



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

# DESARROLLO DE UNA SUSPENSIÓN SEMI-ACTIVA EN UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL BASADO EN LÓGICA FUZZY

Autor: D. Adrián Pérez Rello

Tutor: Dra. Dña María Jesús López Boada

Leganés, septiembre de 2011



# Agradecimientos

A mis padres, Antonio y Ana por darme la posibilidad de llegar a este momento que tan lejano se veía, pero que por fin ha llegado.

A mis compis, y en el fondo buenos amigos que he hecho durante estos arduos años de estudio, Albertito, Alejandro y Jesús, y que espero que siga siendo así durante mucho más tiempo, por tantos momentos aguantándome y animándome a seguir.

A mis amigos de toda la vida, Héctor y Victorio, por esos buenos ratos pasados juntos.

A María Jesús y a Beatriz, por ayudarme a sacar este proyecto adelante en momentos en los que hubiese arrojado la toalla.

## Índice General

Capítulo 1 Introducción .....	13
1.1    Objetivos .....	15
1.2    Organización del proyecto .....	17
Capítulo 2 La suspensión .....	18
2.1. Introducción .....	18
2.2. Evolución de las suspensiones.....	23
2.3. Características que debe reunir una suspensión.....	23
2.4. Principales componentes de una suspensión.....	25
2.4.1    Elementos elásticos .....	25
2.4.1.1    Ballestas .....	25
2.4.1.2    Resortes helicoidales .....	26
2.4.1.3    Barras de torsión .....	28
2.4.1.4    Barras estabilizadoras.....	29
2.4.2    Elementos de amortiguación .....	31
2.4.2.1    Amortiguador hidráulico convencional.....	32
2.4.2.2    Amortiguador hidráulico presurizado.....	33
2.4.3    Otros elementos.....	34
2.4.3.1 <i>Silentblocks</i> y cojinetes elásticos.....	34
2.4.3.2    Rótulas .....	36
2.4.3.3    Mangueta y buje .....	36
2.4.3.4    Trapecios o brazos de suspensión .....	37
2.4.3.5    Tirantes de suspensión .....	38
2.5 Tipos de suspensiones .....	38
2.5.1    Suspensión pasiva .....	41
2.5.2    Suspensión activa .....	42
2.5.3    Suspensión semi-activa .....	45
2.5.3.1    Control en el amortiguador .....	46

2.5.3.2 Control en la posición mediante actuador .....	49
Capítulo 3 Lógica Fuzzy.....	51
3.1 Lógica de control.....	51
3.2 Introducción a la <i>Lógica Borrosa</i> .....	52
3.3 Historia de la <i>Lógica Difusa</i> .....	53
3.4 Conjuntos difusos.....	54
3.4.1 Función de inclusión o pertenencia .....	55
3.4.1.1 Función tipo trapezoidal.....	55
3.4.1.2 Función del tipo T (triangular).....	56
3.4.1.3 Ejemplo de función de inclusión o pertenencia .....	57
3.4.2 Particiones borrosas .....	58
3.4.3 Operaciones borrosas.....	59
3.5 Control borroso .....	61
3.5.1 Borrosificador.....	62
3.5.2 Base de reglas borrosas.....	62
3.5.3 Dispositivo de inferencia borrosa.....	63
3.5.4 Desborrosificador .....	63
3.6 Sistema tipo Sugeno.....	64
3.7 Ejemplo.....	65
Capítulo 4 Construcción del modelo y pasos para la simulación.....	69
Capítulo 5 Resultados de la simulación .....	90
5.1 Introducción a la simulación.....	91
5.2 Resultados suspensión pasiva .....	94
5.3. Resultados suspensión semi-activa.....	97
5.3.1 Modelo de suspensión semi-activa 1.....	98
5.3.2. Modelo de suspensión semi-activa 2.....	105
5.3.3. Modelo de suspensión semi-activa 3.....	110
5.3.4. Modelo de suspensión semi-activa 4 .....	115
5.3.5. Modelo de suspensión semi-activa 5.....	119
5.3.6. Modelo de suspensión semi-activa 6.....	123

Capítulo 6 Conclusiones y futuros trabajos .....	128
6.1 Conclusiones .....	128
6.2 Futuros trabajos .....	130
Capítulo 7 Referencias.....	132

