del conjunto de sensores que miden distancias a los bordes.

El segundo conjunto de sensores láser medirá distancias entre el vehículo y sus oponentes; está formado por 36 sensores orientados a  $\{\pm 180, \pm 170, \dots, 0\}$  grados con relación a la dirección del vehículo; igual que los anteriores, éstos no permiten la lectura de distancias mayores a 100 metros. A partir de ahora denotaremos  $O_d$  como la medida del sensor orientado a  $d$  grados. La figura 5.4 muestra una representación gráfica del anillo de sensores.

Para medir la posición del vehículo con respecto a la línea directriz de la pista, se dispone de las variables *ángulo*, *desviación* y *dist*; su descripción detallada se encuentra en la tabla 5.1 y están representadas gráficamente en la figura 5.5. El estado de la carrera actual puede inferirse mediante *orden*, *tiempo* y *tiempo*<sub>1</sub>, mostradas en la tabla 5.2. El estado interno del vehículo puede determinarse mediante variables tales como *rpm*, *marcha*, *daño*, *combustible*, *ruedas*<sub>1,2,3,4</sub>, *velocidad* y *velocidad*<sub>y</sub>, resumidas en la tabla 5.3.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

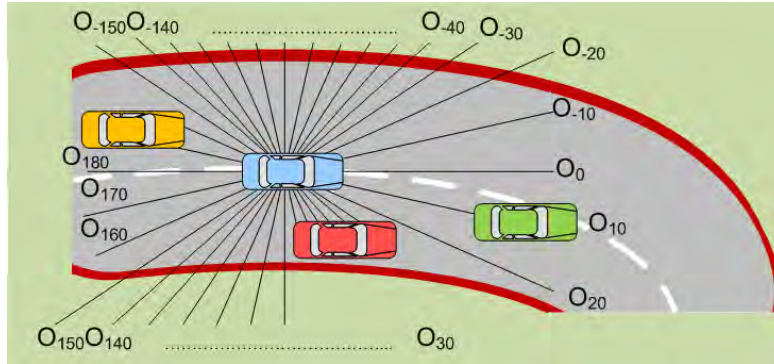


Figura 5.4: Esquema de funcionamiento del conjunto de sensores que miden distancias a los oponentes.

Nombre	Rango	Descripción
<i>ángulo</i>	$[-\pi, \pi]$ (rad)	Representa el ángulo del vehículo con la directriz de la pista.
<i>desviación</i>	-	Distancia relativa del vehículo al centro de la pista, normalizada con respecto al ancho de la misma. 0 cuando el vehículo se encuentra en el centro, -1 y 1 cuando está en el borde izquierdo y derecho respectivamente y valores menores que -1 o mayores que 1 cuando se encuentra fuera de los bordes de la pista.
<i>dist</i>	$[0, -]$ (m)	Distancia a lo largo de la pista entre la posición de salida y la posición actual del vehículo.

Tabla 5.1: Sensores de posicionamiento en la pista.

Nombre	Rango	Descripción
<i>orden</i>	1, 2, 3, ...	Posición del vehículo en un instante dado con respecto a sus oponentes.
<i>tiempo</i>	$[0, -]$ (s)	Tiempo de la vuelta actual (hasta el momento).
<i>tiempo<sub>-1</sub></i>	$[0, -]$ (s)	Tiempo de la vuelta anterior.

Tabla 5.2: Sensores de estado de la carrera.



### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

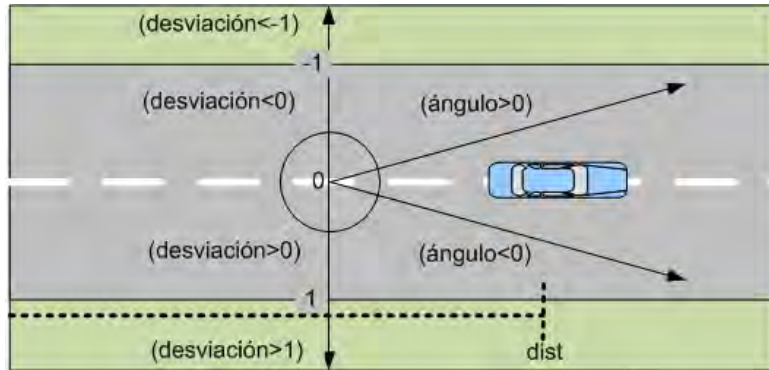


Figura 5.5: Representación gráfica de los sensores de posicionamiento.

Nombre	Rango	Descripción
<i>rpm</i>	[2000, -] (rpm)	Revoluciones por minuto del motor del vehículo.
<i>marcha</i>	{-1, 0, 1, 2, ..., 6}	Marcha actual: -1 para marcha atrás, 0 para punto muerto y valores entre 1 y 6 para marchas de avance.
<i>daño</i>	[0, 100] (%)	Mide el cómo de dañado se encuentra el vehículo.
<i>combustible</i>	[0, 100] (%)	Estado del depósito de combustible del vehículo; aunque no tiene gran interés debido a que todos los vehículos comienzan la carrera con suficiente como para finalizar sin necesidad de <i>parar en boxes</i> .
<i>ruedas<sub>1,2,3,4</sub></i>	[0, -] (rad/s)	Velocidad angular de cada una de las ruedas.
<i>velocidad</i>	[0, 300] (km/h)	Velocidad de avance del vehículo.
<i>velocidad<sub>y</sub></i>	- (km/h)	Velocidad transversal del vehículo.

Tabla 5.3: Sensores de información sobre el estado interno del vehículo.

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

En esta sección se explica toda la metodología y técnicas utilizadas a la hora del diseño de la arquitectura de control. Un esquema global de ésta se presenta en la figura 5.6.

La arquitectura se compone básicamente de seis módulos, cada uno

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

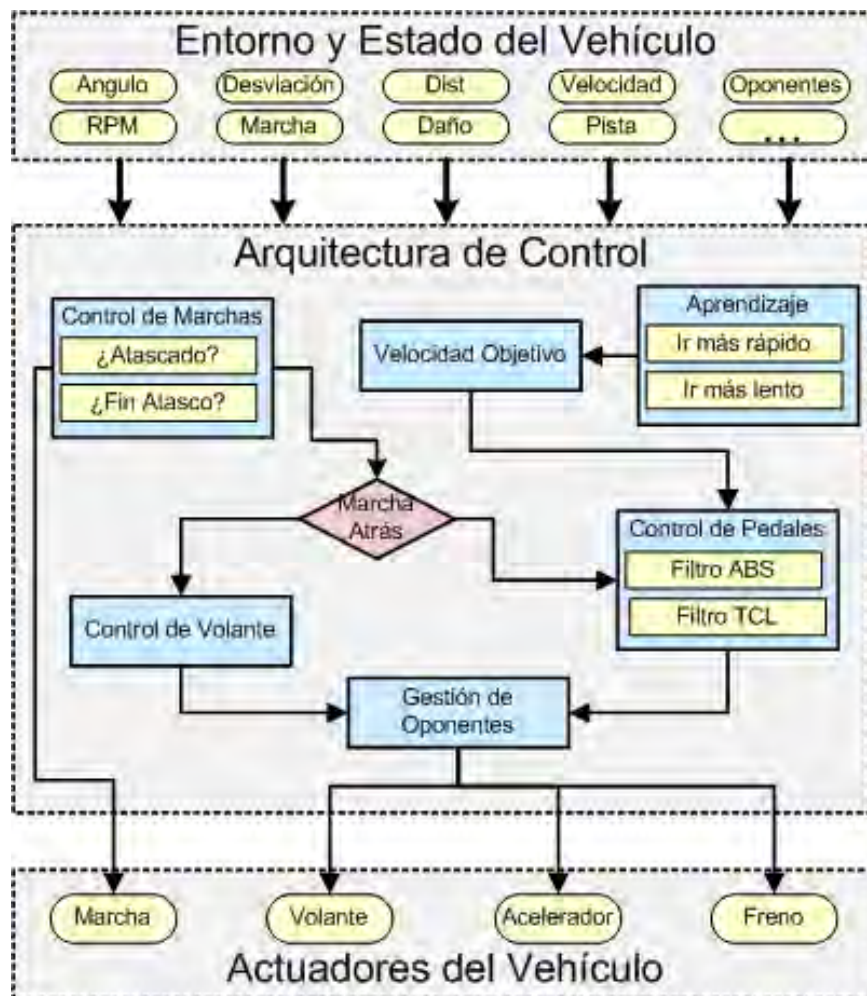


Figura 5.6: Esquema Global de la Arquitectura.

de ellos a cargo de lo que consideramos una función básica requerida en la conducción en entornos competitivos:

1. El **Control de Marchas** se encarga principalmente de seleccionar la apropiada entre las marchas de avance (de primera a sexta). Su función incluye también la detección situaciones en las que el vehículo debe utilizar marcha atrás, en cuyo caso el control del volante y pedales se verá afectado (véase figura 5.6).
2. El Módulo de **Velocidad Objetivo** es el encargado de calcular la

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

---

- velocidad máxima permitida en un determinado segmento de pista.
3. El **Control de Pedales** accionará los pedales del vehículo con el fin de adecuar su velocidad a la dictada por el módulo anterior. Por otra parte, unos filtros de control de tracción y frenada asistida (TCS y ABS) se encargarán de reducir, en caso necesario, las acciones sobre los pedales para evitar que el vehículo derrape.
  4. El **Control de Volante** controla la dirección del vehículo.
  5. El Módulo de **Aprendizaje** se encarga de *recordar* posiciones de la pista donde el vehículo puede circular más rápido o su velocidad debe ser reducida según información recopilada durante vueltas anteriores. Ejemplos de aplicación son segmentos rectos suficientemente largos o curvas donde el vehículo perdió el control.
  6. El Módulo de **Gestión de Oponentes** se activa cuando otro vehículo se encuentra cerca. Su función es la de adaptar las acciones sobre los pedales y volante para lidiar con oponentes; ya sea realizar adelantamientos o frenadas de emergencia.

Es importante notar que los módulos 1 a 4 conforman una arquitectura suficiente para disponer de un controlador capaz de circular sin oponentes durante una vuelta; el quinto añade la posibilidad de recordar acciones realizadas durante la vuelta actual con el fin de mejorar el tiempo en vueltas siguientes y, finalmente; el sexto módulo añade los aspectos necesarios para la conducción con oponentes.

Consideramos como *núcleo* de la arquitectura el módulo encargado de determinar la velocidad objetivo, debido a que se trata de un valor vital para llevar a cabo una conducción competitiva. Una velocidad demasiado baja hace crecer el tiempo por vuelta mientras que una demasiado alta puede provocar derrapes, choques y salidas de vía. Por otra parte, según el esquema planteado, este módulo es determinante para el control de pedales y, transitivamente repercute sobre el de gestión de oponentes; así como es influido por el módulo de aprendizaje, que, debido al carácter limitado de la información sensorial disponible (únicamente se puede ver el entorno 100 metros delante del vehículo), conviene que el vehículo

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

*recuerde* salidas de vía o choques, para adaptar la velocidad en un futuro (figura 5.6).

La arquitectura aquí presentada es una mejora del trabajo presentado con anterioridad en (Onieva 09c). Los principales cambios recaen en un nuevo diseño del controlador difuso, la incorporación del módulo de aprendizaje así y el filtro TCS para evitar derrapes y la optimización del control de marchas, entre otros cambios menores. La experimentación comparará esta arquitectura con su anterior versión para valorar la bondad de las modificaciones.

Las siguientes subsecciones se encargarán de explicar en detalle cada uno de los módulos que conforman la arquitectura.

### 5.3.1 Control de Marchas

El módulo estará a cargo de tres funciones básicas:

1. Realizar cambios entre primera y sexta marcha según requisitos del vehículo.
2. Detectar situaciones donde sea necesaria la aplicación de marcha atrás.
3. Detectar el fin de dichas situaciones para aplicar primera marcha nuevamente y retomar la carrera.

Con el fin de de **cambiar entre marchas** en situaciones normales de avance se tendrá en cuenta el valor *rpm*. Se definirán límites máximos y mínimos para cada una de las marchas; en caso de que el valor *rpm* supere el máximo definido, la marcha actual se incrementará, de la misma forma se decrementará cuando dicho valor baje del mínimo establecido.

La tabla 5.4 muestra los valores máximo y mínimo para cada una de las marchas. La sexta marcha no puede incrementarse de la misma forma que la primera no puede (no debe) decrementarse, salvo en situaciones de especiales (marcha atrás). Con el fin de evitar oscilaciones de marcha se impone la restricción de que una marcha debe ser mantenida al menos durante 2 segundos.

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

Marcha Actual	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>
Subir	≥ 9000	≥ 9000	≥ 9000	≥ 8000	≥ 8000	
Bajar		≤ 3000	≤ 3000	≤ 3000	≤ 3500	≤ 3500

Tabla 5.4: Valores máximos y mínimos para realizar cambios de marchas.

Se considerará que debe aplicarse **marcha atrás** cuando el *ángulo* en valor absoluto es mayor que  $\frac{\pi}{6}$  (30 grados) y el valor absoluto de la *desviación* sea mayor que 0.5 (más de la mitad de pista); la figura 5.7 (izquierda) muestra gráficamente esta situación. Complementariamente. En el caso de que la *velocidad* sea menor de 10 km/h, el vehículo puede haber chocado (contra una valla de protección o contra un vehículo parado) y no puede continuar el movimiento. De una manera formal, el estancamiento puede formularse como sigue:

$$(|\text{angulo}| \geq \frac{\pi}{6} \text{ Y } |\text{desviacion}| \geq 0.5) \text{ O } (\text{velocidad} < 10) \quad (5.1)$$

La marcha atrás se usará en el momento en el que la condición 5.1 sea mantenida durante, al menos, dos segundos.

El **fin del uso de la marcha atrás** se dará cuando, estando haciendo uso de la marcha atrás, el *ángulo* y la *desviación* tengan el mismo signo, lo que representará que el vehículo tiene la orientación apropiada con respecto a su posición, es decir, se encuentra desviado hacia la derecha pero orientado hacia la izquierda o viceversa, tal y como se representa en la figura 5.7 (derecha).

#### 5.3.2 Velocidad Objetivo

Una de las claves para una conducción rápida es la correcta determinación de la velocidad límite en cada uno de los tramos de pista. Esto permite recorrer la pista lo más rápido posible, además de evitar salirse de ella, derrapar o perder el control del vehículo en una curva, etc. El objetivo de este módulo es obtener ese valor de velocidad límite ( $Vel_{obj}$ , en adelante).

Cuando el vehículo se encuentra dentro de la pista, un sistema

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

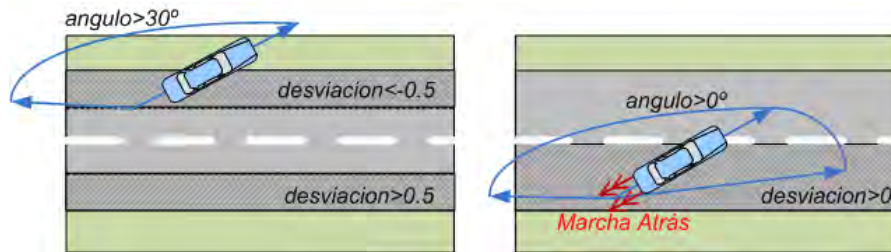


Figura 5.7: Representación gráfica de situación que requiere marcha atrás (izquierda) y momento en que la situación cesa (derecha).

de control difuso estará a cargo de determinar el valor  $Vel_{obj}$ . Se seleccionarán y utilizarán solamente tres de los 19 sensores láser a los bordes de la pista (figura 5.3) como variables de entrada:

1.  $Frente = P_0$ , será la distancia medida por el sensor frontal del vehículo.
2.  $Max_{10} = \max(P_{-10}, P_{10})$ , será el mayor de los valores leídos por los sensores orientados a  $\pm 10$  grados.
3.  $Max_{20} = \max(P_{-20}, P_{20})$ , el mayor de los valores leídos por los sensores orientados a  $\pm 20$  grados.

Estos sensores permitirán tener en cuenta la situación de los bordes detectados inmediatamente delante del vehículo. Cada una de las variables de entrada se codificará mediante tres funciones de pertenencia llamadas *Bajo*, *Medio* y *Alto* representando, respectivamente el nivel de distancia libre en la dirección del vehículo. La representación gráfica de las funciones de pertenencia utilizadas puede verse en la figura 5.8.

La variable de salida ( $Vel_{obj}$ ) se codificará por medio de los siete singletons mostrados en la figura 5.9 que van de un máximo de 200 km/h a un mínimo de 50 km/h.

La base de reglas se diseñó bajo la premisa de que, a mayor distancia frontal libre, mayor velocidad debe adoptar el vehículo, por ello, en el caso de que la distancia libre sea máxima, la velocidad debe ser máxima y será disminuida a medida que disminuya la distancia libre. Las reglas utilizadas para inferir  $Vel_{obj}$  se listan a continuación:

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

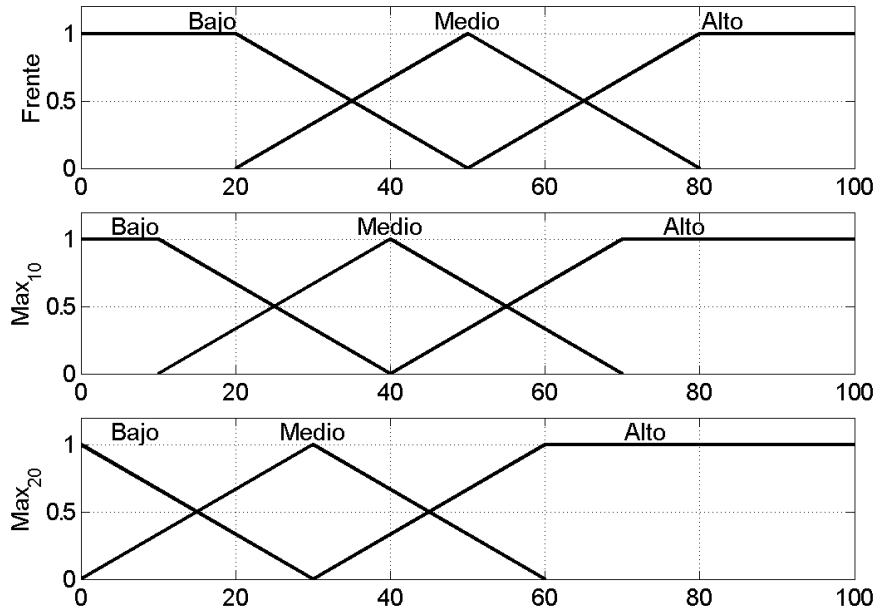


Figura 5.8: Funciones de pertenencia utilizadas para codificar cada una de las variables de entrada.

