



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL LATERAL SOBRE UN VEHÍCULO CON DIRECCIÓN ASISTIDA ELÉCTRICA

Autor: Esteban de Torres Rivera

Tutor: Paolo Pierro

Director de proyecto UPM-CSIC: Jorge Villagrà Serrano

Leganés, Julio de 2011

Título: IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL LATERAL SOBRE UN VEHÍCULO CON
DIRECCIÓN ASISTIDA ELÉCTRICA

Autor: Esteban de Torres Rivera.

Tutor: Paolo Pierro.

EL TRIBUNAL

Presidente: Ramón Barber Castaño.

Vocal: Higinio Rubio Alonso.

Secretario: Juan González Vítores.

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 27 de JULIO de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

A mi familia.

A todo el personal del Centro de Automática y Robótica.

Al personal de Hematología, Hospital de Día, y segunda planta del
Hospital Severo Ochoa de Leganés.

AGRADECIMIENTOS

Muchas son las personas a las que debo agradecer su ayuda durante este tiempo tan importante para mí, y la verdad es que no me gustaría olvidarme de ninguno de ellos. Agradecer a todos y cada uno de ellos el tiempo que han compartido conmigo, deseándoles que ese tiempo, les haya resultado tan bueno y fructífero como a mí.

Quisiera hacer una mención especial a Jorge Villagrà, pues este Proyecto Fin de Carrera no hubiese sido posible sin su inestimable ayuda. Agradecer también a Paolo Pierro, tutor de este proyecto, su dedicación.

No quisiera terminar sin agradecer a todo el grupo AUTOP A el cariño que me han profesado, pues desde el primer momento y durante todo el tiempo me han tratado como a uno más. Muchas gracias a Teresa, Ricardo, Carlos, Vicente, Javier, Roberto, Joshue, Enrique, Jorge Godoy, Jorge Villagrà y a Moises, que aunque no pertenece al grupo, también contó con su ayuda.

RESUMEN

En este proyecto, enmarcado en el programa AUTOPIA, se presenta una solución para implementar el control lateral sobre un vehículo de fabricación en serie, equipado con dirección asistida eléctrica y sistema de corrección de trayectorias ESP. En él se detallan los procesos que se han seguido para su realización, tales como el proceso de selección del hardware y conexionado del mismo. Además se especifican las pruebas realizadas sobre la dirección del vehículo, así como los pasos seguidos para la obtención de un modelo matemático aproximado de la dirección, que permita el cálculo de un controlador PID con la precisión necesaria para el guiado del vehículo de manera autónoma. Finalmente, se muestran las pruebas realizadas sobre el vehículo con el controlador PID obtenido.

Palabras Clave: Control Lateral, Controlador PID, Dirección Asistida Eléctrica, Vehículos autónomos.

ABSTRACT

In line with AUTOPIA, an automobile automation program from UPM-CSIC, this project presents a solution to implement lateral control on a production vehicle equipped with Electric Power Steering and Electronic Stability Program. The project shows the processes needed to carry out the lateral control, such as the hardware selection and its wiring. In addition, it specifies the tests made on the steering of the vehicle, and the steps followed to obtain an approximate mathematical model to calculate the PID controller needed for guiding the vehicle steering automatically. Finally, the project shows how the steering behaves under the different PID controllers obtained before.

Keywords: Autonomous Vehicles, Electric Power Steering, Lateral Control, PID Controller.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 FASES DEL DESARROLLO.....	3
1.4 MEDIOS EMPLEADOS	5
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 LOS SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE.....	8
2.1.1 EL TRANSPORTE POR CARRETERA.....	10
2.1.2 VEHÍCULOS INTELIGENTES	11
2.2 GRUPOS DE INVESTIGACIÓN EN VEHÍCULOS AUTÓNOMOS	12
2.3 GRUPO AUTOPIA.....	18
2.3.1 LA ZONA DE CONDUCCIÓN	18
2.3.2 LOS VEHÍCULOS.....	20
2.3.3 LA ARQUITECTURA DE CONTROL	23
2.3.4 ORBEX	24
CAPÍTULO 3: EL VEHÍCULO UTILIZADO.....	25
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	26
3.2 PROGRAMA ELECTRÓNICO DE ESTABILIDAD.....	27
3.2.1 SENSOR DE ÁNGULO DE VOLANTE	28
3.3 DIRECCIÓN ASISTIDA ELECTRICA	29
3.3.1 MOTOR DE LA SERVODIRECCIÓN	30
3.3.2 CONSIDERACIONES DE LA DIRECCIÓN	30
3.4 EL BUS CAN.....	31
3.4.1 LA RED CAN	31
3.4.2 FORMATO DE TRAMA CAN	32

3.4.3 TRAMAS CAN DEL CITROËN C3	33
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN HARDWARE	35
4.1 ELECCIÓN DEL DRIVER	36
4.1.1 EL DRIVER UTILIZADO	37
4.2 MODO DE FUNCIONAMIENTO Y CONEXIONADO	38
4.3 NECESIDADES ADICIONALES.....	39
4.3.1 COMUNICACIÓN CON EL ORDENADOR.....	41
CAPÍTULO 5: MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA	43
5.1 MODELADO DE LA DIRECCIÓN.....	45
5.1.1 PRUEBAS REALIZADAS.....	47
5.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LA DIRECCIÓN	50
5.2 MODELADO DE LA CARGA	54
5.2.1 PRUEBAS REALIZADAS.....	56
5.2.2 IDENTIFICACION DE LA CARGA.....	59
5.2.3 AJUSTE DEL MODELO DE CARGA	62
5.3 SIMULACIÓN DE LA DIRECCIÓN	69
CAPÍTULO 6: DISEÑO DEL CONTROLADOR.....	73
6.1 REQUISITOS	74
6.2 MODELO PARA LAS SIMULACIONES.....	75
6.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIONES	77
6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES	79
6.4.1 PRUEBAS CON PID.....	80
6.4.2 PRUEBAS CON PI.....	81
6.5 REAJUSTE DE LOS CONTROLADORES.....	84
6.6 OBSERVACIONES.....	88

CAPÍTULO 7: PRUEBAS EN CIRCUITO	90
7.1 CONTROL MEDIANTE PI	91
7.2 COMPARACIÓN CON EL CONTROLADOR BORROSO	95
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	98
8.1 CONCLUSIONES	99
8.2 TRABAJOS FUTUROS	99
CAPÍTULO 9: PRESUPUESTO	101
9.1 INTRODUCCIÓN	102
9.1.1 EJECUCIÓN DEL PROYECTO	102
9.2 RESUMEN DEL PRESUPUESTO	103
REFERENCIAS	107
DOCUMENTOS ANEXOS	112
ANEXO A: MODELO FÍSICO DEL NEUMÁTICO	113
ANEXO B: CONTROLADOR MDL-BCD24	115
ANEXO C: CÁLCULO DE LA EXPRESIÓN DEL PID DISCRETO	116
ANEXO D: CÓDIGO DE MATLAB PARA LA BUSQUEDA DEL PID ÓPTIMO	118

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Evolución del parque de vehículos en España	10
FIGURA 2.2: Evolución del número de víctimas mortales en España	11
FIGURA 2.3: Vehículos autónomos utilizados en el proyecto VaMoRs-P (izquierda) y MuCAR-3 (derecha).....	13
FIGURA 2.4: Vehículos del proyecto LaRA	14
FIGURA 2.5: Vehículos autónomos MobLab (izquierda) y ARGO (derecha).....	14
FIGURA 2.6: Imágenes del viaje realizado por el vehículo autónomo del VisLab.....	15
FIGURA 2.7: Caravana de vehículos automáticos del PATH	16
FIGURA 2.8: Vehículos autónomos de la Universidad Carnegie Mellon NavLab5 (izquierda) y NavLab11 (derecha).....	17
FIGURA 2.9: Nissan ASV-4.....	17
FIGURA 2.10: Vista aérea del ZOCO	19
FIGURA 2.11: Mejoras realizadas sobre ZOCO en los últimos años. Trazado adicional (arriba), Rotonda (centro) y Semáforos (abajo).....	19
FIGURA 2.12: Plano esquemático de ZOCO antes de las modificaciones.....	20
FIGURA 2.13: Rocinante (izquierda) y Babioca (derecha)	21
FIGURA 2.14: Clavileño (descapotable) y Platero.....	21
FIGURA 2.15: Molinero	22
FIGURA 2.16: Fotografía de la instrumentación.....	22
FIGURA 2.17: Esquema de la arquitectura de control utilizada.....	24
FIGURA 3.1: Citroën C3, Platero.....	26
FIGURA 3.2: Programa Electrónico de Estabilidad	27
FIGURA 3.3: Sensor de ángulo de volante.....	28
FIGURA 3.4: Esquema de una DAE	29
FIGURA 3.5: Motor de la dirección KOYO.....	30
FIGURA 3.6: Datagrama de bus CAN.....	32
FIGURA 4.1: Driver MDL-BDC24	37
FIGURA 4.2: Esquema de funcionamiento	39

FIGURA 4.3: Esquema de conexiones	40
FIGURA 4.4: Tarjeta del relés con MDL-BDC24	41
FIGURA 4.5: Lawicel CANUSB	42
FIGURA 5.1: Esquema físico de una DAE.....	44
FIGURA 5.2: Esquema físico de la dirección.....	45
FIGURA 5.3: Diagrama de bloques de la dirección	46
FIGURA 5.4: Posición del eje de la dirección en zona dura.....	48
FIGURA 5.5: Velocidad del eje de la dirección en zona dura	48
FIGURA 5.6: Posición del eje de la dirección en zona blanda	49
FIGURA 5.7: Velocidad del eje de la dirección en zona blanda.....	49
FIGURA 5.8: Modelo en velocidad de un motor CC.....	50
FIGURA 5.9: Respuesta real y simulada del sistema en zona dura	51
FIGURA 5.10: Respuesta real y simulada del sistema en zona blanda.....	52
FIGURA 5.11: Modelo simplificado piñón-cremallera	54
FIGURA 5.12: Posición del eje de la dirección en zona dura con carga	56
FIGURA 5.13: Velocidad del eje de la dirección en zona dura con carga.....	57
FIGURA 5.14: Posición del eje de la dirección en zona blanda con carga.....	58
FIGURA 5.15: Velocidad del eje de la dirección en zona blanda con carga	58
FIGURA 5.16: Modelo del sistema con carga	59
FIGURA 5.17: Respuesta real y simulada del sistema con carga en zona dura.....	60
FIGURA 5.18: Respuesta real y simulada del sistema con carga en zona blanda	61
FIGURA 5.19: Efecto del par en la simulación	63
FIGURA 5.20: Gráfica Par-Velocidad del modelo de fricción traslacional.....	64
FIGURA 5.21: Modelo del sistema con carga completa separada.....	66
FIGURA 5.22: Simulación sin efecto indeseado del par	66
FIGURA 5.23: Criterio de signos para la posición y velocidad.....	67
FIGURA 5.24: Discriminador entre zona dura o blanda.....	68
FIGURA 5.25: Discontinuidad del par	69
FIGURA 5.26: Modelo utilizado para la simulación	70

FIGURA 5.27: Alimentación usada en la simulación.....	71
FIGURA 5.28: Gráficas resultado de la simulación del sistema.....	71
FIGURA 6.1: Esquema del sistema con el controlador PID.....	76
FIGURA 6.2: Evolución de los controladores PID en simulación.....	78
FIGURA 6.3: Evolución de los controladores PI en simulación.....	79
FIGURA 6.4: Resultados experimentales del PID-A.....	80
FIGURA 6.5: Resultados experimentales del PID-B.....	81
FIGURA 6.6: Resultados experimentales del PI-1.....	82
FIGURA 6.7: Resultados experimentales del PI-2.....	83
FIGURA 6.8: Resultados experimentales del PI-1A.....	85
FIGURA 6.9: Resultados experimentales del PI-1B.....	86
FIGURA 6.10: Resultados experimentales del PI-1C.....	87
FIGURA 6.11: Delimitación zonal de las pruebas.....	88
FIGURA 6.12: Diferencia en la dinámica del controlador de cada zona.....	89
FIGURA 7.1: Mapa de los movimientos realizados en las pruebas.....	91
FIGURA 7.2: Resultados experimentales en circuito con PI-1A.....	92
FIGURA 7.3: Resultados experimentales en circuito con PI-1B.....	93
FIGURA 7.4: Resultados experimentales en circuito con PI-1C.....	94
FIGURA 7.5: Resultados experimentales en circuito con control borroso.....	95
FIGURA 7.6: Resultados experimentales del control borroso en parado.....	97
FIGURA 9.1: Diagrama de Gantt.....	103
FIGURA A.1: Modelo físico del neumático.....	113
FIGURA A.2: Ángulo de deslizamiento.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1: Características del sensor de ángulo de volante.....	28
TABLA 3.2: Posición de los datos en la trama.....	34
TABLA 4.1: Alternativas de Drivers comerciales.....	37
TABLA 4.2: Características del MDL-BDC24.....	38
TABLA 5.1: Unidades en el S.I. de los parámetros.....	46
TABLA 5.2: Valores estimados en zona dura.....	53
TABLA 5.3: Valores estimados en zona blanda.....	53
TABLA 5.4: Valores para modelo definitivo.....	53
TABLA 5.5: Valores estimados en zona dura para la carga.....	61
TABLA 5.6: Valores estimados en zona blanda para la carga.....	62
TABLA 5.7: Criterio de signos.....	68
TABLA 5.8: Valores utilizados para la simulación de la carga.....	69
TABLA 6.1: Especificaciones del controlador.....	75
TABLA 6.2: Valores de los controladores PID.....	77
TABLA 6.3: Valores de los controladores PI.....	78
TABLA 6.4: Resumen de características dinámicas de los controladores.....	83
TABLA 6.5: Valores de los controladores PI reoptimizados.....	84
TABLA 6.6: Resumen de características dinámicas de los controladores reajustados.....	87
TABLA 7.1: Resumen de características dinámicas en circuito de los controladores.....	94
TABLA 7.2: Comparación de características dinámicas de los controladores.....	96
TABLA 9.1: Duración de las tareas del proyecto.....	102

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y

OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte inteligentes han sido, en las últimas dos décadas, uno de los temas más desafiantes en el entorno tecnológico. Los constantes progresos en el desarrollo de sistemas robustos de control, de percepción y de comunicaciones, han abierto una senda de evolución casi imparable hacia la conducción autónoma de vehículos en espacios urbanos. En este contexto, el primer objetivo ha de ser el de utilizar el aumento de prestaciones de los sistemas de localización, sensorización y control, para poder emular e incluso mejorar al control humano, y lograr así una conducción lo más eficiente y segura posible.

La automatización de vehículos es la piedra angular sobre la que reposa cualquier sistema inteligente de transporte. De este modo, los algoritmos de control deberán explotar al máximo las prestaciones de los sensores y actuadores de los que se disponga, para garantizar unos criterios mínimos de robustez y precisión en el guiado del vehículo. La conducción autónoma sigue siendo, hoy en día, un problema abierto para la comunidad científica, puesto que el control combinado de las dinámicas longitudinal y lateral de un vehículo a velocidades elevadas (autopistas) y en entornos urbanos, es un desafío de extraordinaria complejidad.

Los proyectos desarrollados en el grupo AUTOPIA del *Centro de Automática y Robótica*, grupo donde se enmarca este proyecto, (más información se detalla en la apartado 2.3), intentan dar respuesta a estos retos; para ello, utiliza arquitecturas de control que se basan principalmente en el uso de la *lógica borrosa*, técnica que posee un funcionamiento similar al razonamiento humano.

1.2 OBJETIVOS

El programa AUTOPIA ha logrado controlar los actuadores de vehículos convencionales, tales como el freno, el acelerador y la dirección. Sin embargo, existen subsistemas para los que las prestaciones obtenidas pueden mejorarse. Un ejemplo de ello es el esquema general de control para el guiado lateral de los vehículos. Siguiendo un paradigma clásico en robótica, el control lateral se realiza con dos lazos en cascada: uno de *alto nivel* que transforma la posición del vehículo dentro de la carretera, en posiciones de volante, y otro de *bajo nivel* que tiene por misión orientar las ruedas en la

posición deseada con la mayor rapidez y precisión posibles. Esta última capa de control es el ámbito de trabajo de este proyecto, que buscará incrementar la precisión de las técnicas borrosas de control en todo el rango de situaciones que se presentan en entornos urbanos.

El objetivo principal del proyecto es el de integrar el control lateral de *bajo nivel*, en un vehículo de fabricación en serie, equipado con dirección asistida eléctrica y sistema electrónico de estabilidad.

En base a este objetivo principal, se proponen los siguientes objetivos parciales:

- Presentar una alternativa fiable al control borroso, utilizado en la actualidad por el grupo AUTOPIA.
- Obtener un controlador que sea capaz de posicionar las ruedas directrices en cualquier condición, (vehículo parado, vehículo en marcha, etc.).
- Obtener una aproximación del modelo matemático de la dirección del vehículo para futuras investigaciones y mejoras.
- Comparar el controlador PID obtenido, con el controlador borroso utilizado actualmente.

1.3 FASES DEL DESARROLLO

Para la realización del proyecto se han tenido que seguir una serie de tareas en secuencia que, aunque aquí se explican en detalle, en el capítulo 9 se presenta un diagrama de Gantt que especifica la duración estimada de cada tarea, así como su precedencia.

- **Análisis del vehículo y sus posibilidades.** Esta tarea comprende el estudio de los actuadores y accionadores de los que dispone el vehículo, así como la posibilidad de utilización de los mismos.
- **Elección del controlador hardware para control lateral.** Se realiza una búsqueda en el mercado de los Drivers comerciales disponibles, para realizar el control.

- **Montaje y conexión.** Una vez en posesión del Driver, se conectará al vehículo y al ordenador para su correcto funcionamiento.
- **Preparación para la recogida de datos.** Se realiza una programación simple con el objetivo de realizar las pruebas necesarias en la dirección.
- **Pruebas realizadas sobre la dirección.** Se realizarán pruebas para obtener el comportamiento dinámico de la dirección, a diferentes escalones de tensión, para la correcta modelización.
- **Programación del control lateral.** Esta tarea implementa en el software el PID para el control lateral.
- **Identificación de la dirección.** Con las pruebas realizadas anteriormente, se identifican los parámetros dinámicos para crear un modelado matemático aproximado de la dirección.
- **Identificación de la interacción neumático-suelo.** Una vez identificado el sistema de la dirección, se identificará la interacción neumático-suelo.
- **Creación del modelo de la dirección.** En esta tarea se crea un modelo matemático aproximado de la dirección que emule su comportamiento.
- **Optimización del controlador mediante simulación.** En esta tarea, se obtienen de forma numérica los parámetros del controlador PID, que será utilizado para el control lateral.
- **Pruebas con el vehículo parado.** Con los valores obtenidos en la fase anterior, se realizan las pruebas en el vehículo y se estudia su comportamiento.
- **Reajuste del controlador.** Con la experiencia adquirida en los controladores PID, se reajustan los parámetros de forma experimental para conseguir un control de mayor precisión.
- **Pruebas en pista.** Una vez que el control lateral funciona con el vehículo parado, se realizan las pruebas con el vehículo circulando a baja velocidad. El control se realiza de forma manual, es decir, el usuario controla por teclado la posición de la dirección.
- **Reajuste del controlador.** Se realiza un nuevo ajuste del controlador para que exista un equilibrio entre el funcionamiento en parado y en circulación.

1.4 MEDIOS EMPLEADOS

Durante la realización de este proyecto se ha contado con la ayuda del grupo AUTOPIA, que ha puesto a nuestra disposición tanto sus vehículos, como sus laboratorios y su pista de pruebas.

También ha sido necesaria la utilización de un lenguaje de programación como C++, así como un programa de computación de alto nivel como Matlab.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo.

- En el capítulo 2 se presenta una descripción de conceptos importantes tales como estado del arte, en cuanto a los Sistemas Inteligentes de Transportes. También se presenta al grupo AUTOPIA, pues este proyecto está enmarcado dentro de su línea de investigación.
- En el capítulo 3 se especifica el vehículo automatizado, así como las características de las que dispone y una breve descripción de su funcionamiento.
- En el capítulo 4 se explica la implementación hardware utilizada en el control lateral, comprendiendo las características del Driver utilizado, y el modo de conexiónado.
- En el capítulo 5 se presenta el modelado y simulación del sistema, explicando las pruebas realizadas para el modelado, y las modificaciones realizadas para la correcta simulación del sistema.
- En el capítulo 6 se aborda el proceso completo de la obtención de los parámetros de un controlador PID, que pueda ser usado sobre la dirección del vehículo.
- En el capítulo 7 se muestran las pruebas en pista para obtener un controlador robusto y eficaz, capaz de posicionar la dirección ante cualquier condición.
- En el capítulo 8 se exponen las conclusiones y posibles trabajos futuros que se obtienen como consecuencia del desarrollo del proyecto.

- En el capítulo 9 se presenta un presupuesto de la ejecución del proyecto, así como un diagrama de Gantt que da una idea de la secuencia y duración de las tareas durante la realización del proyecto.
- El documento se completa con la bibliográfica consultada y referencias, así como de anexos, donde se expone información relevante.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se detallan los *Sistemas Inteligentes de Transporte*, así como los grupos de investigación más importantes en el área de los vehículos autónomos.

Puesto que, como se comentó anteriormente, este Proyecto Fin de Carrera está enmarcado dentro del grupo AUTOPIA, dicho grupo será tratado de una forma especial, explicando tanto la infraestructura de la que dispone para realizar las pruebas, como la flota de vehículos que ha desarrollado. En la sección 2.3.3 se presenta la arquitectura de control que se utiliza en dicho grupo, pues será la que se utilice en la realización de este proyecto.

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.

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 ITS se ha venido desarrollando con más o menos intensidad para las diferentes áreas 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 Unidos con el sistema GPS, y Rusia con el sistema GLONASS. La Unión Europea ha presentado un programa autónomo de radio-navegación por satélite denominado GALILEO [AEE. 2011]. 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. Después de sufrir una serie de reveses técnicos y políticos, se espera poner este sistema en 2014.
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 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 la mejora de las condiciones del tráfico o del impacto medioambiental, entre otras.
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.
7. **Transporte marítimo:** sistemas de gestión de tráfico marítimo y sistemas de información. El objetivo fundamental es 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 programa AUTOPIA, marco referencial del presente proyecto, 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. Su creciente demanda está causando que, en la actualidad, 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 1995 hasta el 2004 [DGT. 2005].

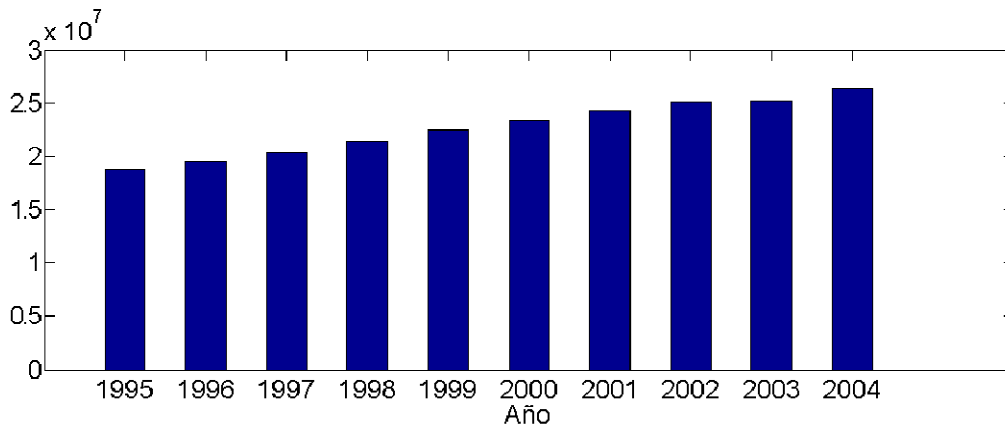


FIGURA 2.1: Evolución del parque de vehículos en España

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. 2009]. La figura 2.2 muestra una evolución de este número.

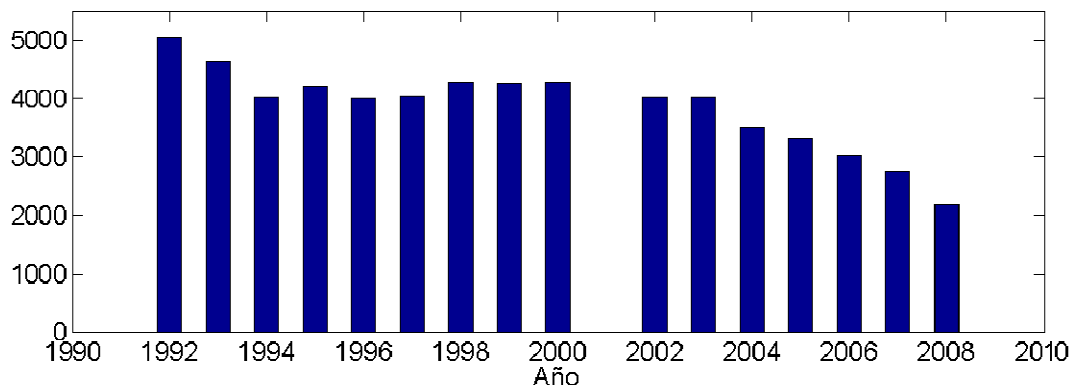


FIGURA 2.2: Evolución del número de víctimas mortales en España

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. Se encuentran 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. Unos ejemplos son: centralización semafórica, pago electrónico de peaje, información de tráfico y viajes, etc.
2. **Vehículos inteligentes**; 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. Como ejemplos están los sistemas de ayuda a la conducción, los vehículos autónomos, etc.

El programa AUTOPIA, 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.

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

1. **Asistencias pasivas a la conducción.** Incluyen funciones de aviso ante potenciales peligros y/o reducción de riesgos de lesiones en caso de accidente. Como ejemplos se pueden marcar: alertas de cambio involuntario de carril, control de luces inteligentes, sistemas de alerta de colisión, airbags, cinturones de seguridad, etc.
2. **Asistencias activas a la conducción.** Incluyen algunas acciones de control sobre los elementos implicados en la conducción del vehículo. Algunos ejemplos son: parada y arranque, control de cruce, caja de cambios robotizada, etc.
3. **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 pueden cometer.

En lo referente a vehículos autónomos, área de trabajo del programa AUTOPIA, son múltiples los grupos de investigación que abordan el problema en todo el mundo. En la siguiente sección se describirán grupos dedicados a la misma disciplina por todo el mundo.

2.2 GRUPOS DE INVESTIGACIÓN EN VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

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

En 1987, junto a prestigiosos fabricantes europeos, la **Universität der Bundeswehr** creó en el proyecto PROMETHEUS (acrónimo inglés, *PROgram for European Traffic with HighEst and Unprecedented Safety*), el vehículo automatizado VaMoRs guiado por visión artificial [Dickmanns, E.D. 1987], 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, B. 1992].

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, E.D. 1994]. VITA II y VaMP, continuaciones del anterior [Thomanek, F. 1996].

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, F. 2008], fusionada con un sensor láser [Manz, M. 2009].



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 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, S. 2007].

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,

J.M. 2000], 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.



FIGURA 2.4: Vehículos del proyecto LaRA

La **Universidad de Parma** lleva desde 1989 investigando en el campo de 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 crucero, detección de obstáculos o control lateral por medio de visión artificial [Cumani, A. 1995].

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, A. 1999].



FIGURA 2.5: Vehículos autónomos MobLab (izquierda) y ARGO (derecha)

Recientemente **VisLab**¹, una derivación de la Universidad de Parma dedicada a la conducción autónoma que colabora estrechamente con esta, 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.

¹ The VisLab Intercontinental Autonomous Challenge.

En la figura 2.6 pueden verse algunas imágenes del viaje; más información puede encontrarse en [VISLAB. 2010].



FIGURA 2.6: Imágenes del viaje realizado por el vehículo autónomo del VisLab

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, J. 2008] sin necesidad de poner vidas en riesgo o dañar propiedad alguna.

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 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.

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

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, S. 1993], principalmente en autopistas [Shladover, S.E. 1992]. 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 2.7).



FIGURA 2.7: Caravana de vehículos automáticos del PATH

El proyecto **NAVLAB** de la Universidad Carnegie Mellon trabaja en la construcción 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, C. 1988]. En la figura 2.8 pueden verse el *Navlab 5* y *11* respectivamente.



FIGURA 2.8: Vehículos autónomos de la Universidad Carnegie Mellon NavLab5 (izquierda) y NavLab11 (derecha)

Actualmente están 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, C.C. 2007].

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 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 2.9) 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 2.9: Nissan ASV-4

2.3 GRUPO AUTOPIA

Puesto que el presente proyecto se enmarca dentro del programa AUTOPIA, se va comentar de una forma más detallada.

El Grupo AUTOPIA se desarrolla en España en el desaparecido *Instituto de Automática Industrial*, que actualmente es 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 autónoma de vehículos.

Desde sus inicios en 1998, ha centrado su trabajo en la aplicación de técnicas de control desarrolladas inicialmente para robots móviles, en vehículos autónomos reales. Estas técnicas de inteligencia artificial se basan en la *lógica borrosa*, 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.

2.3.1 LA ZONA DE CONDUCCIÓN

La pista de pruebas de la que dispone el grupo, (ZOCO), es una pista 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, permite la circulación en ambos sentidos. La recta mayor de la pista tiene una longitud de 250 metros, lo que permite alcanzar velocidades de hasta 50 Km/h, velocidad límite en entornos urbanos. En la figura 2.10 se puede ver una visión aérea del ZOCO².

² Fuente: <http://maps.google.es>. Se han añadido las actuales modificaciones del plano (Jorge Godoy).



FIGURA 2.10: Vista aérea del ZOCO

En la actualidad, se ha modificado la trazada de determinados planos para así lograr un conjunto más amplio de curvas, se ha añadido una pequeña rotonda, así como semáforos en el cruce central. En la figura 2.11 pueden verse imágenes del estado actual de la zona de pruebas disponible.



FIGURA 2.11: Mejoras realizadas sobre ZOCO en los últimos años. Trazado adicional (arriba), Rotonda (centro) y Semáforos (abajo)

Las calles originales de ZOCO fueron nombradas para así poder definir recorridos. 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. Los nombres pueden verse en la figura 2.12.

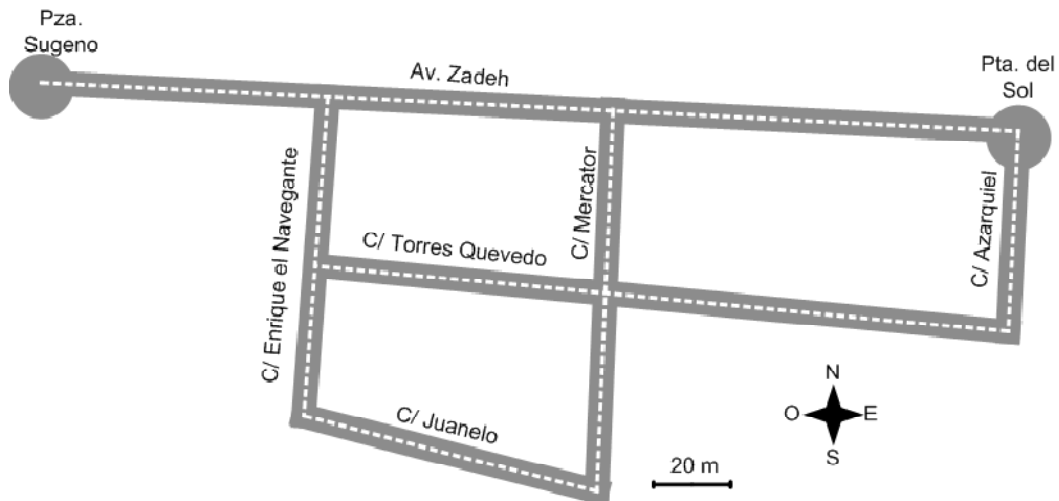


FIGURA 2.12: Plano esquemático de ZOCO antes de las modificaciones

ZOCO también dispone de una estación base de posicionamiento global diferencial basado en información geográfica vía satélite, DGPS (Differential GPS), que puede ser utilizado por los sistemas móviles embarcados en los coches, para obtener su posición con una precisión inferior al centímetro.