## Índice de Figuras

Figura 2. 1 Masas suspendidas y no suspendidas en un Renault Laguna.....	19
Figura 2. 2 Elementos destinados a absorber irregularidades.....	21
Figura 2. 3 Movimientos sufridos por la carrocería.....	22
Figura 2. 4 Oscilaciones de un muelle blando vs muelle rígido.....	24
Figura 2. 5 Elementos que componen una ballesta.....	26
Figura 2. 6 Muelles metálicos de un vehículo.....	27
Figura 2. 7 Distintas disposiciones de muelles.....	28
Figura 2. 8 Funcionamiento de una barra de torsión.....	28
Figura 2.9 Montaje de barra de torsión longitudinalmente y transversalmente...	29
Figura 2. 10 Balanceo de la carrocería por efecto de la fuerza centrífuga.....	30
Figura 2. 11 Ejemplo de barra estabilizadora en un eje trasero.....	31
Figura 2. 12 Ejemplo de amortiguador de un vehículo.....	32
Figura 2. 13 Partes de un amortiguador hidráulico.....	33
Figura 2. 14 Amortiguador hidráulico presurizado vs no presurizado.....	34
Figura 2. 15 Ejemplos de Silentblocks en un vehículo.....	35
Figura 2. 16 Ejemplo de cojinetes elásticos para una suspensión.....	35
Figura 2. 17 Rótulas del sistema de suspensión del eje delantero de un Audi R8...	36
Figura 2. 18 Mangueta y buje de un vehículo.....	37
Figura 2. 19 Trapecios de la suspensión en un Fórmula 1 de los años 50.....	37
Figura 2. 20 Suspensión por tirantes de un vehículo.....	38
Figura 2. 21 Imágenes con los tres distintos tipos de esquema de suspensión existentes.....	39
Figura 2. 22 Sistema muelle-amortiguador en una suspensión pasiva.....	41

Figura 2. 23 Suspensión activa BOSE.....	43
Figura 2. 24 Esquema de una suspensión activa.....	43
Figura 2. 25 Imagen de la arquitectura de una suspensión activa.....	45
Figura 2. 26 Sistema de una suspensión semi-activa.....	46
Figura 2. 27 Sistema de suspensión semi-activa de regulación continua desarrollada por Bosch.....	47
Figura 2. 28 Diferentes posiciones de altura en una suspensión hidractiva.....	49
Figura 2. 29 Suspensión ABC de Mercedes.....	50
Figura 3. 1 Función de pertenencia de tipo trapezoidal.....	56
Figura 3. 2 Función de pertenencia triangular.....	56
Figura 3. 3 Subconjunto A preciso.....	57
Figura 3. 4 Subconjunto B impreciso o borroso.....	57
Figura 3. 5 Componentes de la Lógica Fuzzy.....	58
Figura 3. 6 Subconjunto A.....	60
Figura 3. 7 Subconjunto B.....	60
Figura 3. 8 Intersección entre los conjuntos A y B.....	60
Figura 3. 9 Unión entre los conjuntos A y B.....	60
Figura 3. 10 Complementario del conjunto borroso A.....	61
Figura 3. 11 Estructura de un controlador borroso o FLC.....	61
Figura 3. 12 Esquema de un péndulo inverso.....	65
Figura 3. 13 Función de pertenencia.....	66
Figura 3. 14 Reglas para el ángulo y velocidad nulos.....	67
Figura 3. 15 Aplicación del operador y.....	67
Figura 3. 16 Reglas para el segundo caso.....	68
Figura 3. 17 Resultado de la inferencia borrosa y posterior desborrosificación.....	68