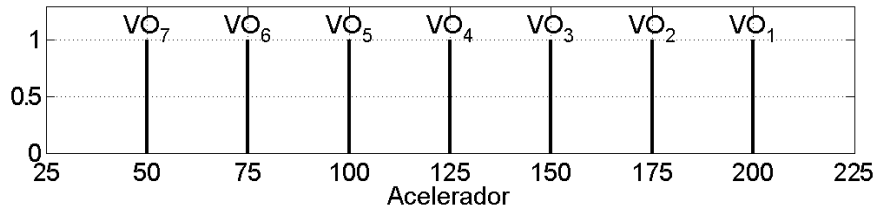


Figura 5.9: Singletons utilizados para codificar la salida.

- R<sub>1</sub>: si *Frente* es Alto entonces  $Vel_{obj} VO_1$
- R<sub>2</sub>: si *Frente* es Medio entonces  $Vel_{obj} VO_2$
- R<sub>3</sub>: si *Frente* es Bajo Y  $Max_{10}$  es Alto entonces  $Vel_{obj} VO_3$
- R<sub>4</sub>: si *Frente* es Bajo Y  $Max_{10}$  es Medio entonces  $Vel_{obj} VO_4$
- R<sub>5</sub>: si *Frente* es Bajo Y  $Max_{10}$  es Bajo Y  $Max_{20}$  es Alto  
entonces  $Vel_{obj} VO_5$
- R<sub>6</sub>: si *Frente* es Bajo Y  $Max_{10}$  es Bajo Y  $Max_{20}$  es Medio  
entonces  $Vel_{obj} VO_6$
- R<sub>7</sub>: si *Frente* es Bajo Y  $Max_{10}$  es Bajo Y  $Max_{20}$  es Bajo  
entonces  $Vel_{obj} VO_7$

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

Para complementar, se añade al conjunto una regla adicional no difusa con el fin de dar un valor máximo a  $Vel_{obj}$  de 300 km/h en el caso de que uno de las tres variables de entrada tenga el valor máximo posible de 100 m:

$R_8$ : **si**  $Frente = 100$  O  $Max_{10} = 100$  O  $Max_{20} = 100$   
**entonces**  $Vel_{obj} = 300$

La regla  $R_8$  se activará siempre que se cumpla la condición, esto es, si una de las entradas del módulo ( $Frente$ ,  $Max_{10}$  o  $Max_{20}$ ) toma valor máximo, la velocidad objetivo será fijada a 300 km/h.

Dado que los sensores láser dejan de funcionar en el caso en que el vehículo se encuentra fuera de la pista, esta situación ha de tenerse en cuenta por separado. En este caso, el módulo incrementará en 5km/h la *velocidad* actual del vehículo, permitiendo así un uso moderado del acelerador, manteniendo siempre la velocidad en el rango [30,150] km/h. Mientras tanto, así como durante toda la carrera, los módulos *ABS* y *TCS* estarán a cargo de evitar derrapes y deslizamientos, ya que, en ciertas pistas, el exterior de la pista está compuesto por arena, y suele ser más deslizante.

### 5.3.3 Control de Pedales

Representa el módulo encargado de accionar los pedales del vehículo con el fin de adecuar la velocidad del vehículo al valor  $Vel_{obj}$  inferido por el anterior módulo. Las variables de control *acelerador* y *freno* se codificarán como una sola variable (*pedal* en [-1,1]) con el fin de evitar situaciones no coherentes como accionar ambos pedales a la vez. Valores positivos representarán acciones sobre el acelerador manteniendo el freno a cero y valores negativos representarán la situación contraria.

El módulo se implementa en función de la diferencia entre la *velocidad* real del vehículo y  $Vel_{obj}$  tal y como se muestra en la ecuación 5.2. La función resultante se muestra en la figura 5.10.

$$Pedal = 1 - \frac{2}{1 + e^{velocidad - Vel_{obj}}} \quad (5.2)$$

Se han implementado dos filtros: 1) un filtro TCS con el fin de reducir



## 5.3 Arquitectura de Control Implementada

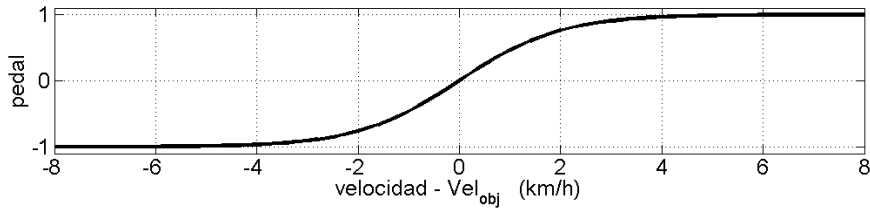


Figura 5.10: Representación gráfica de las acciones sobre los pedales.

la acción sobre el acelerador cuando  $pedal > 0$  y 2) un filtro ABS para reducir acciones sobre el freno cuando  $pedal < 0$ . Ambos permitirán al vehículo adaptarse a las condiciones del firme de la pista, evitando así, derrapes y deslizamientos.

Los filtros se basan en la diferencia entre la *velocidad* del vehículo y la velocidad de avance calculada mediante la transformación<sup>1</sup> en km/h de las velocidades angulares de las ruedas (sensores  $ruedas_{1,2,3,4}$ ). En el caso en que ambos valores difieran se puede decir que el vehículo está en una situación de derrape; si las ruedas están paradas y el vehículo avanza o las ruedas giran y el vehículo está parado.

Los filtros se activan cuando la *diferencia* entre ambas velocidades difieren en más de 1.5 km/h y modifican el valor *pedal* de la siguiente forma:

$$Pedal = Pedal \pm \frac{|diferencia| - 1.5}{5} \quad (5.3)$$

utilizando el signo menos cuando  $pedal > 0$  (TCS) y el signo más cuando  $pedal < 0$  (ABS).

### 5.3.4 Control de Volante

Para manejar el volante, se tienen en cuenta tres situaciones:

1. El vehículo circula dentro de la pista.
2. El vehículo se encuentra fuera de la pista.

<sup>1</sup>El radio de las ruedas, necesario para realizar el cálculo es cogido de la descripción física del vehículo y es de 31.7 cm para las ruedas delanteras y 32.7 cm para las traseras

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

3. El vehículo circula marcha atrás.

En el primero de los casos, cuando el vehículo se encuentra realizando una **conducción normal**, se define  $M$  como la orientación en grados del sensor de pista ( $P_{\{\pm 90, \pm 80, \dots, 0\}}$ ) con mayor valor; en caso de empate entre dos sensores se tomará como  $M$  la menor orientación en valor absoluto (tomando así el sensor *más centrado*). Dado esto,  $P_M$  representará la medida devuelta por el sensor orientado a  $M$  grados, y  $P_{M \pm 10}$  representará las medidas de sus dos sensores adyacentes, es decir, orientados a  $M \pm 10$  grados.

En el caso en que la mayor distancia a los bordes de la pista se detecte en un ángulo mayor de 30 grados, se aplicarán sobre el volante acciones máximas. Se asignará  $volante = 1$  si  $M \geq 30$  y  $volante = -1$  si  $M \leq -30$ .

En otro caso,  $volante$  será calculado haciendo uso de las distancias medidas por el sensor de mayor valor y sus dos adyacentes, tal y como sigue:

$$volante = S_M + \frac{P_{M-10} \times |S_M - S_{M-10}| - P_{M+10} \times |S_M - S_{M+10}|}{P_M} \quad (5.4)$$

, donde  $S_d$  representa un vector de acciones sobre el volante dependientes del valor  $M$ .  $S_{-30} = 1$ ,  $S_{-20} = 0.75$ ,  $S_{-10} = 0.5$ ,  $S_0 = 0$  y valores opuestos para  $S_{10,20,30}$ ; la ecuación 5.4 permitirá orientar al vehículo según la mayor distancia libre detectada por sus sensores láser.

En el segundo de los casos de control del volante, cuando el vehículo se encuentra **fuera de la pista** y los valores  $P_d$  no son fiables, se utilizará la ecuación 5.5 con el fin de corregir los errores laterales y angulares del mismo para hacerlo volver a la pista.

$$volante = \frac{angulo - 0.5 \times desviacion}{Steer_{lock}} \quad (5.5)$$

$Steer_{lock}$  es un valor constante extraído de la descripción mecánica del vehículo e indica el giro máximo de las ruedas cuando el volante se gira por completo. Su valor es de 0.785 radianes. En la figura 5.11 se muestra

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

la superficie de control definida cuando el vehículo se encuentra fuera de la pista. La superficie no está definida en su parte central debido a que, cuando está dentro de la pista se cumple que  $|desviacion| < 1$ .

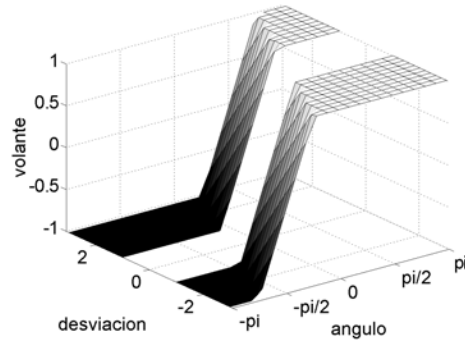


Figura 5.11: Representación gráfica de la acción sobre el volante cuando el vehículo se encuentra fuera de la pista

El tercero de los casos pretende controlar el vehículo cuando se está utilizando **marcha atrás**; en este caso, el principal objetivo del controlador será el de orientar adecuadamente el vehículo con el fin de reanudar la marcha. Para ello se hace uso de la ecuación 5.6. Una representación gráfica de la función puede verse en la figura 5.12, donde se aprecian valores de volante máximos cuando aproximadamente  $|angulo| > \frac{\pi}{5}$  ( $36^\circ$ ).

$$volante = \frac{-angulo}{Steer_{lock}} \quad (5.6)$$

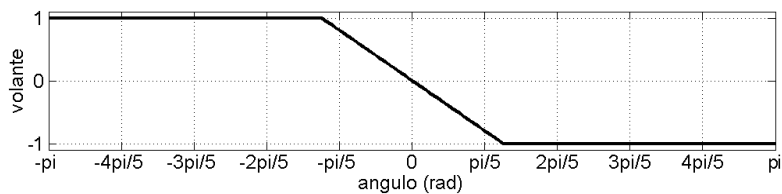


Figura 5.12: Representación gráfica de la acción sobre el volante cuando el vehículo utiliza marcha atrás.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

### 5.3.5 Gestor de Oponentes

El módulo estará a cargo de adaptar los valores aplicados sobre pedales y volante en caso de que se detecten oponentes cercanos. Las modificaciones se realizarán principalmente en función de los valores obtenidos por los sensores láser que miden distancias a oponentes ( $O_{\{\pm 180, \pm 170, \dots, 0\}}$ ).

Se realizan tres tipos de modificaciones:

1. Modificación sobre el volante para evitar oponentes (adelantar).
2. Modificación más brusca el volante para evitar choques (evitar colisiones).
3. Modificación sobre los pedales con el fin de frenar en caso de que un oponente se encuentre delante, a una distancia peligrosa (frenada de emergencia).

Ambas acciones sobre el volante se realizan simultáneamente con el fin de reforzarse mutuamente.

Con el fin de realizar **adelantamientos**, el giro del volante se modifica en función de un conjunto de reglas, que se pueden resumir bajo la siguiente estructura:

$$\text{Si } \left( \frac{O_d}{\text{velocidad}} < Tol_d^{\text{adel}} \right) \text{ entonces } (\text{volante} = \text{volante} + inc_d^{\text{adel}}) \quad (5.7)$$

, donde se consideran las medidas de los sensores de oponentes orientados a  $d = \{\pm 90, \pm 80, \dots, 0\}$ , para así considerar únicamente oponentes que se encuentren delante del vehículo. En la ecuación 5.7,  $Tol$  e  $inc$  representan respectivamente una tolerancia para activar la regla y un incremento sobre el giro del volante; sus valores se definen en la tabla 5.5. Un caso especial se aplica sobre el sensor orientado a cero grados; en este caso  $Tol_0^{\text{adel}} = 1$  y  $inc_0^{\text{adel}} = \pm 0.3$ ; el signo del incremento será igual al signo del actual valor de  $volante$ , con lo que se consigue un refuerzo en la acción de adelantar cuando hay un oponente inmediatamente delante.

Para **evitar colisiones**, o esquivar oponentes, se requieren acciones de volante generalmente más bruscas, así como tolerancias menores. El

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

$d$	$inc_d^{adel}$	$Tol_d^{adel}$	$d$	$inc_d^{adel}$	$Tol_d^{adel}$
$\leq -60^\circ$	+0.1	0.3	$\geq 60^\circ$	-0.1	0.3
$-50^\circ$	+0.12	0.5	$50^\circ$	-0.12	0.5
$-40^\circ$	+0.12	0.5	$40^\circ$	-0.12	0.5
$-30^\circ$	+0.13	0.75	$30^\circ$	-0.13	0.75
$-20^\circ$	+0.14	0.75	$20^\circ$	-0.14	0.75
$-10^\circ$	+0.15	1	$10^\circ$	-0.15	1

Tabla 5.5: Tolerancias e incrementos utilizados para adelantar oponentes.

$d$	$inc_d^{col}$	$T_d^{col}$	$d$	$inc_d^{col}$	$T_d^{col}$
$-30^\circ$	+0.25	10	$30^\circ$	-0.25	10
$-20^\circ$	+0.25	10	$20^\circ$	-0.25	10
$-10^\circ$	+0.25	10	$10^\circ$	-0.25	10

Tabla 5.6: Tolerancias e incrementos utilizados para evitar colisiones con oponentes.

conjunto de reglas se define bajo la siguiente estructura:

$$Si (O_d < Tol_d^{col}) \text{ entonces } (volante = volante + inc_d^{col}) \quad (5.8)$$

, en este caso, se utilizarán sensores orientados a  $d = \{\pm 30, \pm 20, \pm 10, 0\}$  grados, considerando así a oponentes que se encuentren estrictamente delante. La tabla 5.6 muestra las tolerancias e incrementos utilizados. Para el caso especial de cero grados se usará  $T_0^{col} = 15$  y  $inc_0^{col} = \pm 0.3$  con igual signo a la actual salida.

El tercer caso consiste en una **frenada de emergencia**, es decir, la modificación de las acciones sobre los pedales cuando se encuentra un oponente delante del vehículo a corta distancia. En esta situación adoptaremos una política tan sencilla como reducir  $Vel_{obj}$  un 20% si uno de los sensores de oponentes orientados a  $\pm 20, \pm 10$  ó 0 grados reporta una medida inferior a 10 metros.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

### 5.3.6 Módulo de Aprendizaje

El objetivo de este módulo es identificar segmentos de pista donde el vehículo debe ir más despacio o rápido que en vueltas anteriores. Este módulo se hace *necesario* debido a que la información sensorial es instantánea, es decir, no se dispone de una descripción del trazado de la pista, únicamente se puede *ver* 100 metros delante del vehículo, siendo en muchos casos imposible reaccionar. Por ejemplo, si el vehículo circula a 250 km/h, y 100 metros delante se detecta una curva en la que se debe circular a 50 km/h, hay que reducir 200 km/h en 100 metros, lo que supone una deceleración muy brusca, haciendo que el vehículo derrape y pierda el control, o salga de la vía.

Para ello se divide la pista a recorrer en tramos de un metro de longitud y se crea un vector ( $factor_i$ ) del mismo tamaño que la longitud de la pista en metros. Todos los elementos del vector se inicializan a 1. La función de  $factor_i$  es la de modificar  $Vel_{obj}$  en función del tramo de pista en el que se encuentre el vehículo (variable  $dist$  en tabla 5.1) y de la experiencia acumulada de la siguiente manera:

$$Vel'_{obj} = Vel_{obj} \times factor_{dist} \quad (5.9)$$

Durante toda la carrera, este módulo comprobará puntos donde el vehículo deberá reducir o aumentar su velocidad para vueltas siguientes. Una vez se detecta una de dichas situaciones se modificarán las posiciones de  $factor$  correspondientes para no repetir el mismo error en la siguiente vuelta. El efecto obtenido es que el vehículo *recuerda* errores cometidos y corrige su comportamiento en siguientes vueltas.

Tres situaciones requerirán realizar modificaciones sobre  $factor$ :

1. El vehículo se ha salido de la pista.
2. El vehículo ha sufrido un choque contra una barrera (ha recibido *daño*).
3. Ha encontrado una recta (o curva poco pronunciada) muy larga.

Para ser tenidas en cuenta por el módulo de aprendizaje, las

### 5.3 Arquitectura de Control Implementada

situaciones 1 y 2 deberán producirse siempre que no haya ningún oponente en un radio de 15 metros.

En situaciones de **salidas de pista** *factor* se reducirá un 10% en los segmentos desde 200 a 100 metros antes del punto de salida (ecuación 5.10) y un 20% en los segmentos desde 100 metros antes al punto de salida (ecuación 5.11).

$$factor_i = 0.9 \times factor_i, i = \{X - 200, \dots, X - 100\} \quad (5.10)$$

$$factor_i = 0.8 \times factor_i, i = \{X - 100, \dots, X\} \quad (5.11)$$

donde  $X$  representa el punto en el que se ha producido la salida de pista. En la figura 5.13 se puede ver una representación gráfica de la aplicación de los correspondientes factores.