También existe una estación central de simulación sobre la que se prueban las estrategias, normalmente basadas en *lógica borrosa*, que luego son transferidas a los vehículos.

2.3.2 LOS VEHÍCULOS

La flota de vehículos disponibles está compuesta por cinco unidades, que se describen a continuación.

Dos furgonetas eléctricas Citroën Berlingo, llamadas *Babioca* y *Rocinante* [Milanes, V. 2009], que pueden verse en la figura 2.13. Son impulsadas por un motor eléctrico de 15 Kw que les permite alcanzar velocidades de hasta 90 Km/h; en pruebas de conducción automática se han alcanzado velocidades de 60 Km/h.

Un Citroën C3 Pluriel [Milanes, V. 2010-a], en su configuración descapotable, llamado *Clavileño*, completamente automatizado; y un segundo Citroën C3 llamado *Platero*; ambos se muestran en la figura 2.14. *Platero* es el vehículo objeto de este proyecto, por lo que más información acerca de este vehículo se encuentra en el capítulo 3.

Finalmente, la última adquisición del grupo ha consistido en un prototipo de microbús eléctrico de la casa Suzhou Eagle Electric Vehicle Manufacturing para transporte público, con el que se pretende extrapolar las técnicas y resultados obtenidos, a los sistemas públicos de transporte. A este microbús se la ha llamado *Molinero*, y actualmente se encuentra en proceso de automatización. En la figura 2.15, se muestra una imagen del mismo.



FIGURA 2.13: Rocinante (izquierda) y Babiéca (derecha)



FIGURA 2.14: Clavileño (descapotable) y Platero



FIGURA 2.15: Molinero

Todos los vehículos están instrumentados para actuar sobre el freno y el acelerador, [Onieva, E. 2010]. También lo están para actuar sobre el volante, aunque esa parte se ha realizado de forma *diferente para cada vehículo*³. En este proyecto se explica la automatización del control lateral de *Platero*.

En lo que respecta a la información sensorial que los vehículos son capaces de leer de su entorno, está formada principalmente por un receptor GPS; éste, 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 la figura 2.16 se muestra una imagen con la instrumentación embarcada en *Clavileño*.

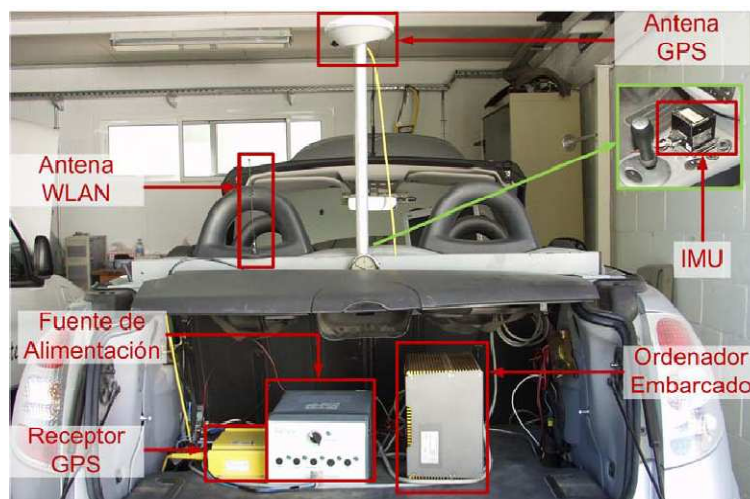


FIGURA 2.16: Fotografía de la instrumentación

³ Más información puede verse para Rocinante y Babioca en [Milanes, V. 2009], para Clavileño veasé [Milanes, V. 2010-a].

Los demás vehículos están instrumentados de forma análoga.

En el caso de que, o bien el GPS embarcado, o la comunicación con la estación base falle, una IMU (*Inertial Measurement Unit* o *Unidad Inercial de Medida*) instalada junto a la palanca de cambios será capaz de dar la posición, usando para ello las aceleraciones longitudinales 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.

Una vez tomados todos los parámetros necesarios 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 borrosa*.

2.3.3 LA ARQUITECTURA DE CONTROL

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 se denomina, el control lateral y longitudinal, respectivamente.
2. **Nivel de Maniobra:** abarca todas las maniobras propias de la 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.

Tal y como se comentó en el capítulo anterior, el objetivo de este proyecto es el de realizar el control lateral de *bajo nivel* del vehículo, por lo que sólo nos vamos a detener a explicar un poco más el *Nivel de Control*.

El control lateral busca regular, con un único actuador (volante), al menos dos variables (distancia al borde de la carretera y ángulo de posicionamiento del vehículo).

Se trata pues de un sistema subaccionado, cuyo control se resuelve con dos etapas en cascada. [Naranjo, J.E. 2005].

Un primer controlador de *bajo nivel* intentará posicionar las ruedas con el ángulo que un algoritmo de control de más *alto nivel* decidirá en función de la posición y orientación del vehículo. En la figura 2.17 se muestra la configuración en cascada para el *control lateral* que se ha utilizado en el presente proyecto.

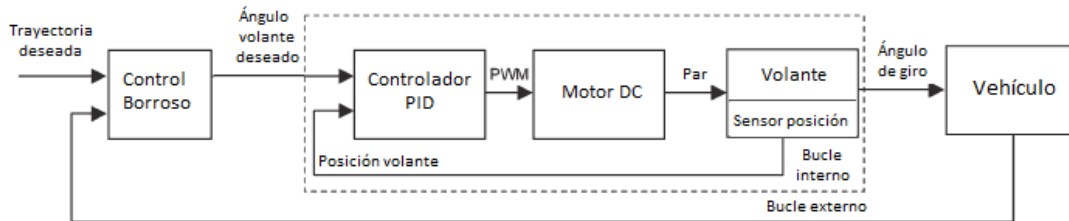


FIGURA 2.17: Esquema de la arquitectura de control utilizada

Más información sobre el control de *alto nivel* utilizado por el grupo AUTOPIA puede encontrarse en [Naranjo, J.E. 2007].

2.3.4 ORBEX

(ORdenador Borroso EXperimental), es el núcleo de un sistema de inferencia difusa.

Los controladores difusos que definen al *control de alto nivel* en la arquitectura de control están definidos utilizando la librería de modelado difuso ORBEX [García, R. 1998]. El entorno ha venido siendo usado por el grupo AUTOPIA para el modelado y ejecución en tiempo real de los controladores difusos que controlan los vehículos [García, R. 2000]. Gracias a él se pueden describir diferentes formas de conducción, con el fin de emular el comportamiento de diferentes tipos de conductores, así como adaptar la conducción a la situación actual del tráfico. Dichas estrategias pueden ser definidas e implementadas mediante reglas difusas del tipo SI...ENTONCES...

Para más información sobre el grupo AUTOPIA refiérase a [AUTOPIA. 2011].

CAPÍTULO 3

EL VEHÍCULO UTILIZADO

La implementación del control lateral descrito en este Proyecto Fin de Carrera, se ha realizado teniendo en mente que, a nivel hardware, dicho control debía ser válido para cualquier vehículo de serie que dispusiera de dirección asistida eléctrica y de programa electrónico de estabilidad.

Puesto que el desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo en las instalaciones, y con los vehículos del *Centro de Automática y Robótica*, esta implementación se ha realizado sobre uno de los vehículos de su flota.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El vehículo comercial utilizado en este proyecto es un Citroën C3 denominado *Platero*, que hasta ahora había sido utilizado exclusivamente como vehículo de pruebas pilotado, pues sólo disponía de sistema de posicionamiento GPS diferencial y comunicaciones WIFI con el resto de automóviles (véase [Milanes, V. 2010-b] como ejemplo).



FIGURA 3.1: Citroën C3, Platero

Platero posee un equipamiento de serie, en términos de sensores y actuadores, de:

- Dirección Asistida Eléctrica (DAE) o Electric Power Steering (EPS)
- Sistema de Antibloqueo de Ruedas o Antilock Brake System (ABS).
- Programa Electrónico de Estabilidad o Electronic Stability Program (ESP).
- Bus CAN (Controller Area Network) de comunicaciones.

Para la implementación del control lateral se ha utilizado el motor eléctrico de corriente continua de la DAE, el sensor de posición del volante, incorporado en el sistema ESP y el bus CAN. Este último ha facilitado la implementación del control, al posibilitar la lectura de la información de posición de volante a través de él; sólo siendo necesario capturar y procesar la trama correspondiente.

3.2 PROGRAMA ELECTRÓNICO DE ESTABILIDAD

El programa electrónico de estabilidad (ESP) es un complemento del sistema de antibloqueo de ruedas (ABS). Evita que el vehículo llegue a patinar debido a intervenciones rápidas en el motor, caja de cambios y frenos.

Para lograr el efecto estabilizador, el ESP dispone de un conjunto de sensores y actuadores, así como de una unidad de control. En la figura 3.2 se muestra un esquema de montaje en un vehículo (para más información véase [Arias-Paz, M. 2005]).

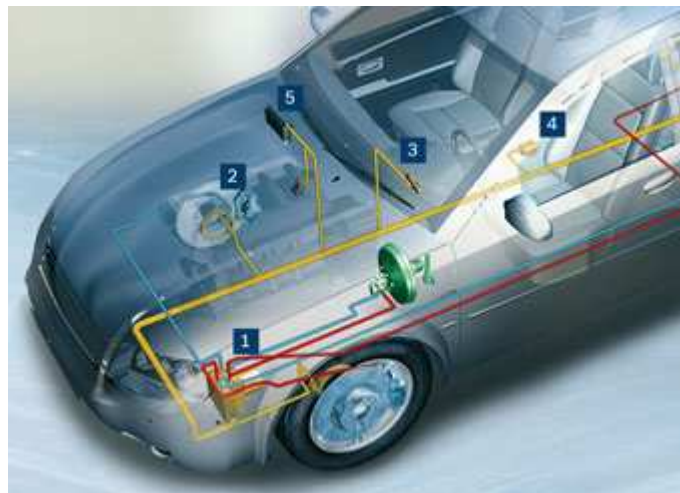


FIGURA 3.2: Programa Electrónico de Estabilidad

1. Grupo hidráulico con módulo de control.
2. Sensores de las revoluciones de las ruedas.
3. Sensor de ángulo de volante.
4. Sensor de relación de giro y aceleración transversal.
5. Comunicación con la gestión del motor.

En la implementación del control lateral, se ha utilizado el sensor de ángulo de volante (3), del ESP; por lo que sólo se profundizará en dicho sensor.

3.2.1 SENSOR DE ÁNGULO DE VOLANTE

El sensor de ángulo del volante es un elemento indispensable dentro del sistema ESP, pues es el que indica la posición exacta del volante en todo momento, para poder actuar en consecuencia e impedir el subviraje o sobreviraje del automóvil en situaciones críticas. Este da información de la posición absoluta así como de la velocidad y sentido de giro del volante, aunque en este proyecto sólo se utiliza el dato de la posición para realizar el lazo de control. En *Platero*, este sensor va conectado directamente al bus CAN, lo que facilita la adquisición de los datos necesarios para hacer la realimentación.



FIGURA 3.3: Sensor de ángulo de volante

En la Figura 3.3 se muestra una vista del sensor de posición del volante (encoder absoluto), fabricado por Bosch, modelo LWS5. [Bosch, 2010]. En la tabla 3.1 se muestran las características del sensor que nos ofrece el fabricante.

TABLA 3.1: Características del sensor de ángulo de volante

Alimentación (V)	Consumo (mA)	Interface	Rango (grados)	Precisión (grados)
8 – 16	150	CAN	1560 (-780/780)	1.5

La trama y la composición del dato necesario que se obtiene del sensor, se explica en la sección 3.4.

3.3 DIRECCIÓN ASISTIDA ELECTRICA

La dirección de *Platero* está asistida eléctricamente. A diferencia de la dirección hidráulica, esta sólo consume energía cuando es necesario, reduciendo así el consumo de combustible del vehículo.

La Dirección Asistida Eléctrica genera esfuerzos de maniobra según la fuerza ejercida por el conductor sobre el volante. Este par de asistencia es suministrado gracias a un motor eléctrico, que actúa sobre la barra de la dirección mediante un reductor, en este caso, tornillo sin fin de relación 1:15.

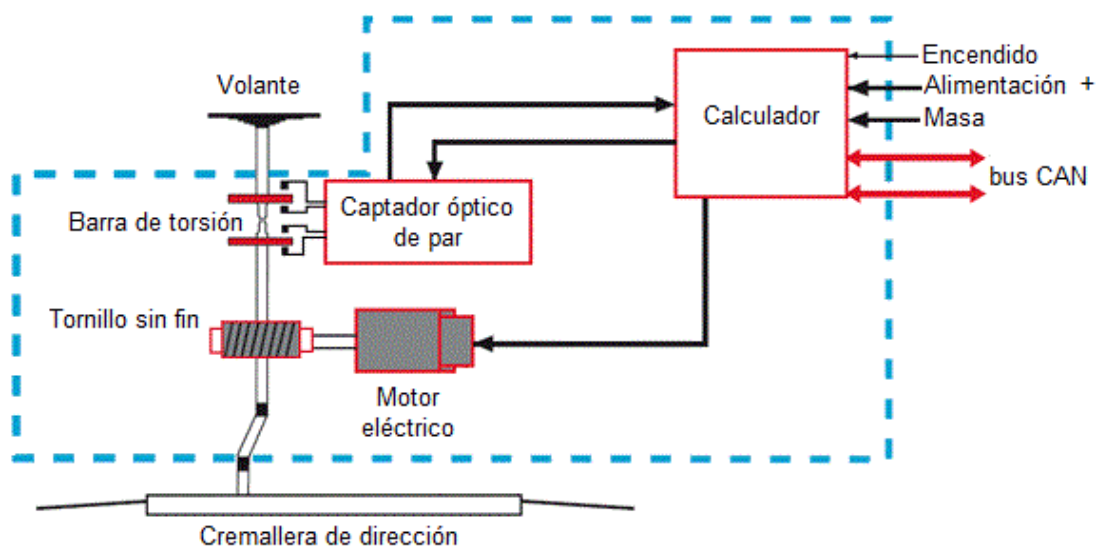


FIGURA 3.4: Esquema de una DAE

En la figura 3.4 se muestran tanto los componentes como la interconexión de un sistema DAE.

El principio de funcionamiento consiste en controlar el motor para que ayude al conductor a realizar el giro del volante. Para ello, con el captador óptico de par, se mide el esfuerzo realizado por el conductor sobre el volante. Este dato es enviado al calculador, que utilizando además, datos de velocidad del vehículo y régimen de giro del motor, obtiene el valor de tensión que se debe aplicar al motor de la servodirección, para que este compense el par ejercido por el conductor (para más información véase [Mecánica. 2011]).

3.3.1 MOTOR DE LA SERVODIRECCIÓN

Según PSA [Citroën. 2005], la dirección asistida de *Platero* ha sido fabricada por Koyo, que introduce un motor de corriente continua alimentado a 12 voltios, cuya intensidad máxima es de 60 amperios, para permitir la asistencia de forma instantánea. Debido a la ausencia de documentación del fabricante, no se ha podido utilizar el controlador de la misma para hacer el control de posición; ni profundizar en las características del motor para facilitar las tareas de modelado previas al diseño del controlador.

En la figura 3.5 se muestra el motor de la dirección instalada en *Platero*, así como el acople de la barra de la dirección, que incorpora en su base el sensor de par para regular la asistencia.



FIGURA 3.5: Motor de la dirección KOYO

3.3.2 CONSIDERACIONES DE LA DIRECCIÓN

Antes de terminar con este apartado, es importante destacar que, según el fabricante [Citroën. 2005], el rango del volante está comprendido entre los $+540^\circ$ (extremo izquierdo) y -540° (extremo derecho), siendo la posición central la denominada como 0° .

Además, se ha calculado que la relación de giro existente entre las ruedas y el volante es de 1:16,36, es decir, que por cada 16,36 grados que gira el volante, las ruedas giran 1 grado. (Para más información véase [Citroën. 2005]).

Estos datos se tendrán en consideración para el modelado de la dirección.

3.4 EL BUS CAN

En este apartado se va a tratar de una forma somera el bus CAN, puesto que el objetivo de éste no es explicar el funcionamiento completo de la red, sino de dar una visión general de las consideraciones que se han tenido en cuenta para poder obtener del vehículo los datos necesarios. (Para más información véase [Kaschel, H. 2005]).

3.4.1 LA RED CAN

El protocolo CAN comenzó a ser desarrollado en 1983 por el equipo Bosch GmbH. En 1986 fue presentado a la ISO (International Stándar Organisation) con vistas a una normalización. El primer vehículo de serie que incorporaba este bus se fabricó en 1992. En 2003 la mayoría de los fabricantes ya incorporaban este sistema en sus vehículos, pero no fue hasta 2008 cuando la red CAN se convirtió en implantación universal en todos los vehículos.

La red CAN es una red de comunicaciones organizada de forma jerárquica y distribuida, la cual permite la comunicación serie para aplicaciones de tiempo real. La jerarquía se organiza, no por la importancia de los nodos, sino por la prioridad de los mensajes, es decir, que cuanto más prioridad tenga un mensaje mayor preferencia tendrá para ser transmitido. El método utilizado para manejar la colisión entre mensajes es el denominado CSMA/CD⁴. En este caso, cuando se produce una colisión, no se resetean los mensajes que colisionan, sino que se realiza un arbitraje y sólo continua emitiéndose el que tenga mayor prioridad.

El medio físico utilizado es un par de cables trenzado denominados CAN High y CAN Low (CAN_H y CAN_L). La diferencia de potencial entre estos cables permite codificar los dos estados lógicos (1, 0). Una peculiaridad de las redes CAN embarcadas en vehículos, es que la masa está conectada a la carrocería del vehículo, enganchada a su vez al polo negativo de la batería.

El protocolo CAN define al estado lógico 1 como recesivo, mientras que el estado 0 será el dominante, esto es utilizado para definir la prioridad.

Las velocidades de transmisión de la red CAN van desde los 10 Kbps (kilobits por segundo) hasta 1 Mbps (megabit por segundo). En el caso concreto del Citroën C3 la velocidad está limitada a 250 Kbps [Citroën, 2001].

⁴ Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection o Acceso Multiple con Detección de Portadora y Detección de Colisiones. Método de control de acceso al medio, estándar IEEE 802.3.

3.4.2 FORMATO DE TRAMA CAN

Toda trama CAN está constituida por 8 campos, que se enumeran a continuación:

1. Identificador de principio de trama (1 bit)
2. Identificador de trama (12 bits)
3. Campo de comando (6 bits)
4. Campo de datos (8 bytes)
5. Código de redundancia cíclica (15 bits)
6. Campo de acuse de recibo (2 bits)
7. Identificador de fin de trama (7 bits)
8. Campo separador de trama (3 bits)

De estos ocho campos, se explicarán con algo más de detalle el 2 y el 4, que son los que identifican la trama en cuestión y su contenido. El resto de campos se usan a bajo nivel, de manera transparente al usuario, por lo que no se incidirá en ellos. En la figura 3.6 se muestra un datagrama del bus CAN donde se indica la posición de cada campo en el mensaje.

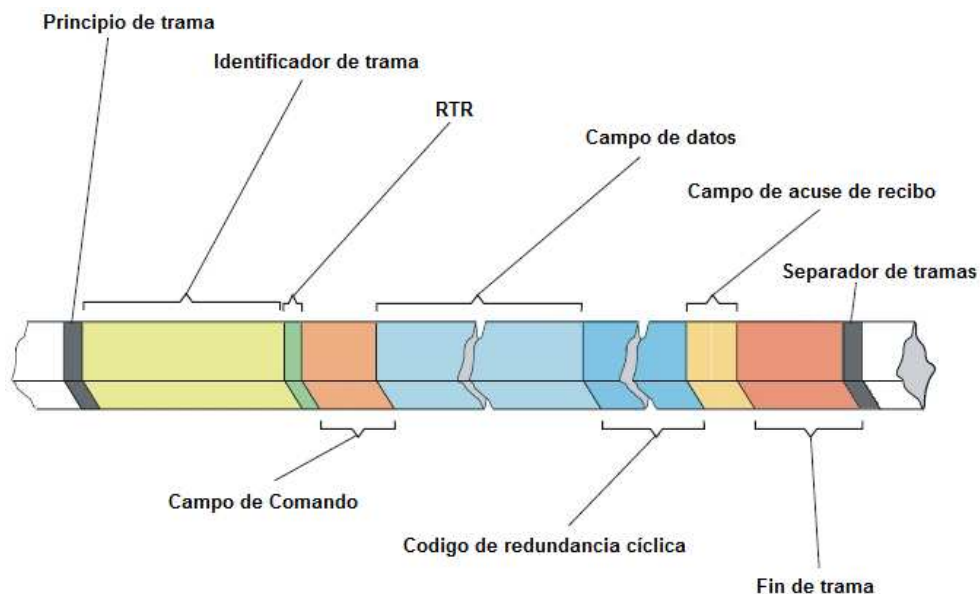


FIGURA 3.6: Datagrama de bus CAN

Campo de identificación de la trama.

Está formado por 12 bits, que se pueden separar en 11 + 1. Los primeros 11 bits tienen una finalidad doble. Por un lado identifica el mensaje CAN que se está

transmitiendo, dotándole de un número único para ese tipo de mensaje que lo hace distinguible al resto. Por otro lado, ese número define la prioridad del citado mensaje. Así, el mensaje de mayor prioridad será el 000h y el de menor 7FFh (números indicados en hexadecimal).

El bit que queda, RTR (Remote Transmission Request), permite codificar la naturaleza del mensaje, si es un 0, la trama contiene datos, si es un 1, la trama es de consulta. Al ser el 0 el dominante, las tramas de datos tienen prioridad sobre las de consulta.

Campo de datos.

Este campo contiene de 0 a 8 bytes de datos, con el bit de mayor peso colocado al principio y el de menor peso colocado al final.

3.4.3 TRAMAS CAN DEL CITROËN C3

De todas las tramas disponibles en el bus CAN del Citroën C3, únicamente va a ser necesaria para este proyecto la correspondiente al sensor de ángulo de volante (Steering Wheel Angle, ID: xxxh)⁵ [Automatización. 2007].

Steering Wheel Angle. ID: xxxh.

Transmite el ángulo, velocidad y sentido de giro del volante para ser utilizado por el ESP. Es una señal periódica que se transmite cada 10 milisegundos, con un tamaño de 5 bytes.

En la tabla 3.2 se muestra la posición de los datos de la trama que envía el sensor de ángulo de volante.

⁵ Por motivos de confidencialidad no se puede especificar el identificador de la trama.

TABLA 3.2: Posición de los datos en la trama

Designación	Longitud	Posición	
		LSB	MSB
Ángulo de volante	16 bits	2	1
Velocidad rotación	8 bits		3
Sentido de giro	1 bit		4.7
Código de fallo	4 bits		4.6-4.3
Ajuste	1 bit		4.2
Calibración	1 bit		4.1
Estado del captador	1 bit		4.0
Checksum	4 bits		5.7-5.4
Contador	4 bits		5.3-5.0

Donde LSB (Least Significant Byte o Byte Menos Significativo), MSB (Most Significant Byte o Byte Más Significativo).

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN

HARDWARE

Una vez conocidos tanto el sensor como el actuador necesarios, así como la arquitectura de control utilizada (véase sección 2.3.3), queda determinar el tipo de controlador que mandará las señales al motor. Utilizar como controlador lateral el calculador de la DAE del vehículo es imposible, pues no tenemos permiso de escritura en el bus CAN, bloqueándose el sistema si se intenta. Por esta razón, se ha decidido utilizar un controlador o “*driver*” de motores de corriente continua externo, para comandar al motor de la dirección.

Con motivo de no confundir el concepto de *controlador hardware* con el concepto de *controlador PID*, de ahora en adelante se utilizará la designación inglesa “*driver*” para referirse al *controlador hardware*.

4.1 ELECCIÓN DEL DRIVER

Antes de decantarse por un modelo u otro de *driver*, es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones, tales como:

- Facilidad de manejo. Que tenga un puerto de comunicaciones estándar y disponga de sencillas instrucciones para su control.
- Tensión deseada. Que se alimente de las tensiones de las que se dispone y sea capaz de suministrar las tensiones necesarias.
- Corriente máxima. Que sea capaz de entregar la intensidad de corriente necesaria para la aplicación.

En este caso concreto, la consideración más restrictiva ha sido la necesidad de corriente máxima, pues para mover la dirección de un coche se utilizan intensidades elevadas (entre 20 y 30 A).

Para determinar la corriente máxima que se necesitaría durante el funcionamiento, se deben de tener en cuenta las resistencias que hay que vencer durante el movimiento de la dirección, esto es, las condiciones del firme, el estado de los neumáticos (desgaste, presión), las condiciones meteorológicas, etc., es decir, un sinnúmero de variables que afectan de forma activa al comportamiento de la dirección.

Para no alargar el proceso, se toma como hipótesis la condición más desfavorable; esta situación se produce cuando el vehículo está parado sobre asfalto seco; se desprecia el desgaste y la presión de los neumáticos, asumiendo que estos se encuentran en buenas condiciones de uso. Bajo esta hipótesis, se mide la corriente que requiere el motor para

mover las ruedas correctamente de tope a tope, obteniéndose un valor máximo de 27 A. por lo que el *driver* debe ser capaz de suministrar esa corriente.

En el mercado existen multitud de alternativas, pero aquí sólo se mostrará una selección de los que se ajustan más a nuestras necesidades y presupuesto. En la tabla 4.1 se muestran dichas alternativas.

TABLA 4.1: Alternativas de Drivers comerciales

Modelo	Alimentación (V)	Corriente máxima (A)	Interface
MDL-BDC24	6-30	40	RS232/CAN
ION500	12-56	9.8	RS232/RS485/ CAN
FMOD-IPECMOT 48/10	15-48	10	Ethernet

Como se muestra en la tabla 4.1, todos los *drivers* satisfacen las necesidades de alimentación y de facilidad de manejo, pero sólo el MDL-BDC24 satisface además, los requisitos de corriente máxima. Por lo tanto, los *drivers* ION500 y FMOD-IPECTMOT 48/10 quedan descartados.

4.1.1 EL DRIVER UTILIZADO

El *driver* elegido es el denominado MDL-BDC24 de la casa Texas Instrument.



FIGURA 4.1: Driver MDL-BDC24

Stellaris Brushed DC Motor Module, también conocido como MDL-BDC24 ó *blackjaguar*, mostrado en la figura 4.1, es un *driver* bidireccional para motores de escobillas, capaz de manejar valores altos de corriente continua.

El *driver* MDL-BDC24 tiene un rango de alimentación comprendido entre 6 y 30 voltios en corriente continua, siendo capaz de suministrar una corriente máxima en régimen continuo de 40 amperios, con tensiones típicas de 12 o 24 voltios. El fabricante certifica que dicho *driver* es capaz de soportar una corriente de 60 amperios durante 2 segundos y picos de arranque de 100 amperios.

Las comunicaciones con el *driver* se pueden realizar o a través de puerto CAN con velocidad de hasta 1 Mbps, o por puerto RS232 (*Recommended Standard 232*). El *driver* es completamente configurable a través de cualquiera de los dos puertos.

Posee un microcontrolador de 32 bit que implementa un control en lazo abierto de tensión, así como un control en lazo cerrado de velocidad, posición o corriente. Para cerrar el lazo de control dispone de una entrada (encoder/potenciómetro).

En la tabla 4.2 se muestran un resumen de sus características [Texas Instrument, 2010].

TABLA 4.2: Características del MDL-BDC24

Alimentación (V)	Corriente máxima (A)	Interface	Puertos de entrada	Modos de control
6 – 30	40	RS232/CAN	Encoder/ potenciómetro	Corriente Tensión Velocidad Posición

4.2 MODO DE FUNCIONAMIENTO Y CONEXIONADO

Para realizar las pruebas necesarias, con objeto de identificar los parámetros del modelo de la dirección del vehículo (capítulo 5) e implementar posteriormente el controlador, se opta por montar el esquema de funcionamiento que se muestra a continuación.

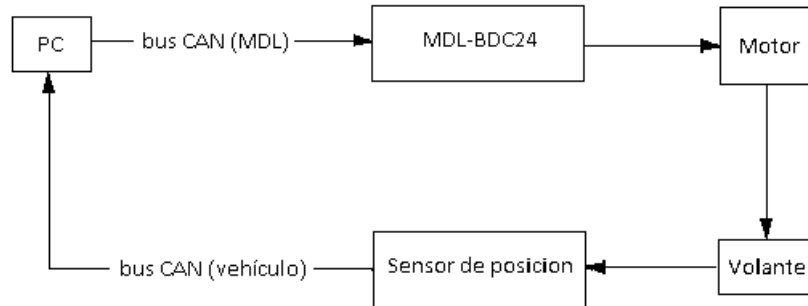


FIGURA 4.2: Esquema de funcionamiento

En la figura 4.2, se observan los componentes de los que se dispone, así como su interconexión.

Como se ha indicado en el apartado anterior, el *driver* de motores MDL-BDC24 tiene distintos modos de control. Para este trabajo se ha optado por utilizar la regulación en tensión. En este modo, el *driver* pone a la salida un voltaje en forma de PWM (*Pulse Width Modulation*), que es función del dato de tensión que se le manda a través su bus CAN.

El funcionamiento del sistema es sencillo. El PC envía los ajustes necesarios (modo de funcionamiento, valor deseado de voltaje) al *driver*, a través de su bus CAN propio. Este alimenta al motor con dicha tensión para empezar el movimiento. Al mismo tiempo, el sensor de posición del volante manda la posición real de este a través del bus CAN del vehículo. El PC recibe esta información, calculando a través del PID (implementado en PC), el voltaje que se debe aplicar al motor para mover la dirección hacia la posición deseada y cerrando así el lazo de control.

Nota: el uso de dos bus CAN diferentes en el montaje viene justificado por la imposibilidad de introducir tramas en el bus CAN del vehículo.

4.3 NECESIDADES ADICIONALES

Cuando se intenta llevar a cabo la implementación desarrollada anteriormente, el calculador de la DAE y el *driver* MDL-BDC24 entran en conflicto al intentar comandar el motor a la vez; esto hace necesario la creación de dos circuitos independientes que controlen al motor de la dirección. A través de un interruptor, emplazado en el salpicadero, se podrá elegir entre un circuito u otro, cambiando así el modo de funcionamiento de la dirección, ya sea a través del calculador de la DAE (giro del

volante de forma manual) o con el *driver* MDL-BDC24 (giro del volante de forma automática).