Figura 4. 1 Vehículo a simular en ADAMS CAR.....	69
Figura 4. 2 Crear variables de estado para exportar a MATLAB.....	71
Figura 4. 3 Dar valores a las fuerzas en ADAMS.....	72
Figura 4. 4 Crear medidores de aceleración vertical.....	73
Figura 4. 5 Crear medidores de desplazamiento vertical.....	74
Figura 4. 6 Añadir obstáculos a la carretera.....	75
Figura 4. 7 Configuración de parámetros del bache.....	76
Figura 4. 8 Carretera generada.....	77
Figura 4. 9 Crear plan de exportación.....	77
Figura 4. 10 Crear el plan de exportación de salidas del sistema.....	78
Figura 4. 11 Simulación de una carretera 3D en ADAMS.....	79
Figura 4. 12 Sistema importado desde ADAMS.....	80
Figura 4. 13 Modelo de suspensión pasiva en Simulink.....	82
Figura 4. 14 Parámetros de los bloques de función.....	83
Figura 4. 15 Configuración de parámetros para el análisis.....	84
Figura 4. 16 Modelo de suspensión semi-activa en Simulink.....	86
Figura 4. 17 Construcción de variables de entrada en Fuzzy.....	87
Figura 4. 18 Construcción de variables de salida en Fuzzy.....	87
Figura 4. 19 Construcción de reglas Fuzzy.....	88
Figura 4. 20 Esquema final de Fuzzy.....	89
Figura 5. 1 Modelo de suspensión semi-activa.....	91
Figura 5. 2 Aceleración vertical en la suspensión pasiva.....	94
Figura 5. 3 Desplazamiento relativo de la suspensión en la suspensión pasiva.....	95
Figura 5. 4 PSD de la aceleración de la suspensión pasiva.....	96

Figura 5. 5 Conjuntos borrosos para la entrada de aceleración al sistema Fuzzy del modelo1.....	99
Figura 5. 6 Conjuntos borrosos para la entrada de desplazamiento relativo al sistema Fuzzy del modelo 1.....	99
Figura 5. 7 Conjuntos borrosos para la salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 1.....	100
Figura 5. 8 Comparación de la aceleración vertical del modelo 1 y la suspensión pasiva.....	102
Figura 5. 9 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 1 y la suspensión pasiva.....	103
Figura 5. 10 PSD para el modelo 1 de suspensión semi-activa.....	104
Figura 5. 11 Comparación de la aceleración vertical del modelo 2 y la suspensión pasiva.....	107
Figura 5. 12 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 2 y la suspensión pasiva.....	108
Figura 5. 13 PSD para el modelo 2 de suspensión semi-activa.....	109
Figura 5. 14 Comparación de la aceleración vertical del modelo 3 y la suspensión pasiva.....	112
Figura 5. 15 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 3 y la suspensión pasiva.....	113
Figura 5. 16 PSD para el modelo 3 de suspensión semi-activa.....	114
Figura 5. 17 Conjuntos borrosos de salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 4.....	115
Figura 5. 18 Comparación de la aceleración vertical del modelo 4 y la suspensión pasiva.....	116
Figura 5. 19 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 4 y la suspensión pasiva.....	117
Figura 5. 20 PSD para el modelo 4 de suspensión semi-activa.....	118

Figura 5. 21 Conjuntos borrosos de la salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 5.....	119
Figura 5. 22 Comparación de la aceleración vertical del modelo 5 y la suspensión pasiva.....	120
Figura 5. 23 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 5 y la suspensión pasiva.....	121
Figura 5. 24 PSD para el modelo 5 de suspensión semi-activa.....	122
Figura 5. 25 Comparación de la aceleración vertical del modelo 6 y la suspensión pasiva.....	124
Figura 5. 26 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 6 y la suspensión pasiva.....	125
Figura 5. 27 PSD para el modelo 6 de suspensión semi-activa.....	126

## Índice de Tablas

Tabla 3. 1 Denominación de las particiones borrosas.....	59
Tabla 3. 2 FAM para el control del péndulo inverso.....	66
Tabla 5. 1 Efectos debidos a exposiciones a vibraciones mecánicas sobre el cuerpo humano.....	92
Tabla 5. 2 Valores RMS para la suspensión pasiva.....	96
Tabla 5. 3 Nomenclatura de las particiones borrosas.....	98
Tabla 5. 4 Reglas de actuación del modelo 1.....	101
Tabla 5. 5 RMS para el modelo 1 de suspensión semi-activa.....	103
Tabla 5. 6 Reglas de actuación del modelo 2.....	106
Tabla 5. 7 RMS para el modelo 2 de suspensión semi-activa.....	108
Tabla 5. 8 Reglas de actuación del modelo 3.....	111
Tabla 5. 9 RMS para el modelo 3 de suspensión semi-activa.....	113
Tabla 5. 10 RMS para el modelo 4 de suspensión semi-activa.....	117
Tabla 5. 11 RMS para el modelo 5 de suspensión semi-activa.....	121
Tabla 5. 12 RMS para el modelo 6 de suspensión semi-activa.....	125

# Capítulo 1

## Introducción

Actualmente, el vehículo automóvil forma parte de la vida cotidiana de la gran mayoría de las personas, tratándose de un medio de vida para algunos y un simple medio de transporte para otros. Un vehículo no es sino una obra de ingeniería, resultado de horas de trabajo y experimentación, de forma que se consiga dar al usuario un producto final seguro y duradero.