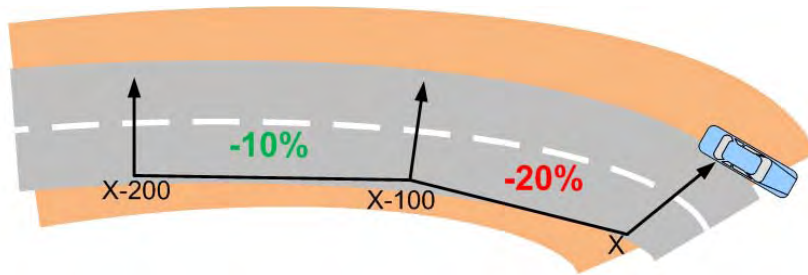


Figura 5.13: Esquema de funcionamiento del reconocedor de salidas de vía.

Se definirá una situación de **choque con la barrera** cuando el vehículo recibe *daño* sin encontrarse ningún oponente a menos de 15 metros de distancia. Se reducirá un 10% factor en los segmentos desde 150 a 75 metros antes del punto de choque (ecuación 5.12) y un 20% en segmentos desde 75 metros antes al puntos de choque (ecuación 5.13).

$$factor_i = 0.9 \times factor_i, i = \{X - 150, \dots, X - 75\} \quad (5.12)$$

$$factor_i = 0.8 \times factor_i, i = \{X - 75, \dots, X\} \quad (5.13)$$

donde nuevamente  $X$  representa el punto en el que se ha producido

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

el choque. La figura 5.14 muestra un esquema del funcionamiento de detector de colisiones.

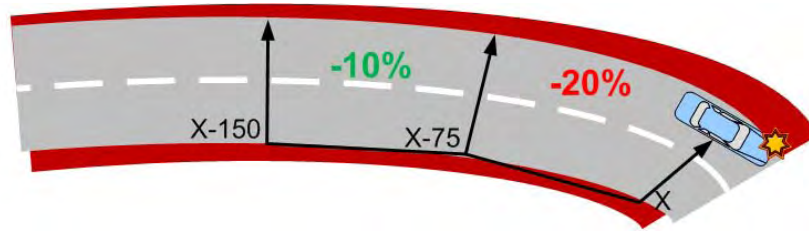


Figura 5.14: Representación gráfica del detector de colisiones.

El reconocimiento de **rectas largas** se lleva a cabo a partir de la segunda vuelta, gracias a esto, conseguimos identificar tramos críticos durante la primera, evitando aumentar la velocidad en ellos. El controlador mantiene un vector *anterior*, en el que se guardan las velocidades a las que se ha circulado por el correspondiente segmento de pista durante la vuelta anterior.

En un determinado momento en el que el vehículo se encuentra en  $dist = X$ , debe de cumplirse que:  $factor_{X+i} = 1$  (no ha sido modificado con anterioridad) y  $anterior_{X+i} \geq 180$  (se ha circulado a más de 180 km/h) para todo  $i = 0, \dots, 100$ . En caso afirmativo se procederá a aumentar *factor* como sigue: incrementar un 50% en los 75 primeros metros (ecuación 5.14) y un 25% en los 25 últimos metros (ecuación 5.15).

$$factor_i = 1.50 \times factor_i, i = \{X, \dots, X + 75\} \quad (5.14)$$

$$factor_i = 1.25 \times factor_i, i = \{X + 75, \dots, X + 100\} \quad (5.15)$$

En la figura 5.15 puede verse gráficamente cómo actúa este detector de rectas largas o curvas poco pronunciadas.



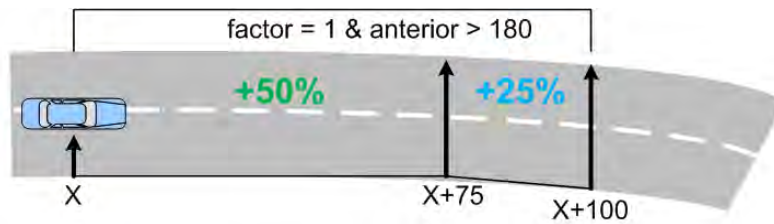


Figura 5.15: Representación gráfica de la detección de rectas largas.

## 5.4 Experimentación y Resultados

El objetivo de la experimentación es probar la arquitectura presentada en tantas situaciones como sea posible con el fin de validarla. Los experimentos se dividen en dos etapas: 1) experimentación de laboratorio y 2) participación en la *2009 Simulated Car Racing Championship*.

Durante la experimentación de laboratorio se llevan a cabo dos tipos de pruebas. En un primer momento se prueba el controlador circulando sólo sobre diferentes pistas con el fin de evaluar su calidad en tantas combinaciones de curvas como sea posible; los resultados de esta *conducción en solitario* se comparan con los mejores resultados obtenidos durante la *2008 Simulated Car Racing Competition*, competición de características similares realizada el año anterior. En segundo lugar, se realizan carreras contra algunos de los controladores disponibles en la distribución de TORCS utilizada.

Durante la *2009 Simulated Car Racing Championship* la arquitectura presentada compitió contra hasta 13 controladores representando diferentes nacionalidades y grupos de investigación, así como técnicas de ajuste o aprendizaje. La competición se llevó a cabo en tres congresos: *CEC-2009* en mayo, *GECCO-2009* en julio y *CIG-2009* en septiembre. Debido al corto período de tiempo dado a los competidores para preparar los controladores, una versión previa de la arquitectura fue utilizada en la competición celebrada durante el *CEC-2009*, que puede encontrarse en (Onieva 09c). La arquitectura final, aquí presentada fue utilizada sin modificaciones importantes en las competiciones llevadas a cabo en *GECCO-2009* y *CIG-2009*.

Las siguientes subsecciones describen en detalle cada una de las

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

etapas de experimentación llevadas a cabo.

### 5.4.1 Experimentación de Laboratorio

Para esta experimentación se decidió hacer uso de las pistas utilizadas a lo largo de la competición de 2008, disponibles en TORCS. Las pistas *Ruudskogen*, *Street – 1* y *D – Speedway* se usaron en la competición llevada a cabo durante el WCCI-2008; y *CG Speedway 1*, *E – Track3* y *B – Speedway* fueron utilizadas en una fase preliminar a la competición donde los organizadores testaron diversos controladores.

La forma de las pistas utilizadas pueden verse en la figura 5.16 junto con sus longitudes y anchos. Como podemos ver, el conjunto abarca gran variedad de combinaciones de tramos curvos y rectos, así como anchos de pista. Por otra parte, en la figura 5.17 pueden verse capturas de pantalla de cada una de las pistas.

Los controladores presentados a la competición llevada a cabo durante 2008 fueron:

- ***Simmerson***: realizada por Matt Simmerson, investigador independiente de Nueva Zelanda, evoluciona la topología de una red neuronal para por medio del algoritmo NEAT (Stanley 04).
- ***Lucas***: Simon Lucas (*Universidad de Essex*, Reino Unido) modifica un controlador sencillo con el fin de añadir funciones adicionales y hacerlo más competitivo.
- ***Kinnaird***: implementada por Leonard Kinnaird-Heether y Robert Reynolds (*Universidad del Estado de Wayne*, en Estados Unidos) utiliza algoritmos culturales (Reynolds 08).
- ***Pérez***: Diego Pérez y Yago Saez (*Universidad Carlos III* de Madrid) implementan un sistema de reglas evolutivo (Perez 08).
- ***Tan***: realizada por Chin Hiong y and Kay Chen Tan (*Universidad Nacional de Singapur*), implementa un sistema de reglas evolutivo.

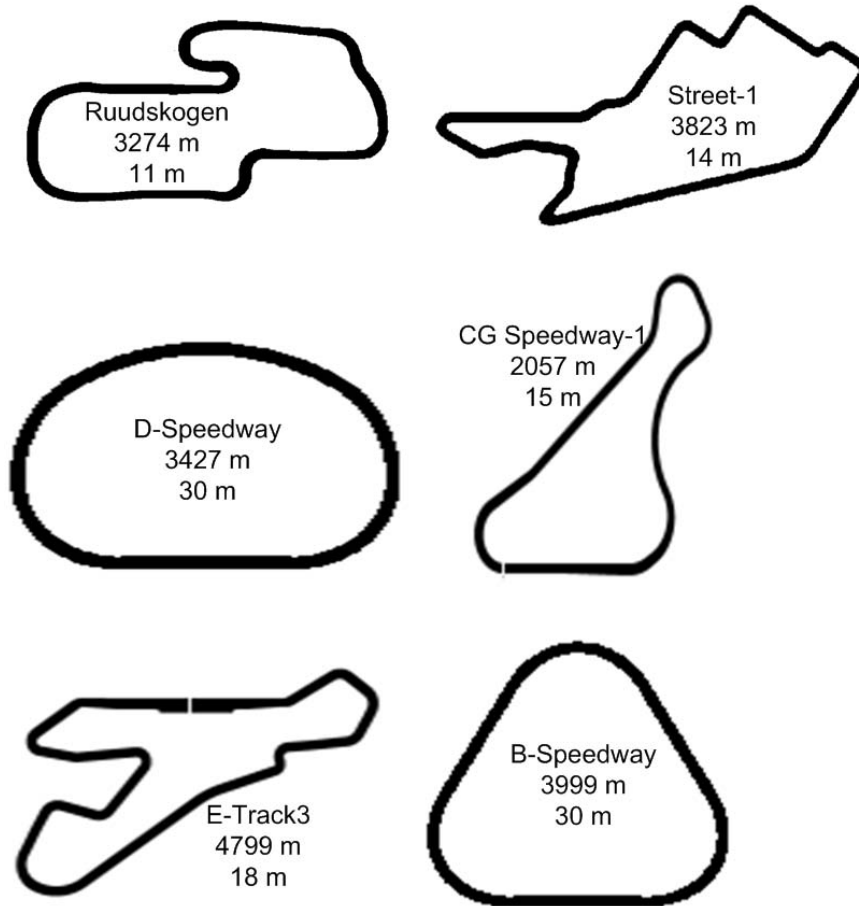


Figura 5.16: Pistas utilizadas durante la competición de 2008 junto a sus longitudes y anchuras.

Aparte, Luigi Cardamone y Daniele Loiacono (*Politécnico de Milán, Italia*) y Julian Togelius (*Universidad de Copenhague, Dinamarca*) utilizaron entradas propias para una fase previa de prueba de controladores.

### Comparación con controladores presentados a la 2008 Simulated Car Racing Competition

Los controladores de 2008 fueron probados en una carrera en solitario durante 200 segundos, para medir la distancia recorrida por cada uno de ellos durante dicho período. Así se puede valorar la bondad de cada

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---



Figura 5.17: Pistas utilizadas durante la competición de 2008. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: *Ruudskogen*, *Street - 1*, *D - Speedway*, *CG Speedway 1*, *E - Track3* y *B - Speedway*

uno de ellos sin considerar otros oponentes en la pista, con los que puedes chocar y pueden alterar el funcionamiento de los controladores. Los resultados de la competición pueden encontrarse en (Loiacono 08) mientras que los de las pruebas previas pueden encontrarse en la web de la competición<sup>1</sup>.

La tabla 5.7 muestra resultados comparativos entre la arquitectura propuesta, su versión anterior y los participantes de la competición celebrada durante el *WCCI-2008*, así como con los resultados obtenidos en la fase previa de pruebas realizada por la organización. En la tabla se han resaltado la mejor de las distancias obtenidas por el resto de controladores. Podemos ver cómo tanto la versión anterior de la arquitectura, como la versión final aquí presentada superan a todas las entradas en las pistas utilizadas. Por otra parte, la distancia recorrida por todos los controladores, es mayor cuanto más *fácil* es la pista, así pues, se obtienen los valores más altos en las pistas anchas y de forma casi circular (*D - Speedway* y *B - Speedway*), mientras que las más bajas se obtienen en pistas más *complejas*.

La figura 5.18 muestra las velocidades medias a las que han circulado los controladores a lo largo de las pistas. En ella se muestra el mejor

<sup>1</sup>[http://cig.ws.dei.polimi.it/?page\\_id=5](http://cig.ws.dei.polimi.it/?page_id=5)

## 5.4 Experimentación y Resultados

	<i>Ruudskogen</i>	<i>Street-1</i>	<i>D-Speedway</i>	<i>CG Speedway-1</i>	<i>E-Track3</i>	<i>B-Speedway</i>
<b>Presentado</b>	<b>9562.5</b>	<b>8797.8</b>	<b>16241.9</b>	<b>10005.1</b>	<b>9987.3</b>	<b>16254.6</b>
(Onieva 09c)	8735.4	7091.8	15612.3	8970.4	9117.4	15550.4
<i>Lucas</i>	4134.2	5502.8	12664.5	∅	∅	∅
<i>Kinnaird</i>	<b>6716.7</b>	3692.9	<b>14406.9</b>	∅	∅	∅
<i>Perez</i>	3786.9	2984.8	-317.3	∅	∅	∅
<i>Tan</i>	3443.5	2998.5	10648.2	∅	∅	∅
<i>Simmerson</i>	5934.0	<b>6477.8</b>	12523.3	<b>7131.7</b>	6923.6	<b>12598.8</b>
<i>Cardamone</i>	∅	∅	∅	7109.6	<b>7651.1</b>	9699.8
<i>Loiacono</i>	∅	∅	∅	5165	5882	7410.6
<i>Togelius</i>	∅	∅	∅	5616	5544.3	5721

Tabla 5.7: Comparación de distancia recorrida durante 200s con datos disponibles de la competición de 2008.

de los resultados obtenidos durante 2008 frente a la propuesta realizada aquí. Como podemos ver, en las pistas circulares se obtienen velocidades medias superiores a 290 km/h, esto es un valor muy cercano a la velocidad máxima que puede obtener el vehículo; para todas las pistas, la propuesta presentada supera al resto con diferencias de entre 30 y 70 km/h de velocidad media.

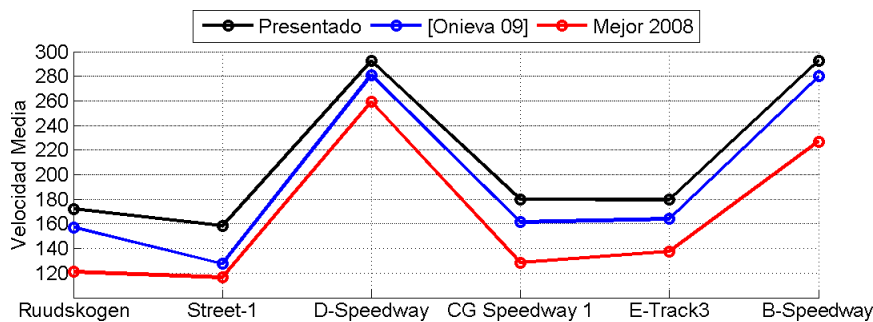


Figura 5.18: Velocidad media (km/h) obtenida por el controlador propuesto frente al resto de entradas.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

### Comparación con la anterior versión de la arquitectura.

Como hemos podido ver, la arquitectura es capaz de proporcionar un control más rápido que otros enfoques analizados, en lo que sería una *conducción en solitario*. Por otra parte, presenta una mejora del anterior enfoque realizado por el autor ((Onieva 09c)). La mejora es debida principalmente a tres factores: 1) inclusión del módulo de aprendizaje, 2) modificación del controlador difuso y 3) mejora del control de marchas. Por otra parte, ligeras modificaciones fueron realizadas sobre varios de los módulos.

Ahora analizaremos cómo y en qué situaciones cada una de las mejoras comentadas influyen. Para ello, las tablas 5.8 hasta 5.13 muestran resultados del comportamiento del controlador presentado sobre cada una de las pistas durante 20 vueltas. Cada una de las filas representa, respectivamente el tiempo de la actual arquitectura en realizar la correspondiente vuelta (*Presentado*), el tiempo adicional que tarda si se anula el módulo del aprendizaje (*Aprendizaje*), el tiempo adicional si se utiliza la antigua versión del controlador difuso (*Difuso*), el tiempo adicional si se utiliza la anterior versión del control de marchas (*Marchas*) y, finalmente, el tiempo de la versión anterior de la arquitectura.

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	...	$V_{20}$	<i>Total</i>
<b>Presentado</b>	<b>75.7</b>	<b>68.8</b>	<b>68.4</b>	<b>68.4</b>	<b>68.6</b>	...	<b>68.1</b>	<b>1376.6</b>
Aprendizaje	0.0	1.3	1.5	1.6	1.3	...	1.7	29.1
Difuso	0.2	0.0	0.6	0.6	0.4	...	0.9	11.2
Marchas	2.5	2.5	2.5	2.8	2.6	...	3.0	52.0
(Onieva 09c)	81.3	74.1	74.1	74.3	73.9	...	74.3	1491.3

Tabla 5.8: Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista *Ruudskogen*.

## 5.4 Experimentación y Resultados

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	...	$V_{20}$	<i>Total</i>
<b>Presentado</b>	<b>95.1</b>	<b>86.5</b>	<b>86.3</b>	<b>86.0</b>	<b>85.9</b>	...	<b>85.5</b>	<b>1728.8</b>
Aprendizaje	0.0	4.5	5.2	5.7	5.3	...	4.4	85.0
Difuso	2.0	1.3	0.7	1.5	1.3	...	1.2	30.1
Marchas	6.1	5.8	5.8	6.0	6.1	...	6.4	121.3
(Onieva 09c)	103.5	99.4	100.0	100.0	99.8	...	99.4	1999.3

Tabla 5.9: Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista *Street-1*.

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	...	$V_{20}$	<i>Total</i>
<b>Presentado</b>	<b>51.7</b>	<b>41.8</b>	<b>41.8</b>	<b>41.8</b>	<b>41.8</b>	...	<b>41.8</b>	<b>846.0</b>
Aprendizaje	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
Difuso	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
Marchas	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	1.1
(Onieva 09c)	52.3	42.8	43.0	42.4	43.1	...	43.0	865.4

Tabla 5.10: Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista *D-Speedway*.

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	...	$V_{20}$	<i>Total</i>
<b>Presentado</b>	<b>48.3</b>	<b>41.6</b>	<b>41.6</b>	<b>41.6</b>	<b>41.5</b>	...	<b>41.3</b>	<b>837.1</b>
Aprendizaje	0.0	1.0	1.1	0.9	1.0	...	1.2	20.0
Difuso	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.4	1.5
Marchas	2.0	2.8	2.8	2.7	2.7	...	2.9	53.9
(Onieva 09c)	51.0	45.8	46.0	46.0	45.4	...	46.1	920.2

Tabla 5.11: Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista *CG-Speedway1*.