Para llevar a cabo el cambio entre manual y automático, se ha construido un circuito de relés, que conmuta tanto la alimentación del calculador DAE como del MDL-BDC24, al igual que sus señales de control mandadas al motor de la dirección.

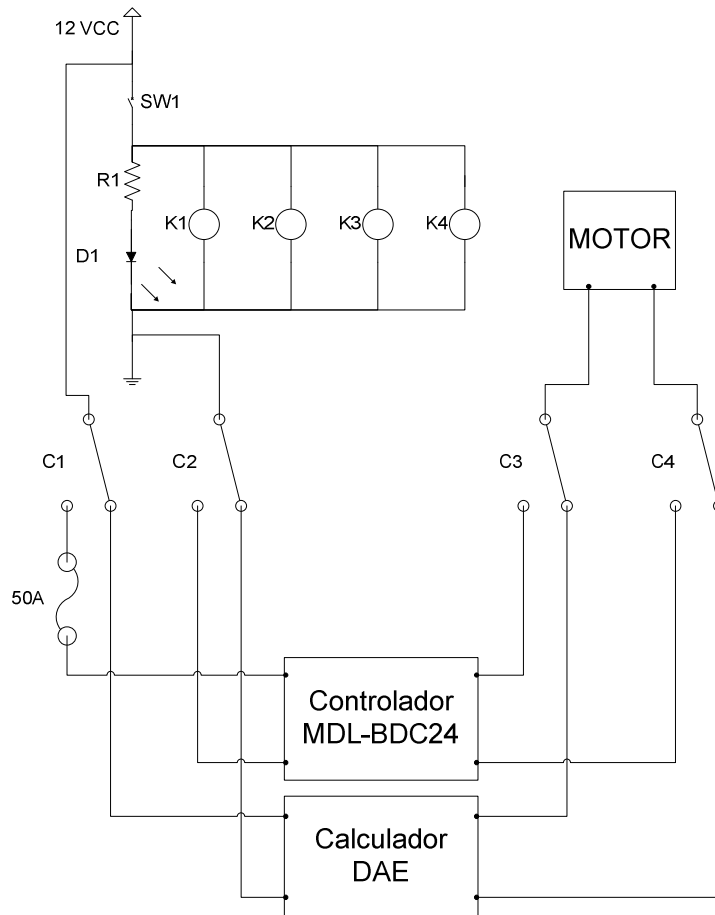


FIGURA 4.3: Esquema de conexiones

En la figura 4.3 se muestran el esquema del circuito de relés. Los cuatro relés (K1-K4) con contactos conmutados (C1-C4) son los encargados de manejar la corriente necesaria. Cuando el interruptor (SW1) está abierto, el circuito alimenta al calculador de la DAE, haciendo que el sistema funcione en modo manual. Por el contrario, si el interruptor se cierra, las bobinas de los relés se excitan provocando que los contactos conmuten y pongan en funcionamiento al MDL-BDC24, activando el sistema para su funcionamiento en modo automático.

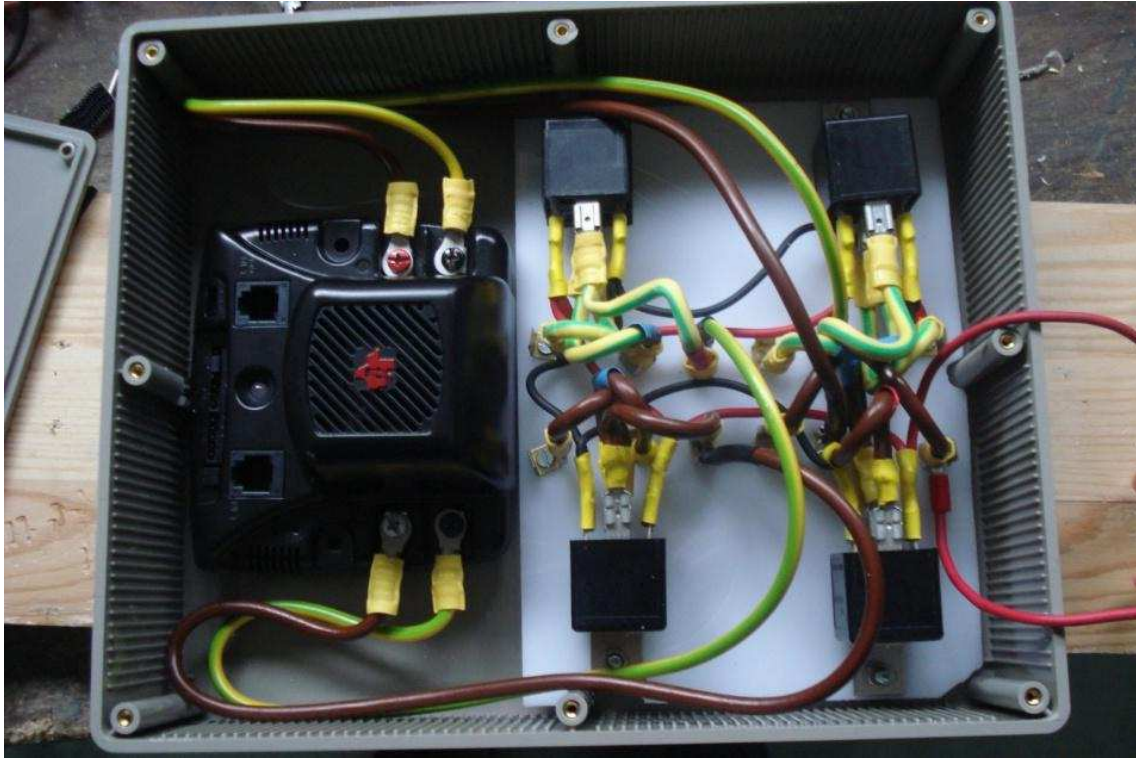


FIGURA 4.4: Tarjeta del relés con MDL-BDC24

En la figura 4.4 se muestra una fotografía real de la tarjeta de relés con el MDL-BDC24. Para dar mayor protección y mejor manejabilidad a la hora de emplazar los componentes, se ha utilizado una caja para su montaje.

4.3.1 COMUNICACIÓN CON EL ORDENADOR

Como se ha comentado anteriormente, tanto para comunicar el ordenador con el MDL-BDC24, como para obtener el dato de posición del volante, se usa el bus CAN. Por lo tanto, necesitamos un dispositivo que sea capaz de transformar las tramas CAN en tramas de un puerto de comunicaciones estándar de los ordenadores. El programa AUTOPIA ya tiene experiencia en este tipo de comunicaciones y por lo tanto se decide usar el mismo dispositivo que se había utilizado en proyectos anteriores; este dispositivo es el denominado CANUSB de la casa Lawicel. Funciona a modo de puente entre el protocolo CAN y el protocolo USB (Universal Serial Bus). En la figura 4.5 se muestra una imagen del dispositivo.



FIGURA 4.5: Lawicel CANUSB

Dispone de unas librerías definidas para lenguaje C++, que se utilizan en su programación.

CAPÍTULO 5

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Una vez montado el sistema y en funcionamiento, la siguiente tarea es la identificación de un modelo de la dirección que permita diseñar el controlador que mejor se ajuste al sistema y a las especificaciones de control. Como la carga es compleja de modelar debido a que depende de la geometría de la dirección y la interacción del neumático con el firme [Gillespie, T.D. 1992]; se ha separado el proceso. En primer lugar modelando los parámetros de la dirección en vacío, es decir, motor más geometría de la dirección; en segundo lugar, y una vez obtenidos dichos parámetros, se pasa a modelar la interacción neumático-suelo de una forma aproximada. Por último se presentan los resultados de las simulaciones.

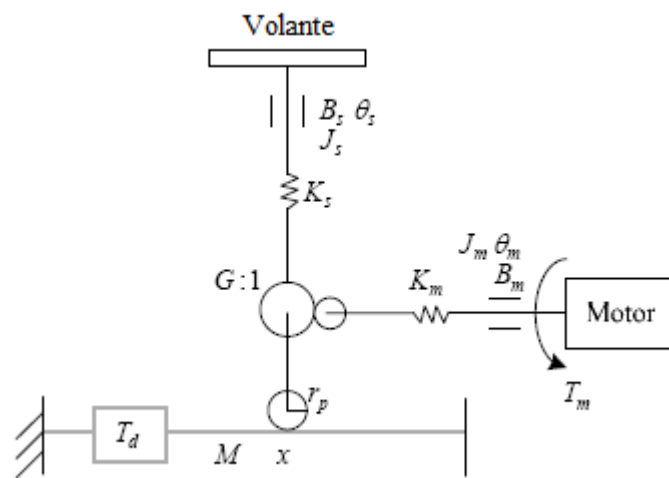


FIGURA 5.1: Esquema físico de una DAE

En la figura 5.1 se muestra el esquema, en términos físicos, de la dirección completa, donde:

T_m	Par motor.
T_d	Par neumático-firme.
G	Relación de reducción.
K_m, J_m, B_m	Rigidez, inercia, y rozamiento viscoso del motor con la reductora.
K_s, J_s, B_s	Rigidez, inercia, y rozamiento viscoso de la barra de la dirección.
M	Masa del piñón cremallera.
x	Desplazamiento de la cremallera.
θ_s, θ_m	Giro de la columna de la dirección, y giro del motor.

En el caso que nos ocupa, sabemos que el motor mueve todo el mecanismo. Como se ha comentado en el párrafo anterior, la interacción neumático-firme T_d , será eliminada en primera aproximación; más adelante será tomada en cuenta.

5.1 MODELADO DE LA DIRECCIÓN

En este apartado, se va a modelar la dirección del vehículo, es decir, se va a eliminar la interacción neumático-suelo, consiguiendo de esta forma obtener los parámetros que corresponden al sistema en vacío. Con este fin y para simplificar el proceso de modelado, se ha incluido todo el modelo dinámico de la dirección como si fuese una carga conectada a un motor eléctrico convencional, tal como muestra la figura 5.2.

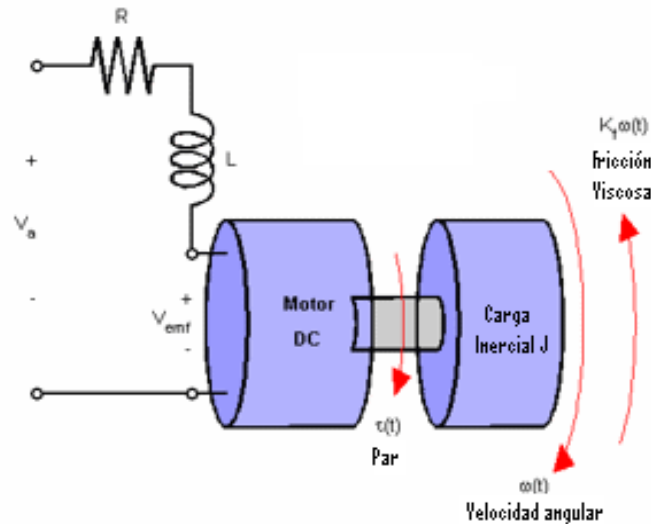


FIGURA 5.2: Esquema físico de la dirección

A partir del esquema físico simplificado mostrado en la figura 5.2, y de las ecuaciones de un motor de corriente continua, tenemos:

$$T_m = K_m \cdot i \quad (5.1)$$

$$T_m = J \frac{d\omega}{dt} + K_f \cdot \omega + T_d \quad (5.2)$$

$$V_a = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + K_b \cdot \omega \quad (5.3)$$

donde i es la corriente que circula por el motor; ω es la velocidad angular; R , L y K_m son la resistencia, la inductancia y la constante de fuerza electromotriz respectivamente; J y K_f son la inercia y el rozamiento viscoso de la dirección; T_d es la carga debida a la

interacción neumático suelo y K_b la constante de par; T_m corresponde al par generado por el motor, y V_a es la tensión de alimentación.

Se puede aproximar la dinámica de la dirección mediante un diagrama de bloques como el que aparece en la figura 5.3, en el que cada subsistema se supone lineal y se modela con una función de transferencia. [MATLAB. 2010].

En la figura 5.3 se observa la relación de dependencia que existe entre los componentes eléctricos (R , L y K_m) y mecánicos (J , K_f) de la dirección, así como dónde afectaría la carga (T_d) en el modelo y en qué medida (K_b).

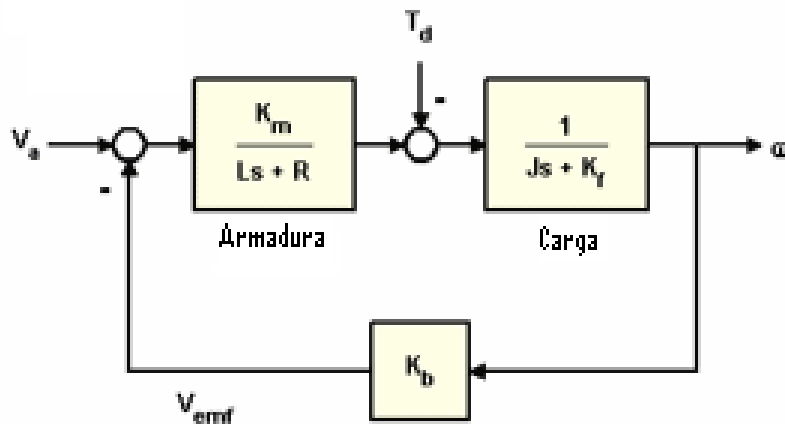


FIGURA 5.3: Diagrama de bloques de la dirección

Como nota aclaratoria, y debido a que el motor está montado en la dirección, los valores estimados de J y K_f serán los que corresponden al motor más la geometría de la dirección.

En la tabla 5.1 se muestran las unidades en el *Sistema Internacional* de cada parámetro.

TABLA 5.1: Unidades en el S.I. de los parámetros

	Unidades
K_m	N.m/Amp.
R	Ohms.
L	Henrios
J	Kg.m ²
K_f	N.m/rad/s
K_b	V/rad/s

5.1.1 PRUEBAS REALIZADAS

Para conseguir los valores del modelo del sistema se han realizado una serie de pruebas que se detallan a continuación. Para eliminar la influencia de la carga debido a la interacción neumático-suelo, dichas pruebas se han realizado en vacío, es decir, con el eje directriz del vehículo en el aire.

Estas pruebas han consistido en someter al motor de la DAE a diferentes escalones de tensión, observando la posición y la velocidad alcanzada para cada uno de ellos. De experiencias anteriores [Paz, H. 2007], se sabe que existe, debido a la geometría de la dirección, dos zonas que deben ser tratadas de forma independiente; estando estas delimitadas por el ángulo que forman las ruedas con el eje longitudinal del vehículo. Si las ruedas están orientadas inicialmente en un ángulo 0, el vehículo marcha en línea recta; por construcción de la dirección, el vehículo tiende a mantener la trayectoria rectilínea. En este caso, la fuerza resistente que tendrá que vencer el motor para alcanzar la posición deseada será mayor, debido a dicha tendencia de la dirección. A esta zona la denominamos *zona dura*.

Si por el contrario, las ruedas se encuentran orientadas hacia la derecha o hacia la izquierda, y su posición deseada fuese el centro, la fuerza resistente, por el mismo efecto de la dirección, será menor, con lo que el motor ejercerá un par menor para realizar el movimiento. A esta zona la denominamos *zona blanda*.

En las gráficas que se presentan a continuación se puede observar dicho efecto.

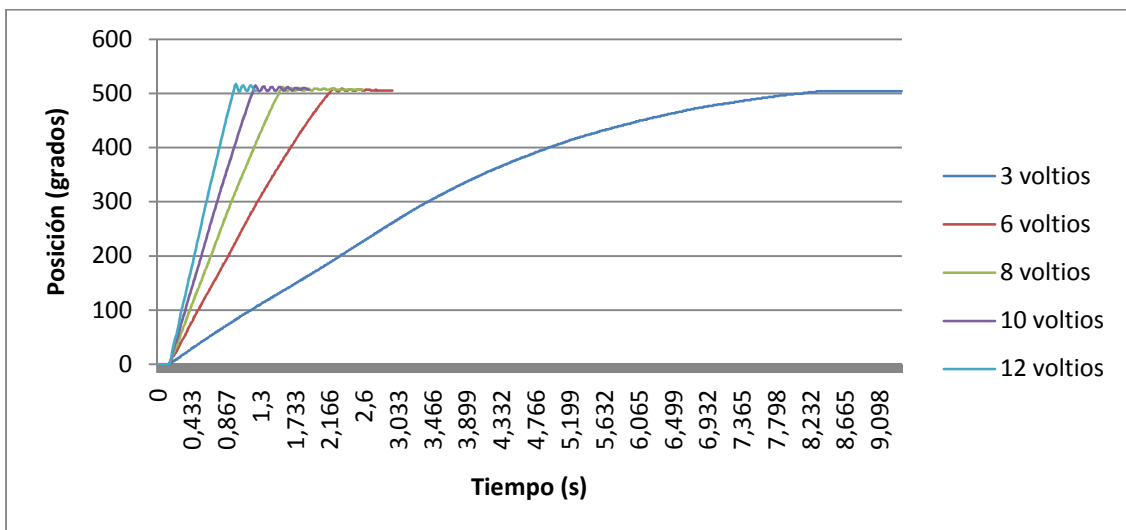


FIGURA 5.4: Posición del eje de la dirección en zona dura

En la figura 5.4 se muestra la evolución de la posición, en la *zona dura*, con diferentes escalones de tensión, comprendidos entre 3 y 12 voltios. Se observa como, a medida que aumentamos la tensión, aumenta la velocidad y por consiguiente disminuye el tiempo de la prueba. En todos los supuestos se ha llegado a la posición final de 500 grados.

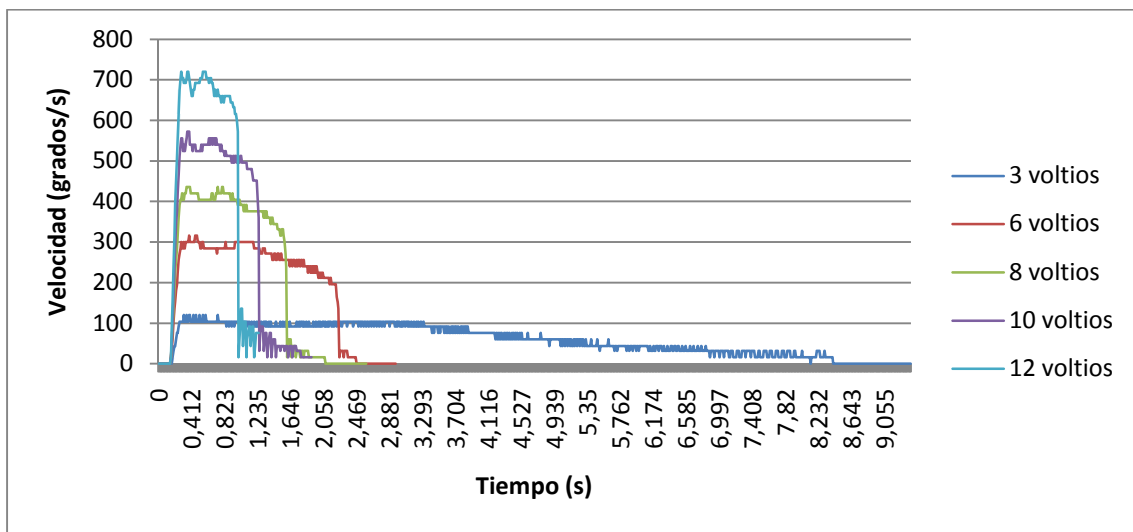


FIGURA 5.5: Velocidad del eje de la dirección en zona dura

En la figura 5.5 se muestra la evolución de la velocidad del eje de la barra de la dirección a los distintos escalones. Como se ha apuntado antes, la velocidad aumenta al aumentar el escalón. Cuando la dirección llega a los 500 grados aproximadamente, da con el tope del mecanismo y provoca una caída brusca de la velocidad, así como rebotes en ella debido a la inercia que llevan las ruedas. Otro efecto destacable es la disminución de la velocidad a medida que nos alejamos de la posición central (0 grados) debido a la resistencia ofrecida por la geometría de la dirección.

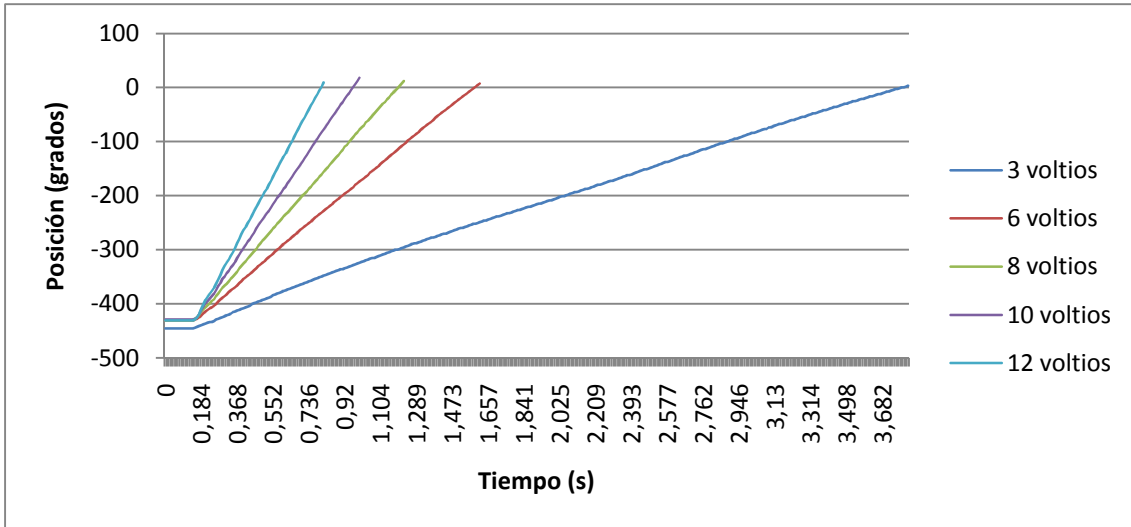


FIGURA 5.6: Posición del eje de la dirección en zona blanda

En la figura 5.6 se muestra el efecto de la *zona blanda*. Para ello se parte de un ángulo -430 grados (vehículo con la dirección girada hacia la derecha) y se busca la posición central del volante.

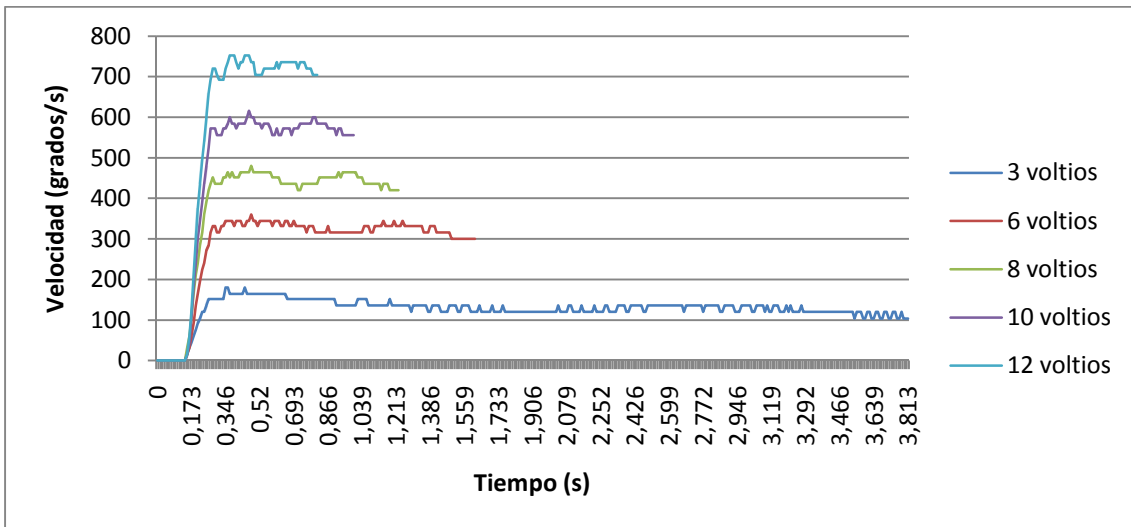


FIGURA 5.7: Velocidad del eje de la dirección en zona blanda

En la figura 5.7 se muestra la velocidad alcanzada por la barra de la dirección en las pruebas correspondientes a la *zona blanda*. Ahora se observa claramente que la velocidad en todo el recorrido permanece constante.

Nótese que al principio de las gráficas anteriores (figura 5.4 – 5.7), existe un pequeño retardo de unos 0.15 segundos. Este se tendrá en cuenta en la modelización.

Si se comparan las gráficas de la figuras 5.4 y 5.5 con las gráficas de las figuras 5.6 y 5.7, se puede distinguir perfectamente la influencia de cada una de las zonas; para

un mismo recorrido, los resultados son diferentes, siendo este efecto más acusado cuanto menor es el valor del escalón aplicado.

5.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LA DIRECCIÓN

Tal y como se introdujo anteriormente, la dirección del vehículo se puede aproximar a un modelo con dos subsistemas supuestos lineales, definido, como es bien sabido, por unas constantes eléctricas (K_m , L , R) y mecánicas (J , K_f , K_b). Según [MATLAB. 2010], el parámetro K_m es equivalente en magnitud a K_b , cuando se representan en unidades del *Sistema Internacional*, lo que facilita la identificación, al igualarse ambos parámetros.

El modelo utilizado para la parametrización es el que se muestra en la figura 5.8. Este es el modelo matemático en velocidad de un motor de corriente continua, [MATLAB. 2010], cuando la carga externa, T_d , es nula.

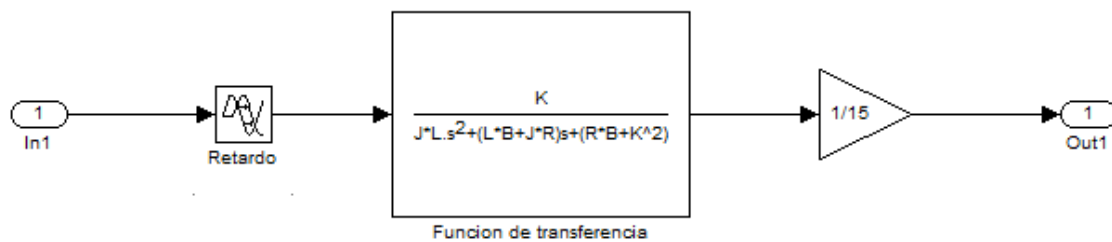


FIGURA 5.8: Modelo en velocidad de un motor CC

Como se ha comentado en el apartado anterior, se ha tenido que introducir un retardo de 0.15 segundos para el correcto funcionamiento del sistema, al igual que una ganancia a la salida (relación de transmisión), que establece la relación entre las velocidades del motor y las de la barra de la dirección, que es la medida obtenida en las pruebas.

Tanto para los resultados de la *zona blanda* como para los resultados de la *zona dura*, se ha utilizado el modelo mostrado en la figura 5.8.

Para llevar a cabo la identificación, se ha utilizado la herramienta *Parameter Estimation* de *Simulink*, utilizando varios algoritmos de identificación. Puesto que no se conocen a priori que valores se deben obtener, se usa en primer lugar el algoritmo

denominado *Pattern Search*⁶, el cual busca valores de forma arbitraria. Una vez que se han encontrado los valores que se adaptan, se afinan dichos parámetros mediante el algoritmo denominado *Nonlinear Least Squares*⁷, el cual busca una mejor aproximación, pero esta, ya más cercana al valor inicial de las variables obtenido por el algoritmo *Pattern Search*. Para realizar la aproximación todos los algoritmos minimizan el valor de la *función de coste*⁸, esta función nos da una idea del error cometido en la aproximación; cuanto menor sea dicho valor, más se ajustará el modelo a la realidad.

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para cada zona.

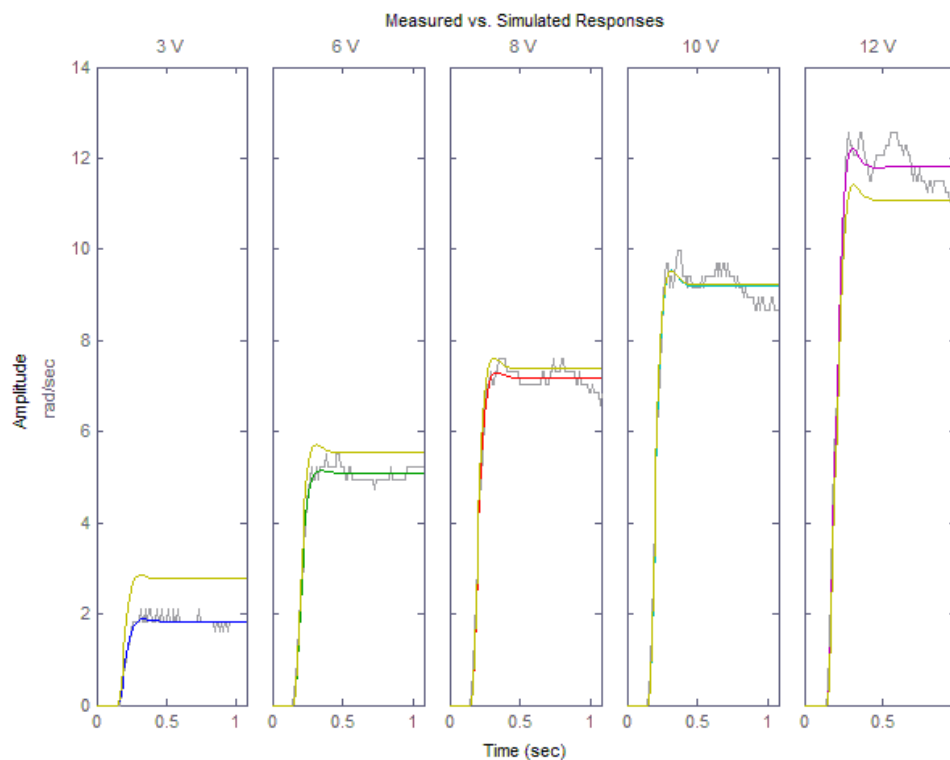


FIGURA 5.9: Respuesta real y simulada del sistema en zona dura

En la figura 5.9 se muestra la respuesta del sistema real y el simulado para los diferentes escalones de tensión, observándose una gran similitud entre ambos. Destacar que en todas las columnas de la simulación aparece una línea amarilla, correspondiente a una simulación extra, calculada usando todos los escalones al mismo tiempo, para obtener los parámetros de la función de transferencia. Remárquese igualmente, que si se

⁶ Algoritmo iterativo determinista utilizado para optimización de valores. [Pattern Search. 2010]

⁷ Algoritmo que utiliza los mínimos cuadrados para aproximar un conjunto de valores a un modelo de función no lineal. [Nonlinear. 2010].

⁸ Valor a minimizar. Este valor da una idea del error cometido al aproximar un conjunto de valores a una función.

intenta modelar el sistema con todos los escalones a la vez, como muestra la línea amarilla de la gráfica, se observa que a tensiones bajas el ajuste es malo, influenciado por el aumento de la resistencia de la *zona dura*. A medida que va aumentando la tensión, la simulación se ajusta más a la calculada para cada uno de los escalones.