De las diferentes partes de las que está formado un automóvil, la suspensión es uno de los componentes fundamentales, sobre todo desde el punto de vista del confort y la seguridad. La mayoría de las personas asocian seguridad a otros elementos presentes en el vehículo como puedan ser los cinturones, *airbags* o frenos *ABS*. Sin embargo, si una suspensión no se encuentra diseñada de manera correcta o no cumple sus funciones satisfactoriamente, las probabilidades de accidente se multiplican de manera exponencial.

Es por ello que, a la vez que el vehículo ha ido evolucionando, desde sus motorizaciones a su aerodinámica, haya sido fundamental que de la misma forma se desarrollasen nuevos sistemas de suspensión, lo más eficaces posibles, de manera que confort y seguridad se mantuviesen. Este proyecto es el resultado de dicha evolución.

Una suspensión consta de una serie de dispositivos, que pueden variar de forma drástica entre una suspensión del tipo pasivo y del tipo activo, encargados de unir las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo, es decir, sirve de enlace entre chasis y ruedas a modo de simplificación. Sus dos principales funciones son, maximizar el contacto entre la rueda y la calzada, y proporcionar confort a los ocupantes. Más adelante se advertirá que, encontrar un punto óptimo entre ambas funciones será sumamente complicado, siendo el principal motivo del desarrollo de las llamadas "suspensiones inteligentes" que se adapten a las circunstancias.

En el párrafo anterior, se introdujo el concepto de "suspensión inteligente" haciendo referencia a la posibilidad de adaptación de la misma a distintas circunstancias, por lo que, desde el punto de vista del funcionamiento, se puede clasificar una suspensión en tres grupos, atendiendo a esta diferenciación: suspensión pasiva, suspensión semi-activa y suspensión activa [1].

Las suspensiones pasivas ocurren únicamente a dispositivos del tipo mecánico en los que sus propiedades no pueden ser variadas una vez son instaladas en el automóvil, ni durante la marcha del mismo. Es por esto por lo que, hasta el desarrollo de suspensiones inteligentes, o bien se diseñaban suspensiones blandas, idóneas para obtener confort para los pasajeros pero sacrificando la estabilidad, o viceversa, buscar el máximo control del vehículo, perdiendo confort mediante el diseño de suspensiones rígidas. Además, puede verse que encontrar una cohesión entre ambos modos tiene visos de no ser tarea sencilla.

La solución al uso de una u otra configuración de suspensión nació con la utilización de las denominadas suspensiones semi-activas. Las suspensiones semi-activas cuentan con sistemas electrónicos capaces de variar las propiedades de los elementos mecánicos o de actuadores que trabajen de forma paralela al muelle y amortiguador, limitando el desplazamiento de forma que se incremente la seguridad de los ocupantes, o disminuyendo las aceleraciones verticales, y por consiguiente, aumentando el confort. El último paso en la evolución es el desarrollo de suspensiones activas, en las que se sustituye todo el conjunto tradicional de la suspensión pasiva, a saber muelle más amortiguador, por actuadores que actúan de manera independiente en cada rueda a partir de las señales recibidas por el controlador.

Se observa por tanto que, el principal punto de desarrollo de suspensiones se centrará en el estudio y optimización de suspensiones activas y semi-activas. Dichos tipos de suspensiones necesitan para su funcionamiento de la información recogida por los distintos sensores repartidos por el vehículo y que les proporcionan principalmente dos condiciones para el cálculo: la aceleración vertical del vehículo (de la masa suspendida), y desplazamiento vertical de la suspensión.

La aceleración vertical afectará a la comodidad en marcha del vehículo. Se presentarán bajos valores de aceleración para los casos de suspensiones blandas y mayores valores cuando se trate de suspensiones rígidas, disminuyéndose el confort. En cuanto al desplazamiento, este repercute en el hecho de que una suspensión cuenta con un espacio limitado de operación dentro del vehículo.