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	...	$V_{20}$	<i>Total</i>
<b>Presentado</b>	<b>102.0</b>	<b>91.5</b>	<b>91.0</b>	<b>90.9</b>	<b>91.1</b>	...	<b>90.4</b>	<b>1829.7</b>
Aprendizaje	0.0	4.6	4.8	4.7	4.4	...	4.9	79.6
Difuso	2.4	0.8	2.4	0.9	2.0	...	1.8	29.7
Marchas	6.8	8.3	7.7	8.2	8.4	...	9.1	162.0
(Onieva 09c)	112.8	104.8	105.3	105.0	105.1	...	105.0	2108.1

Tabla 5.12: Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista *E-Track3*.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	...	$V_{20}$	<i>Total</i>
<b>Presentado</b>	<b>58.6</b>	<b>48.8</b>	<b>48.8</b>	<b>48.7</b>	<b>48.8</b>	...	<b>48.8</b>	<b>985.0</b>
Aprendizaje	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
Difuso	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	0.0
Marchas	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	0.0	1.0
(Onieva 09c)	59.5	50.5	50.9	51.2	50.9	...	50.6	1026.1

Tabla 5.13: Modificaciones con respecto a la anterior versión sobre la pista *B-Speedway*.

En las tablas existen varios detalles que merece la pena destacar y analizar.

En las pistas sencillas (*D-Speedway* y *B-Speedway*) ni el módulo de aprendizaje ni el control difuso aportan mejora alguna, esto es debido a que en ambas versiones se mantiene la velocidad objetivo máxima y no se producen salidas de vía ni choques que activen el aprendizaje. En dichas pistas, el control de marchas únicamente mejora en aproximadamente un segundo el tiempo de la primera vuelta debido a que el coche comienza parado; situación en la que un buen control de marchas hace que obtenga la velocidad máxima en el menor tiempo. Podemos observar este efecto en la figura 5.19, donde se muestra la velocidad y marcha del vehículo durante dos vueltas sobre la pista *D-Speedway*, haciendo uso de ambas versiones del control de marchas. Se puede ver cómo el nuevo control de marchas retrasa levemente el incremento de marchas consiguiendo así mayor velocidad. La versión anterior presenta un leve aumento del tiempo por vuelta debido a los cambios menores mencionados. En todas las pistas, es el control de marchas el que produce mayor mejora. Por ejemplo, en *E-track3* llega a reducir hasta 9 segundos por vuelta; en la figura 5.20 se muestran dos vueltas al circuito, donde se ve cómo el retraso de la subida de marchas al principio, así como el adelanto de la bajada de marchas hacen que el vehículo adopte mayor velocidad.

El módulo de aprendizaje no aporta mejora alguna durante la primera vuelta en ninguna de las pistas, esto es, como se comentó en la sección 5.3.6, debido a que dicho módulo usa la experiencia de la vuelta actual para mejorar el tiempo en las siguientes vueltas, por tanto, durante la primera vuelta no tiene ningún efecto sobre el tiempo. Por otra parte, la mejora aportada es *proporcional* a la dificultad de la pista; desde un



## 5.4 Experimentación y Resultados

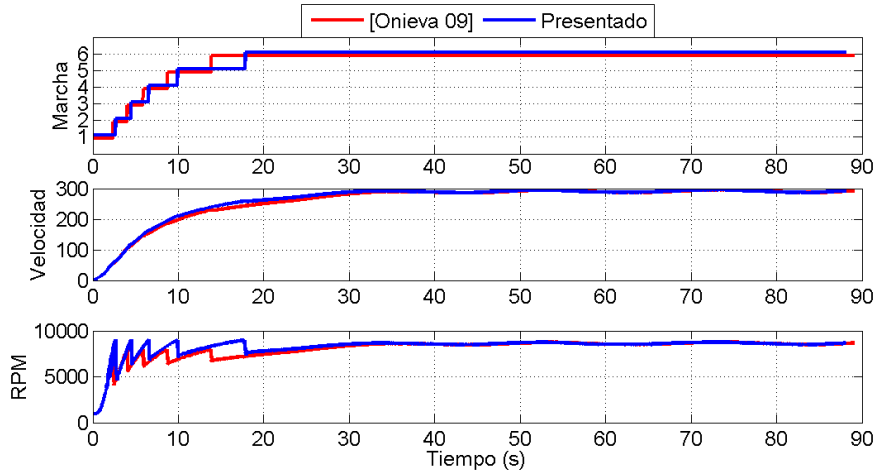


Figura 5.19: Comparativa de ambos controles de marchas sobre *D – Speedway*. Recorrido de dos vueltas.

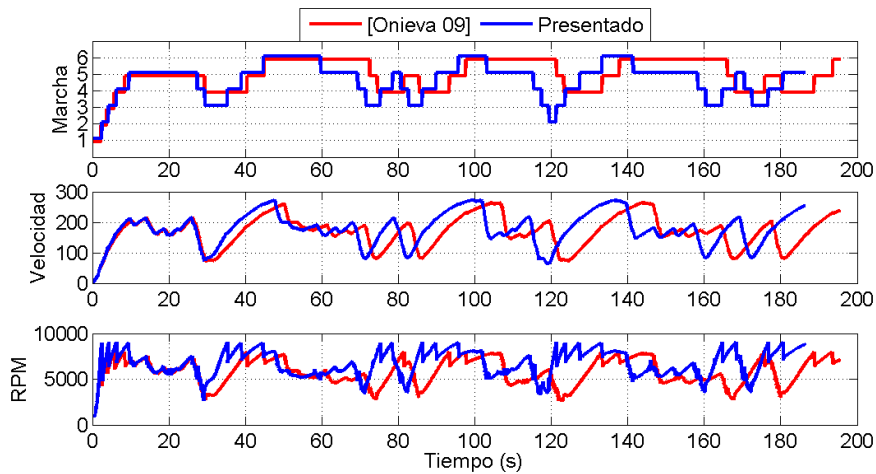


Figura 5.20: Comparativa de ambos controles de marchas sobre *E – Track3*. Recorrido de dos vueltas.

segundo por vuelta en *CG – Speedway1*, pista relativamente sencilla, hasta 4.5 ó 5 en *Street – 1* o *E – track3*.

El módulo de aprendizaje tiene un comportamiento estable, es decir, no se va a reducir o incrementar continuamente la velocidad a medida que vayan pasando vueltas. Como podemos ver, en la mayoría de los casos, la mejora obtenida en la vuelta 2 ó 3 es mantenida, sin grandes

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

variaciones, hasta la vuelta 20.

La mejora del controlador difuso suele aportar menos que las otras modificaciones, llegando a aportar hasta 2 segundos por vuelta.

En las tablas se pueden observar diferencias entre el tiempo obtenido por la presente arquitectura más el tiempo adicional si se cambian los respectivos módulos por su anterior versión comparado con el tiempo obtenido por la anterior versión de la misma, es decir, para cada columna, se cumple que  $(Presentado + Aprendizaje + Difuso + Marchas \leq (Onieva 09c))$ . Esto es debido a las modificaciones leves sobre el resto de módulos, así como interacciones entre módulos implicados.

Durante la conducción en solitario no se observaron valores destacables del daño debido a choques del vehículo con los bordes de la carretera; únicamente en algunas ocasiones durante la primera vuelta y nunca valores superiores al 2%; a partir de la segunda vuelta, el módulo de aprendizaje se encarga de recordar las posiciones, conduciendo así de manera más prudente en siguientes vueltas. Es por ello que no se presenta un análisis detallado del daño en dichas situaciones.

### **Carrera contra controladores incluidos en la distribución de TORCS.**

Hasta ahora se ha analizado el comportamiento de la arquitectura presentada únicamente en escenarios de *conducción en solitario*. El módulo de oponentes también representa un factor clave en la carrera debido a la variable *daño*, que mide el deterioro del vehículo. A medida que el daño se va incrementando, éste afecta a la dinámica del vehículo, haciéndolo más lento y, en caso de que dicho valor alcance su valor máximo, el vehículo será retirado de la carrera, finalizando así, en última posición.

Por ello, una adecuada política de gestión de oponentes puede ayudar a reducir considerablemente el número de choques producidos. Por otra parte, y de una manera más obvia, éste módulo nos permitirá realizar adelantamientos a vehículos más lentos, con lo que el controlador irá ganando posiciones.

Sin duda, el comportamiento ante oponentes es un factor clave

## 5.4 Experimentación y Resultados

---

debido a que una carrera puede involucrar muchos aspectos desconocidos. Por ejemplo, la estrategia que seguirá un oponente es completamente desconocida, la decisión de frenar o adelantar a un oponente puede ser una cuestión de *buena suerte* dado que si dicho oponente trata de bloquear el adelantamiento, podría producirse una colisión.

Para comprobar el buen funcionamiento del módulo de oponentes, se optó por enfrentar la arquitectura aquí presentada con 9 controladores o *bots*<sup>1</sup> incluidos en la distribución de TORCS. Hay que notar que dichos bots se implementan haciendo uso de una visión completa del entorno en el que se encuentran, es decir: conocen la geometría de la pista, así como su adherencia y condiciones, también conocen en tiempo real información acerca de sus oponentes, como sus posiciones, velocidades y aceleraciones, etc. Es por ello que podría decirse que *juegan con ventaja* frente al controlador presentado, que trabaja con una información un tanto limitada sobre el entorno en el que se encuentra (véase sección 5.2.1).

Para realizar la experimentación con oponentes se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Los oponentes utilizados deben ser más lentos que el controlador propuesto en conducción en solitario, para así asegurarnos de que la propuesta tiene la posibilidad de alcanzarlos y adelantarlos.
- Los controladores se ubicarán en la parrilla inicial en orden inverso al tiempo utilizado para recorrer la pista en solitario (primero los más lentos), con el fin de que se produzca el mayor número de adelantamientos posibles.
- El controlador propuesto debe empezar en última posición.
- La carrera durará 20 vueltas, tiempo suficiente para adelantar a los oponentes, así como para que los más rápidos saquen ventaja sobre más a los lentos.

---

<sup>1</sup>Abreviatura de *robot*. En el ambiente de los videojuegos, se conoce como bot a programas capaces de jugar por sí mismos el juego en cuestión.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

Se utilizarán nueve de los diez controladores de la familia *Berniw Hist*<sup>1</sup>, creados por Bernhard Wymann, el líder actual del proyecto *TORCS*, que escribió uno de los primeros y más competitivos de los bots incluidos en la distribución, y que ha servido como base a la gran mayoría de desarrolladores. Existen diez controladores denominados *Berniw Hist*  $i$ , con  $i = 1 \dots 10$ , cada uno de ellos con diferentes características, vehículos y comportamiento; utilizaremos únicamente los nueve más rápidos para esta experimentación. A partir de ahora, llamaremos  $Bot_i$  al correspondiente controlador *Berniw Hist*  $i$ .

Para evaluar el orden de salida de los controladores se han hecho correr en solitario a todos en cada una de las pistas utilizadas en esta sección de la experimentación. La tabla 5.14 muestra los tiempos obtenidos por cada uno de los bots en cada una de las pistas ordenados de menor a mayor tiempo total (los nombres de las pistas han sido abreviados). Como podemos ver, el controlador presentado supera al resto de los oponentes, seguido muy de cerca por  $Bot_9$ , que llega incluso a superarle en la pista *Street - 1* con 80 segundos de ventaja, lo que supone aproximadamente unos 4 segundos por vuelta más rápido;  $Bot_2$  también supera al presentado en *Street - 1*. Este ejemplo ilustra el grado de dificultad de crear un controlador capaz de *superar a todos y en todas las pistas*, ya que no es el único caso que puede verse en la tabla de controladores, mejores en conjunto, pero peores para una pista en concreto con respecto a otros; de hecho, únicamente el  $Bot_5$  que finaliza en la misma posición.

Como se comentó anteriormente, los controladores empezarán la carrera en orden inverso a sus velocidades, es decir, para cada una de las pistas, el orden de salida será  $Bot_{[4,10,6,1,7,8,3,2,9]}$  y, en último lugar, el controlador aquí presentado.  $Bot_5$  es descartado debido a sus malos resultados.

La figura 5.21 muestra en forma de barras, las posiciones en las que finalizaron cada uno de los oponentes durante la experimentación en solitario y la posición en la que finalizaron en la carrera todos juntos. Como podemos ver, en todas las pistas, nuestro controlador obtuvo la

---

<sup>1</sup><http://www.berniw.org/>

## 5.4 Experimentación y Resultados

	Ruudskogen	Street-1	D-Speedway	CG Speedway-1	E-Track3	B-Speedway	Total
<b>Presentado</b>	<b>1376.6</b> (1)	<b>1728.8</b> (3)	<b>846.0</b> (1)	<b>837.1</b> (1)	<b>1829.7</b> (1)	<b>985.0</b> (1)	<b>7603.2</b>
<i>Bot<sub>9</sub></i>	1389.3 (2)	1648.2 (1)	987.5 (4)	863.2 (2)	1845.5 (2)	1144.9 (4)	7878.6
<i>Bot<sub>2</sub></i>	1450.6 (3)	1699.4 (2)	912.6 (3)	905.7 (3)	1921.8 (3)	1086.0 (3)	7976.2
<i>Bot<sub>3</sub></i>	1474.7 (4)	1752.6 (4)	911.8 (2)	914.3 (4)	1972.2 (4)	1075.1 (2)	8100.7
<i>Bot<sub>8</sub></i>	1627.0 (6)	1899.5 (6)	1054.8 (5)	1022.6 (7)	2130.9 (5)	1247.3 (5)	8982.1
<i>Bot<sub>7</sub></i>	1618.8 (5)	1896.2 (5)	1058.7 (6)	1012.9 (5)	2147.3 (6)	1253.2 (6)	8987.0
<i>Bot<sub>1</sub></i>	1629.1 (7)	1957.0 (7)	1087.4 (7)	1015.9 (6)	2237.3 (8)	1282.5 (7)	9209.3
<i>Bot<sub>6</sub></i>	1742.9 (8)	2056.1 (8)	1210.8 (8)	1088.1 (8)	2336.7 (7)	1417.5 (8)	9852.2
<i>Bot<sub>10</sub></i>	1861.9 (10)	2168.8 (9)	1216.7 (9)	1172.2 (10)	2437.8 (9)	1432.4 (9)	10289.7
<i>Bot<sub>4</sub></i>	1858.3 (9)	2184.2 (10)	1257.9 (10)	1170.7 (9)	2473.8 (10)	1480.1 (10)	10424.9
<i>Bot<sub>5</sub></i>	2148.7 (11)	2520.6 (11)	1446.8 (11)	1354.4 (11)	2835.3 (11)	1713.7 (11)	12019.4

Tabla 5.14: Tiempo en segundos requerido en completar 20 vueltas en cada uno de los circuitos y *posición* en la pista.

primera posición; incluso en *Street – 1*, donde fue más lento en solitario que dos de sus oponentes. Es decir, comenzando desde la última posición fue capaz de adelantar a sus oponentes para alcanzar el primer puesto. No sólo eso, algunos oponentes fueron adelantados en varias ocasiones. Respecto a los oponentes, pueden verse diversas variaciones entre la posición en solitario y con oponentes.

Respecto al daño sufrido al adelantar oponentes, la tabla 5.15 muestra el número total de adelantamientos realizados durante cada una de las carreras, así como el daño sufrido, total y por adelantamiento. Como podemos ver, el mayor número de adelantamientos, así como el menor daño se produce en las pistas *anchas* y de trazado sencillo, como son

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

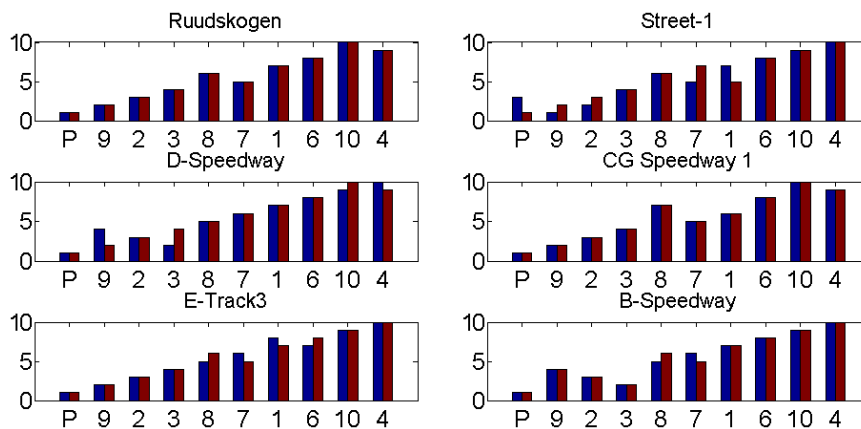


Figura 5.21: Posición en carrera en solitario (azul) y en carrera con oponentes (rojo). En el eje X:  $P = Presentado$ ,  $i = Bot_i$

*B – Speedway* y *D – Speedway*. El menor número de adelantamientos se produce en *Ruudskogen*, ya que es la pista más estrecha. El mayor daño se sufre adelantando en *E – Track3*, debido a que es una pista con varios tramos muy rectos seguidos de curvas muy pronunciadas, esto hace que el vehículo circule a gran velocidad, siendo en ocasiones, muy difícil reaccionar ante la aparición de un oponente.

Consideramos más que aceptables los valores del daño sufrido por el vehículo teniendo en cuenta el elevado número de adelantamientos que realiza en cada una de las carreras, así como la cantidad de vueltas a realizar y de oponentes. Nótese que para competiciones similares se suelen utilizar cinco vueltas en lugar de las veinte utilizadas aquí, así como ocho corredores, en lugar de diez.