En la figura 5.10, al igual que en la figura 5.9, se muestra la respuesta del sistema real y del simulado, pero en este caso correspondientes a la *zona blanda*.

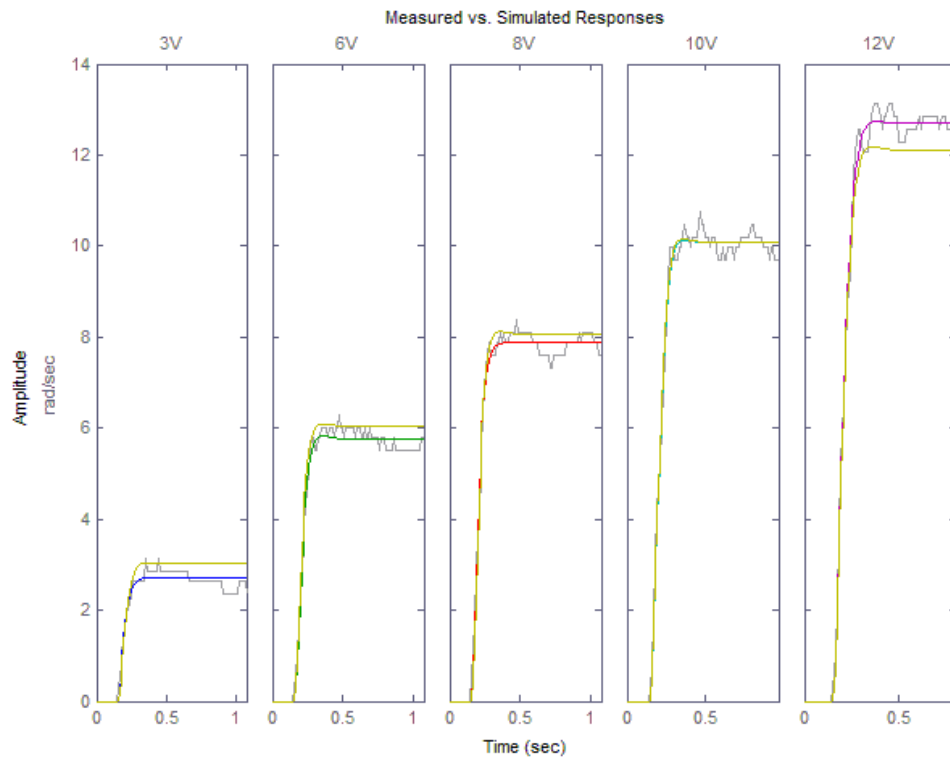


FIGURA 5.10: Respuesta real y simulada del sistema en zona blanda

Como se observa en la figura 5.10, el modelo calculado utilizando todos los escalones a la vez, representado por la línea amarilla en las gráficas, se ajusta de mejor manera que en la figura 5.9. Obviamente aquí ya no existe la influencia de la carga de la *zona dura*, y por tanto el sistema se comporta de una forma más lineal.

En las tablas que se muestran a continuación se exponen los resultados de los valores de las variables (K_m , R , L , J , K_f), así como la *función de coste*.

TABLA 5.2: Valores estimados en zona dura

	3 V	6 V	8 V	10 V	12 V	Todos
K_m	0,056095	0,05495	0,055028	0,056247	0,054795	0,052572
R	0,53468	0,51527	0,53687	0,5272	0,52192	0,49295
L	0,019917	0,012336	0,013126	0,014871	0,01342	0,013455
J	0,00045329	0,00041809	0,00037555	0,00035489	0,00031598	0,00034057
K_f	0,005525	0,0025134	0,0019675	0,0017328	0,0013597	0,0020929
F.cost	0,94182	2,707	4,482	9,6798	15,168	167,14

La tabla 5.2 muestra los valores para la *zona dura*, y la tabla 5.3 muestra los valores para la *zona blanda*.

TABLA 5.3: Valores estimados en zona blanda

	3 V	6 V	8 V	10 V	12 V	Todos
K_m	0,050923	0,053234	0,057026	0,055233	0,054072	0,056882
R	0,49105	0,56623	0,57108	0,49984	0,46373	0,47806
L	0,0081766	0,014143	0,0097502	0,010616	0,009646	0,01016
J	0,00036362	0,00035989	0,00036973	0,00041412	0,00043022	0,00044133
K_f	0,0023814	0,0015143	0,0010689	0,0012048	0,0010421	0,001092
F.cost	2,8628	3,5008	4,9218	4,6371	4,8381	55,292

A la hora de elegir los parámetros que componen la función de transferencia, se tendrá en cuenta que la dirección va a trabajar en tensiones medias, por lo que se decide usar los parámetros obtenidos en la simulación donde se emplean todos los datos capturados (véase línea amarilla). Por otro lado, como la zona blanda y dura tienen un comportamiento muy similar, se tomará la media de los valores anteriores, que se muestran en la tabla 5.4, para determinar el modelo definitivo usado en la sintonización del controlador.

TABLA 5.4: Valores para modelo definitivo

K_m	0,054727
R	0,485505
L	0,0118075
J	0,00039095
K_f	0,00159245

Para terminar con este apartado, sólo comentar que debido a que estamos buscando 5 parámetros, la cantidad de conjuntos de valores que se ajustan al modelo es innumerable; por lo que, una vez obtenidos los parámetros, se tuvo que comprobar que el modelo matemático obtenido, se comportaba de forma similar al real, tanto en velocidad como en corriente del motor.

5.2 MODELADO DE LA CARGA

En esta sección, se presenta la modelización de la carga, es decir, la interacción neumático-suelo. En el Anexo A, se analiza cualitativamente el modelo físico del neumático, con objeto de comprender los efectos que se observarán durante las pruebas realizadas.

El modelo de carga está basado en un modelo simplificado, que permite, de forma aproximada, hacernos una idea del par que tendrá que vencer el motor al realizar el giro de la dirección.

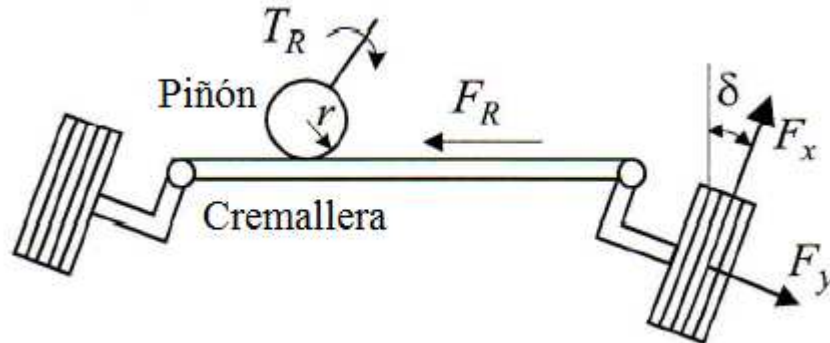


FIGURA 5.11: Modelo simplificado piñón-cremallera

En la figura 5.11, se muestra la interacción de los neumáticos con el sistema de dirección. La fuerza lateral F_y , y longitudinal F_x , de las ruedas son transmitidas a la barra de la dirección a través de la cremallera. Este efecto viene representado por F_R ; T_r , representa el par que genera dicha fuerza en la barra de la dirección y r es el radio del piñón del mecanismo; δ representa el ángulo lateral que forma las ruedas con el eje longitudinal del vehículo.

De [Kim, J-H. 2002], se sabe que las ecuaciones que rigen estas fuerzas son:

$$F_x = \frac{AK_x s}{1-s} \quad (5.4)$$

$$F_y = \frac{AK_y \tan(\alpha)}{1-s} \quad (5.5)$$

donde K_x y K_y representan la rigidez longitudinal y transversal del neumático, y A , s , α son el área de contacto del neumático con el firme, la relación de deslizamiento y el ángulo de deslizamiento respectivamente. Todos estos parámetros son lo que hacen tan complicado el modelaje de esta interacción.

La fuerza F_r que se transmite a la cremallera es:

$$F_r = F_x \sin(\delta) + F_y \cos(\delta) \quad (5.6)$$

Con lo que el par que le llega a la columna de la dirección será

$$T_r = F_r \cdot r = \left(\frac{AK_x s}{1-s} \sin(\delta) + \frac{AK_y \tan(\alpha)}{1-s} \cos(\delta) \right) \cdot r \quad (5.7)$$

De varios estudios realizados anteriormente [Kim, J-H. 2002] y [Liu, Q. 2007], sabemos que dicho par se puede aproximar a un comportamiento lineal con el ángulo de giro de las ruedas. Por lo que el par se puede describir como una carga genérica T_d .

$$T_d = K \cdot \delta \quad (5.8)$$

donde K corresponde a la constante de par en posición.

Notar que en los estudios citados anteriormente, las pruebas han sido realizadas con la velocidad del vehículo no nula (vehículo en marcha), donde el rozamiento del neumático con el firme no influye tanto como en las pruebas realizadas en este proyecto.

Las pruebas se han realizado con el vehículo en el suelo, (cemento seco) y con velocidad longitudinal nula, es decir, vehículo parado. En esta situación, además de la carga de la ecuación 5.8, debemos tener en cuenta el rozamiento que existe entre el neumático y el firme, así como la inercia del sistema completo. Por lo que, de acuerdo con las leyes de la dinámica de Newton, la dinámica de la carga sería la que se muestra en la ecuación (5.9).

$$T_d = J_s \cdot \ddot{\delta} + B \cdot \dot{\delta} + K \cdot \delta \quad (5.9)$$

donde J_s , B y K corresponden a la inercia, el rozamiento viscoso y la constante de par en posición respectivamente.

Ahora el problema queda reducido a la obtención de las constantes J_s , B y K , por lo que al modelo de motor de corriente continua obtenido en el apartado 5.1, se le añade una carga externa que cumpla la ecuación (5.9).

5.2.1 PRUEBAS REALIZADAS

Como se comenta al final del apartado 5.2, estas pruebas se han realizado con velocidad longitudinal del vehículo nula y con las ruedas apoyadas en el suelo (cemento seco). Al igual que para la modelización del motor (apartado 5.1) la pruebas consisten en la respuesta de la dirección a diferentes escalones de tensión, del mismo modo, también se ha distinguido entre *zona dura* y *zona blanda*. Destacar ahora, que para poder observar los datos correctamente, y debido a que a bajas tensiones el tiempo de realización de la prueba aumentaba considerablemente, se ha decidido limitar el tiempo que se muestra en las graficas siguientes a 10 segundos aproximadamente.

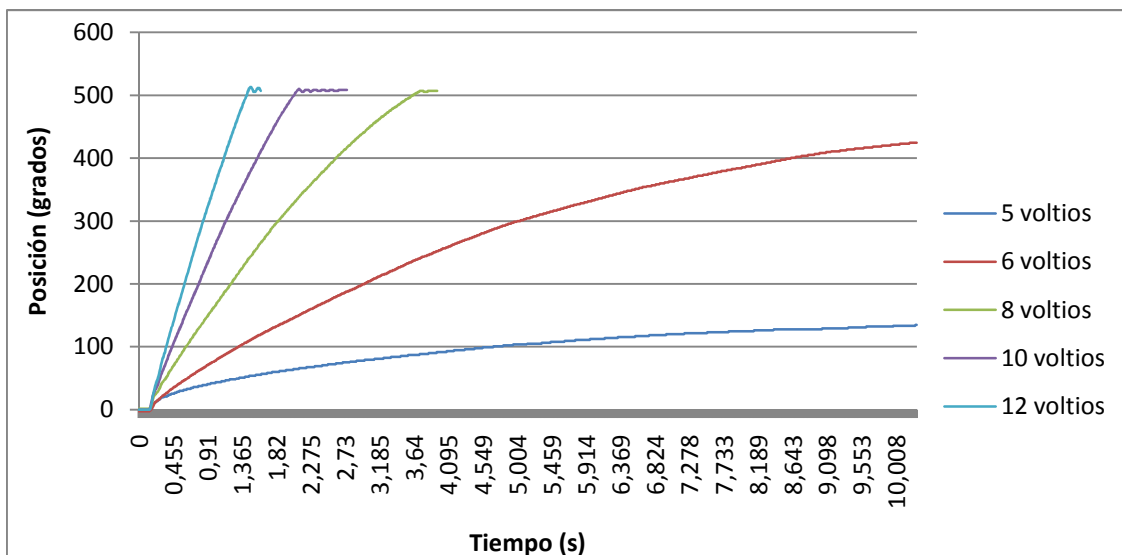


FIGURA 5.12: Posición del eje de la dirección en zona dura con carga

En la figura 5.12 se puede observar la evolución de la posición de la barra de la dirección en zona dura. Cabe destacar que ahora, y debido a la carga, la tensión mínima

con la que se han realizado las pruebas ha sido de 5 voltios, pues a tensiones inferiores el tiempo de realización se extendía demasiado, comprobando que a tensiones menores de 3 voltios, el sistema no se movía. En las gráficas se observan que a bajas tensiones (5 y 6 voltios) la posición alcanzada no es la máxima de la dirección, obviamente influenciado por la carga existente.

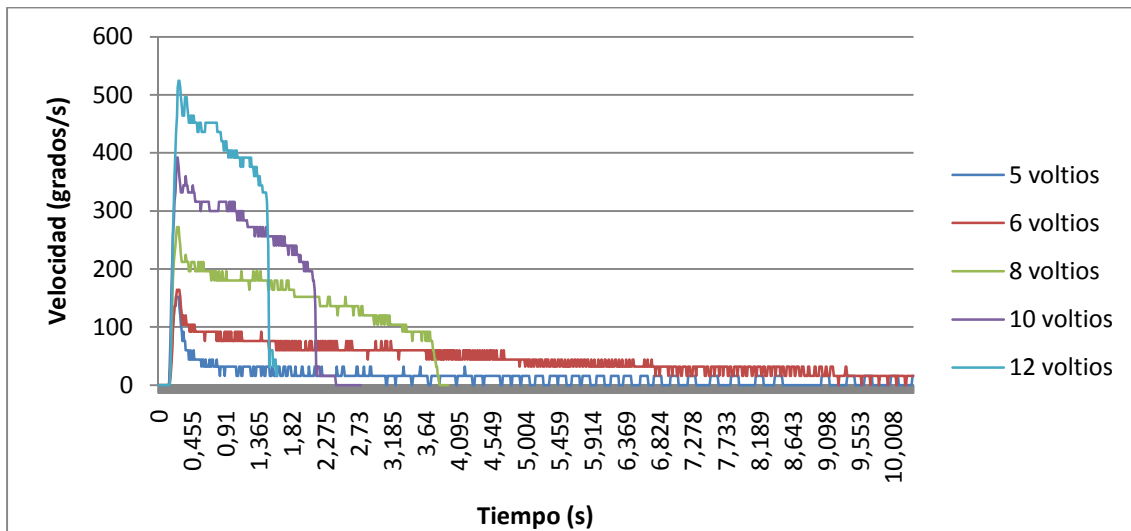


FIGURA 5.13: Velocidad del eje de la dirección en zona dura con carga

En la figura 5.13 se muestra la evolución de la velocidad para cada escalón de tensión. En la gráfica se observa como la velocidad va disminuyendo a medida que nos alejamos de la posición inicial (0 grados); esto está en concordancia con lo obtenido en el modelo, es decir, la carga depende de la posición del neumático. En las gráficas obtenidas para los escalones de 8, 10 y 12 voltios, se puede ver una caída brusca de velocidad, al igual que pasaba en la figura 5.5 del apartado 5.1.1, esta es debida a que el sistema llega al final de su recorrido; la única diferencia existente, es que ahora no se producen rebotes, pues esos rebotes son absorbidos por el neumático al estar apoyado en el suelo. Otro efecto a destacar es el pico de velocidad que se observa al principio, motivado por la rigidez transversal del neumático, es decir, el neumático se deforma antes de que se llegue a crear deslizamiento entre él y el suelo, lo que produce este incremento de velocidad. Cuando el neumático empieza a deslizarse por el suelo, la velocidad cae de forma brusca, para luego decrecer paulatinamente en función del ángulo de posición de las ruedas (δ). Este efecto es más acusado cuanto menor es la tensión que se aplica.

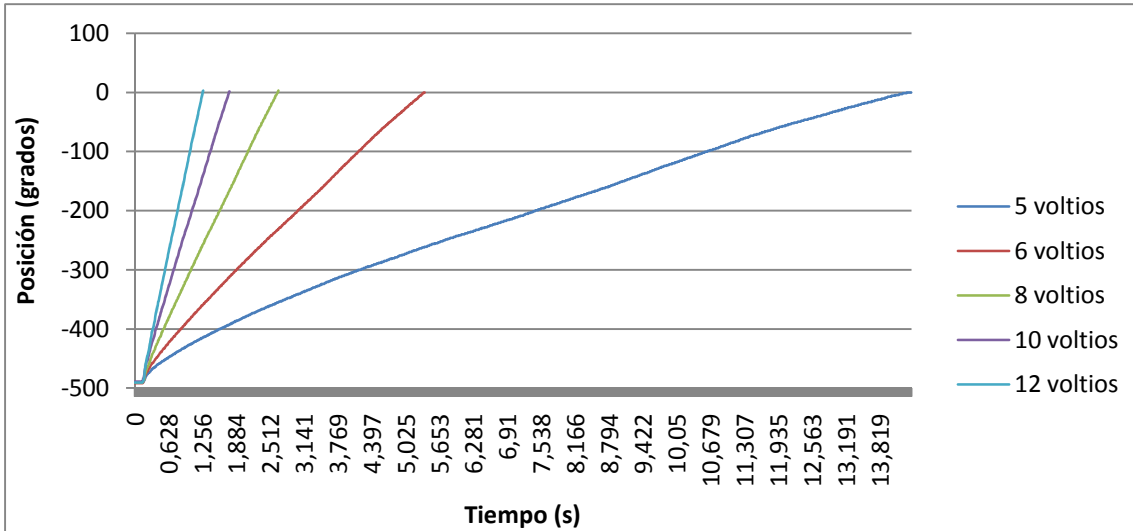


FIGURA 5.14: Posición del eje de la dirección en zona blanda con carga

En la figura 5.14, se muestra la evolución de la posición, partiendo desde un ángulo de -490 grados hasta llegar al centro. En la *zona blanda* se llega a realizar el movimiento completo para todos los escalones de tensión, a diferencia de lo que sucedía en *zona dura*.

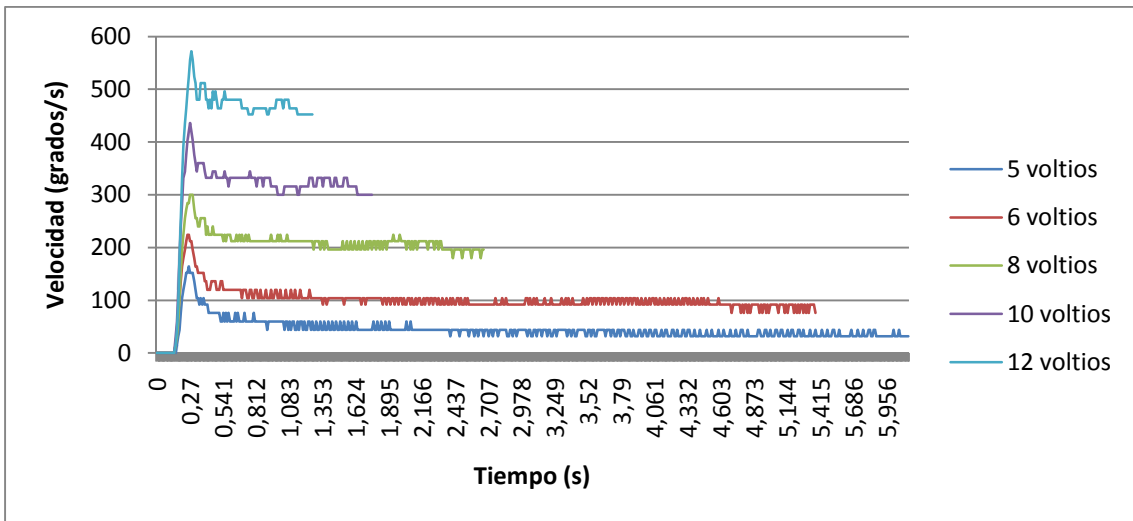


FIGURA 5.15: Velocidad del eje de la dirección en zona blanda con carga

En la figura 5.15, se muestra la velocidad de la barra de la dirección en *zona blanda* con carga; esta vez, la velocidad permanece constante durante todo el recorrido. Al igual que ocurría en la figura 5.7 del apartado 5.1.1 la prueba se ha parado cuando se llega a la posición central, para no mostrar en la gráfica el efecto de la *zona dura*. Como se comentó en la figura 5.13, al principio de las gráficas se observa un pico de

velocidad, que al igual que en la *zona dura*, está motivado por la rigidez transversal del neumático. Destacar que en la *zona blanda* ese efecto es más acusado, pues en esta zona, la influencia de la posición del neumático en el par es menor, como se comprobará experimentalmente en los valores obtenidos en la identificación.

5.2.2 IDENTIFICACION DE LA CARGA

Una vez realizadas las pruebas, queda obtener el valor de las constantes que cumplan la ecuación (5.9). Antes de mostrar el esquema seguido para calcular los parámetros, comentar que al hacer dicha obtención, se observó que la constante J_s , que cuantifica la influencia de la aceleración (véase ecuación 5.9), era cero para todos los casos, lo que resulta lógico, pues ese parámetro quedó absorbido en la identificación del mecanismo de la dirección y el motor, por lo que se elimina del esquema.

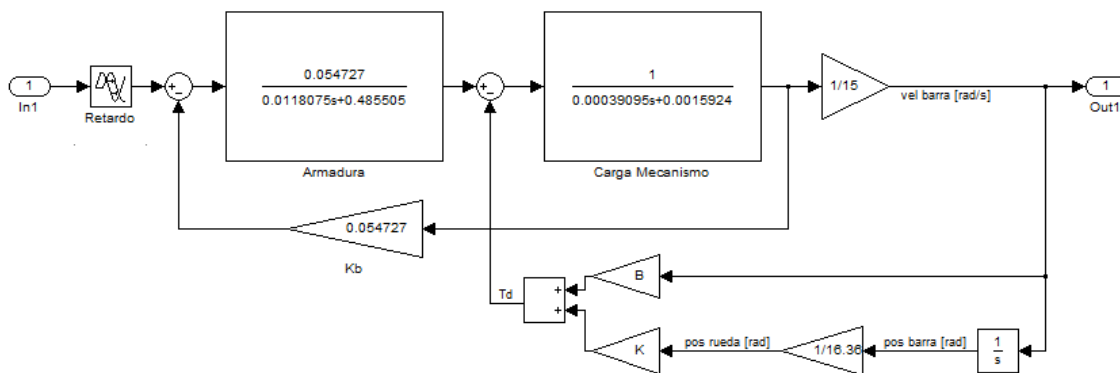


FIGURA 5.16: Modelo del sistema con carga

En la figura 5.16, se muestra el esquema utilizado para la obtención de los parámetros K y B , que cuantifican la influencia de la posición lateral de la ruedas y de la velocidad en dicho desplazamiento. Este esquema es equivalente al presentado en la figura 5.8, la diferencia estriba en que se ha separado la *Armadura* de la *Carga del Mecanismo*, para así poder tener en cuenta el efecto de la carga T_d . Notar que para la obtención de K utilizamos una ganancia con valor $1/16.36$ (véase capítulo 3), que es la relación que existe entre el ángulo de giro de la barra de la dirección y el ángulo de posición de la rueda referida al eje longitudinal del vehículo (δ). Al igual que para la identificación de la dirección se utiliza el mismo modelo tanto para la *zona dura* como para la *zona blanda*, así como las herramientas utilizadas para la obtención del valor, utilizando de igual forma los algoritmos *Pattern Search* y *Nonlinear Least Squares*.

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para cada una de las zonas.

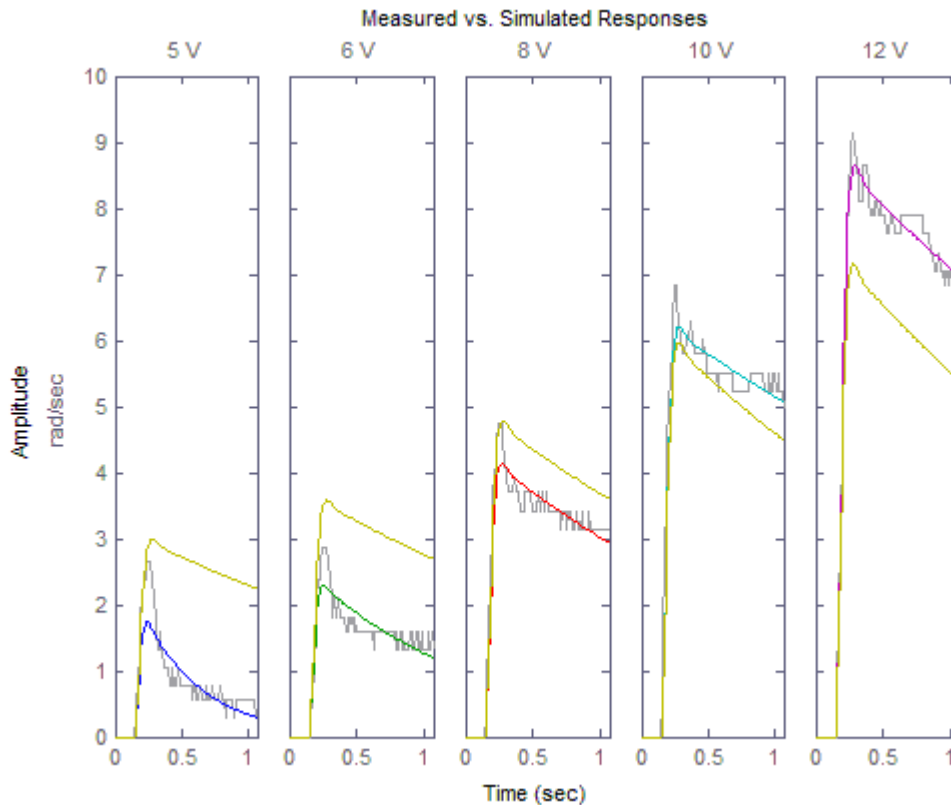


FIGURA 5.17: Respuesta real y simulada del sistema con carga en zona dura

En la figura 5.17 se presenta la comparación entre la respuesta del sistema real y simulado para los diferentes escalones de tensión para la *zona dura*. Se observa como el sistema simulado se ajusta de una forma bastante precisa para cada escalón individualmente. Existe una línea amarilla que se ha obtenido utilizando todos los datos de los escalones en su conjunto, esta forma tiene un mayor error a la hora de ajustarse, motivado por la no linealidad de la carga, es decir de la interacción de los neumáticos con el suelo.

Cabe destacar, que en la *zona dura*, y acorde con lo que se ha comentado anteriormente sobre la rigidez transversal del neumático (ver anexo A), el efecto de dicha rigidez, es absorbido por el modelo de carga utilizado.

En la figura 5.18, al igual que en la figura 5.17 se muestra la comparación del sistema real con el sistema simulado, pero esta vez en la *zona blanda*.

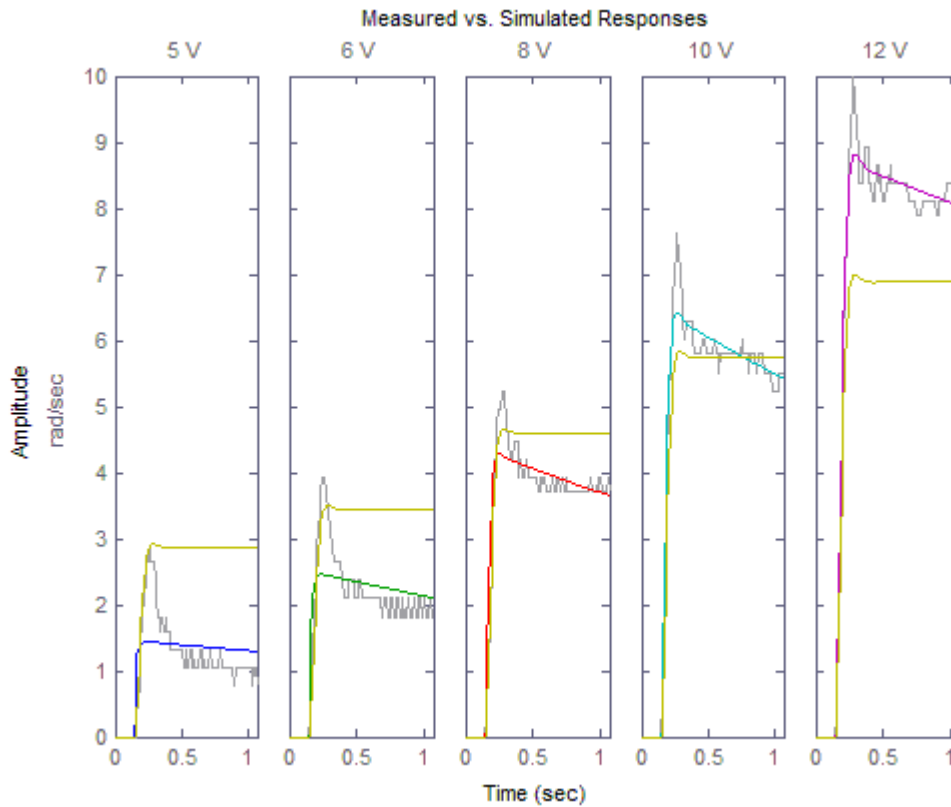


FIGURA 5.18: Respuesta real y simulada del sistema con carga en zona blanda

Se observa, en la figura 5.18, como ahora la aproximación se ajusta al pico de velocidad al principio de cada gráfica, pero de una forma menos acusada que para la figura 5.17. Obviamente, este pico viene dado por la rigidez transversal del neumático, y provoca un error en la identificación, pues es un efecto, que debido a la complejidad de su naturaleza no se ha podido separar de la carga, y a diferencia de lo que ocurre en la *zona dura*, este efecto no se puede absorber por el modelo de carga para la *zona blanda*, ya que este depende mucho más del rozamiento viscoso.

A continuación se muestran las tablas con los valores obtenidos para cada parámetro de la carga (K , B), así como la *función de coste*.

TABLA 5.5: Valores estimados en zona dura para la carga

	5V	6V	8V	10V	12V	Todos
K	10,889	3,6192	1,4342	0,69072	0,64663	1,0539
B	0,10205	0,16052	0,091988	0,057942	0,032603	0,0628
Fun. Coste	6,5033	4,4333	6,1607	12,232	4,8751	667,02

En la tabla 5.5 se muestran los valores obtenidos para la *zona dura*, y en la tabla 5.6 los valores para la *zona blanda*.

TABLA 5.6: Valores estimados en zona blanda para la carga

	5V	6V	8V	10V	12V	Todos
K	3,3426	2,3643	0,5629	0,73752	0,26479	0,0006452
B	1,5041	0,65641	0,17591	0,12701	0,062148	0,087154
Fun. Coste	19,597	18,127	9,2969	6,9033	7,8908	594,8

Como se ha comentado anteriormente, observamos que la *zona dura* tiene una mayor influencia de la posición, mientras que en la *zona blanda*, la influencia de la posición se ve disminuida, siendo mayor el efecto del rozamiento viscoso.