Hasta ahora hemos comprobado la validez de cada uno de los módulos haciendo uso de los datos disponibles sobre la competición llevada a cabo en 2008, viendo cómo el controlador presentado es capaz de circular más rápido que los demás a lo largo de cualquier tipo de pista. Por otra parte, se ha analizado en detalle cómo cada una de las mejoras incluidas con respecto a la anterior versión de la arquitectura influye en sus resultados. Finalmente, se ha hecho uso de controladores disponibles en el entorno para comprobar las capacidades del controlador presentado para llevar a cabo una conducción completamente competitiva, mostrando que es

## 5.4 Experimentación y Resultados

	Ruudskogen	Street-1	D-Speedway	CG Speedway-1	E-Track3	B-Speedway
Adelantamientos	28	36	45	42	34	48
Daño total	46.8%	23.0%	9.9%	50.5%	82.7%	17.4%
Daño/Adelantamiento	1.7%	0.6%	0.2%	1.2%	2.4%	0.4%

Tabla 5.15: Número de adelantamientos y daño sufrido en cada una de las carreras.

capaz de realizar multitud de adelantamientos y alcanzar la primera posición en una carrera en la que comienza desde la última posición.

Estos resultados motivaron la participación en el *2009 Simulated Car Racing Championship* con el fin de comparar nuestra propuesta con otras propuestas existentes. Los resultados obtenidos se detallan en la siguiente sección.

### 5.4.2 El 2009 Simulated Car Racing Championship

Durante 2009 se celebró el primer *Simulated Car Racing Championship*, un campeonato de carreras de controladores de vehículos en un entorno competitivo. Dicho campeonato fue dividido en tres etapas, cada una de ellas celebrada en un congreso internacional de alto nivel:

- IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2009), en *Trondheim* (Noruega), en Mayo de 2009.
- Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2009), *Montreal* (Canada), en Julio de 2009.
- IEEE Congress on Computational Intelligence and Games (CIG-2009), *Milán* (Italia), en Septiembre de 2009.

Cada una de las etapas consistió en tres competiciones, cada una de las cuales se divide en dos fases diferentes: una *clasificatoria* y una *carrera*.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

El objetivo de la fase clasificatoria de probar la velocidad de los vehículos circulando por las pistas en conducción en solitario durante 200 segundos, midiendo la distancia recorrida. Por otra parte, y en caso de haber más de ocho controladores, descartar a los más lentos, con el fin de que únicamente los ocho mejores pasen a la fase de carrera.

En la fase de carrera, los ocho mejores conductores corren juntos en la misma pista durante cinco vueltas. La carrera se repite diez veces con parrillas de salida aleatorias con el fin de no condicionar el resultado a la posición inicial. Una vez finalizada una carrera, los corredores son puntuados con 10 puntos el primero, 8 el segundo, 6 el tercero, 5 el cuarto, 4 el quinto, 3 el sexto, 2 el séptimo y 1 el octavo. Adicionalmente, se suman dos puntos al corredor que finaliza con menor porcentaje de daño y con otros dos al que realiza la vuelta más rápida. La puntuación final se calcula como la mediana de las puntuaciones obtenidas en las diez carreras.

El ganador de cada etapa se decide mediante la suma las puntuaciones obtenidas en las tres carreras mientras que el ganador del campeonato se decidirá mediante la suma de las puntuaciones obtenidas en el total de las nueve carreras disputadas, tres en cada uno de los tres congresos.

Seis, once y trece participantes se presentaron respectivamente a las etapas del CEC-2009, GECCO-2009 y CIG-2009; esto teniendo en cuenta que la organización incluyó entre los competidores al campeón del año anterior. Los competidores se presentan a continuación:

1. **Butz**: realizada por Martin V. Butz y Thies D. Lönneker (*Universidad de Würzburg, Alemania*) combina acoplación sensomotora inteligente (Braitenberg 86) con el principio de comportamientos anticipatorios (Butz 04). La descripción del controlador se puede encontrar en (Butz 09).
2. **Cardamone**: realizada por Luigi Cardamone (*Politécnico de Milán, Italia*), es una versión mejorada con neuroevolución de la ganadora de la competición del año anterior, añadiéndole funcionalidades adicionales para el comienzo de la carrera, adelantamientos, etc. La descripción se encuentra en (Cardamone 09).



## 5.4 Experimentación y Resultados

---

3. **Pérez**: presentada por Diego Pérez y Yago Sáez (*Universidad Carlos III*, Madrid). Utiliza una máquina de estados finitos, un módulo de lógica difusa y un clasificador. Dichos módulos se diseñan y optimizan mediante el constructor de árboles de decisión *J48* (Quinlan 93) y una implementación del algoritmo NSGA-II (Deb 02). Los detalles se encuentran en (Perez 09a).
4. **Quadflieg**: desarrollada por Jan Quadflieg y Mike Preuss (*Universidad de Dortmund*, Alemania). Presenta una arquitectura orientada a la conducción competitiva. Incorpora un *detector de curvas* que asigna velocidades según la trazada de la pista optimizado con una estrategia evolutiva (1+1); los detalles se encuentran en (Quadflieg 10).
5. **Chiu**: realizada por Chung-Cheng Chiu (*Academia Sinica de Taipei*, Tailandia). Se trata de un controlador desarrollado a base de adaptaciones realizadas sobre controladores de ejemplo.
6. **Muñoz**: presentada por Jorge Muñoz (*Universidad Carlos III*, Madrid). Realiza un ajuste manual de una versión previa donde se crea un controlador por imitación del comportamiento humano por medio de redes neuronales. Se encuentra en detalle en (Muñoz 09).
7. **Vrajitoru**: presentada por Dana Vrajitoru y Charles Guse (*Universidad de Indiana*, Estados Unidos). Implementa una arquitectura diseñada en base a un clasificador simple que diferencia la distancia a la siguiente curva, así como su tipo para poder ajustar la velocidad.
8. **Bernardi**: enviada por Paolo Bernardi, Davide Ciambelli, Paolo Fiocchetti, Andrea Manfucci y Simone Piazza (*Universidad de Perugia*, Italia). Se trata de un controlador reactivo basado en reglas que discretiza posibles estados de las variables de entrada, llegando a un total de 685900 posibles estados.
9. **Wong**: realizada por Ka Chun Wong (*Universidad de Hong Kong*, China). Implementa una arquitectura de control, incluyendo entre

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

sus módulos un módulo de aprendizaje muy parecido al aportado por el controlador aquí presentado.

10. **Szymaniak**: desarrollada por Witold Szymaniak (*Universidad Tecnológica de Poznan*, Polonia). Utiliza programación genética cartesiana (Miller 10) para crear un controlador que genera la velocidad y orientación deseadas.
11. **Ebner**: por Mark Ebner y Thorsten Tiede (*Universidad de Tübingen*, Alemania). Evolucionan dos árboles de decisión, uno para la dirección y otro para la velocidad, por medio de programación genética. La descripción detallada se puede encontrar en (Ebner 09).
12. **Beelitz**: realizada por Wolf-Dieter Beelitz (*BHR Engineering Ltd.*, Alemania). Presenta un sofisticado controlador ajustado manualmente partiendo de *Simplix*<sup>1</sup>, uno de los mejores controladores disponibles en la distribución de TORCS.

Como ya se comentó, la versión anterior de la arquitectura aquí presentada ((Onieva 09c)) fue enviada a la competición celebrada en el CEC-2009, mientras que, la arquitectura aquí presentada se utilizó para las competiciones llevadas a cabo en el GECCO-2009 y CIG-2009. Las siguientes subsecciones describen en detalle los resultados obtenidos en cada una de dichas etapas. La figura 5.22 muestra el vehículo manejado por el controlador durante el campeonato.

De aquí en adelante se describen cada una de las competiciones. Debido a que las carreras fueron llevadas a cabo por la organización, únicamente podremos mostrar y analizar la información y resultados que se hicieron públicos en cada uno de los congresos.

### Competición en el IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC-2009)

Seis controladores se presentaron a esta competición: *Butz*, *Cardamone*, *Quadflieg*, *Perez* y *Chiu*, junto al aquí presentado.

---

<sup>1</sup><http://wdbee.gotdns.org:8086/SIMPLIX/SimplixDefault.aspx>

## 5.4 Experimentación y Resultados

---



Figura 5.22: Aspecto del vehículo utilizado durante el campeonato.

Para esta competición, se utilizaron dos pistas disponibles en la distribución de TORCS (*Michigan* y *Alpine2*) y una tercera (*Corkscrew*), réplica virtual del circuito de Laguna Seca <sup>1</sup>. Este circuito es famoso por su curva conocida como el *sacacorchos*, una curva en "S" tras un tramo recto relativamente largo. Las trazadas y características de las pistas pueden encontrarse en la figura 5.23, con el *sacacorchos* remarcado; capturas de pantalla de ellas pueden verse en la figura 5.24. Dicha pista no se encuentra en la distribución estándar de TORCS.

Los resultados de la fase clasificatoria pueden verse en la tabla 5.16. Como podemos ver, la entrada propuesta se clasificó en segundo lugar. Se puede ver un mal comportamiento en la pista *Corkscrew*.

Tras esta etapa clasificatoria, los ocho controladores fueron puestos a correr juntos en cada una de las tres pistas. Para cada pista se ejecutaron diez repeticiones, variando la parrilla inicial. La tabla 5.17 muestra las medianas de la puntuación obtenida por cada uno de los competidores en cada una de las pistas, así como la puntuación total obtenida hasta el momento.

En esta competición, el controlador presentado quedó en segundo

---

<sup>1</sup>el circuito Laguna Seca es un autódromo situado en Monterey, estado de California, Estados Unidos. El trazado principal tiene una longitud de 3.602 metros. Desde su apertura en el año 1957, ha albergado carreras de numerosos campeonatos, entre ellos el Gran Premio de Estados Unidos de Motociclismo, entre 1988 y 1994, y luego desde 2005, el Campeonato Mundial de Superbikes (desde 1995 hasta 2004), el Campeonato IMSA GT (entre 1974 y 1987, en 1989, desde 1991 hasta 1994, en 1997 y 1998), la American Le Mans Series (a partir de 1999) y la Rolex Sports Car Series (desde 2005 hasta 2009).

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

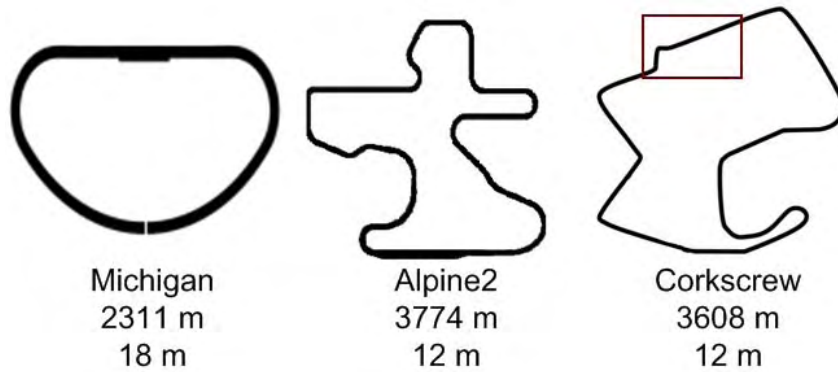


Figura 5.23: Trazada de las pistas utilizadas durante la competición en el CEC-2009.



Figura 5.24: Captura de pantalla de las pistas *Michigan* (izquierda), *Alpine – 2* (centro) y *Corkscrew* (derecha).

lugar, por debajo del enfoque propuesto por *Butz*, a 6.5 puntos de diferencia. Cabe destacar que, la posición final en *Michigan* es la segunda, superando a *Chiu* que obtuvo mejor puntuación en la fase clasificatoria; en *Alpine2* también es segundo, por encima de *Butz*,

	Michigan		Alpine2		Corkscrew		Orden
	Dist.	Pos.	Dist.	Pos.	Dist.	Pos.	
Butz	13516.9	1	7798.0	1	7147.8	1	1
<b>Presentado</b>	<b>11797.7</b>	<b>3</b>	<b>6826.4</b>	<b>2</b>	<b>3377.7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
Quadflieg	9926.6	6	6398.6	3	6900.7	2	3
Chiu	11987.4	2	5527.7	6	3695.0	3	4
Cardamone	11301.3	4	3689.5	4	2569.5	6	5
Perez	10946.5	5	6272.0	5	3235.2	5	6

Tabla 5.16: Resultados de la fase clasificatoria en la competición del CEC-2009.

## 5.4 Experimentación y Resultados

	Michigan	Alpine2	Corkscrew	Total
Butz	12	7.5	9	28.5
<b>Presentado</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>22</b>
Cardamone	5	10	5	20
Quadflieg	3	6	10	19
Perez	6	4	6	16
Chiu	5	5	4	14

Tabla 5.17: Resultados de la fase final de la competición del CEC-2009.

también con mejor puntuación en la fase clasificatoria. Esto indica que el módulo de oponentes hace que la propuesta sea capaz de superar a competidores que son capaces de circular más rápido cuando se encuentran en entornos con más vehículos.

Respecto a la *Corkscrew*; tras conocer los malos resultados obtenidos, se experimentó sobre dicha pista, comprobando la necesidad del módulo de aprendizaje esta pista, así como otras modificaciones aportadas por el presente enfoque. El vehículo se salía en cada vuelta, no sólo en la curva del *sacacorchos*, sino en dos puntos más de la pista, en cada una de las vueltas; por otra parte, el firme exterior de la pista es de arena, haciendo que el vehículo resbalara y derrapara, motivando también la incorporación del filtro TCS sobre el acelerador. Tras esto, y repitiendo la prueba clasificatoria, obtuvimos que, la presente arquitectura hubiera recorrido 7725.1 metros en dicha pista, frente a los 3377.7 de la anterior versión.

### Competición en el Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2009)

Aparte del nuestro, diez controladores se presentaron a esta competición: *Butz*, *Cardamone* y *Perez* enviaron una versión mejorada, *Quadflieg* y *Chiu* volvieron a enviar la misma versión utilizada en el CEC-2009 y se añadieron cinco nuevos controladores (*Bernardi*, *Vrajitoru*, *Wong*, *Szymaniak* y *Muñoz*).

Las pistas utilizadas fueron: *Dirt* – 3, *Alpine* – 1 y *E – road*, de la distribución de TORCS (figura 5.25); en la figura 5.26 puede verse

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

el aspecto de dichas pistas. Hay que notar que *Dirt – 3* es una pista de tierra, muy deslizante, que hace que el control del vehículo sea muy difícil y que la velocidad tenga que ser ligeramente reducida. El módulo de aprendizaje ayuda a que las curvas donde se pierde el control sean recordadas de una vuelta para otra.

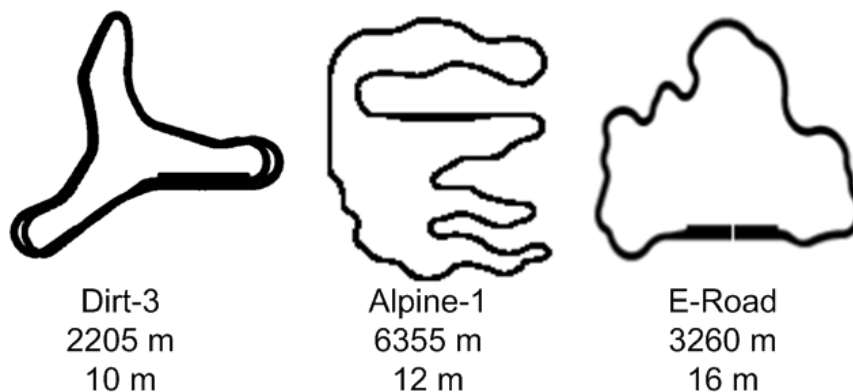


Figura 5.25: Trazada de las pistas utilizadas durante la competición en el GECCO-2009.



Figura 5.26: Captura de pantalla de las pistas *Dirt – 3* (izquierda), *Alpine – 1* (centro) y *E – road* (derecha).

Los resultados de la fase clasificatoria se muestran en la tabla 5.18. Nuevamente nuestro controlador se clasificó en segunda posición, siendo el que más distancia ha sido capaz de recorrer en *Dirt – 3* mientras que, nuevamente por debajo de *Butz*, en *Alpine – 1* y *E – Road* ha obtenido la segunda posición.

Únicamente ocho competidores podían clasificarse para la fase final, por lo que *Chiu*, *Szymaniak* y *Quadflied* fueron descalificados. Según la

## 5.4 Experimentación y Resultados

	Dirt-3		Alpine-1		E-Road		Orden
	Dist.	Pos.	Dist.	Pos.	Dist.	Pos.	
Butz	6216.2	2	8677.1	1	10253.3	1	1
<b>Presentado</b>	<b>6659.8</b>	<b>1</b>	<b>8386.5</b>	<b>2</b>	<b>9301.1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
Cardamone	5439.8	5	7308.0	5	7716.3	4	3
Perez	5190.4	6	7661.0	3	6586.6	7	4
Bernardi	4993.9	8	7184.2	6	8036.8	3	5
Vrajitoru	5788.3	3	6410.3	9	6384.4	8	6
Wong	5106.5	7	6470.0	8	6638.3	6	7
Muñoz	4459.1	9	5548.7	10	7573.5	5	8
Chiu	901.6	10	6539.0	7	5124.3	9	9
Szymaniak	782.8	11	3711.9	11	4501.7	10	10
Quadflied	5502.0	4	7482.2	4	NC	11	11

Tabla 5.18: Resultados de la fase clasificatoria en la competición del GECCO-2009.

organización, *Quadflied* chocó repetidamente con los bordes de *E-Road*, provocando su descalificación cuando el daño alcanzó el valor máximo.

En la tabla 5.19 se ve la mediana de la puntuación obtenida por los participantes en la fase de carrera conjunta. Se puede ver que el controlador propuesto obtuvo la mayor puntuación en todas las pistas, adicionalmente, se obtuvieron puntos extra (por el bajo daño o por la vuelta rápida) en *E-Road*.

	Dirt-3	Alpine-1	E-Road	Total
<b>Presentado</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>32</b>
Cardamone	7	8	8	23
Butz	5.5	7.5	3.5	16.5
Vrajitoru	5.5	3.5	4	13
Wong	3.5	4	5	12.5
Bernardi	3.5	5	2.5	11
Perez	4	3.5	3.5	11
Muñoz	3	2.5	3	8.5

Tabla 5.19: Resultados de la fase final de la competición del GECCO-2009.

En esta segunda etapa del campeonato alcanzamos la primera posición con una amplia ventaja, tanto con respecto al segundo clasificado (9 puntos de diferencia con *Cardamone*) como con respecto a *Butz* (15.5 puntos de diferencia), el cual nos superó en la primera de las competiciones por

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

6.5 puntos. Según la tabla, en *Dirt – 3* fue donde el resto de participantes obtuvo peor puntuación; esto puede deberse al firme de tierra de la pista. Claramente nuestro controlador aquí fue ayudado tanto por el módulo de aprendizaje, para recordar curvas acentuadas, como por los filtros ABS y TCS, que evitan, en la medida de lo posible, los derrapes producidos por el uso de altas presiones para los pedales del vehículo.

Recordemos que en la fase clasificatoria, tanto en *Alpine – 1* como en *E – Road*, nuestro controlador se clasificó en segunda posición, siendo el primero en la fase final con una considerable ventaja sobre el que fue el primero en la fase clasificatoria (*Butz*).

### Competición en el IEEE Congress on Computational Intelligence and Games (CIG-2009)

En esta ocasión, la propuesta presentada tuvo que enfrentarse a doce oponentes: *Butz, Perez, Muñoz y Quadflieg* realizaron modificaciones sobre la versión anterior; se incorporaron dos nuevos oponentes, *Ebner y Beelitz*; y, finalmente, *Chiu, Cardamone, Wong, Vrajitoru, Szymaniak y Bernardi* mantuvieron el mismo enfoque. El controlador propuesto no cambió significativamente con respecto a la anterior versión, únicamente ligeras modificaciones con el fin de solventar pequeños errores de implementación.

Las pistas utilizadas fueron *Forza*<sup>1</sup>, tomada de la distribución de TORCS, *Migrants*<sup>2</sup> y *Buzzard*, que fueron añadidas para la competición. Los trazados de las pistas pueden verse en la figura 5.27, así como capturas de pantalla pueden verse en la figura 5.28

Los resultados de la fase clasificatoria pueden verse en la tabla 5.20. En esta ocasión tuvieron que ser eliminados cinco de los trece

---

<sup>1</sup>*Forza* está basada en el Autodromo Nazionale di Monza, situado en las cercanías de Monza, región de Lombardía, Italia. El circuito es reconocido por albergar el Gran Premio de Italia de Fórmula 1, y se caracteriza por el alto porcentaje del trazado que los pilotos recorren con el acelerador a fondo, debido a las largas rectas.

<sup>2</sup>*Migrants* es una réplica virtual del circuito *Nürburgring*, un autódromo ubicado alrededor del pueblo y castillo medieval de Nurburgo en las montañas Eifel, Alemania. Considerado como el circuito más difícil y agotador del mundo, se le conoce como *Grüne Hölle* o *infierno verde*, apelativo inventado por el piloto de Fórmula 1 Jackie Stewart.



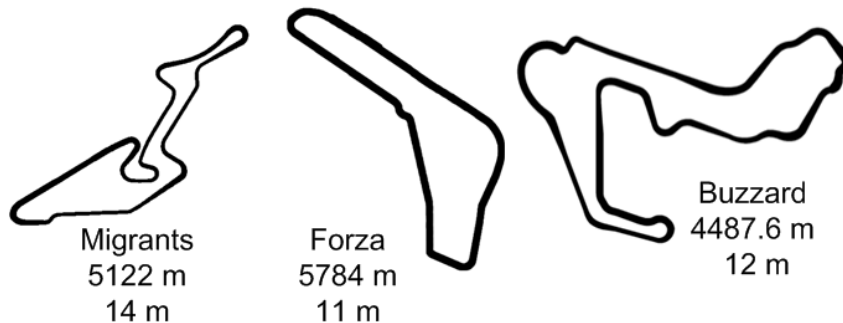


Figura 5.27: Trazada de las pistas utilizadas durante la competición en el CIG-2009.



Figura 5.28: Captura de pantalla de las pistas *Forza* (izquierda), *Migrants* (centro) y *Buzzard* (derecha).

controladores presentados, para que únicamente los ocho primeros pasaran a la fase final. *Ebner*, *Wong*, *Vrajitoru*, *Szymaniak* y *Bernardi* fueron eliminados. El controlador presentado se clasificó en segundo lugar, obteniendo la segunda mejor posición en cada una de las tres pistas.

La fase final se resume en la tabla 5.21. La propuesta presentada obtuvo la segunda posición, a sólo un punto de diferencia con *Butz*. En *Forza* se obtuvo la primera posición con cinco puntos de diferencia sobre el segundo, mientras que en *Migrants* y *Buzzard* se obtuvo en ambas la segunda posición.

Esta tercera etapa del campeonato se resolvió con nuestro controlador en segundo lugar, a sólo un punto del primer clasificado, y con cerca del doble de puntos sobre el tercero. En esta etapa, claramente fueron nuestro controlador y el enfoque de *Butz* los más acertados, con una gran diferencia sobre el resto.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

	Migrants		Buzzard		Forza		Orden
	Dist.	Pos.	Dist.	Pos.	Dist.	Pos.	
Butz	9603.0	1	9459.6	1	11768.3	3	1
<b>Presentado</b>	<b>9140.9</b>	<b>2</b>	<b>9255.9</b>	<b>2</b>	<b>11997.2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
Muñoz	8734.9	3	8377.6	4	10577.6	4	3
Quadflieg	7730.6	9	7700.6	5	12191.5	1	4
Beelitz	8515.5	4	8425.8	3	10409.2	6	5
Chiu	8157.4	5	7262.2	7	10424.9	5	6
Cardamone	7858.8	7	7360.9	6	9862.2	7	7
Perez	8010.5	6	6919.1	9	9028.3	10	8
Ebner	7766.8	8	7182.0	8	9666.5	9	9
Wong	6852.9	10	6183.5	11	9781.6	8	10
Vrajitoru	6362.8	11	6245.8	10	7176.7	11	11
Szymaniak	4939.6	13	4560.3	13	6856.8	12	12
Bernardi	5973.2	12	4688.7	12	6685.9	13	13

Tabla 5.20: Resultados de la fase clasificatoria en la competición del CIG-2009.

	Migrants	Buzzard	Forza	Total
Butz	12	11	7	30
<b>Presentado</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>29</b>
Beelitz	6	4	5.5	15.5
Muñoz	5	6	3.5	14.5
Cardamone	4	4.5	4	12.5
Quadflieg	2.5	3.5	6	12
Chiu	4	2.5	4	10.5
Perez	4	3	2.5	9.5

Tabla 5.21: Resultados de la fase final de la competición del CIG-2009.

### Clasificación final

Hasta ahora se han mostrado los resultados obtenidos en cada una de las etapas en las que se dividió el campeonato (CEC-2009, GECCO-2009 y CIG-2009). El controlador propuesto compitió contra cinco, diez y doce controladores respectivamente. La tabla 5.22 se muestran los resultados finales del campeonato, siendo este la suma de las puntuaciones obtenidas a lo largo de cada una de las tres competiciones. El resultado fue que el controlador aquí presentado resultó campeón del *2009 Simulated Car Racing Championship*.

La diferencia de puntos con el segundo clasificado (*Butz*) fue de 8

## 5.4 Experimentación y Resultados

	CEC-2009			GECCO-2009			CIG-2009			Total
	Michigan	Alpine-2	Corkscrew	Dirt-3	Alpine-1	E-Road	Migrants	Buzzard	Forza	
<b>Presentado</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>83</b>
Butz	12	7.5	9	5.5	7.5	3.5	12	11	7	75
Cardamone	5	10	5	7	8	8	4	4.5	4	55.5
Perez	6	4	6	4	3.5	3.5	4	3	2.5	36.5
Quadflieg	3	6	10	No Clasificado			2.5	3.5	6	31
Chiu	5	5	4	No Clasificado			4	2.5	4	24.5
Muñoz	No Presentado			3	2.5	3	5	6	3.5	23
Beelitz	No Presentado			No Presentado			6	4	5.5	15.5
Vrajitoru	No Presentado			5.5	3.5	4	No Clasificado			13
Wong	No Presentado			3.5	4	5	No Clasificado			12.5
Bernardi	No Presentado			3.5	5	2.5	No Clasificado			11
Ebner	No Presentado			No Clasificado			No Clasificado			0
Szymaniak	No Presentado			No Presentado			No Clasificado			0

Tabla 5.22: Resultados de carreras con oponentes obtenidos a lo largo del 2009 Simulated Car Racing Championship.

puntos, de 27.5 con el tercero (*Cardamone*), y de más de 40 puntos con el resto de competidores. Hay que notar que los seis primeros clasificados fueron los seis controladores presentados al CEC-2009, incluso aunque ni *Quadflieg* ni *Chiu* se clasificaron para la fase final del GECCO-2009.

Los cuatro primeros puestos fueron para los que se presentaron y clasificaron en las tres competiciones. Los últimos clasificados fueron *Ebner* y *Szymaniak*; el primero de ellos no consiguió clasificarse para la fase final en ninguna de las dos competiciones a las que se presentó, mientras que el segundo no lo hizo para la tercera, que fue la única a la que se presentó. También destacamos a *Beelitz*, que, aún habiéndose presentado únicamente a la tercera competición, supera a *Vrajitoru*, *Wong* y *Bernardi*, que participaron en las competiciones del GECCO-2009 y CIG-2009, pero no se clasificaron para la fase final de esta última.

En la tabla 5.23 se muestran las posiciones que cada uno de ellos obtuvo, tanto en la fase clasificatoria como final. Se puede apreciar cuán de igualado ha estado el campeonato entre nuestra propuesta y la de *Butz*.

La propuesta de *Butz* es claramente la más rápida en solitario, ya

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

		CEC-2009			GECCO-2009			CIG-2009		
		Michigan	Alpine-2	Corkscrew	Dirt-3	Alpine-1	E-Road	Migrants	Buzzard	Forza
Presentado	Clas.	3	2	4	1	2	2	2	2	2
	Fin.	2	2	4	1	1	1	2	2	1
Butz	Clas.	1	1	1	2	1	1	1	1	3
	Fin.	1	3	2	3	3	5	1	1	2
Cardamone	Clas.	4	4	5	5	5	4	7	6	7
	Fin.	4	1	4	2	2	2	5	4	5
Perez	Clas.	5	5	6	6	3	7	6	9	10
	Fin.	3	6	3	5	6	5	5	7	8

Tabla 5.23: Posiciones obtenidas en las fases clasificatorias y final para cada uno de los cuatro primeros clasificados.

que únicamente se clasifica sin ser primera en dos pistas mientras que la nuestra sólo se clasifica en primera posición en una pista. Respecto a la conducción en carrera con oponentes, nuestra propuesta obtiene cuatro primeros puestos, cuatro segundos y un cuarto; mientras que *Butz* obtiene tres primeros, dos segundos, tres terceros y un quinto; es decir, nuestro controlador es más regular que los demás enfoques en conducción con oponentes.

Por otra parte, hemos de notar que el controlador presentado y *Cardamone* son los únicos que cumplen para todos los casos que, la posición obtenida en la fase final es mejor o igual que la obtenida en la fase clasificatoria; esto denota la robustez de los enfoques en conducción con oponentes. Al contrario, las posiciones obtenidas por *Butz* en la fase final son en casi todos los casos peores que las obtenidas en la fase clasificatoria.

### 5.5 Conclusiones

A lo largo del presente capítulo, se ha presentado y probado un diseño de arquitectura de conducción de vehículos virtuales orientada a la

conducción en entornos competitivos. La arquitectura se compone de módulos, cada uno de ellos a cargo de una tarea específica. Los módulos de bajo nivel incluyen el manejo de pedales (acelerador y freno), cambios de marcha y control del volante. Módulos de más alto nivel se encargan de determinar la velocidad adecuada para circular por un tramo de vía, enviar instrucciones a los módulos de más bajo nivel para adecuar la circulación a la presencia de oponentes y recordar tramos de vía entre vueltas con el fin de ir más rápido en subsecuentes vueltas.

La experimentación muestra que la propuesta presentada es capaz de circular rápido a lo largo de la pista (más rápido que controladores utilizados en competiciones el año anterior) y es altamente eficiente en situaciones de carrera, dado que ganó el *2009 Simulated Car Racing Championship*.

De la propia experiencia acumulada, se puede concluir que uno de los aspectos claves del éxito es la determinación de la velocidad objetivo en cada tramo de pista ya que una velocidad adecuada puede, no sólo hacer que el vehículo circule rápido, sino evitar que el coche pueda perder el control, lo que puede implicar salidas de pista, choques o que el vehículo quede atascado. Para esta tarea se ha diseñado un controlador difuso con tres variables de entrada codificadas mediante tres funciones de pertenencia trapezoidales cada una y una variable de salida codificada mediante singletons.

Otro aspecto importante es el comportamiento en presencia de oponentes con el fin de evitar choques así como realizar adelantamientos. Un conjunto de reglas no difusas fue implementado con estos propósitos.

La experimentación en laboratorio se ha llevado a cabo desde tres puntos de vista diferentes. El primero de ellos comparando la velocidad del controlador para circular en solitario por una pista con propuestas presentadas a la competición de vehículos simulados llevada a cabo durante 2008. El segundo, comparando con una versión anterior incompleta de la arquitectura, mostrando cómo cada una de las modificaciones aplicadas aportan al resultados final. Tercero, compitiendo con bots implementados para el entorno, con el fin de evaluar su capacidad competitiva.

## 5. CONDUCCIÓN COMPETITIVA EN ENTORNOS SIMULADOS

---

Finalmente, en el *2009 Simulated Car Racing Championship* la arquitectura presentada compitió con hasta doce propuestas basadas en diferentes técnicas de inteligencia artificial. Los resultados dieron a la propuesta, si no el mejor comportamiento en conducción en solitario, sí el mejor cuando se realizan carreras con múltiples vehículos sobre la misma pista, logrando el primer puesto y mostrando la robustez del sistema propuesto en una gran variedad de situaciones competitivas.

## Capítulo 6

# Conclusions and Future Work

One of the great challenges of computer sciences applied to automation is the development of control algorithms for systems with great complexity, which present heterogeneities, imprecision, and nonlinearities. An example of this kind of systems is the automatic guidance of vehicles. To achieve it, multidisciplinary techniques have been used from computer science, control, and soft computing, among others.

The automatic guidance of a car is a problem of great complexity, and its behaviour is not fully predictable due to the great number of factors that influence the vehicle and the driving scenario. One has to consider that the operation of the guidance system depends on the interaction between vehicle and environment. Hence, not only the conditions of the vehicle must be considered, but also the road surface, weather conditions, traffic density, visibility..., which can affect the final operation of the system. These characteristics make the autonomous guidance of vehicle an optimal test-bed for intelligent control techniques. Moreover, although naturally conservative, the automobile industry is quite susceptible to innovation and application of emerging technologies in the medium term.

This thesis has presented three successful applications of soft computing techniques for vehicle guidance:

## 6. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

---

1. The design and implementation of a fuzzy controller for the speed of a mass-produced car, able to act cooperatively on the throttle and brake in a speed range between 0 and 30 km/h.
2. The design and tuning by means of iterative genetic algorithms of a fuzzy controller in charge of managing the steering of a mass-produced vehicle. The adjustment is aimed at providing good emulation of human drivers' behaviour, good path tracking, and smooth and comfortable driving.
3. The design and implementation of a driving architecture that controls a simulated vehicle in competitive situations. The architecture is built around a fuzzy based kernel that calculates the allowed maximum speed.

In summary, two autonomous driving systems have been completed. One comprises fuzzy controllers designed for the speed and trajectory, and implemented and tested in real vehicles, thus expanding the experience acquired in robotic control and soft computing applied to the automotive field. The other was designed, implemented, and tested in the virtual world, opening up a test field of the application of the aforementioned techniques to advanced driving manoeuvring.

Both systems were extensively validated by experiments to test their performance:

- The control systems implemented in the real vehicle were compared with the behaviour shown by human operators, concluding that, while it is extremely difficult to drive a car optimally, soft computing techniques allow the car to be managed in a way that is quite similar to how a human handles it.
- The good behaviour of the control architecture for competitive situations was clearly reflected in its winning the *2009 Simulated Car Racing Championship*, where it had to face thirteen other control systems designed by researchers from all over the world which, while at first impression used more sophisticated techniques, actually performed less well.



---

The following conclusions were drawn from the three applications described, grouped by whether the domain of the application was real (mass-produced vehicle control) or virtual (competitive driving).

**Mass-produced vehicle control for urban environments:**

1. A longitudinal fuzzy control system specially adapted for urban environments was obtained. It coordinates actions on the throttle and brake for low speeds – up to 30 km/h.
2. Fuzzy logic confers the system with great interpretability and closeness to the user, as well as good behaviour, even better than shown by humans in the task of controlling the speed of the vehicle.
3. Actions on the steering wheel made by human drivers were monitored with the purpose of compiling data that permitted the determination of the parameters of fuzzy controllers able to do the same task.
4. A method was designed for the adjustment of fuzzy controllers based on two genetic algorithms – one of them to optimize the rule base and the other to optimize the membership functions that define the fuzzy sets. The optimization step, consisting of the sequential execution of both genetic algorithms, with each using the results coming from the other, was repeated until the end of the adjustment process. At the end, a total of six fuzzy controllers were optimized.
5. The performance of the fuzzy controllers was measured in terms of similarity to actions made by human drivers and smoothness of the control surface, in order to achieve a good *adjustment/comfort* balance.
6. The adjusted fuzzy controllers were tested at speeds relatively high for urban environments (up to 30 km/h) in a path tracking task, showing behaviour quite similar to that obtained from human drivers.

## 6. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

---

### Competitive driving control in simulated environments:

7. A fully hierarchical control architecture for manoeuvring in competitive situations was designed. Its flexibility for adding modules or functionalities lies in its modularity .
8. A fuzzy rule based system was used as kernel of the architecture. It is responsible for one of the most important tasks in this kind of environment: the estimation of the maximum allowable speed in each track segment.
9. The architecture is completed with lower level control modules in charge of tasks such as managing pedals, gear shifting, or steering control. Higher level modules are in charge of learning the special characteristics of the track to follow, as well as dealing with opponents. These modules, even though quite simple, gave excellent results in racing tasks.
10. The control architecture implemented was compared in *similar conditions* with systems published in the literature. In particular, the distances covered for a given amount of time along different tracks were compared, with the present architecture obtaining the best results.
11. Finally, the architecture participated in the 2009 Simulated Car Racing Championship, an event held in three international congresses of the highest level in the field of artificial intelligence. The proposed control architecture was reported the winner over thirteen competitors from all over the world which used different methods.