Puesto que la carga tiene un comportamiento tan dispar entre zonas, e incluso entre diferentes escalones de tensión para una misma zona, es lógico utilizar en lugar de unos valores únicos para todas las tensiones, los valores de cada escalón, por lo que para modelar la carga se utilizan unas *Lookup tables*⁹ para cada zona, en donde se introducen los valores de cada constante para cada nivel de tensión. Aunque como se verá en el apartado siguiente, esta idea se desechará pues provoca una enorme cantidad de discontinuidades en el par.

5.2.3 AJUSTE DEL MODELO DE CARGA

Una vez que se han modelado los parámetros de la carga, se debe comprobar si el sistema simulado se comporta como el real.

La primera dificultad que aparece es que, tal cual está planteado el sistema, sólo funciona cuando se le aplica un escalón de tensión definido. Además existe otra problemática, pues debido a que la carga depende de la posición, si la posición final de la dirección es distinta de cero, aun siendo cero la tensión aplicada al motor, dicho par tenderá a hacer girar al motor en sentido contrario, este efecto se observa mejor en la figura 5.19.

⁹ Estructura de datos que se usa para sustituir una rutina de computación por unos valores indexados. Con esto se consigue ahorrar tiempo de procesamiento.

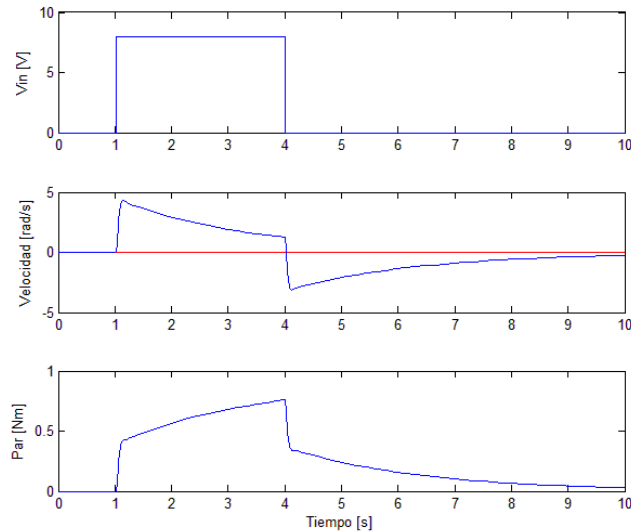


FIGURA 5.19: Efecto del par en la simulación

En la figura 5.19 se observa el efecto indeseado de la carga sobre el motor. En la primera gráfica se muestra la tensión aplicada, que es un pulso de 3 segundos de duración con una amplitud de 8 voltios. Observamos que en ese periodo de tiempo, el motor empieza a girar de forma correcta, hasta que se le suprime la tensión de alimentación; obviamente, el sistema real se queda parado en la posición a la que haya llegado, pero sin embargo, el sistema simulado experimenta una deceleración influenciada por la carga que provoca que este empiece a girar en sentido contrario. Este efecto se observa en la gráfica de la velocidad, a partir del segundo 4. Es decir, para que el sistema se comporte como uno real, el par, una vez que la velocidad del motor cae a cero, debe ser también cero, y en la grafica del par, se confirma que no es cero en ese instante de tiempo, sino que tiene un valor influenciado por el efecto de la posición.

Para solucionar este efecto, como primera aproximación se utiliza un modelo de fricción universal, que es el modelo de *fricción traslacional* [Fricción. 2010], este modelo simula la fricción existente entre dos cuerpos en movimiento.

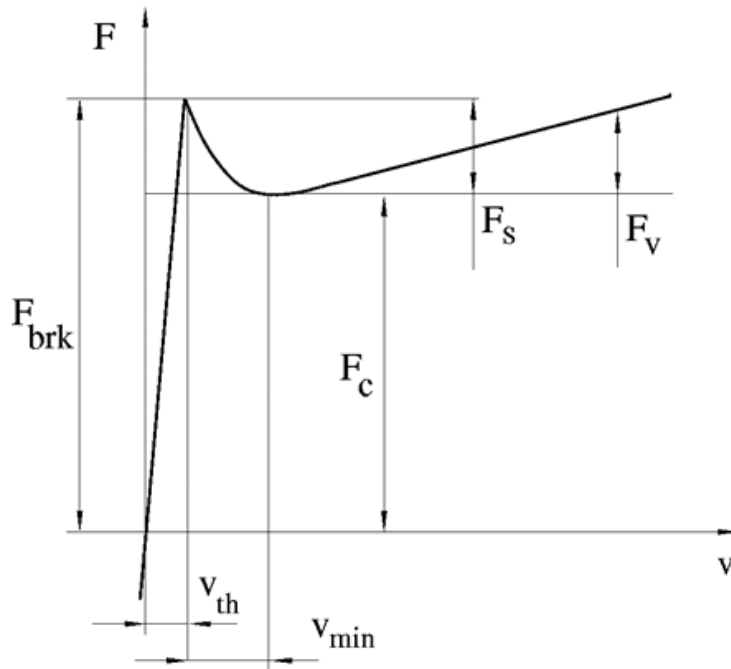


FIGURA 5.20: Gráfica Par-Velocidad del modelo de fricción traslacional

En la figura 5.20 se muestra la gráfica par-velocidad del modelo de *fricción traslacional*. Este modelo tiene en cuenta tres tipos de fricción, la fricción de Coulomb (F_c), fricción viscosa (F_v) y una fricción de pendiente negativa a bajas velocidades denominada fricción de Stribeck (F_s). La suma de la fricción de Coulomb con Stribeck con velocidades próximas a cero, forman lo que se denomina fricción estática (F_{brk}). Para que en el modelo no existan discontinuidades y por lo tanto no tenga problemas de computación se introduce una zona a velocidades bajas puramente lineal con la velocidad; esta zona viene determinada por V_{th} que se define como la velocidad límite, con un valor de aproximadamente 10^{-4} m/s. Las ecuaciones que rigen cada una de las zonas son las que se muestran a continuación.

Si $|V| \geq V_{th}$.

$$F = (F_c + (F_{brk} - F_c)\exp(-C_v|V|))\text{sing}(V) + f \cdot V \quad (5.10)$$

Si $|V| < V_{th}$.

$$F = V \frac{f \cdot V_{th} + (F_c + (F_{brk} - F_c)\exp(-C_v V_{th}))}{V_{th}} \quad (5.11)$$

siendo en este caso f , un coeficiente de fricción viscosa, y C_v un coeficiente genérico.

Con las premisas de este modelo, sí se consigue eliminar el efecto observado en la figura 5.19, pero debido a que la carga es distinta a la aquí planteada, no se obtuvo una correcta aproximación. Tras dicha prueba, y observando que el modelo de carga planteado en la ecuación (5.9) es capaz de ajustarse a la carga, y teniendo en cuenta que el modelo de *fricción translacional*, sí elimina el efecto indeseado comentado anteriormente, se pasa a utilizar una composición entre ambos.

En este nuevo modelo, de forma análoga al modelo de *fricción traslacional*, se separa el par en 2 zonas, una zona que corresponde al par obtenido en la ecuación (5.9) y otra zona, que corresponde a velocidades bajas, que es lineal con la velocidad.

Se define T_{th} como el par que se genera debido a la ecuación (5.9) en el punto de corte de las dos zonas, θ_{th} como la velocidad angular límite, que en este caso se ha escogido con un valor de 10^{-3} rad/s, y K_s como la relación lineal entre par y velocidad a bajas velocidades. Ahora tenemos las siguientes ecuaciones que van a explicar nuestro modelo.

$$\text{Si } |\dot{\delta}| \geq \theta_{th}.$$

$$T_d = B \cdot \dot{\delta} + K \cdot \delta \quad (5.12)$$

$$\text{Si } |\dot{\delta}| < \theta_{th}.$$

$$T_d = K_s \cdot \dot{\delta} = \frac{T_{th}}{\theta_{th}} \dot{\delta} \quad (5.13)$$

Debido a que el par es diferente dependiendo de donde se encuentre posicionado el neumático, el valor de K_s ha de calcularse de forma dinámica dentro del modelo; además se debe de cumplir que el par es continuo en todo momento. Por lo que ahora el modelo queda de la siguiente forma.

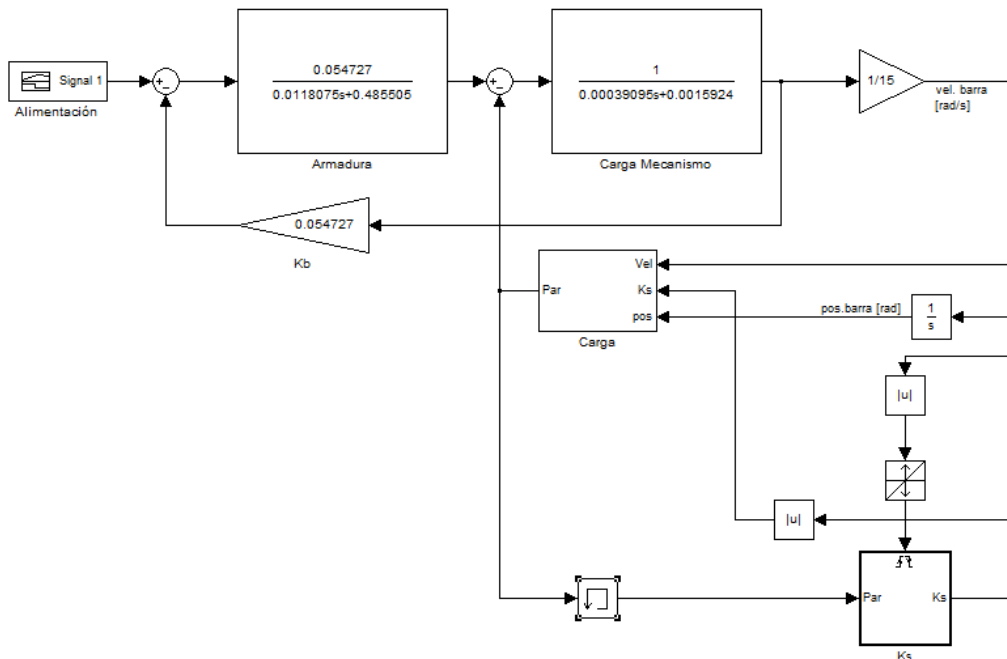


FIGURA 5.21: Modelo del sistema con carga completa separada

Se observa en la figura 5.21 las modificaciones hechas para poder simular el sistema completo. Se destaca que se ha añadido un sistema que calcula K_s utilizando la ecuación (5.13), este sistema sólo entra en funcionamiento cuando la velocidad de la barra alcanza el valor umbral, en este caso 10^{-3} rad/s. Además la carga también se ha separado en dos para cumplir los requisitos que se plantearon anteriormente para el modelo (ecuaciones 5.12 y 5.13).

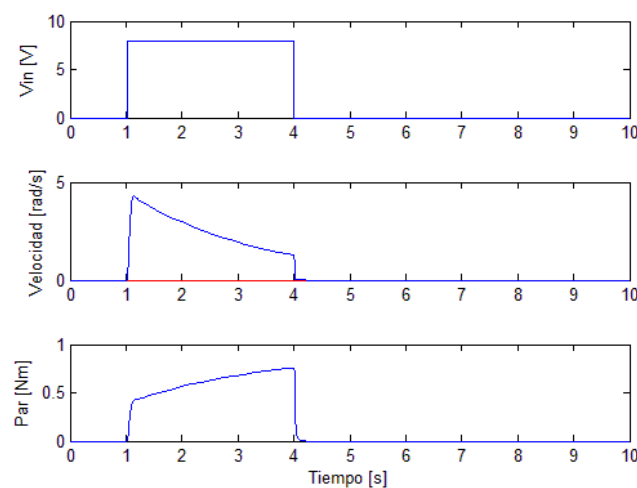


FIGURA 5.22: Simulación sin efecto indeseado del par

En la figura 5.22, se observan las mismas gráficas que en la figura 5.19 y en las mismas condiciones; si se comparan ambas figuras, se observa que con el nuevo modelo de carga separado en 2 zonas, ya se ha eliminado el efecto indeseado del par que se mostraba en la figura 5.19.

Una vez solucionado este problema, ya se puede pasar a hacer una simulación del sistema utilizando como carga las *Lookup tables*, con los valores que se obtuvieron en el apartado 5.2.2 de los parámetros B y K . Una vez construidas las *Lookup tables*, debemos distinguir cuando el sistema está en *zona dura* o *zona blanda*, para poder simular de forma continua y con tensiones diferentes a un escalón. Estas zonas vienen determinadas por el sentido de giro y por la posición del neumático. Así, y según los signos que se han usado en el sistema real, tenemos que el sentido positivo de giro será cuando las ruedas se desplacen de derecha a izquierda, independientemente de la posición de partida. Los ángulos de posición positivos ($+\delta$) serán los comprendidos entre el eje longitudinal del vehículo y la izquierda, mientras que los ángulos de posición negativos ($-\delta$) estarán comprendidos entre el eje longitudinal y la derecha, denominando al centro como ángulo 0. (ver figura 5.23).

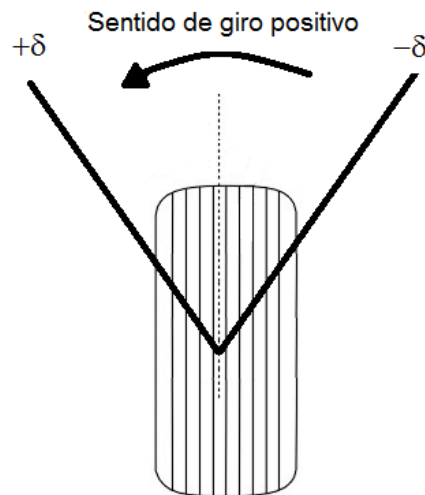


FIGURA 5.23: Criterio de signos para la posición y velocidad

Siguiendo este criterio ya se puede construir la tabla que nos indicará cuando estamos en *zona dura* o *zona blanda*.

TABLA 5.7: Criterio de signos

	δ	$\dot{\delta}$
Zona dura	> 0	> 0
Zona blanda	> 0	< 0
Zona blanda	< 0	> 0
Zona dura	< 0	< 0

En la tabla se indica como están delimitadas las zonas según el criterio de signos escogido, siendo δ la posición del neumático con respecto al eje longitudinal y $\dot{\delta}$ la velocidad de giro transversal del neumático.

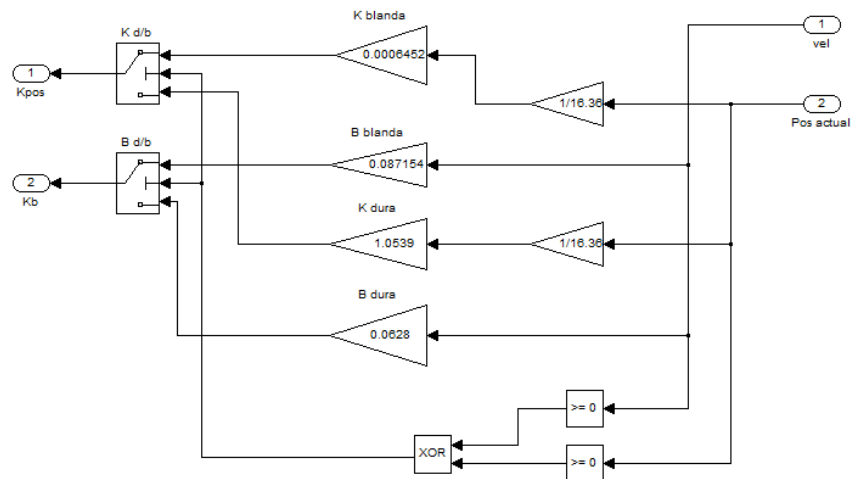


FIGURA 5.24: Discriminador entre zona dura o blanda

En la figura 5.24 se puede ver el sistema utilizado para detectar en que zona se encuentra el sistema. Esto corresponde a unas condiciones lógicas que siguen el comportamiento del criterio de signos mostrado en la tabla 5.7.

Una vez realizada esta corrección dentro del modelo, observamos que si intentamos hacer una simulación del sistema, el par se vuelve discontinuo debido a que los valores de K y B , utilizados para su simulación, son diferentes para cada tensión y cada zona, por lo que no se comporta como el sistema real.

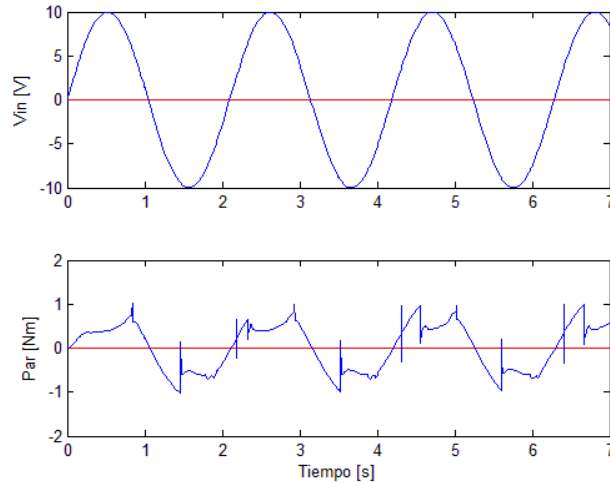


FIGURA 5.25: Discontinuidad del par

En la figura 5.25 se observa como al introducir al modelo una tensión senoidal (gráfica superior), el par (gráfica inferior) se comporta de forma discontinua, por los efectos comentados anteriormente.

Como consecuencia de este efecto, las *Lookup tables* dependientes de la tensión quedan rechazadas para el propósito de este proyecto, utilizando para optimizar el PID los valores de carga mostrados en la tabla 5.8 que corresponden a los valores de K y B en las tablas 5.5 y 5.6 en la columna denominada “*Todos*”. Aunque aquí tenemos un mayor error en la aproximación de los parámetros, conseguimos eliminar las discontinuidades debidas a la diferencia de valores para cada tensión de alimentación, con lo que se afinará el proceso de optimización del PID.

TABLA 5.8: Valores utilizados para la simulación de la carga

	Zona Dura	Zona Blanda
K	1,0539	0,0006452
B	0,0628	0,087154

5.3 SIMULACIÓN DE LA DIRECCIÓN

Con todo lo comentado anteriormente, ya se puede pasar a crear una simulación del comportamiento de la dirección.

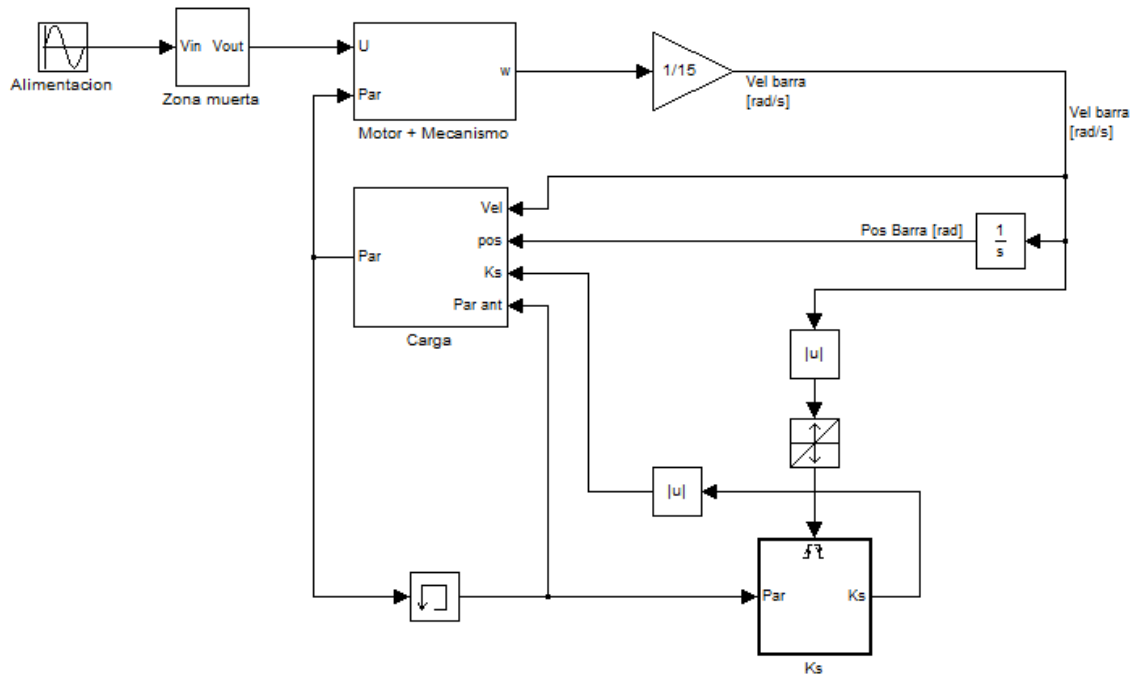


FIGURA 5.26: Modelo utilizado para la simulación

En la figura 5.26 se muestra el esquema del modelo utilizado en la simulación. Sólo destacar que el motor ahora se ha introducido en un subsistema denominado “Motor + Mecanismo”, y se ha introducido otro subsistema llamado “Zona muerta”, que lo que hace es simular el comportamiento a bajas tensiones, pues se comprueba experimentalmente que a tensiones menores de 3 voltios, la dirección del vehículo no se mueve. Además, y para asegurar un comportamiento continuo de la carga, se han tenido que introducir unas condiciones lógicas extras, para distinguir cuando el sistema trabaja a velocidades bajas con giro positivo o negativo, según el criterio de signos (véase figura 5.23 y tabla 5.7).

En las figuras que se muestran a continuación se observa el comportamiento del sistema simulado.

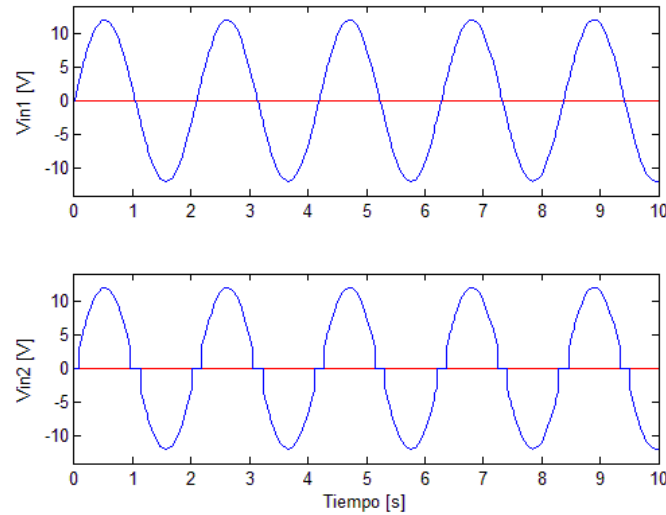


FIGURA 5.27: Alimentación usada en la simulación

En la figura 5.27, (gráfica superior) se representa la señal de tensión de entrada que corresponde a una onda senoidal con una amplitud de 12 voltios; la gráfica inferior, corresponde a la misma alimentación pero después de pasar por el subsistema denominado “Zona muerta” de la figura 5.26, que representa la tensión que sería efectiva en el sistema real, pues como se comentó anteriormente, con tensiones menores de 3 voltios, no se consigue mover la dirección.

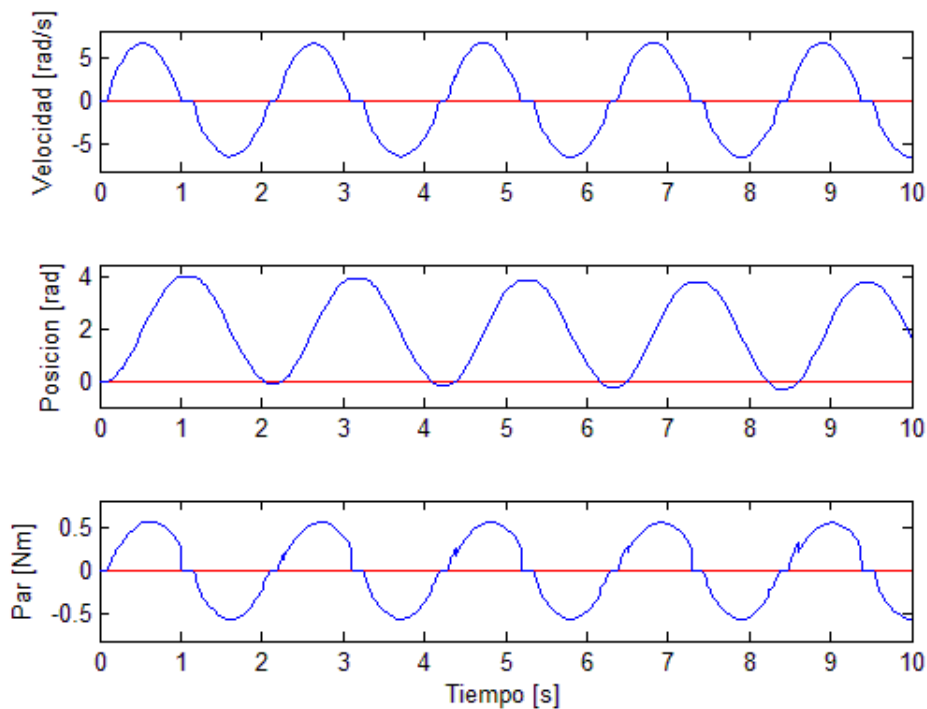


FIGURA 5.28: Gráficas resultado de la simulación del sistema

En la figura 5.28, se muestran tres gráficas, la gráfica superior corresponde a la velocidad de la barra de la dirección, la central a la posición de la barra de la dirección y la inferior al par generado en el movimiento.

De la gráfica de la velocidad solo destacar los escalones existentes en 0, como resultado del efecto de que a tensiones menores de 3 voltios el sistema no se mueve. En la gráfica de la posición se destaca que la posición inicial del sistema es 0 grados, y tras la simulación se puede observar que la posición sobrepasa el 0 inicial, llegando a posiciones negativas; este efecto es real, pues en todas las pruebas realizadas se ha comprobado que el sistema, para realizar un recorrido equivalente, necesita más tiempo para desplazar la dirección en *zona dura* que en *zona blanda*. En la gráfica correspondiente al par, ahora se comprueba que ya es continua, a excepción de unas pequeñas distorsiones debido al paso del sistema de zona dura a zona blanda, pues aunque se han minimizado, obviamente los valores usados para la simulación de la carga son diferentes en cada zona, lo que provoca esa discontinuidad.

CAPÍTULO 6

DISEÑO DEL CONTROLADOR

Con la identificación realizada en el capítulo anterior, y los ajustes que se han considerado para que el modelo se comporte como un sistema real, ya se está en posición de realizar el cálculo del controlador que nos haga funcionar el sistema.

El controlador *Proporcional Integral Derivativo (PID)* es sin duda el más utilizado en la industria por su excelente relación entre facilidad de diseño y prestaciones [Moreno, L. 2003]. La estructura básica de un *PID* es la siguiente.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.1)$$

donde $u(t)$ es la variable de control, $e(t)$ es el error entre la medida y la referencia y K_p , K_i , K_d son las constantes de las acciones proporcional, integral y derivativa, respectivamente. Como el regulador se implementará en un computador, que trabaja en tiempo discreto, habrá que utilizar la versión discreta de (6.1), quedando como sigue.

$$u(t_k) = K_p e(t_k) + K_i \frac{T_s}{z-1} e(t_k) + K_d \frac{N}{1+N\frac{T_s}{z-1}} e(t_k) \quad (6.2)$$

Donde T_s es el periodo de muestreo y N es la frecuencia de corte del filtro en la parte derivativa. La frecuencia de refresco del controlador estará limitada a 100 Hz, frecuencia con la que se manda cada trama por el sensor al bus CAN. Por otro lado, conviene recordar que la precisión del sensor de posición utilizado es de únicamente 1.5°. Esta precisión limitará de manera notable el comportamiento del sistema en lazo cerrado, tanto en régimen permanente (oscilaciones bruscas en torno a la referencia), como en el transitorio (la parte derivativa del controlador se verá afectada sensiblemente por esa falta de precisión).

6.1 REQUISITOS

Antes de pasar al cálculo del PID, se necesitan definir las características que debe cumplir dicho controlador. Estas características vienen limitadas en buena medida por el funcionamiento del vehículo.

El tiempo de estabilización (T_e) debe ser cercano a la duración del ciclo de trabajo del bucle externo de control, marcado por una frecuencia de refresco del GPS, que por defecto está situada en 5 Hz. Para el movimiento de las ruedas, primero debemos

considerar que la velocidad que puede alcanzar el motor, está limitada, como se ha visto en el capítulo 5, por la zona en la que se trabaje y la interacción neumático suelo, por lo que se debe tener en cuenta que ya de por sí, el sistema tardará un tiempo en posicionar las ruedas a un determinado ángulo, por este motivo se decide trabajar en escalones de referencia pequeños, de aproximadamente 20 grados medidos en el eje del volante, pues con esta variación, se puede afirmar experimentalmente que el neumático tiene tiempo más que suficiente para llegar a la posición deseada dentro de la duración del ciclo de control del bucle externo. Con este escalón, se define una sobreoscilación de un 20% en el eje del volante (M_p), que en términos de error de ángulo corresponde a un error de 4 grados. La sobreoscilación no debe superar este límite, pues se comprueba de forma experimental que una sobreoscilación mayor juega en detrimento de la comodidad de los pasajeros, provocando sacudidas en el vehículo.

La tabla 6.1 resume estos requisitos para el controlador.

TABLA 6.1: Especificaciones del controlador

Ajuste	Valor
T_e	Aprox. 0.2s
M_p	$\leq 20\%$

6.2 MODELO PARA LAS SIMULACIONES

Para la sintonización de los controladores no se usarán ninguno de los métodos clásicos (Ziegler Nichols o Lugar Geométrico de las Raíces), debido a que no se puede tener explícitamente en cuenta la imprecisión de la medida. Se utilizará el algoritmo, que permita encontrar de manera iterativa el diseño que mejor se adapte a las restricciones del sistema.

Como consecuencia de esto, se ha creado un modelo que incorpora el PID a sintonizar, y una función para, a través de este modelo, encontrar el óptimo de los valores del controlador.