With respect to possible future research lines, from the individual control of a mass-produced vehicle, the goal is to progress through full traffic control, starting from considering the vehicle's flow in local environments, such as incorporation into or exiting from roads, roundabouts, intersections, tunnels, bridges, . . . . The work will focus on the individual (vehicles) and global (control centres) decision making in each case studied. The problem is so complex that, to be realistic, one

---

can yet only guess at what research areas will have to accompany the soft computing for its solution.

In particular, there will have to work on real time perception with the aim of incorporating new sources of information, such as video cameras or laser sensors in order get a more complete view of the surrounding environment of the vehicle. The incorporation communications networks between fixed and moving elements will allow the cooperation between vehicles in order to optimize the maneuvers where more than one vehicle is involved, such as overtaking, unsigned intersections or roundabouts; in other hand, the communication with the infrastructure will allow the reception of warning messages or orders coming from a central station; they can advertise to the vehicle both from special situations (accidents or reparations on the roads) or prioritization messages for road joints.

All of this will be done within the framework of soft computing techniques as the main support for the design, implementation, and testing of the controllers and systems in charge of decision and coordination in Intelligent Transportation Systems, with the final, maybe quite utopian, objective of eventually attaining fully autonomous driving.

## **6. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK**

---

# Bibliografía

- [Acarman 06] T. Acarman, Y. Liu and U. Ozguner. *Intelligent cruise control stop and go with and without communication*. In American Control Conference, 2006, pp. 4356–4361, 2006. 65
- [Ackermann 90] J. Ackermann and W. Sienel. *Robust Control for Automated Steering*. In American Control Conference, pp. 795–800, 1990. 4
- [Alcalde 00] S. Alcalde. Instrumentación de un vehículo eléctrico para una conducción autónoma. Tesis de máster, Universidad Politécnica de Madrid, 2000. 44
- [Alonso 05] J. Alonso, T. de Pedro, C. González and R. García. *Estudio de la Conducción Automática de Vehículos en Curvas*. In I Simposio Control Inteligente, 2005. 59
- [Alonso 07a] J. Alonso, J. Jiménez, J. E. Naranjo, J. Suárez and B. Vinagre. *Cooperative Maneuver Study Between Autonomous Cars: Overtaking*. In Springer Berlin / Heidelberg, editeur, Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2007, volume 4739/2007 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1151–1158. Springer-Verlag, 2007. 60
- [Alonso 07b] J. Alonso, J. I. Suárez, J. Jiménez and T. de Pedro. *Cooperation between Autonomous Cars: Overtaking maneuver*. In Proceedings of Computer Aided Systems Theory - EuroCast 2007, pp. 386–387, 2007. 60

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Alonso 09a] J. Alonso, V. Milanés, E. Onieva, J. Perez and R. García. *Safe Crossroads via Vehicle to Vehicle Communication*. In Springer Berlin / Heidelberg, editeur, Computer Aided Systems Theory EUROCAST 2009, Lecture Notes in Computer Science, pp. 421–428. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. 60
- [Alonso 09b] J. Alonso, E. Onieva, R. García and T. de Pedro. *An experiment to improve the safety and the flow of traffic in a cross-roads by V2V communications*. In Proceedings of Computer Aided Systems Theory, pp. 146–147, 2009. 60
- [Alonso 11] J. Alonso, V. Milanés, E. Onieva, J. Pérez, C. González and T. de Pedro. *Cartography For Cooperative Manoeuvres, Autopias new Cartography System for Cooperative Manoeuvres among Autonomous Vehicles*. Journal of Navigation, Vol. 64, 2011. 46
- [Arimitsu 07] S. Arimitsu, K. Sasaki, H. Hosaka, M. Itoh, K. Ishida and A. Ito. *Seat Belt Vibration as a Stimulating Device for Awakening Drivers*. IEEE Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 5, pp. 511–518, 2007. 22
- [Armstrong 04] D. Armstrong, G. Carr, U. Ozguner and R. Behringer. *DARPA grand challenge on autonomous vehicles*. In Proc. 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 847–847, October 3–6, 2004. 85
- [Bajaj 05] P. Bajaj, A. Dalavi, S. Dubey, M. Mouza, S. Batra and S. Bhojwani. *Soft computing based real-time traffic sign recognition: A design approach*. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Vol. 3681 LNAI, pp. 1070–1074, 2005. 23
- [Bevilacqua 10] A. Bevilacqua, A. Gherardi and L. Carozza. *An Automatic System for the Real-Time Characterization of Vehicle Headlamp Beams Exploiting*

- Image Analysis*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No. 10, pp. 2630–2638, 2010. 21
- [Beyer 02] H.G. Beyer and H.P. Schwefel. *Evolution strategies - A comprehensive introduction*. Natural Computing, Vol. 1, pp. 3–52, 2002. 6
- [Blosseville 00] J.M. Blosseville and M. Parent. *The French Program La Route Automatisée*. IEEE Intelligent Systems, Vol. 15, pp. 10–11,13, 2000. 25
- [Bonnetfoi 07] F. Bonnetfoi, F. Bellotti, T. Schendzielorz and F. Visintainer. *SAFESPOT applications for infrastructure-based co-operative road-safety*. In 14th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, 2007. 34
- [Bourg 02] D.M. Bourg. *Physics for game developers*. O’Reilly Media, 2002. 115
- [Brady 82] M. Brady. *Robot motion: planning and control*. The MIT Press, 1982. 65
- [Braitenberg 86] V. Braitenberg. *Vehicles: Experiments in synthetic psychology*. The MIT press, 1986. 152
- [Broggi 99] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C.G.L. Bianco and A. Piazzini. *The ARGO autonomous vehicles vision and control systems*. International Journal of Intelligent Control and Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 409–441, 1999. 26
- [Bünter 02] T. Bünter, D. Odenthal, B. Aksun-Güvenç and L. Güvenç. *Robust vehicle steering control design based on the disturbance observer*. Annual Reviews in Control, Vol. 26, No. 1, pp. 139–149, 2002. 3
- [Butz 04] M.V. Butz, O. Sigaud and P. Gérard. *Anticipatory behavior: Exploiting knowledge about the future to improve current behavior*. Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems, pp. 69–86, 2004. 152

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Butz 09] M.V. Butz and T.D. Lonneker. *Optimized sensory-motor couplings plus strategy extensions for the TORCS car racing challenge*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 317–324, 2009. 152
- [Campbell 02] M. Campbell, A J. Hoane and F. Hsu. *Deep Blue*. Artificial Intelligence, Vol. 134, No. 1-2, pp. 57–83, 2002. 113
- [Caponetto 03] R. Caponetto, O. Diamante, G. Fargione, A. Risitano and D. Tringali. *A soft computing approach to fuzzy sky-hook control of semiactive suspension*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 786–798, 2003. 23
- [Cardamone 09] L. Cardamone, D. Loiacono and P.L. Lanzi. *Evolving competitive car controllers for racing games with neuroevolution*. In Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation, pp. 1179–1186, 2009. 152
- [Casavola 10] A. Casavola, G. Prodi and G. Rocca. *Efficient gear shifting strategies for green driving policies*. In American Control Conference, pp. 4331–4336, 2010. 22
- [Cerny 85] V. Cerny. *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm*. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, pp. 41–51, 1985. 5
- [Chen 09] X. Chen. *Reversing radar system based on CAN bus*. In International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, pp. 162–165, 2009. 21
- [Chumsamutr 03] R. Chumsamutr and T. Fujioka. *Development of car-following model with parameter identification by genetic algorithm*. JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine



- Elements and Manufacturing, Vol. 46, No. 1, pp. 188–196, 2003. 23
- [Clanton 09] J.M. Clanton, D.M. Bevely and A.S. Hodel. *A Low-Cost Solution for an Integrated Multisensor Lane Departure Warning System*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 47–59, 2009. 21
- [Commission 01] European Commission. *European Transport Policy for 2010. Time to Decide*. White Paper, 2001. 63
- [Commission 06] European Commission. *Use of Intelligent Systems in Vehicles*. Eurobarometer, 2006. 63
- [Crane 07] C.D. Crane. *The 2005 DARPA Grand Challenge*. In International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2007. 85
- [Cuesta 04] F. Cuesta, F. Gomez-Bravo and A. Ollero. *Parking maneuvers of industrial-like electrical vehicles with and without trailer*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 2, pp. 257–269, 2004. 27
- [Cumani 95] A. Cumani, S. Denasi, P. Grattoni, A. Guiducci, G. Pettiti and G. Quaglia. *MOBLAB: a mobile laboratory for testing real-time vision-based systems in path monitoring*. In Proceedings of SPIE, volume 2352, pp. 228–238, 1995. 26
- [DARPA 07] DARPA. *Special Issue on the DARPA Urban Challenge Autonomous Vehicle Competition*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 4, 2007. 29
- [Deb 02] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan. *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197, apr. 2002. 153

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [DGT 05] DGT. *Parque Nacional de Vehículos*. Dirección General del Tráfico, Ministerio del Interior, 2005. 18
- [DGT 09] DGT. *Número Anual de Víctimas Mortales*. Dirección General del Tráfico, Ministerio del Interior, 2009. 19
- [Dickmanns 87] ED Dickmanns and A. Zapp. *Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision*. In 10th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control., volume 4, pp. 221–226, 1987. 24
- [Dickmanns 94] E.D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek and J. Schiehlen. *The seeing passenger car 'VaMoRs-P'*. In Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium, pp. 68 – 73, 1994. 24
- [Dorigo 05] M. Dorigo and C. Blum. *Ant colony optimization theory: A survey*. Theoretical Computer Science, Vol. 344, No. 2-3, pp. 243 – 278, 2005. 6
- [Driankov 93] M. Driankov. *An introduction to fuzzy control*. Springer-Verlag, 1993. 4, 85
- [Driankov 01] D. Driankov and A. Saffiotti. *Fuzzy logic techniques for autonomous vehicle navigation*. Springer Berlin Heidelberg, 2001. 65
- [Ebner 09] M. Ebner and T. Tiede. *Evolving driving controllers using Genetic Programming*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 279 –286, 2009. 154
- [Ernst 07] T. Ernst. *IPv6 Network Mobility in the CVIS Project*. In 6th European Congress & Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, 2007. 33
- [Fang 03] C.Y. Fang, S.W. Chen and C.S Fuh. *Automatic change detection of driving environments in a vision-based driver assistance sys-*

- tem.* IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 14, No. 3, pp. 646 – 657, May 2003. 23
- [Feo 95] Thomas A. Feo and Mauricio G. C. Resende. *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*. Journal of Global Optimization, Vol. 6, pp. 109–133, 1995. 6
- [Fogel 66] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh *et al.* Artificial intelligence through simulated evolution, volume 26. Wiley New York, 1966. 6
- [Frotscher 08] A. Frotscher, T. Scheider and M. Bohm. *Coopers Project: Development of An Its Architecture FOR CO-Operative Systems on Motorways*. In 15TH World Congress on Intelligent Transportation Systems, 2008. 32
- [García 98] R. García and T. de Pedro. *Modeling a fuzzy coprocessor and its programming language*. Mathware and Soft Computing, Vol. 5(2-3), pp. 167–174, 1998. 54
- [García 04] R. García, T. de Pedro, C. González, J. E. Naranjo and J. Alonso. *Presente y Futuro del programa AUTOPÍA de conducción automática de vehículos*. In XXV Jornadas de Automática, 2004. 59
- [García 07] R. García, T. de Pedro, C. González, J.E. Naranjo and J. Alonso. *¿Para qué un Conductor Humano?* In XXVIII Jornadas de Automática, 2007. 61
- [Glover 93] F. Glover and M. Laguna. *Tabu search, Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, 1993. 6
- [Glover 03] F. Glover and B. Melián-Batista. *Búsqueda tabú*. Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial, Vol. 19, pp. 29–48, 2003. 6
- [Godoy 10] J. Godoy, V. Milanés, J. Pérez, J. Villagrà, T. De Pedro and González C. *Implementación*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- de un sistema de localización para vehículos sin conductor.* In Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, 2010. 47
- [Goldberg 89] D.E. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley, New York, 1989. 6, 86
- [González-Cantos 09] A. González-Cantos and A. Ollero. *Backing-Up Maneuvers of Autonomous Tractor-Trailer Vehicles using the Qualitative Theory of Nonlinear Dynamical Systems.* The International Journal of Robotics Research, Vol. 28, No. 1, p. 49, 2009. 27
- [Gorinevsky 96] D. Gorinevsky, A. Kapitanovsky and A. Goldenberg. *Neural network architecture for trajectory generation and control of automated car parking.* IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 50–56, 1996. 23
- [Herrera 98] F. Herrera, M. Lozano and J.L. Verdegay. *Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis.* Artificial Intelligence Review, Vol. 12, pp. 265–319, 1998. 96
- [Hillenbrand 06] J. Hillenbrand, A.M. Spieker and K. Kroschel. *A multilevel collision mitigation approach Its situation assessment, decision making, and performance tradeoffs.* IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 528–540, 2006. 84
- [Holland 75] J.H. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. The University of Michigan Press., 1975. 6, 86, 96
- [Hsiao 09] Pei-Yung Hsiao, Chun-Wei Yeh, Shih-Shinh Huang and Li-Chen Fu. *A Portable Vision-Based Real-Time Lane Departure Warning System: Day and Night.* IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 4, pp. 2089 – 2094, 2009. 21

- 
- [Hsu 04] C.-F. Hsu, W.-J. Wang, T.-T. Lee and C.-M. Lin. *Longitudinal control of vehicle platoon via wavelet neural network*. In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, volume 4, pp. 3811–3816, 2004. 23
- [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, 1993. 22
- [Jeong 10] SH Jeong, CG Choi, JN Oh, PJ Yoon, BS Kim, M. Kim and KH Lee. *Low cost design of parallel parking assist system based on an ultrasonic sensor*. International Journal of Automotive Technology, Vol. 11, No. 3, pp. 409–416, 2010. 84
- [Jones 01] W. D. Jones. *Keeping cars from crashing*. IEEE Spectrum, Vol. 38, No. 9, pp. 40–45, 2001. 3
- [Kennedy 95] J. Kennedy, R.C. Eberhart *et al.* *Particle swarm optimization*. In Proceedings of IEEE international conference on neural networks, volume 4, pp. 1942–1948, 1995. 6
- [Kim 07] D.J. Kim, K.H. Park and Z. Bien. *Hierarchical longitudinal controller for rear-end collision avoidance*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 2, pp. 805–817, 2007. 84
- [King 77] PJ King and EH Mamdani. *The application of fuzzy control systems to industrial processes*. Automatica, Vol. 13, No. 3, pp. 235–242, 1977. 4
- [Kirkpatrick 83] S. Kirkpatrick, C. Gelatt and M. Vecchi. *Optimization by simulated annealing*. Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, 1983. 5
- [Koenders 08] E. Koenders and J. Vreeswijk. *Cooperative infrastructure*. In IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 721 –726, 2008. 34

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Laird 02a] J.E. Laird. *Research in human-level AI using computer games*. Communications of the ACM, Vol. 3(8), pp. 32–35, 2002. 113
- [Laird 02b] J.E. Laird. *Research in human-level AI using computer games*. Communications of the ACM, Vol. 45, No. 1, p. 35, 2002. 115
- [Larsen 80] M. Larsen *et al.* *Industrial applications of fuzzy logic control*. International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 12, No. 1, pp. 3–10, 1980. 4
- [Laumond 98] JP Laumond. *Robot motion planning and control*. Springer, 1998. 65
- [Li 09] X. Li, Zhao X.P. and J. Chen. *Controller design for electric power steering system using T-S fuzzy model approach*. International Journal of Automation and Computing, Vol. 6, No. 2, pp. 198–203, 2009. 85
- [Liu 09] Y.J. Liu, S.C. Tong, W. Wang and Y.M. Li. *Observer-based direct adaptive fuzzy control of uncertain nonlinear systems and its applications*. International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 681–690, 2009. 4
- [Loiacono 08] D. Loiacono, J. Togelius, P.L. Lanzi, L. Kinnaird-Heether, S.M. Lucas, M. Simmerson, D. Perez, R.G. Reynolds and Y. Saez. *The WCCI 2008 simulated car racing competition*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 119 –126, 2008. 116, 140
- [Loiacono 09] D. Loiacono, P.L. Lanzi, J. Julian Togelius, E. Onieva, D.A. Pelta, M.V. Butz, T.D. Lönneker, L. Cardamone, D. Diego Perez, Y. Saez, M. Preuss and J. Quadflieg. *The 2009 Simulated Car Racing Championship*. IEEE Transactions on Computational Intelligence and