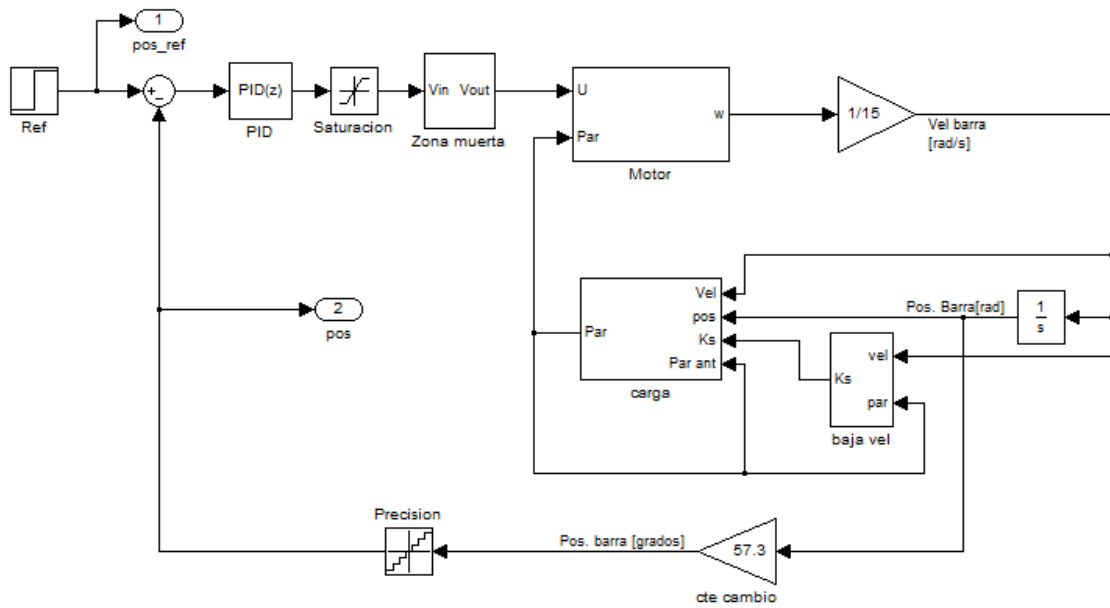


FIGURA 6.1: Esquema del sistema con el controlador PID

En la figura 6.1 se muestra el esquema utilizado para la optimización del PID, en ella se puede observar que por motivos de simplicidad, se han agrupado las diferentes partes del modelo en subsistemas, “motor”, carga”, “baja vel”, “zona muerta” que incorporan respectivamente, el modelo del motor más mecanismo de dirección, el modelo de interacción neumático firme, la corrección del modelo a bajas velocidades, y la zona de tensiones a la que el sistema no se mueve, como se comentó en el capítulo 5 apartado 5.1.1. Además se ha añadido un PID con su saturación, pues los valores máximos de tensión que se podrán aplicar al motor será de 12 voltios, y una realimentación de la posición de la barra, que cuenta con un *cuantizador* con precisión de 1.5 grados (que discretiza el valor a dicha precisión).

Tras realizar el modelo se pasa a crear una función, que calcule los valores óptimos de las constantes del PID. Para tal fin utilizamos la función *fminsearch*¹⁰ definida en la *toolbox de optimización*¹¹ de *Matlab*. Dicha función encuentra el mínimo de una función escalar de varias variables (*función de coste*), empezando la optimización con unos valores iniciales de dichas variables. Estos valores iniciales han de ser definidos por el usuario. Cuanto menor sea el valor de la función de coste mejor será el control del sistema.

¹⁰ Función de optimización [Fminsearh. 2010].

¹¹ Conjunto de algoritmos de Matlab utilizados para aproximar un conjunto de valores a un modelo de función.

Como función escalar se ha usado el error cuadrático medio creado por la posición deseada y la real, por lo tanto se utiliza la ecuación que se muestra a continuación, para calcular dicho valor.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (ref_i - pos_i)^2}{n} \quad (6.3)$$

Donde E es el error, valor a minimizar; ref es el valor de la referencia; pos el valor de la posición de la barra en la simulación; y n el número de muestras que se han obtenido en la simulación.

En el anexo D puede verse el código de *Matlab* utilizado para la optimización.

Cabe destacar que la función *fminsearch* busca como óptimos los mínimos locales, y por lo tanto se ha tenido que hacer primero una búsqueda de valores iniciales de forma iterativa, tras lo cual ya se puede pasar a obtener el óptimo en la simulación.

6.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIONES

Puesto que se han obtenido multitud de controladores, solo se mostrarán los que mejor resultado han dado en las pruebas experimentales.

También comentar que debido a la similitud entre los controladores de *zona dura* y *zona blanda*, nos quedamos únicamente con los valores obtenidos para la *zona dura*, pues cuando se lleve a la práctica serán los más restrictivos, es decir, si el controlador es capaz de mover la dirección en dicha zona, siendo esta la que mayor resistencia ofrece al movimiento, como se comprobó en el capítulo anterior, lógicamente será capaz de mover la dirección en *zona blanda*.

TABLA 6.2: Valores de los controladores PID

	PID-A	PID-B
K_p	0,2082	0,2193
K_i	0,2765	0,027
K_d	0,1308	0,152
N	0,9962	1,04
Fcost	64,1835	63,7624

En la tabla 6.2 se muestran los valores de las constantes de los controladores PID, que aún teniendo funciones de coste similares, presentan valores de las constantes

diferentes, por lo que será interesante ver las diferencias de comportamiento cuando se hagan las pruebas en pista.

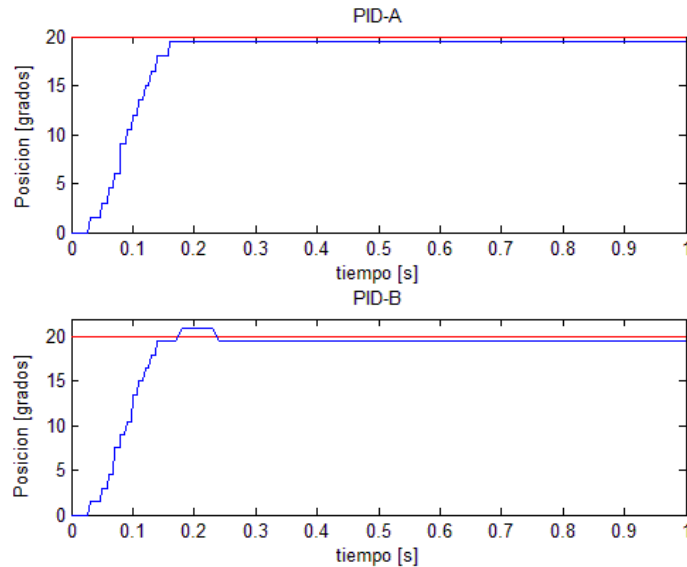


FIGURA 6.2: Evolución de los controladores PID en simulación

En la figura 6.2 se puede observar la evolución de la posición de la barra de la dirección en simulación; en la gráfica superior, utilizando el denominado PID-A, se obtiene un tiempo de establecimiento de 0,15 segundos, no existiendo sobreoscilación; en la gráfica inferior, el denominado PID-B, el tiempo de establecimiento es de 0,13 segundos, existiendo ahora una sobreoscilación de un 5%, por debajo del 20% que se ha puesto como límite, por lo que cualquiera de los dos controladores cumple las especificaciones marcadas.

Como se comprobará experimentalmente, y debido a la falta de precisión del sensor de posición, que afecta de forma directa a la parte derivativa, se decide optimizar unos controladores distintos eliminando dicha parte, utilizando en este caso el esquema *Proporcional Integral*.

TABLA 6.3: Valores de los controladores PI

	PI-1	PI-2
K_p	0,3089	0,3361
K_i	0,261	0,0861
Fcost	66,751	65,326

En la tabla 6.3 se muestran los valores obtenidos de las constantes para cada controlador. Al igual que pasaba para los PID, los valores se han obtenido de forma iterativa hasta conseguir alcanzar los óptimos.

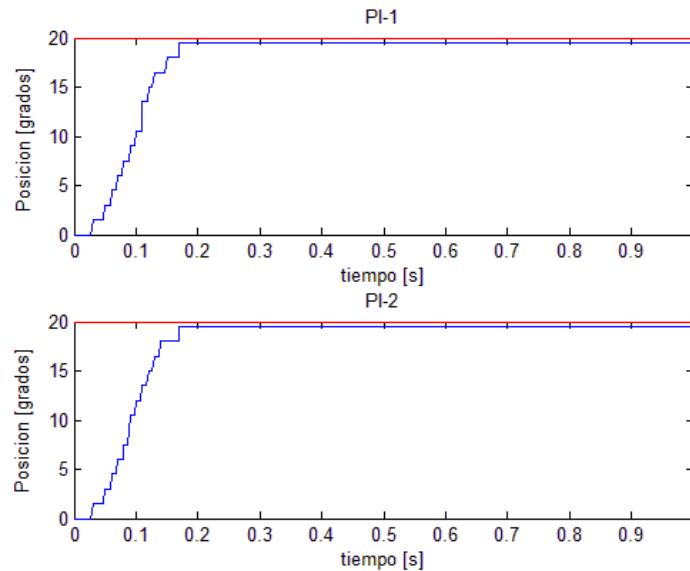


FIGURA 6.3: Evolución de los controladores PI en simulación

En la figura 6.3 se muestra la evolución de la posición de la barra de dirección en simulación para ambos controladores. En la gráfica superior (PI-1), el tiempo de establecimiento es de 0,16 segundos, y no presenta sobreoscilación. Para la gráfica inferior (PI-2), el tiempo de establecimiento es de 0,14 segundos, y al igual que el caso anterior, no presenta sobreoscilación. Ambos casos cumplen las especificaciones que se han marcado.

6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tras la obtención de los valores de las constantes para los controladores, ya se puede implementar el control en el vehículo y obtener los resultados reales. Dichas pruebas consisten en girar la dirección del vehículo desde la posición central hasta llegar a los 100 grados, a continuación desplazar la dirección hasta los -100 grados, para luego volver a la posición central. El movimiento se lleva a cabo utilizando escalones de 2 segundos de duración y 20 grados de amplitud. Destacar que las pruebas se han realizado con el vehículo parado por motivos de seguridad.

6.4.1 PRUEBAS CON PID

Las figuras que se muestran a continuación corresponden a los resultados experimentales obtenidos para ambos PID.

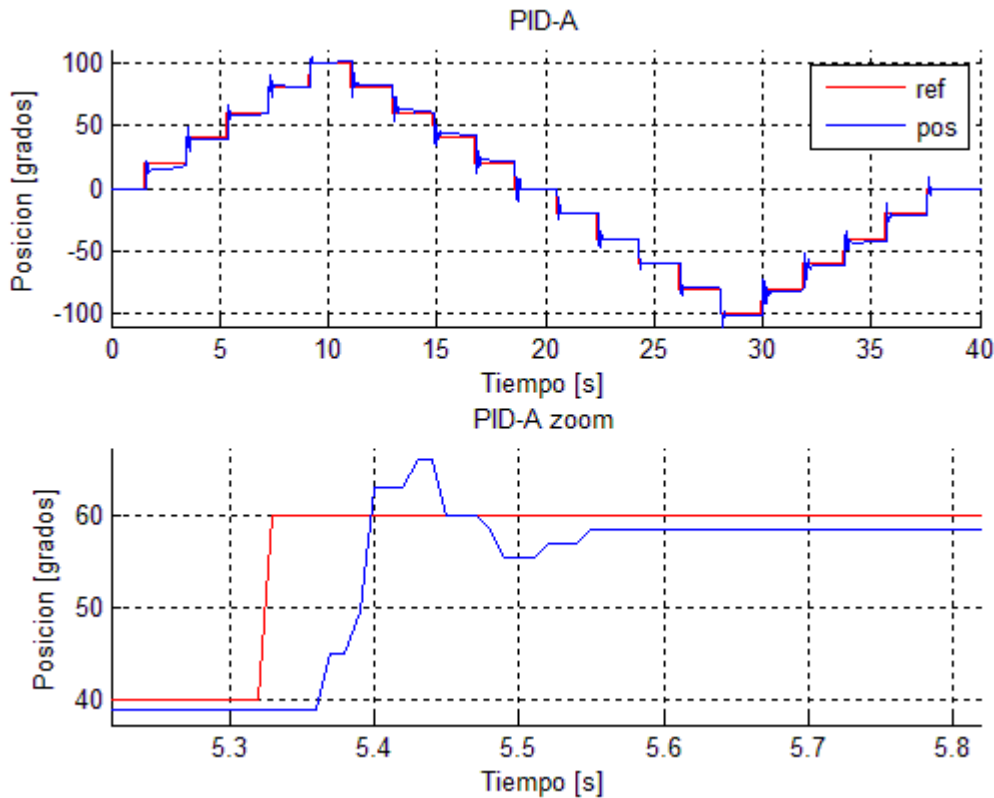


FIGURA 6.4: Resultados experimentales del PID-A

En la figura 6.4 se puede observar el resultado obtenidos para el controlador PID-A que se calculó en el apartado anterior. En la gráfica superior, que corresponde al experimento completo, notar que este controlador es capaz de seguir la referencia de una forma precisa; sólo destacar que existe una sobreoscilación en cada escalón, que se ve rápidamente amortiguada. La gráfica inferior, muestra en detalle un escalón, para así poder ver la dinámica del sistema; donde se puede comprobar ahora que el tiempo de establecimiento es de aproximadamente 0,2 segundos, siendo este el límite requerido. También notar que en este caso se produce una sobreoscilación de un 25%, superior al 20% deseado, siendo esta la causante del tiempo de establecimiento. En esta misma gráfica también se observa un tiempo de retardo de aproximadamente 0,05 segundos entre la referencia y la posición real, este viene influenciado por el tiempo utilizado en la comunicación con el driver MDL-BCD24 y el tiempo de reacción del sistema; este

retardo se puede observar en todas y cada una de las gráficas de las pruebas realizadas, por lo que este tiempo no es dependiente del controlador, pero sí que habrá que tenerlo en cuenta a la hora de la elección del mismo.

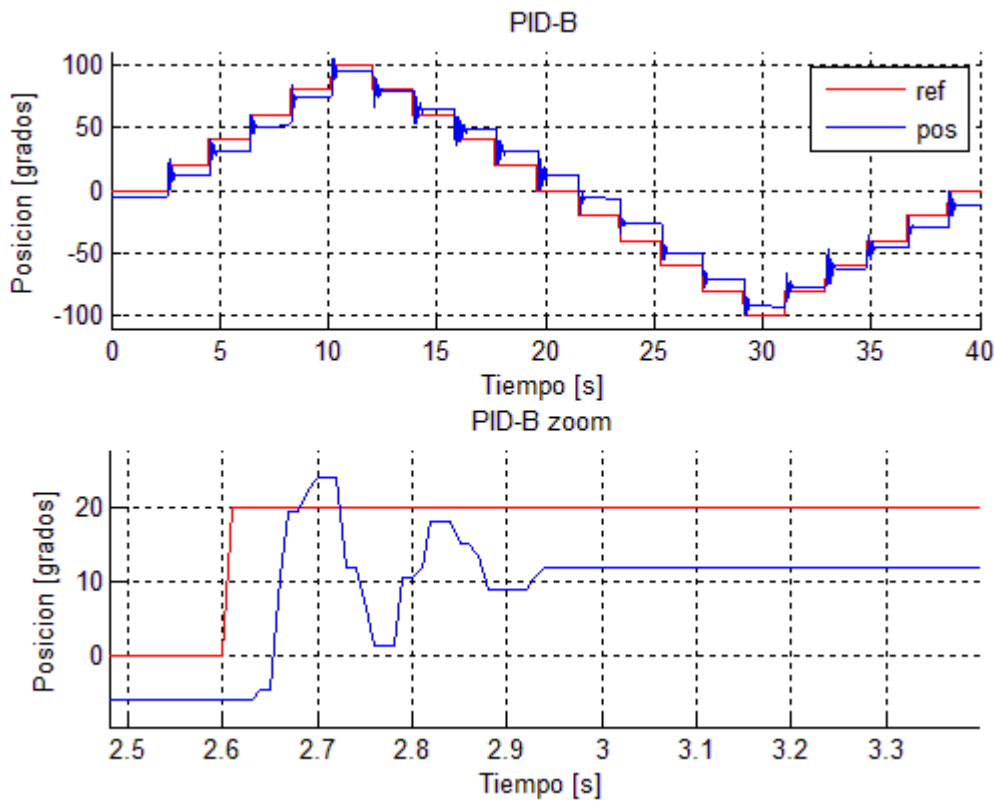


FIGURA 6.5: Resultados experimentales del PID-B

En la figura 6.5, al igual que para la figura 6.4, se muestra la respuesta del sistema con el controlador, pero ahora el utilizado es el denominado PID-B. Destacar de las gráficas, que ahora se tiene un error en régimen permanente de 8 grados, que se va acumulando a lo largo de la prueba, con un tiempo de establecimiento de 0,25 segundos, lo que ya está fuera de los requisitos; además y como se puede observar claramente en la gráfica inferior, esta vez tenemos una oscilación mayor que para el caso anterior, lo que nos lleva a desestimar esta opción.

6.4.2 PRUEBAS CON PI

Al igual que en el apartado anterior, se realizan las pruebas, pero esta vez utilizando los PI que se obtuvieron en el apartado 6.3.

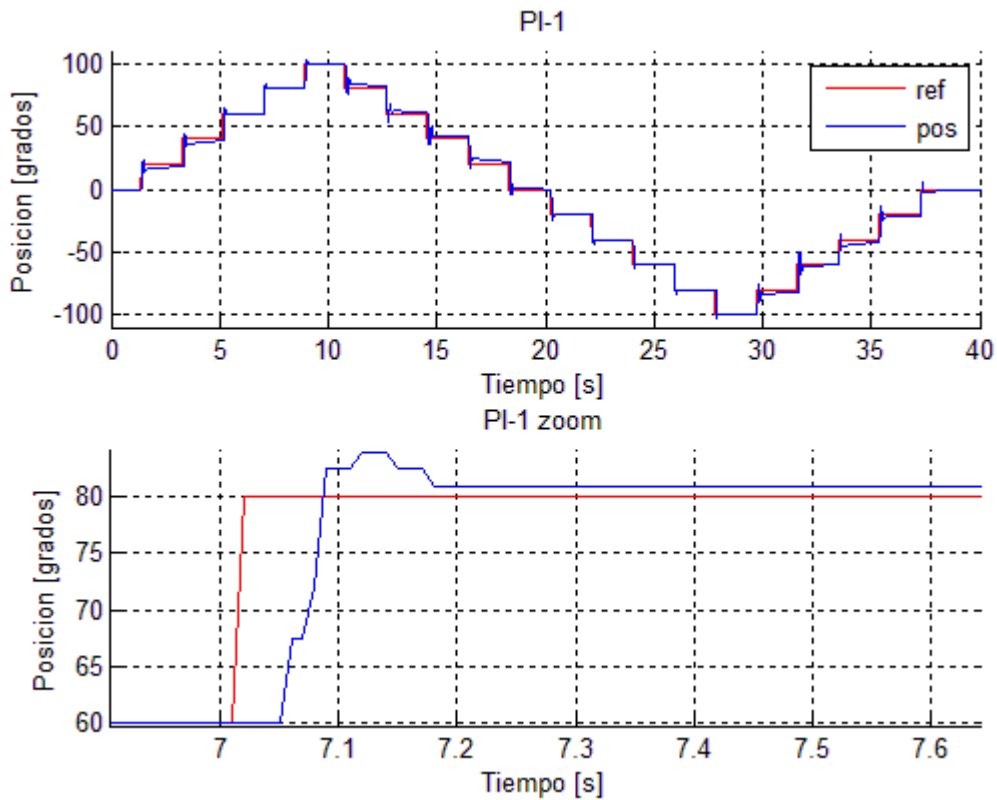


FIGURA 6.6: Resultados experimentales del PI-1

En la figura 6.6 se muestra el resultado obtenido en la prueba utilizando los parámetros del PI-1. Se observa que el sistema es capaz de seguir la referencia con mucha precisión; para este caso, y deteniéndonos en la gráfica inferior, podemos decir que el tiempo de establecimiento está en torno a los 0,17 segundos, y existe una sobreoscilación de un 20%, que está dentro de los requisitos.

En la figura 6.7 se muestra el resultado del experimento utilizando los valores obtenidos para el PI-2.

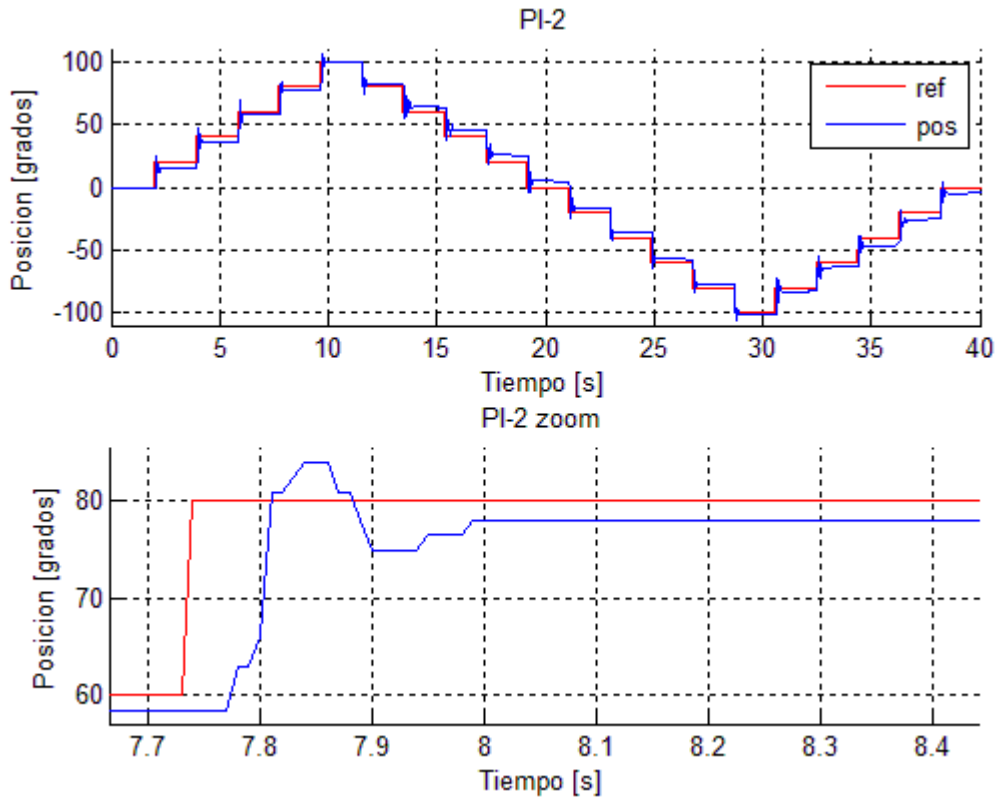


FIGURA 6.7: Resultados experimentales del PI-2

En este caso, y observando la gráfica superior de la figura 6.7, el nivel de seguimiento con respecto a la referencia sigue siendo bueno. En la gráfica inferior de la figura 6.7, podemos ver que el tiempo de establecimiento es de 0,18 segundos, que sigue estando dentro de límites, pero esta vez con una sobreoscilación de un 25%, lo que hace que esta opción sea peor que la anterior y quede desestimada.

Con motivo de cuantificar el error que comete el controlador, se ha calculado el *error cuadrático medio (ECM)* de la posición de la barra, utilizando la ecuación (6.3); este valor dará una idea aproximada de lo preciso que es el controlador, simplificando así su elección.

En la siguiente tabla se resumen las características dinámicas de cada controlador.

TABLA 6.4: Resumen de características dinámicas de los controladores

	PID-A	PID-B	PI-1	PI-2
T_c	0,2	0,25	0,17	0,18
M_p	25%	>25%	20%	25%
ECM	17,3041	97,1899	15,78	32,408

A la vista de la tabla 6.4, podemos desechar a priori, los controladores PID-B y PI-2, pues su *ECM* es muy superior al valor obtenido para los demás. El PID-A también se desestima, pues al tener un valor superior de sobreoscilación, y como se ha comentado antes, el confort de los pasajeros se ve disminuido.

6.5 REAJUSTE DE LOS CONTROLADORES

A falta de hacer las pruebas con el vehículo en movimiento, se decide reajustar el controlador PI-1 de forma experimental, para obtener unos nuevos valores que hagan que su respuesta se ajuste mejor.

Destacar que el reajuste se ha realizado mediante prueba y error del controlador, basándonos en la experiencia acumulada en las sintonizaciones anteriores.

TABLA 6.5: Valores de los controladores PI reoptimizados

	PI-1A	PI-1B	PI-1C
K_p	0,306	0,307	0,21
K_i	0,223	0,2564	0,261

En la tabla 6.5 se muestran los valores obtenidos en el reajuste experimental de las constantes del controlador. De los tres controladores, el PI-1A y el PI-1B han sido ajustados para un buen funcionamiento de la dirección en parado, mientras que el PI-1C se ha ajustado para tener un mejor comportamiento cuando el vehículo está en movimiento, como se comprobará en el siguiente capítulo.

De la misma forma que se ha hecho en el apartado anterior, se vuelven a realizar pruebas, pero esta vez con los nuevos controladores, obteniéndose lo que se detalla a continuación.

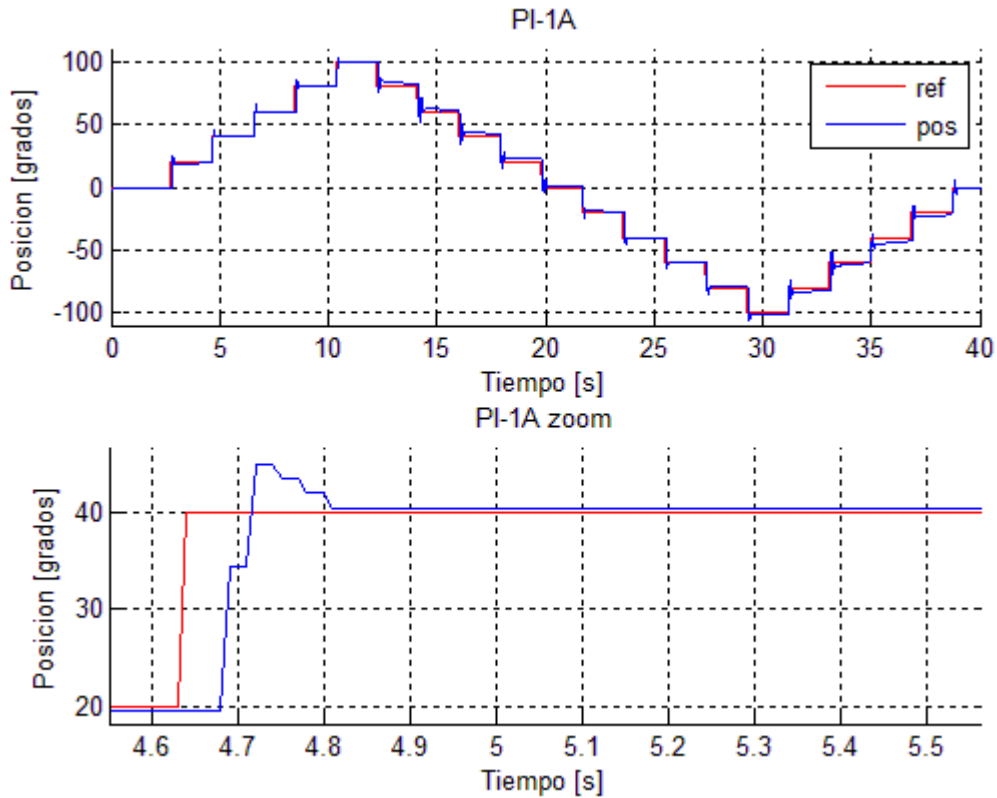


FIGURA 6.8: Resultados experimentales del PI-1A

En la figura 6.8, se muestra el resultado obtenido en la prueba para el controlador PI-1A. Este controlador es capaz de seguir la referencia de una forma robusta y precisa, obteniendo un tiempo de establecimiento de 0,14 segundos y una sobreoscilación del 20% (véase gráfica inferior de la figura 6.8).

En la siguiente figura 6.9, se muestra el resultado obtenido en la prueba correspondiente al controlador PI-1B, en este caso el tiempo de establecimiento está en torno a 0,1 segundos con una sobreoscilación del 20%. Con este controlador se ha conseguido mejorar un poco la velocidad de respuesta del sistema, no así la sobreoscilación.

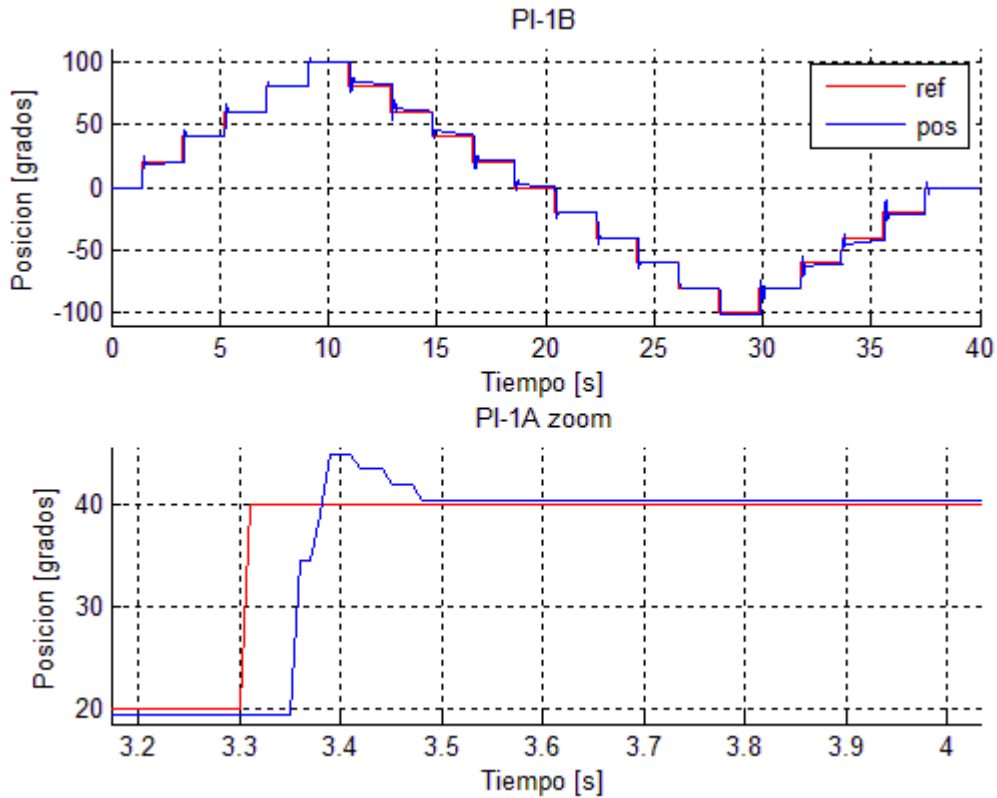


FIGURA 6.9: Resultados experimentales del PI-1B

En la siguiente figura 6.10 se presentan los resultados obtenidos para el PI-1C; se puede observar perfectamente como este controlador tiene mayores dificultades para posicionar las ruedas, debido a que este ha sido reajustado para un buen funcionamiento con el vehículo en movimiento, lo que pone de manifiesto la diferencia de comportamiento del sistema en función de la velocidad. En este caso no existe sobreoscilación, pero se comete un error en régimen permanente de 4 grados en el tiempo de establecimiento requerido (0,2 segundos), que corresponde a un 20%. Se observa además, en la grafica inferior de la figura 6.10, que el error va disminuyendo poco a poco con el tiempo, resultando ahora en un tiempo de establecimiento de 1,1 segundos, cosa que está completamente fuera de los niveles requeridos.