- AI in Games, Vol. 2, No. 2, pp. 131 – 147, 2009. 61
- [Lucas 09] S. M. Lucas. *Computational Intelligence and AI in Games: A New IEEE Transactions*. IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, Vol. 1, No. 1, pp. 1 –3, 2009. 113
- [Malan 07] S. Malan, M. Milanese, P. Borodani and A. Gallione. *Lateral Control of Autonomous Electric Cars for Relocation of Public Urban Mobility Fleet*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 590 –598, 2007. 25
- [Manz 09] M. Manz, M. Himmelsbach, T. Luettel and H.J. Wuensche. *Fusing LIDAR and Vision for Autonomous Dirt Road Following*. Autonome Mobile Systeme, pp. 17–24, 2009. 24
- [Mariyasagayam 08] M.N. Mariyasagayam, H. Menouar and M. Lenardi. *GeoNet: A project enabling active safety and IPv6 vehicular applications*. In IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, pp. 312 –316, 2008. 34
- [Marsden 01] G. Marsden, M. McDonald and M. Brackstone. *Towards an understanding of adaptive cruise control*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 9, No. 1, pp. 33–51, 2001. 65
- [Martinez 07] John-Jairo Martinez and Carlos Canudas de Wit. *A Safe Longitudinal Control for Adaptive Cruise Control and Stop-and-Go Scenarios*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 15, No. 2, pp. 246 –258, 2007. 22
- [Matthias 06] S. Matthias. *Contribution of PReVENT to the Safe Cars of the Future*. In Presentation in Special Session of 13th ITS World Congress, London, UK, 2006. 32
- [Milanés 08a] V. Milanés, J. E. Naranjo, C. González, J. Alonso and T. de Pedro. *Autonomous Vehicle*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- based in Cooperative GPS and Inertial Systems*. ROBOTICA, Vol. 26, pp. 627–633, 2008. 46, 69
- [Milanés 08b] V. Milanés, J.E. Naranjo, C. González, 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. 46
- [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*. In XXIX Jornadas de Automática, 2008. 59
- [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. 1, No. 11, pp. 89–95, Feb 2010. 67, 69
- [Milanés 10b] V. Milanés, D.F. LLorca, B. Vinagre, C. González and M.A. Sotelo. *Clavileño: Evolution of an Autonomous Car*. In Proc. of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010. 48
- [Milanés 10c] V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva and C. González. *Controller for Urban Intersections Based on Wireless Communications and Fuzzy Logic*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 243–248, 2010. 60
- [Miller 10] J.F. Miller and S.L. Harding. *Cartesian genetic programming*. In Proceedings of the 12th annual conference comp on Genetic and evolutionary computation, pp. 2927–2948. ACM, 2010. 154
- [Mladenovic 97] N. Mladenovic and P. Hansen. *Variable neighborhood search*. Computers & Operations Research, Vol. 24, No. 11, pp. 1097 – 1100, 1997. 6



- [Muñoz 09] J. Muñoz, G. Gutierrez and A. Sanchis. *Controller for TORCS created by imitation*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 271–278, 2009. 153
- [Naranjo 04] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. de Pedro, J. Revuelto and J. Reviejo. *Fuzzy logic based lateral control for GPS map tracking*. In Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 397–400, 2004. 53, 59
- [Naranjo 06a] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, T. de Pedro, R. Garcia, J. Alonso, M. A. Sotelo and D. Fernandez. *AUTOPIA architecture for automatic driving and maneuvering*. In IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 1220–1225, 2006. 51
- [Naranjo 06b] JE Naranjo, C. González, 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, 2006. 66
- [Naranjo 07] Jose E. Naranjo, Miguel A. Sotelo, Carlos Gonzalez, Ricardo Garcia and Teresa de Pedro. *Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control*. IEEE Intelligent Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 36–45, 2007. 6
- [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, 2008. 60
- [Onieva 08] E. Onieva, V. Milanés, J. Alonso, J. Pérez and T. de Pedro. *Ajuste Genético de Controladores Difusos para Conducción Autónoma*. In Proc. XIV Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy ESTYLF08, pp. 43–50, 2008. 59

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Onieva 09a] E. Onieva, J. Alonso, J. Pérez, V. Milanés and T. de Pedro. *Autonomous Car Fuzzy Control Modeled by Iterative Genetic Algorithms*. In IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 1615–1620, 2009. 59
- [Onieva 09b] E. Onieva, V. Milanés, J. Perez, J. Alonso and T. de Pedro. *Soft Computing Techniques for Autonomous Driving*. Mathware and Soft Computing, Vol. 16, No. 1, pp. 45–58, 2009. 59
- [Onieva 09c] E. Onieva, D.A. Pelta, J. Alonso, V. Milanés and J. Perez. *A modular parametric architecture for the TORCS racing engine*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 256–262, 2009. 60, 124, 137, 141, 142, 143, 144, 146, 154
- [Onieva 10a] E. Onieva, L. Cardamone, D. Loiacono and P.L. Lanzi. *Overtaking opponents with blocking strategies using fuzzy logic*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 123–130, 2010. 61
- [Onieva 10b] E. Onieva, V. Milanés, C. González, T. de Pedro, J. Perez and J. Alonso. *Throttle and Brake Pedals Automation for Populated Areas*. ROBOTICA, Vol. 28, No. 4, pp. 509–516, 2010. 59
- [Onieva 10c] 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, pp. 91–98, April 2010. 59
- [Onieva 11a] E. Onieva, J. E. Naranjo, V. Milanés, J. Alonso, R. García and J. Perez. *Automatic Lateral Control for Unmanned Vehicles via Genetic Algorithms*. Applied Soft Computing, Vol. 11, pp. 1303–1311, 2011. 59
- [Onieva 11b] E. Onieva, D.A. Pelta, V. Milanés and J. Pérez. *A Fuzzy-Rule-Based Driving Architecture for*

- Non-Player Characters in a Car Racing Game.* Soft Computing, 2011. Aceptado y Pendiente de Publicación. 60
- [Pananurak 08] W. Pananurak, S. Thanok and M. Parnichkun. *Adaptive cruise control for an intelligent vehicle.* In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1794–1799, 2008. 23
- [Pennacchio 05] S. Pennacchio, E. Bellafore, F. Fontana and O. Nevoloso. *A new algorithm for reverse car parking problem.* WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 374–378, 2005. 23
- [Perez 08] D. Perez, Y. Saez, G. Recio and P. Isasi. *Evolving a rule system controller for automatic driving in a car racing competition.* In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 336–342, 2008. 138
- [Perez 09a] D. Perez, G. Recio, Y. Saez and P. Isasi. *Evolving a fuzzy controller for a Car Racing Competition.* In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 263–270, 2009. 153
- [Perez 09b] Joshue Perez, Carlos Gonzalez, Vicente Milanés, Enrique Onieva, Jorge Godoy and Teresa de Pedro. *Modularity, adaptability and evolution in the AUTOPIA architecture for control of autonomous vehicles.* In IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 1–5, 2009. 51
- [Perez 10] J. Perez, V. Milanés, J. Alonso, E. Onieva and T. de Pedro. *Adelantamiento con vehículos autónomos en carreteras de doble sentido.* Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 7, No. 4, pp. 25–33, 2010. 60
- [Pettersson 00] M. Pettersson and L. Nielsen. *Gear shifting by engine control.* IEEE Transactions on Control

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Systems Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 495–507, 2000. 22
- [Piao 03] J. Piao and M. McDonald. *Low speed car following behaviour from floating vehicle data*. In IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 462–467, 2003. 65
- [Ploeg 08] J. Ploeg, F.M. Hendriks and N.J. Schouten. *Towards nondestructive testing of pre-crash systems in a HIL setup*. In Intelligent Vehicles Symposium, pp. 91–96, 2008. 27
- [Polychronopoulos 07] A. Polychronopoulos, M. Tsogas, A.J. Amditis and L. Andreone. *Sensor Fusion for Predicting Vehicles' Path for Collision Avoidance Systems*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 549–562, sep. 2007. 21
- [Pomerleau 91] D.A. Pomerleau. *Efficient training of artificial neural networks for autonomous navigation*. Neural Computation, Vol. 3, No. 1, pp. 88–97, 1991. 65
- [Pérez 08] J. Pérez, E. Onieva, T. de Pedro, R. García, J. Alonso, V. Milanés and González. *Comunicación entre Vehículos Autónomos en Tiempo Real, para Maniobras de Alto Riesgo*. In XXIX Jornadas de Automática, 2008. 60
- [Quadflieg 10] J. Quadflieg, M. Preuss, O. Kramer and G. Rudolph. *Learning the track and planning ahead in a car racing controller*. In IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games, pp. 395–402, 2010. 153
- [Quinlan 93] J.R. Quinlan. C4. 5: programs for machine learning. Morgan Kaufmann, 1993. 153
- [Rajamani 02] R. Rajamani and C. Zhu. *Semi-autonomous adaptive cruise control systems*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 51, No. 5, pp. 1186–1192, sep. 2002. 22

- [Rajamani 06] R. Rajamani. *Vehicle dynamics and control*. Springer, 2006. 3
- [Reynolds 08] R.G. Reynolds and M. Ali. *Computing with the social fabric: The evolution of social intelligence within a cultural framework*. IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 3, No. 1, pp. 18–30, 2008. 138
- [Richards 06] A. Richards and J.P. How. *Robust variable horizon model predictive control for vehicle maneuvering*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 16, No. 7, pp. 333–352, 2006. 3
- [Riedmiller 07] M. Riedmiller, M. Montemerlo and H. Dahlkamp. *Learning to Drive a Real Car in 20 Minutes*. Frontiers in the Convergence of Bioscience and Information Technologies, pp. 645–650, 2007. 85
- [Rosca 96] J.P. Rosca. *Generality versus size in genetic programming*, pp. 381–387. Cambridge MIT Press, 1996. 115
- [Ross 04] T.J. Ross. *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons Inc, 2004. 4
- [Rusconi 07] G. Rusconi, M.C. Brugnoli, P. Dosso, K. Kretzschmar, P. Bougia, D.I. Fotiadis, L. Salgado, F. Jaureguizar and M. De Feo. *I-WAY, intelligent co-operative system for road safety*. In IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 1056–1061, 2007. 37
- [Schaeffer 07] J. Schaeffer, N. Burch, Y. Bjornsson, A. Kishimoto, M. Muller, R. Lake, P. Lu and S. Sutphen. *Checkers is solved*. Science, Vol. 317, No. 5844, p. 1518, 2007. 113
- [Schloman 07] J. Schloman and B. Blackfordm. *Genetic programming evolves a human competitive player for a complex, on-line, interactive, multiplayer game of strategy*. In Proceedings of the Genetic

## BIBLIOGRAFÍA

---

- and Evolutionary Computation Conference, pp. 1951–1958, 2007. 115
- [Schreiner 99] K. Schreiner. *Night Vision: infrared takes to the road*. Computer Graphics and Applications, IEEE, Vol. 19, No. 5, pp. 6–10, 1999. 21
- [Serrano 05] J. I. Serrano, J. Alonso, M. D. del Castillo and J. E. Naranjo. *Evolutionary Optimization of Autonomous Vehicle Tracks*. In IEEE Congress on Evolutionary Computation, volume 2, pp. 1332–1339, 2005. 88
- [Sheikholeslam 93] S. Sheikholeslam and C.A. Desoer. *Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 4, pp. 546–554, 1993. 29
- [Shladover 92] S.E. Shladover. *The California PATH Program of IVHS research and its approach to vehicle-highway automation*. In Proc. Intelligent Vehicles Symposium, pp. 347–352, 1992. 29
- [Siegel 96] E.V. Siegel and D.A. Chaffee. Advances in genetic programming 2, chapitre Genetically optimizing the speed of programs evolved to play tetris, pp. 279–298. Cambridge MIT Press, 1996. 115
- [Sivak 05] M. Sivak, B. Schoettle, M.J. Flannagan and T. Minoda. *Optimal strategies for adaptive curve lighting*. Journal of Safety Research, Vol. 36, No. 3, pp. 281–288, 2005. 21
- [Sotelo 01] M. A. Sotelo, S. Alcalde, J. Reviejo, J. E. Naranjo, R. Garcia, T. de Pedro and C. Gonzalez. *Vehicle fuzzy driving based on DGPS and vision*. In Proc. Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, volume 3, pp. 1472–1477, 2001. 85

- [Sotelo 04] M.A. Sotelo, D. Fernández, J.E. Naranjo, C. González, R. García, T. De Pedro and J. Reviejo. *Vision-based adaptive cruise control for intelligent road vehicles*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, volume 1, pp. 64–69, 2004. 23
- [Stafylopatis 98] A. Stafylopatis and K. Blekas. *Autonomous vehicle navigation using evolutionary reinforcement learning*. European Journal of Operational Research, Vol. 108, No. 2, pp. 306–318, 1998. 65
- [Stanley 04] Kenneth Owen Stanley. *Efficient evolution of neural networks through complexification*. PhD thesis, The University of Texas at Austin, 2004. Supervisor-Miikkulainen, Risto P. 138
- [Sugeno 89] M. Sugeno, T. Murofushi, T. Mori, T. Tatematsu and J. Tanaka. *Fuzzy algorithmic control of a model car by oral instructions*. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 32, No. 2, pp. 207–219, 1989. 65
- [Sugeno 99] M. Sugeno. *On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents*. IEEE Transactions on Fuzzy systems, Vol. 7, No. 2, pp. 201–224, 1999. 56
- [Sussmann 94] H. J. Sussmann, E. D. Sontag and Y. Yang. *A general result on the stabilization of linear systems using bounded controls*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 39, No. 12, pp. 2411–2425, 1994. 4
- [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, pp. 116–132, 1985. 4, 85
- [Thomanek 96] F. Thomanek and E. Dickmanns. *Autonomous road vehicle guidance in normal traffic*. In Recent Developments in Computer Vision, volume

## BIBLIOGRAFÍA

---

- 1035 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 499–507. Springer Berlin / Heidelberg, 1996. 24
- [Thorpe 88] C. Thorpe, M.H. Hebert, T. Kanade and S.A. Shafer. *Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, No. 3, pp. 362–373, 1988. 30
- [Thrun 07] S. Thrun, M. Montemerlo, H. Dahlkamp, D. Stavens, A. Aron, J. Diebel, P. Fong, J. Gale, M. Halpenny, G. Hoffmann *et al.* *Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge*. The 2005 DARPA Grand Challenge, pp. 1–43, 2007. 28
- [Togelius 08] J. Togelius, S. Lucas, H.D. Thang, J.M. Garibaldi, T. Nakashima, C.H. Tan, I. Elhanany, S. Berant, P. Hingston, R.M. Maccallum *et al.* *The 2007 IEEE CEC simulated car racing competition*. Genetic Programming and Evolvable Machines, Vol. 9, No. 4, pp. 295–329, 2008. 115
- [Trivedi 07] Mohan Manubhai Trivedi, Tarak Gandhi and Joel McCall. *Looking-In and Looking-Out of a Vehicle: Computer-Vision-Based Enhanced Vehicle Safety*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 108–120, 2007. 21
- [Tsugawa 01a] S. Tsugawa, K.T.S. Kato, T. Matsui and H. Fujii. *An overview on DEMO 2000 cooperative driving*. In IEEE Intelligent Vehicle Symposium, pp. 327–332, 2001. 32
- [Tsugawa 01b] S. Tsugawa, S. Kato, K. Tokuda, T. Matsui and H. Fujii. *A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in Demo 2000*. IEEE Intelligent Transportation Systems, pp. 918–923, 2001. 32
- [Tunstel 03] E. Tunstel and A. Howard. *Approximate reasoning for safety and survivability of planetary*



- rovers. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 134, No. 1, pp. 27–46, 2003. 23
- [Ulmer 92] B. Ulmer. *VITA-an autonomous road vehicle (ARV) for collision avoidance in traffic*. In *Proceedings of the Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 36–41, 1992. 24
- [Valavanis 06] K.P. Valavanis. *Unmanned vehicle navigation and control: A fuzzy logic perspective*. In *International Symposium on Evolving Fuzzy Systems*, pp. 200–207, 2006. 23
- [van Arem 06] B. van Arem, C.J.G. van Driel and R. Visser. *The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 7, No. 4, p. 429, 2006. 22
- [Velupillai 07] S. Velupillai and L. Guvenc. *Tire Pressure Monitoring [Applications of Control]*. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 27, No. 6, pp. 22–25, 2007. 21
- [Verdegay 08] J.L. Verdegay, R.R. Yager and P.P. Bonissone. *On heuristics as a fundamental constituent of soft computing*. *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 159, No. 7, pp. 846–855, 2008. Theme: Fuzzy Models and Approximation Methods. 5
- [Vivo 07] Giulio Vivo. *The SAFESPOT Integrated Project: an overview*. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 14–14, 2007. 34
- [von Hundelshausen 08] F. von Hundelshausen, M. Himmelsbach, F. Hecker, A. Mueller and H.J. Wuensche. *Driving with tentacles: Integral structures for sensing and motion*. *Journal of Field Robotics*, Vol. 25, No. 9, pp. 640–673, 2008. 24
- [Wang 03] Jian Wang and Baigen Cai. *A low-cost integrated GPS/INS navigation system for the land vehicle*. In *IEEE Intelligent Transportation Systems*, volume 2, pp. 1022–1026, 2003. 85

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Wang 07] C.C. Wang, C. Thorpe, S. Thrun, M. Hebert and H. Durrant-Whyte. *Simultaneous localization, mapping and moving object tracking*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 26, No. 9, p. 889, 2007. 30
- [Wooden 07] D. Wooden, M. Powers, M. Egerstedt, H. Christensen and T. Balch. *A modular, hybrid system architecture for autonomous, urban driving*. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, Vol. 4(12), pp. 1047–1058, 2007. 85
- [Wu 06] B.F. Wu, T.W. Chang, J.W. Perng, H.H. Chiang, C.J. Chen, T.Y. Liao, S.J. Wu and T.T. Lee. *Design and Implementation of the Intelligent Stop and Go System in Smart Car, TAIWAN iTS-1*. In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, volume 3, pp. 2075 –2080, 2006. 66
- [Wu 08] S. Wu, E. Zhu, M. Qin, H. Ren and Z. Lei. *Control of Four-Wheel-Steering Vehicle Using GA Fuzzy Neural Network*. In Proc. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, volume 1, pp. 869–873, 2008. 85
- [Xie 06] L. Xie, G. Zhu, M. Tang, H. Xu and Z. Zhang. *Vehicles Tracking Based on Corner Feature in Video-based ITS*. In Proc. 6th International Conference on ITS Telecommunications, pp. 163–166, 2006. 85
- [Zadeh 65] L.A. Zadeh. *Fuzzy sets*. Information and control, Vol. 8, No. 3, pp. 338–353, 1965. 4, 85
- [Zadeh 94] L.A. Zadeh. *Soft computing and fuzzy logic*. IEEE Software, IEEE, Vol. 11, No. 6, pp. 48–56, 1994. 5
- [Zadeh 99] L.A. Zadeh. *Fuzzy logic= computing with words*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 103 – 111, 1999. 4, 85

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Zhang 01] Qin Zhang. *Design of a generic fuzzy controller for electrohydraulic steering*. In American Control Conference, volume 5, pp. 3938–3942, 2001. 85
- [Zheng 10] Y. Zheng. *Research on fuzzy logic control of vehicle suspension system*. In International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, pp. 307–310, 2010. 23

## **BIBLIOGRAFÍA**

---

## BIBLIOGRAFÍA

---