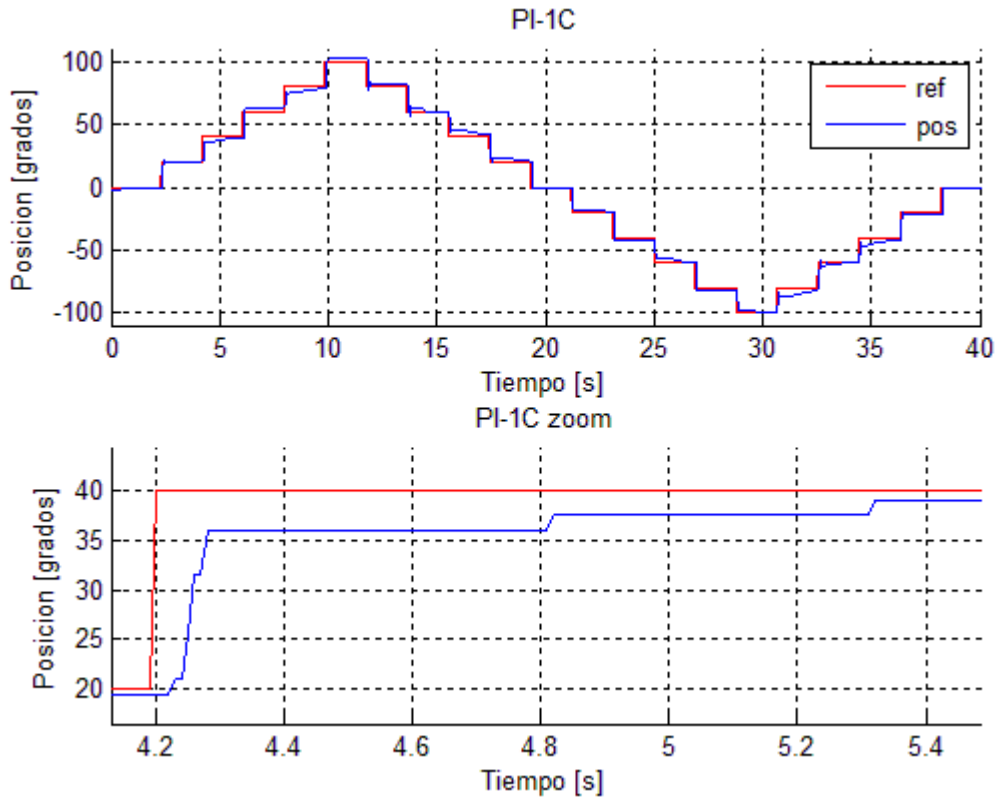


FIGURA 6.10: Resultados experimentales del PI-1C

Una vez que realizadas las pruebas pertinentes, ya podemos pasar a calcular el *error cuadrático medio* para dar una idea de la fiabilidad del controlador. En la tabla 6.6 se muestra un resumen de las características dinámicas de los nuevos controladores.

TABLA 6.6: Resumen de características dinámicas de los controladores reajustados

	PI-1A	PI-1B	PI-1C
T_e	0,14	0,1	1,1
M_p	20%	20%	--
ECM	16,54	15,26	18,83

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que para los PI reajustados para controlar la dirección con el vehículo parado (PI-1A, y PI-1B), se ha conseguido mejorar el tiempo de establecimiento; no así la sobreoscilación, que está influenciada por la resolución del sensor de posición. En el caso del PI-1C, su dinámica para el control de la dirección con el vehículo parado es peor que los casos anteriores, pero esto va a permitir mejorar la dinámica del sistema cuando el vehículo está en movimiento, como se comprobará en el capítulo 7.

Si comparamos todos los controladores que se han probado, se puede concluir que en la situación de vehículo parado, el mejor de ellos es el denominado PI-1B.

6.6 OBSERVACIONES

En este apartado se pretende dar a conocer todos los efectos que aparecen en las pruebas realizadas anteriormente con los controladores.

Se ha comentado con anterioridad, que por motivos de simplicidad, tanto a la hora de implementar el controlador en el ordenador, como a la hora del cálculo del controlador por simulación, sólo se ha tenido en cuenta la *zona dura*, pues la resistencia al movimiento de dicha zona es mayor que para la *zona blanda*, y por lo tanto es más restrictiva. También se ha dicho que los valores obtenidos para los controladores en *zona blanda* y en *zona dura* son muy parecidos, por lo que es otro motivo más para sólo usar los valores de la *zona dura*.

En la figura 6.11 se representa un esquema de las diferentes zonas por las que pasa la dirección en su movimiento durante las pruebas realizadas.

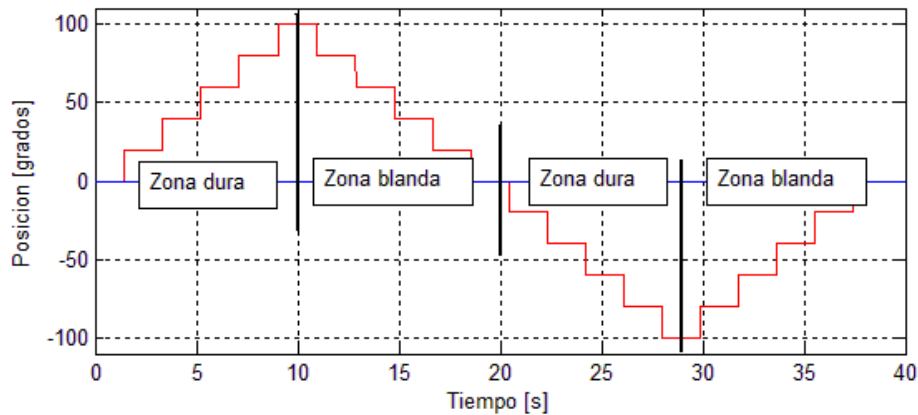


FIGURA 6.11: Delimitación zonal de las pruebas

La prueba comienza con un movimiento en *zona dura*, comprendido entre los 0 grados y los 100 grados; una vez que se llega a 100 grados, el sistema empieza a retroceder, moviéndose en *zona blanda* hasta que alcanza los 0 grados; cuando se sobrepasan los 0 grados y hasta que se alcanzan los -100 grados, el sistema se encuentra otra vez en *zona dura*, hasta que la posición se vuelve a incrementar desde los -100 grados hasta los 0 grados, donde la dirección vuelve a entrar en *zona blanda*, es decir, se

hacen 3 cambios de zona, delimitados por las líneas verticales negras que se muestran en la figura 6.11.

Si se observan con detenimiento las figuras de las pruebas realizadas con los controladores diseñados (véase figuras 6.4 – 6.10, gráfica superior), se comprueba como dicho controlador se comporta de forma diferente dependiendo de la zona en que se encuentre la dirección, de este modo, si el sistema se encuentra en *zona dura*, la oscilación será menor, disminuyendo así el tiempo de establecimiento; mientras que si el sistema se encuentra en *zona blanda*, se crea una mayor oscilación afectando al tiempo de establecimiento.

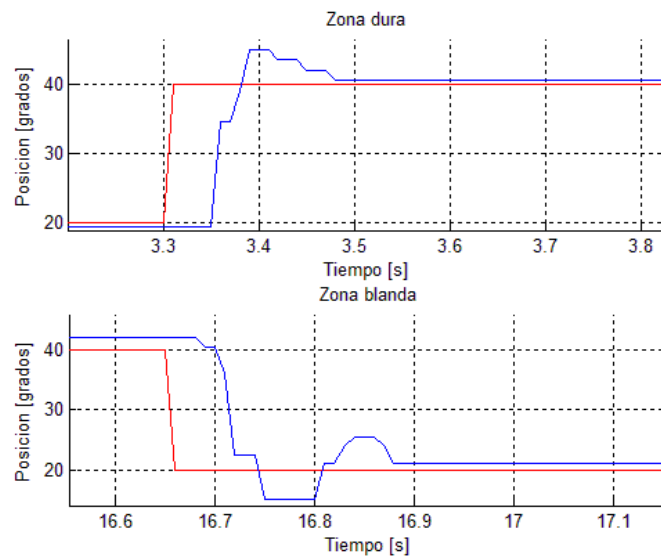


FIGURA 6.12: Diferencia en la dinámica del controlador de cada zona

En la figura 6.12 observamos el comportamiento frente a un escalón de uno de los controladores, tanto para la *zona dura* (gráfica superior), como para la *zona blanda* (gráfica inferior). Se comprueba en las gráficas, que el tiempo de establecimiento para la *zona dura* es de unos 0,1 segundos, mientras que para la *zona blanda* ha aumentado a 0,2, motivado por un incremento en la oscilación. La sobreoscilación no se ve afectada estando en un 20% en ambos casos.

Como uno de los objetivos de este proyecto es conseguir un controlador sencillo y robusto, que sea capaz de mover la dirección en cualquier condición, con lo expuesto en este apartado, queda constancia de que las aproximaciones realizadas en este documento son válidas.

CAPÍTULO 7

PRUEBAS EN CIRCUITO

Una vez terminadas las pruebas del controlador con el vehículo parado, se pasa a realizar las pruebas con el vehículo en movimiento, en el circuito de pruebas del *Centro de Automática y Robótica*. La prueba consiste en una sucesión de curvas: aceleramos el vehículo en una recta, se toma una curva a izquierdas; a continuación se traza una curva a derechas, y finalmente se detiene el vehículo una vez alcanzada la línea recta.

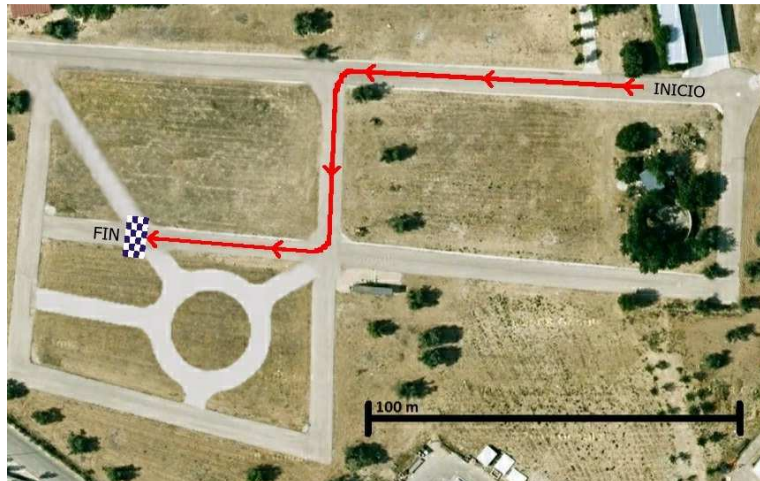


FIGURA 7.1: Mapa de los movimientos realizados en las pruebas

En la figura 7.1 se muestra el recorrido seguido. Estas pruebas, y debido a que el control de alto nivel no está implementado completamente en el vehículo, se han realizado de forma manual, es decir, el conductor acciona el acelerador y el freno. El volante es movido a través del controlador anteriormente ajustado, indicándole la referencia por teclado. Puesto que manualmente es complicado seguir la misma trayectoria, y mantener la misma velocidad en cada instante de tiempo, existen ligeras variaciones entre las pruebas. Para elegir el mejor controlador, se ha calculado el *error cuadrático medio* de las pruebas, para cuantificar el error cometido por el controlador al seguir la referencia. Además de utilizar esta cuantificación para la elección, el controlador debe de cumplir los requisitos exigidos (ver tabla 6.1).

7.1 CONTROL MEDIANTE PI

En este apartado se presentan los resultados experimentales obtenidos en circuito, utilizando los tres controladores PI reajustados en el capítulo 6 (PI-1A, PI-1B y PI-1C).

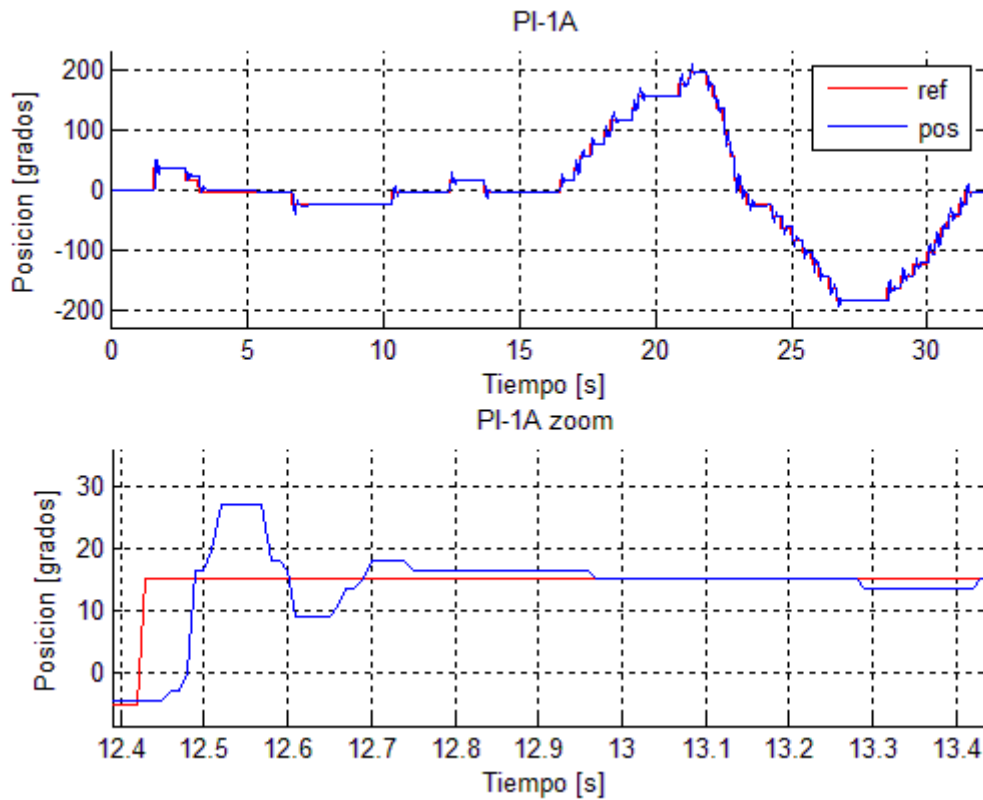


FIGURA 7.2: Resultados experimentales en circuito con PI-1A

En la figura 7.2 se muestran los resultados experimentales en circuito del PI-1A. Como se observa en la gráfica superior, el controlador es capaz de seguir la referencia de forma eficaz, pero si nos paramos en el transitorio de cada escalón, se pueden distinguir unas oscilaciones con respecto a la referencia (ver gráfica inferior de la figura 7.2). En este caso, existe una sobreoscilación del 50%, muy superior a la requerida. Además el tiempo de establecimiento ha aumentado hasta alcanzar los 0,22 segundos, lo que también está fuera de especificaciones.

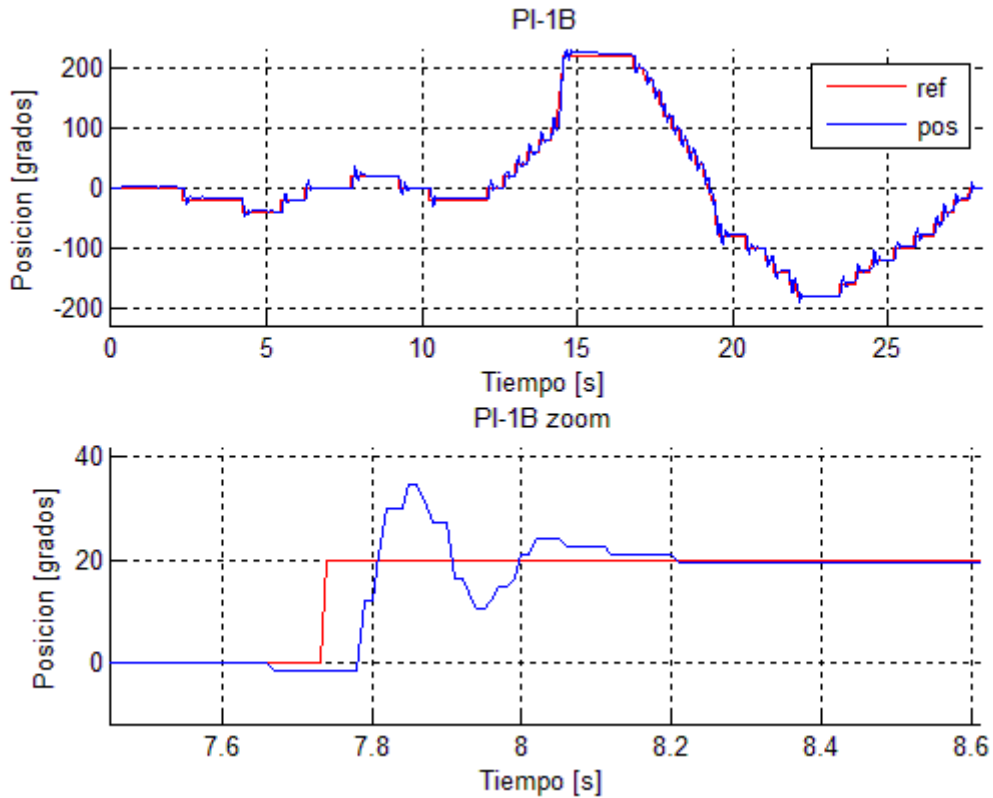


FIGURA 7.3: Resultados experimentales en circuito con PI-1B

En la figura 7.3, se puede ver el resultado de la prueba utilizando el PI-1B. Al igual que ocurre en el caso anterior, el controlador sigue a la referencia y se generan en el transitorio de cada unas oscilaciones. En la gráfica inferior de la figura 7.3, se muestran las características dinámicas con más detalle, alcanzándose un 70% de sobreoscilación, y como consecuencia de ello, el tiempo de establecimiento sube hasta 0,4 segundos.

En la figura 7.4, que se muestra a continuación, se observa el resultado obtenido utilizando el PI-1C, que se optimizó para la condición de velocidad del vehículo no nula. En la figura 7.4 se puede observar una mejoría sustancial con respecto a las dos alternativas anteriores. En la gráfica inferior de la figura 7.4, se muestran las características dinámicas; para este caso, existe una sobreoscilación del 7,5%, que traducido a grados son 1,5 grados, que coincide con la resolución del sensor, por lo que se puede afirmar que no existe sobreoscilación; el tiempo de establecimiento es de 0,12 segundos. Las características dinámicas de este controlador, son las únicas que cumplen perfectamente las especificaciones impuestas en su diseño.

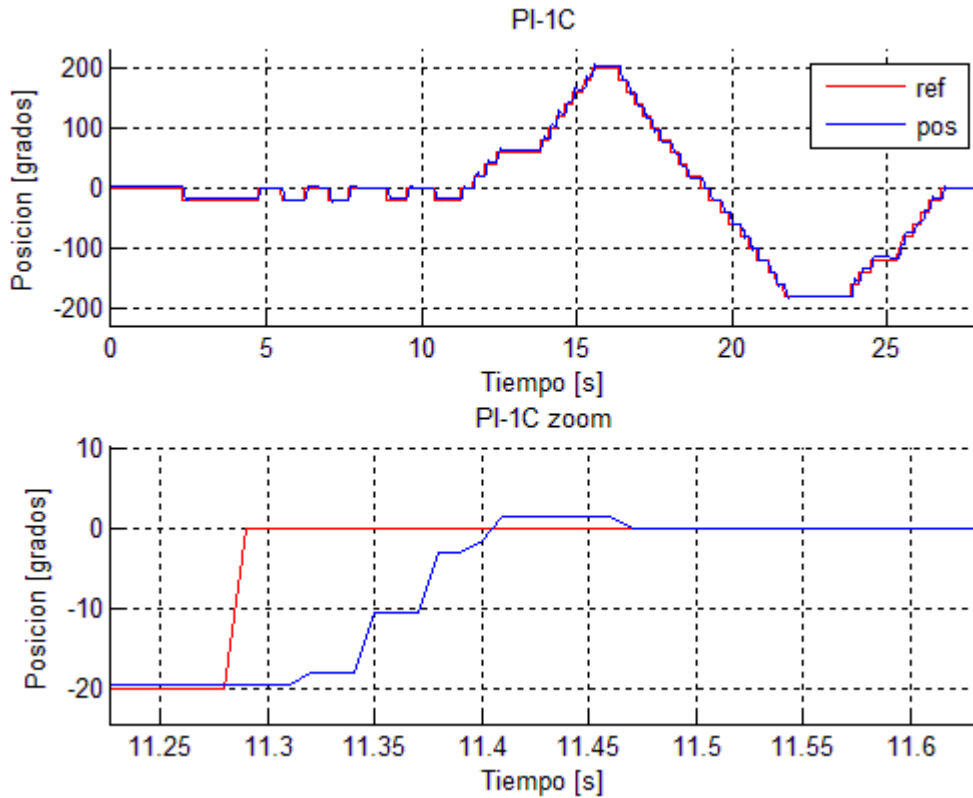


FIGURA 7.4: Resultados experimentales en circuito con PI-1C

Tras comparar los tres controladores, en la tabla 7.1 se muestra el resumen de las características dinámicas de cada uno, así como el *error cuadrático medio* que nos indica de una forma cuantitativa el nivel de seguimiento del controlador a la referencia.

TABLA 7.1: Resumen de características dinámicas en circuito de los controladores

	PI-1A	PI-1B	PI-1C
T_e	0,22	0,4	0,12
M_p	50%	70%	7,5%
ECM	47,53	50,61	41,67

A la vista de esta tabla, se puede concluir que el mejor controlador obtenido ha sido el PI-1C, pues es el único que está dentro de especificaciones.

Al elegir el controlador que se utilizará de forma permanente para realizar el control de *bajo nivel* de la dirección, se debe tener en cuenta que situación es la más restrictiva, vehículo parado o vehículo en movimiento. Puesto que la mayoría de las pruebas futuras se realizarán con el vehículo en movimiento, y debido a que el incumplimiento de las especificaciones en estas circunstancias puede acarrear riesgos

innecesarios, la elección del PI-1C es la correcta, pues su comportamiento dinámico en condiciones de velocidad no nula es superior al de las otras alternativas.

7.2 COMPARACIÓN CON EL CONTROLADOR BORROSO

Como se comentó en el capítulo 2, todos los vehículos del programa AUTOPIA, se basan en la *lógica borrosa*, para realizar tanto el control de *bajo nivel* como el control de *alto nivel*. En este apartado se pretende comparar los resultados de las dos formas de control (*lógica borrosa* vs. control a través de PI).

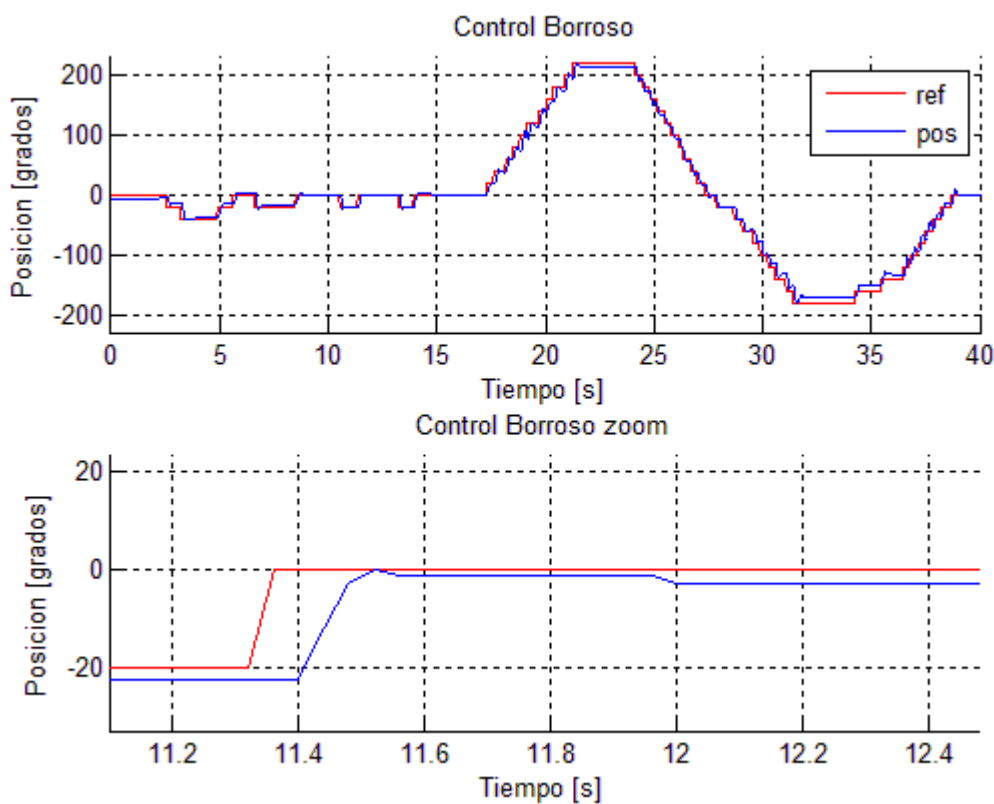


FIGURA 7.5: Resultados experimentales en circuito con control borroso

En la figura 7.5 se muestra el resultado de la prueba utilizando el control borroso actual; en este caso podemos observar que el nivel de seguimiento es bueno, exceptuando que ahora podemos distinguir un error en régimen permanente de aproximadamente 3 grados. En este caso, no existe sobreoscilación, y el tiempo de establecimiento es de 0,18 segundos, lo que está dentro de las especificaciones.

Destacar, que en la figura 7.5, gráfica inferior, se aprecia un tiempo de retardo en la respuesta del controlador borroso de 0,08 segundos, superior a los 0,05 segundos que

tarda el PI en reaccionar; esta diferencia de tiempo, además de estar influenciada por el tiempo de comunicaciones y el tiempo de reacción del sistema, como se comentó en capítulos anteriores, también viene condicionada por el periodo de muestreo. Se comentó, al principio del capítulo 6, que la frecuencia de muestreo utilizada para el PI es de 100 Hz., pero para el controlador borroso, esta frecuencia de muestreo baja hasta los 25 Hz., con lo que claramente afectará al tiempo de respuesta.

Los resultados del control a través del PI se encuentran en la sección 7.1, figura 7.4.

En la tabla 7.2, se muestra el resumen comparativo de las características dinámicas de los dos controladores, así como el *error cuadrático medio*, y el *error en régimen permanente* (ERP).

TABLA 7.2: Comparación de características dinámicas de los controladores

	BORROSO	PI-1C
T_e	0,18	0,12
M_p	--	7,5% ⁽¹²⁾
ERP	3°	0°
ECM	70,65	41,67

A la vista de la tabla 7.2 se comprueba que el controlador borroso utilizado actualmente en el vehículo, aún cumpliendo los requisitos definidos para el controlador, tiene una peor dinámica que el PI obtenido en este proyecto.

Otra buena forma de comparar los controladores, es realizar las pruebas de movimiento de la dirección con el vehículo parado, tal y como se hizo para el controlador PI en el capítulo 6, (véase sección 6.5, figura 6.10). Cabe destacar, que el controlador borroso actual no ha sido diseñado para mover la dirección del vehículo parado, por lo que su respuesta no es satisfactoria.

¹² Correspondiente a la resolución del sensor.

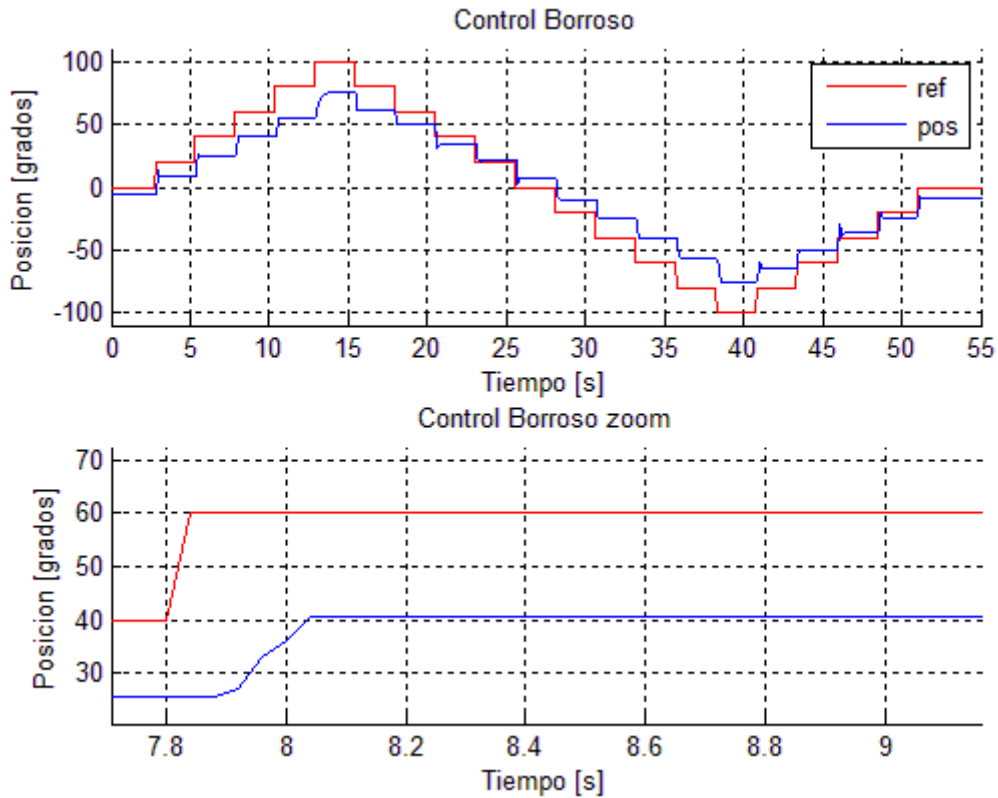


FIGURA 7.6: Resultados experimentales del control borroso en parado

Como se observa en la figura 7.6, el control borroso no es capaz de posicionar la dirección en la posición deseada, cometiendo un error en régimen permanente que se va acumulando. Se puede concluir así que el control realizado en condiciones de vehículo parado por el PI mejora al control realizado por el borroso.

Como reflexión final, apuntar que actualmente se ha conseguido un controlador PI con mejores características dinámicas que el control borroso utilizado actualmente, lo que a priori mejorará el comportamiento del controlador de *alto nivel*.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 CONCLUSIONES

En este proyecto se presentan los resultados preliminares de la implementación física y lógica de un control de posición sobre la dirección de un vehículo comercial. Para ello se han utilizado el sensor y actuador que equipa de serie el vehículo, se ha preparado e integrado en el vehículo la electrónica necesaria, se ha realizado un modelado de la dirección y de la interacción neumático-suelo, y finalmente, ayudándonos de este modelado, se ha diseñado un controlador PI que responde a los requisitos fijados inicialmente.

A través de las pruebas realizadas, se ha confirmado experimentalmente que el sistema de dirección tiene un comportamiento heterogéneo, dependiente de la zona en la que esté situada la dirección (*zona dura* o *zona blanda*), así como de la velocidad del vehículo, y de un largo etcétera, que por simplicidad no se han tenido en cuenta.

Se ha diseñado un controlador PI robusto, (el PID queda descartado por la influencia de la resolución del sensor), comprobándose que es capaz de posicionar correctamente la dirección en cualquier condición. Asimismo queda confirmado que el controlador PI se comporta mejor que el control por *lógica borrosa*, en el que se basa la mayor parte de los desarrollos del grupo AUTOPIA.

Una parte de los resultados de este Proyecto Fin de Carrera fueron presentados en el 8º Workshop Robocity2030-II “Robots de Exteriores”, con el artículo titulado *Implementación del control lateral sobre un vehículo de serie con servodirección asistida*. Sus autores fueron. E. de Torres, J. Villagrà, J. Godoy y T. de Pedro.

8.2 TRABAJOS FUTUROS

Tras la sintonización de un controlador PI robusto, surgen varias ideas que se plantean como trabajos futuros.

- Realizar una mejor aproximación del modelo de dirección, esta vez teniendo en cuenta la influencia de la velocidad en el sistema.
- Conseguir un modelo aproximado de la carga de la dirección (interacción neumático-suelo) a través de la corriente necesaria para el movimiento.

- Realizar la sintonización de un *i-PID*¹³ [Villagrà, J. 2010] que mejore el control en las dos zonas de la direcci3n, así como en cualquier condici3n de circulaci3n (vehículo parado o vehículo circulando a distintas velocidades).
- Puesto que se ha conseguido un sistema capaz de posicionar la direcci3n del vehículo en parado, se puede implementar en el control de *alto nivel*, la posibilidad de hacer maniobras a muy baja velocidad o en parado (útiles por ejemplo para el estacionamiento).

¹³ Intelligent PID. PID convencional al cual se le incorpora un término complementario con el objeto de compensar los efectos de las perturbaciones y/o dinámicas no modeladas.

CAPÍTULO 9

PRESUPUESTO

9.1 INTRODUCCIÓN

En este proyecto se ha implementado un *control lateral* en un vehículo comercial de serie, utilizando los sensores y actuadores incluidos en el propio vehículo. Se han abarcado las tareas de implementación hardware, identificación y simulación de la dirección e interacción neumático-suelo, así como el diseño de un controlador PI que realice dicho control.

9.1.1 EJECUCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se ha dividido en varias fases que se detallan a continuación.

TABLA 9.1: Duración de las tareas del proyecto

	ACTIVIDAD	Precedencia	Inicio (sem.)	Duración (sem.)
A	Análisis del vehículo y sus posibilidades	---	0	2
B	Elección del controlador hardware para control lateral	A	2	2
C	Montaje y conexionado	B	4	1
D	Preparación para la recogida de datos	C	5	2
E	Pruebas realizadas sobre la dirección	D	7	2
F	Programación del control lateral	E	9	4
G	Identificación de la dirección	E	9	2
H	Identificación de la interacción neumático-suelo	G	11	3
I	Creación del modelo de dirección	H	14	4
J	Optimización del controlador mediante simulación	I	18	2
K	Pruebas con el vehículo parado	F,J	20	2
L	Reajuste del controlador	K	22	2
M	Pruebas en pista	L	24	2
N	Reajuste del controlador	M	26	2

En la tabla 9.1 se muestra la sucesión de tareas para la ejecución del proyecto, así como la precedencia, el tiempo de inicio y la duración de cada una. La duración de cada tarea y el tiempo de inicio están expresados en semanas, por lo tanto el proyecto tiene un tiempo de ejecución de 28 semanas, correspondiente a 7 meses.

Con los datos mostrados, se realiza un diagrama de Gantt que ayudará en la ejecución del proyecto.

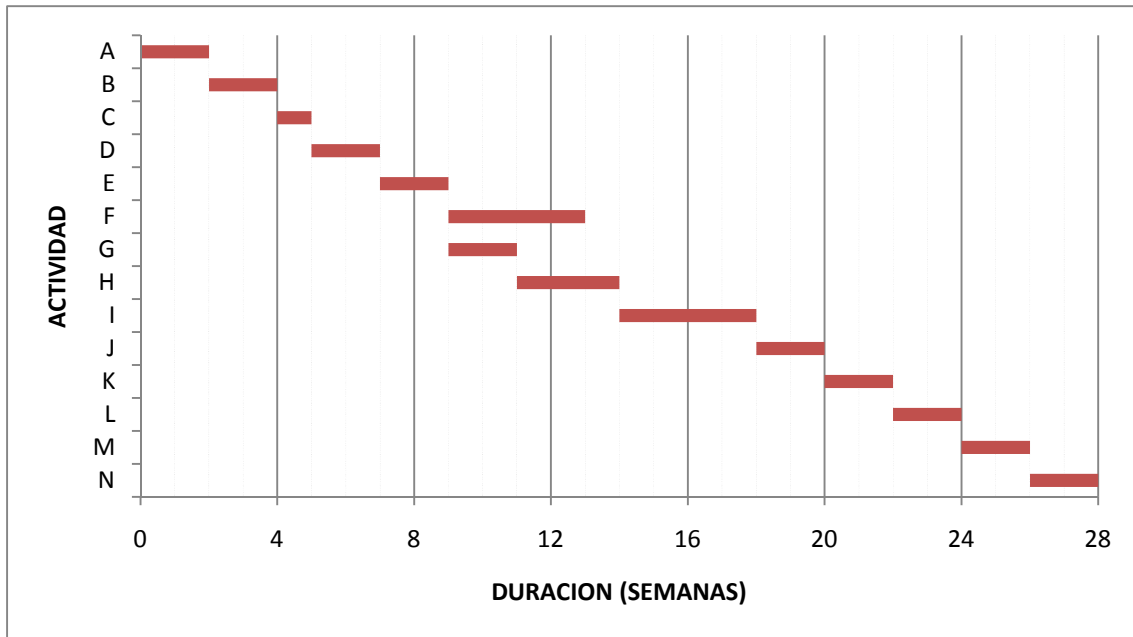


FIGURA 9.1: Diagrama de Gantt

En la figura 9.1 se presenta el diagrama de Gantt resultante para la ejecución del proyecto. De esta gráfica se puede destacar que las tareas F y G pueden iniciarse en paralelo, pues la realizan personas diferentes; en este caso, la tarea F es realizada por un Ingeniero Senior, responsable del programa AUTOPIA, mientras que las demás tareas son realizadas por un Ingeniero. Para la realización de la tarea K, es necesario haber acabado antes las tareas F y J; en este caso concreto la finalización de la tarea J restringe el comienzo de la tarea K.

9.2 RESUMEN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se presenta un desglose de costes de personal, costes de equipos, costes del material y costes totales.

Antes de llevar a cabo el presupuesto, se van a establecer una serie de condiciones que se muestran a continuación, con el fin de clarificar los datos que se aportan en el mismo.

- La dedicación diaria a la realización del proyecto se considera de 8 horas.
- Los meses se computan como 20 días laborables.
- La dedicación del ingeniero se computa en hombres mes, considerando un hombre mes como 131,25 horas de trabajo.

- Para obtener el coste de los equipos imputable al proyecto, se aplicará la siguiente fórmula de amortización de los mismos.

$$\frac{A}{B} C \cdot D$$

A = número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.
B = periodo de depreciación.
C = coste del equipo (sin IVA).
D = Porcentaje del uso que se dedica al proyecto.

- Se ha tomado como periodo de depreciación de los equipos informáticos 60 meses (5 años), mientras que el de las licencias de software serán 12 meses.
- Los costes indirectos, es decir, aquellos que no se imputan en ninguno de los conceptos mencionados, se consideran como un 20% de los costes totales del proyecto.

Una vez realizadas estas aclaraciones, se muestra a continuación el presupuesto del proyecto que se ha llevado a cabo.



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

1.- Autor:

Esteban de Torres Rivera

2.- Departamento:

Ingeniería de Sistemas y Automática

3.- Descripción del Proyecto:

Implementación del control lateral sobre un
vehículo con dirección asistida eléctrica

Duración (meses) **7**

Tasa de costes Indirectos: **20%**

4.- Presupuesto total del Proyecto:

Euros **36.275,82**

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F	Categoría	Dedicación (hombres mes)	Coste hombre mes	Coste (Euro)
Programador control lateral	xxxxxxx-x	Ingeniero Senior	1,22	4.289,54	5.229,15
Torres Rivera, Esteban de	xxxxxxx-x	Ingeniero	8,53	2.694,39	22.992,13
Hombres mes			9,75	Total	28.221,28

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable
Ordenador	600,00	100	7	60	70,00
Licencia Matlab	6.000,00	100	3	12	1.500,00
Total					1.570,00

MATERIALES

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costes imputable
MDLBDC24	1	129,00	129,00
CANUSB	2	105,00	210,00
Relés	4	7,89	31,56
Conectores fast-on crimpar	36	0,278	10,01
Conectores fast-on 2 vías	12	0,192	2,30
Caja de montaje	1	10,3	10,30
Placa de montaje	1	15,2	15,20
Cable 4mm flexible	10	0,55	5,50
Cable comunicaciones 4 hijos	4	0,805	3,22
Interruptor con enclavamiento	1	7,72	7,72
Clemas de nylon	6	0,51	3,06
Conector DB-9 hembra	2	1,66	3,32
Caja conector DB-9 aéreo	2	2,30	4,60
Tornillería (varias métricas)	1	2,78	2,78
Total			438,57

6.- Resumen de costes

Conceptos	Presupuesto Costes Totales
Personal	28.221,28
Amortización	1.570,00
Subcontratación de tareas	0,00
Costes de materiales	438,57
Costes Indirectos	6.056,94
Total	36.275,82

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de TREINTA Y SEIS MIL DOSCIENTOS SETENTA Y CINCO EUROS CON OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS.

Leganés a de 27 Julio de 2011

El ingeniero proyectista

Fdo. Esteban de Torres Rivera

REFERENCIAS

- [AEE. 2011] <http://www.esa.int/export/esaCP/Spain.html>. Accedido en Febrero 2011.
- [Arias-Paz, M. 2005] M. Arias-Paz. *El programa electrónico de estabilidad (ESP) de Bosch*. En *Manual de Automóviles*. CIE Dossat 2000, 55ª edición, reimpresión mayo 2005, pp. 978-981.
- [Automatización. 2007] Programa AUTOPIA. *Automatización del Citroën C3 Pluriel*. Documento interno del programa AUTOPIA. 2007.
- [AUTOPIA. 2011] <http://www.car.upm-csic.es/autopia/> Accedido en Julio 2011.
- [Blosseville, J.M. 2000] J.M. Blosseville, M. Parent. *The french program La Route Automatisée*. IEEE Intelligent Systems, pp. 10-11, 2000.
- [Bosch, 2010] http://rb-kwin.bosch.com/sk/en/powerconsumptionemissions/electric_controls/sensors/steering/steeringanglesensor.html. Accedido en Julio 2011.
- [Broggi, A. 1999] A. Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, C.G.L. Bianco, A. Piazzini. *The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems*. International Journal of Intelligent Control and Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 409-441, 1999.
- [Citroën, 2001] Automóviles Citroën España S.A. *El multiplexado: los protocolos VAN y CAN*. Julio 2001.
- [Citroën. 2005] Citroën. *Private Cars C2-C3-C3 Pluriel*, Vol. 1, 2005.
- [Cumani, A. 1995] A. Cumani, S. Denasi, P. Grattoni, A. Guiducci, G. Pettiti, G. Quaglia. *MOBLAB: a mobile laboratory for testing realtime vision-based systems in path monitoring*. Proceedings of SPIE, Vol. 2352, pp. 228-238, 1995.
- [DARPA. 2007] DARPA. *Special issue on the DARPA urban challenge autonomous vehicle competition*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 8, No. 4, 2007.
- [DGT. 2005] DGT. *Parque nacional de vehículos*. Dirección General del Tráfico, Ministerio del Interior, 2005.
- [DGT. 2009] DGT. *Número anual de víctimas mortales*. Dirección General del Tráfico, Ministerio del Interior, 2009.

- [Dickmanns, E.D. 1987] E.D. Dickmanns, A. Zapp. *Autonomous high speed road vehicle guidance by computer vision*. 10° Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Vol. 4, pp. 221-226, 1987.
- [Dickmanns, E.D. 1994] E.D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek, J. Schiehlen. *The seeing passenger car 'VaMoRs-P*. Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium, pp. 68 -73, 1994.
- [Fminsearch. 2010] <http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/fminsearch.html>. Accedido en Diciembre 2010.
- [Fricción. 2010] <http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/simscape/ref/translationalfriction.html>. Accedido en Noviembre 2010.
- [García, R. 1998] R.García, T. de Pedro. *Modeling a fuzzy coprocessor and its programming language*. Mathware and Soft Computing, Vol. 5, No. 2-3, pp. 167-174, 1998.
- [García, R. 2000] R. García, T. de Pedro. *First application of the ORBEX coprocessor: Control of unmanned vehicles*. Mathware and Soft Computing, Vol. 7, No. 2-3, pp. 265-273, 2000.
- [Gillespie, T.D. 1992] T.D. Gillespie. *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International, 1ª edición, Febrero 1992.
- [Kaschel, H. 2005] H. Kaschel, E. Pinto. *Análisis protocolar del bus de campo CAN*. Ciencia Abierta, revista electrónica de la Universidad de Santiago de Chile, Vol. 19. 2005.
- [Kim, J-H. 2002] J-H. Kim, J-B. Song. *Control logic for an electric power steering system using assist motor*. MECHATRONICS, Vol. 12, pp. 447-459, 2002.
- [Liu, Q. 2007] Q. Liu, H. Chen, H. Zheng. *Robust control of electric power steering system*. 33° Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.874-879, Noviembre 2007.
- [Malan, S. 2007] S. Malan, M. Milanese, P. Borodani, 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, Mayo 2007.
- [Mancosu, F. 2001] F. Mancosu, C. Savi, P. Brivio, GC. Travaglio, I.Ramirez. *New dynamic tyre model in multi-body environment*. SAE 2001 World Congress. SAE International, Ref. 2001-01-0747. Marzo 2001.

- [Manz, M. 2009] M. Manz, M. Himmelsbach, T. Luettel, H.J. Wuensche. *Fusing LIDAR and vision for autonomous dirt road following*. Autonome Mobile Systeme 2009, pp. 17-24, 2009.
- [MATLAB. 2010] <http://www.mathworks.es/products/control/demos.html?file=/products/demos/shipping/control/dcdemo.html>. Accedido en Diciembre 2010.
- [Mecánica. 2011] <http://www.todomecanica.com/direccion-electrica-asistencia-variable.html> . Accedido en Mayo 2011.
- [Milanes, V. 2009] V. Milanés, J. Pérez, E. Onieva, C. González, T. de Pedro. *Electric power controller for steering wheel management in electric car*. Compatibility and Power Electronics, 6º International Conference Workshop, pp. 444-449, Mayo 2009.
- [Milanes, V. 2010-a] V. Milanés, C. Gonzalez, D.F. Llorca, M.A. Sotelo, B.M. Vinagre. *Clavileño: Evolution of autonomos car*. 13º International IEEE Conference on Intelligent Transportation System, pp. 1129-1134, Septiembre 2010.
- [Milanes, V. 2010-b] V. Milanes, J. Perez, E. Onieva, C. Gonzalez. *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.
- [Modelo rueda. 2010] <http://code.eng.buffalo.edu/dat/sites/tire/tire.html>. Accedido en Noviembre 2010.
- [Moreno, L. 2003] L. Moreno, S. Garrido, C. Balaguer. *Técnicas de control clásicas*. En *Ingeniería de Control: Modelado y control de sistemas dinámicos*. (Ariel Ciencia, 1ª edición, noviembre 2003), pp. 275-327.
- [Naranjo, J.E. 2007] J.E. Naranjo, M.A. Sotelo, C. González, R. García, T. de Pedro. *Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control*. IEEE Intelligent Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 36-45, Febrero 2007.
- [Naranjo, J.E. 2005] J.E. Naranjo, C. González, R. García, T. de Pedro, R.E. Haber. *Power-Steering Control Architecture for Automatic Driving*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Vol. 6, No. 4, pp. 406-415. Diciembre 2005.
- [Nonlinear. 2010] <http://mathworld.wolfram.com/NonlinearLeastSquaresFitting.html>. Accedido en Diciembre 2010.

- [Onieva, E. 2010] E. Onieva, V. Milanés, C. González, T. de Pedro, J. Pérez, J. Alonso. *Throttle and brake pedals automation for populated areas*. ROBOTICA, Vol. 28, pp. 509-516, 2010.
- [Pattern Search. 2010] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30173-pattern-search-method-deterministic-iterative-zero-order-algorithm>. Accedido en Diciembre 2010.
- [Paz, H. 2007] H.Paz. *Identificación y regulación de la dirección del Citroën C3 Pluriel*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Centro de Automatica y Robotica. 2007.
- [Ploeg, J. 2008] J. Ploeg, F.M. Hendriks, N.J. Schouten. *Towards nondestructive testing of pre-crash systems in a HIL setup*. Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE, pp. 91-96, 2008.
- [Sheikholeslam, S. 1993] S. Sheikholeslam, 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, Noviembre 1993.
- [Shladover, S.E. 1992] S.E. Shladover. *The California PATH Program of IVHS research and its approach to vehicle-highway automation*. Proceedings of the Intelligent Vehicles '92 Symposium, pp. 347-352, Junio 1992.
- [Texas Instrument, 2010] Texas Instrument. *Stellaris MDL-BDC24 Brushed DC Motors control module, Getting started guide*. 2010.
- [Thomanek, F. 1996] F. Thomanek, E. Dickmanns. *Autonomous road vehicle guidance in normal traffic*. Recent Developments in Computer Vision, pp. 499-507, 1996.
- [Thorpe, C. 1988] C. Thorpe, M.H. Hebert, T. Kanade, 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, Mayo 1988.
- [Ulmer, B. 1992] B. Ulmer. *VITA - an autonomous road vehicle (ARV) for collision avoidance in traffic*. Proceedings of the Intelligent Vehicles '92 Symposium, pp. 36-41, Julio 1992.
- [Villagrà, J. 2010] J. Villagrà, V. Milanés, J. Pérez, T. de Pedro. *Control basado en PID inteligentes: aplicación a control de crucero de un vehículo a bajas velocidades*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 7, No. 4, pp. 44-52, Octubre 2010.

- [VISLAB. 2010] <http://viac.vislab.it/>. Accedido en Diciembre 2010.
- [von Hundelshausen, F. 2008] F. von Hundelshausen, M. Himmelsbach, F. Hecker, A. Mueller, H.J. Wuensche. *Driving with tentacles: Integral structures for sensing and motion*. Journal of Field Robotics, Vol. 25, No. 9, pp. 640-673, 2008.
- [Wang, C.C. 2007] C.C. Wang, C. Thorpe, S. Thrun, M. Hebert, H. Durrant-Whyte. *Simultaneous localization, mapping and moving object tracking*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 26, No. 9, p. 889, 2007.

DOCUMENTOS ANEXOS

ANEXO A: MODELO FÍSICO DEL NEUMÁTICO

En este anexo se expone de forma cualitativa el modelo físico correspondiente a un neumático. [Mancosu, F. 2001].

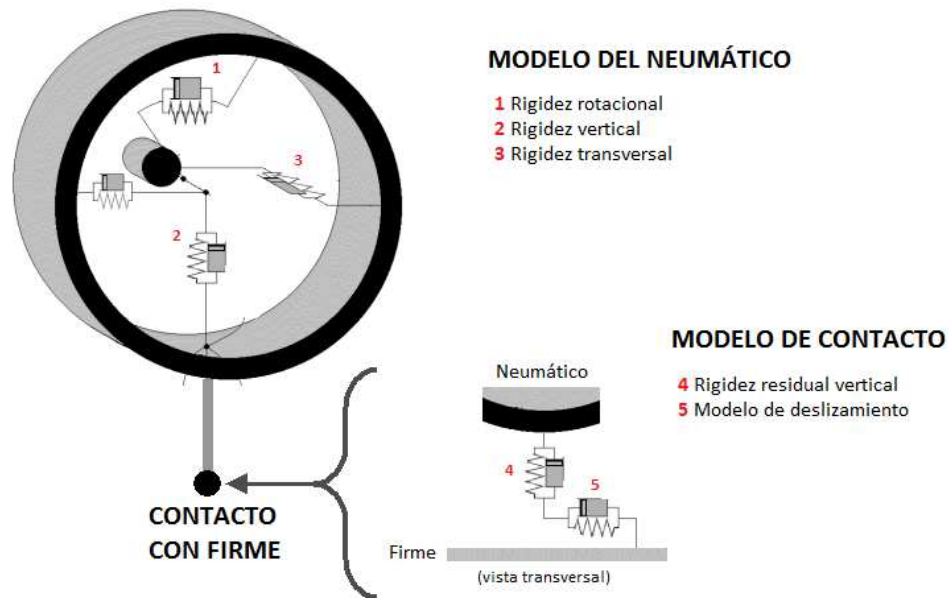


FIGURA A.1: Modelo físico del neumático

Puesto que el modelado del neumático supera los objetivos de este proyecto, en la figura A.1 se muestra, a título informativo, el modelo de neumático que se utiliza actualmente para la modelización del mismo. La figura representa el modelo físico de la interacción llanta-neumático; este tiene en cuenta la rigidez rotacional debida a la deformación del neumático al girar; la rigidez vertical, compuesta por la deformación del neumático al peso, directamente dependiente de la presión de inflado y de la rigidez de los flancos; la rigidez transversal, debida a la deformación del neumático en sentido transversal, compuesta por la rigidez de los flancos y de la presión de inflado.

En la misma figura (parte inferior), se muestra la modelización del contacto del neumático con el firme; compuesto por una rigidez vertical residual, que aquí sería la rigidez de la propia goma del neumático, y de un modelo de deslizamiento, para modelar el efecto de la deformación transversal del neumático al contacto con el firme. Esto provoca que exista un ángulo de deslizamiento, es decir, que la orientación de la rueda no coincida con la dirección del neumático en el punto de contacto. Este efecto se aprecia mejor en la figura A.2.

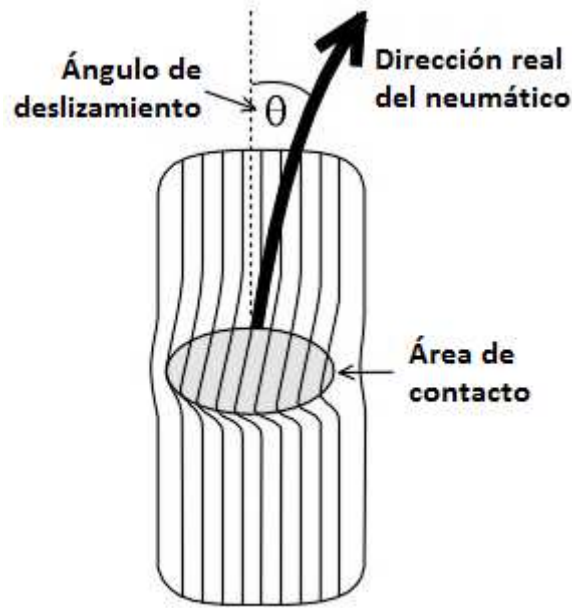


FIGURA A.2: Ángulo de deslizamiento

El ángulo de deslizamiento es mayor cuanto más fuerza lateral exista en el neumático.

Destacar que en este anexo se ha tratado el deslizamiento lateral y, aunque aquí no se comente, también existe un deslizamiento longitudinal, que afecta a la velocidad del neumático en el punto donde hace contacto con el firme. A esta diferencia de velocidad se la denomina velocidad de deslizamiento. Para más información ver [Modelo rueda. 2010].

ANEXO B: CONTROLADOR MDL-BDC24

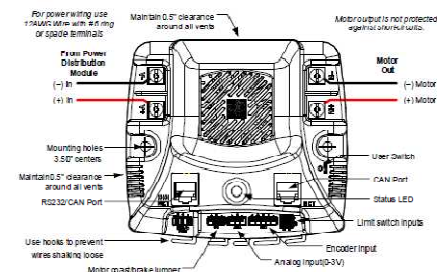
Stellaris® Brushed DC Motor Control Module with CAN (MDL-BDC24)



The Stellaris® Brushed DC Motor Control Module with CAN (MDL-BDC24) improves on the highly successful MDL-BDC design by providing variable speed control for both 12 V and 24 V brushed DC motors at up to 10 A continuous current, while adding a new RS232-based serial control input that also functions as a serial-to-CAN bridge. The MDL-BDC24 includes a rich set of sensor interfaces, connectivity, and control options, including analog and quadrature encoder interfaces, high performance Controller Area Network (CAN) interfaces, and an RS232 port. The module uses highly optimized software and a powerful 32-bit Stellaris® microcontroller to implement open-loop voltage control as well as closed-loop control of speed, position, or motor current. The H-bridge on the MDL-BDC24 is run at high-frequency through the MCU's integrated PWM interface and enables DC motors to run smoothly and quietly over a wide speed range.

The MDL-BDC24 is powered by the ARM® Cortex™-M3-based LM3S2616 microcontroller that provides efficient and deterministic performance while integrating CAN, UART, and advanced motion control capabilities. The MDL-BDC24 design also incorporates several high-quality analog components from Texas Instruments, including the SN65HVD1050 CAN Transceiver, MAX3221 RS232 Line Driver/Receiver, TPS54040 Swift DC/DC Converter, TPS73633 Voltage Regulator, and INA193 Current Shunt Monitor. The MDL-BDC24 is positioned into a wide variety of consumer and industrial applications, including factory automation devices and systems, mobile robots, household appliances, pumping and ventilation systems, and electric wheelchairs and mobility devices.

Features



The MDL-BDC24 ships as a ready-to-run, yet customizable, module with the following features.

- Quiet control of brushed DC motors
 - 15 kHz Hbridge frequency
- Three options for open-loop voltage control

- Industry-standard R-C servo type (PWM) interface
- Controller Area Network (CAN) interface
- RS232 serial interface
- Two options for closed-loop, speed, position, or current control
 - Controller Area Network (CAN) interface
 - RS232 serial interface
- CAN communication
 - Full configurability of module options
 - Real-time monitoring of current, voltage, speed, and other parameters
 - Load firmware over RS232/CAN
- RS232 serial communication
 - Bridges an RS232-enabled device to the CAN
 - Directly interfaces to a PC serial port or National Instruments cRIO
- Limit switch inputs for forward and reverse directions
- Firmware features
 - Full configurability of closed loop module parameters
 - Real-time monitoring of sensor data including motor current, encoder position or speed, and limit switch state
- Status LED indicates run, direction, and fault conditions
- Motor brake/coast selector
- Quadrature encoder input (QE1) and analog input
- Color-coded screw terminals for all power wiring
- Easy to customize using tools supporting the MDL-BDC24 from Keil, IAR, Code Sourcery, or Code Red (using a Stellaris evaluation kit or preferred ARM® Cortex™-M3 debugger)



Ordering Information

Product Number	Description
MDL-BDC24	Stellaris® Brushed DC Motor Control Module with CAN (MDL-BDC24) for Single-Unit Packaging
MDL-BDC24-B	Stellaris® Brushed DC Motor Control Module with CAN (MDL-BDC24) for Volume Packaging

Texas Instruments • 108 Wild Basin, Suite 350 • Austin, TX 78746
Main: +1-512-279-8800 • Fax: +1-512-279-8879 • <http://www.ti.com>

Copyright © 2009 Texas Instruments, Inc. All rights reserved. Stellaris and StellarisWare are registered trademarks of Texas Instruments. ARM and Thumb are registered trademarks, and Cortex is a trademark of ARM Limited. Other names and brands may be claimed as the property of others.



PR-MDI BDC24-00

December 4, 2009

ANEXO C: CÁLCULO DE LA EXPRESIÓN DEL PID DISCRETO

e: error de posición.

P: Ganancia proporcional.

I: Ganancia Integradora.

D: Ganancia derivativa.

N: filtro de la parte derivativa.

Ts: tiempo de muestreo (en nuestro caso es 0.01 segundos).

Y: Valor de la salida de control.

Sabiendo que la ecuación de un controlador PID en tiempo discreto es la mostrada en la ecuación (C.1)

$$Y = P * e + I * \frac{T_s}{z-1} * e + D * \frac{N}{1 + \frac{T_s}{z-1}} * e \quad (C.1)$$

Llamamos a la parte integradora Y1, y a la parte derivativa Y2. Quedando se la forma que se muestra en las ecuaciones (C.2) y (C.3) respectivamente.

$$Y1 = \frac{I * T_s}{z-1} * e \quad (C.2)$$

$$Y2 = \frac{D * N * T_s}{1 + \frac{T_s}{z-1} * N} * e \quad (C.3)$$

Ahora se eliminan denominadores utilizando dicha igualdad y nos quedan unas expresiones como las mostradas en (C.4) y (C.5).

$$Y1 * z - Y1 = I * T_s * e \quad (C.4)$$

$$Y2 * z - Y2 + Y2 * T_s * N = D * N * (e * z - e) \quad (C.5)$$

Cambiando del dominio en “z” al dominio en el instante discreto “t_k”. Las ecuaciones (C.4) y (C.5) quedan transformadas en las ecuaciones (C.6) y (C.7) respectivamente.

$$Y1(t_{k+1}) - Y1(t_k) = I * Ts * e(t_k) \quad (C.6)$$

$$Y2(t_{k+1}) - Y2(t_k) + Y2(t_k) * Ts * N = D * N * [e(t_{k+1}) - e(t_k)] \quad (C.7)$$

Puesto que nos interesa obtener el valor del instante actual (t_k), en función del instante anterior (t_{k-1}), se realiza un cambio matemático. Se cambia t_{k+1} por t_k y el valor anterior t_k por t_{k-1} , quedando las ecuaciones como se muestran en (C.8) y (C.9).

$$Y1(t_k) - Y1(t_{k-1}) = I * Ts * e(t_{k-1}) \quad (C.8)$$

$$Y2(t_k) - Y2(t_{k-1}) + Y2(t_{k-1}) * Ts * N = D * N * [e(t_k) - e(t_{k-1})] \quad (C.9)$$

Siendo los valores denominados con (t_k) los valores de las variables en el instante actual, y (t_{k-1}) los valores de las variables en el instante anterior.

Agrupando términos en dichas ecuaciones, quedan las expresiones mostradas en (C.10) y (C.11)

$$Y1(t_k) = Y1(t_{k-1}) + I * Ts * e(t_{k-1}) \quad (C.10)$$

$$Y2(t_k) = Y2(t_{k-1}) * [1 - Ts * N] + D * N * [e(t_k) - e(t_{k-1})] \quad (C.11)$$

Por lo tanto, la ecuación a implementar en el código para realizar el control es la que se muestra a continuación (C.12)

$$Y = P * e(t_k) + Y1(t_k) + Y2(t_k) \quad (C.12)$$

ANEXO D: CÓDIGO DE MATLAB PARA LA BUSQUEDA DEL PID ÓPTIMO

```

function [Kp,Ki,Kd,N,fcost]=optim_PID
v_th=0.001; %tensión de codo para la simulación.
x0 = [0.21,0.27,0.13,0.9]; %valores iniciales de búsqueda.
options=optimset('Display','iter');
[x1,fval] = fminsearch(@fun,x0,options); %función de optimizado
assignin('base','Kp',x1(1));
assignin('base','Ki',x1(2));
assignin('base','Kd',x1(3));
assignin('base','N',x1(4));
fcost=fval;
[tout,xout,yout] = sim('PID_completo',[0 1]); %simulamos el sistema con los valores
plot(tout,yout(:,1)); %representamos gráficamente los resultados
hold on;
plot(tout,yout(:,2),'r');
    function J=fun(x) %función a optimizar
        Kp = x(1);
        Ki = x(2);
        Kd = x(3);
        N = x(4);
        opt = simset('SrcWorkspace','Current');
        [tout,xout,yout] = sim('PID_completo',[0 1],opt); %simulación sistema
        pos = yout(:,2);
        pos_ref = yout(:,1);
        J=sum((pos-pos_ref).^2)/length(pos); %función a optimizar
    end
end
end

```