En lo relativo a los modelos de control o de gobierno de la suspensión activa y semi-activa, se ha producido una evolución a lo largo de su desarrollo. El principal problema encontrado a la hora de usar un determinado modelo es cómo procesará los parámetros de la suspensión que se deberán tener en cuenta en la suspensión. En los inicios se utilizaban teorías de optimización lineal, sin embargo, este tipo de controladores presentaban como desventaja el no poder contar con retroalimentación, de modo que, pudiesen recibir información acerca de las condiciones de la carretera o de la velocidad. Como solución a estos problemas se recurrió a los denominados *Robust Controls*, capaces de tratar sistemas con parámetros inciertos. El principal modelo de este tipo de control y más usado en la actualidad es el que recurre a la *Lógica Fuzzy* o Lógica Borrosa.

Hasta ahora, en el estudio de suspensiones semi-activas en vehículos, se había adoptado la teoría del modelo de cuarto de coche y *Lógica Fuzzy*, sin embargo, en el presente caso, y gracias a la utilización del programa *ADAMS/CAR*, se podrá recurrir al modelo de vehículo completo, pudiendo obtener valores que se ajusten en mayor medida a la realidad.

Para el presente proyecto se utilizarán principalmente dos programas informáticos:

- *ADAMS R3*, en su módulo *CAR*, se trata de un programa de diseño. *ADAMS* responde a las siglas "*Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems*", y permite la simulación de la dinámica de un vehículo.
- *MATLAB R2007b*, en su módulo *Simulink*, programa de aplicaciones matemáticas y algebraicas. Permite la simulación de controles con cierto grado de abstracción.

## 1.1 Objetivos

El principal objetivo del proyecto será el desarrollo de la Lógica Borrosa y la mejora del sistema de control implementado por medio de la aplicación *Simulink* para una suspensión del tipo semi-activo. Se estudiarán distintos modelos de lógica para intentar mejorar principalmente los valores de aceleración vertical, consiguiendo un aumento del confort de los ocupantes.

Para conseguir alcanzar dicho objetivo, se deberá anteriormente crear una conexión entre el programa informático *ADAMS/CAR* y *MATLAB*. Mediante *ADAMS* se desarrollará toda la parte física del modelo de suspensión semi-activa, se le añadirá al vehículo disponible actuadores de tipo hidráulico y además se creará una calzada para poder simular su funcionamiento en un entorno real. Una vez creado dicho modelo, se exportará a *MATLAB* para proceder a su simulación.

Así los objetivos serán:

- Optimizar el controlador borroso que gobierna la suspensión semi-activa para aumentar los valores de confort, atendiendo a la aceleración vertical, con respecto a los que tendría el mismo vehículo con una suspensión pasiva.
- Aprender el manejo y uso de los programas informáticos *ADAMS* en su módulo *ADAMS/CAR* y *MATLAB* en su módulo *Simulink*.
- Conseguir usar las variables del vehículo creadas con *ADAMS* en *MATLAB*.
- Utilizar la *Lógica Fuzzy* para la implementación de un controlador de la suspensión.

Además, este proyecto se muestra como una continuación de los anteriormente desarrollados [2], [3] y [4] en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, en los que se desarrollaban suspensiones semi-activas con modelos de cuarto, medio y vehículo completo respectivamente, y que han sido tomados como punto de partida para el desarrollo del mismo.

La principal diferencia con respecto a los anteriores proyectos es que, mediante la utilización de *ADAMS*, las condiciones del vehículo y de la calzada se pueden aproximar de una forma mucho más precisa a la realidad, además de conseguir un mayor número de condiciones para el desarrollo.

## 1.2 Organización del proyecto

Además de desarrollar la aplicación de control, y la evaluación de los resultados, en el presente proyecto se intentará introducir al conocimiento de la lógica borrosa y de suspensiones.

En el *Capítulo 2 La suspensión*, se desarrollará de una forma resumida qué es básicamente una suspensión, los tipos existentes actualmente, sus componentes y su funcionamiento. De igual modo, se profundizará en los tipos de suspensiones activas y semi-activas relacionadas con el proyecto.

En el *Capítulo 3 Lógica Fuzzy*, se hará una pequeña introducción a los sistemas lógicos de control y en concreto al utilizado en el presente proyecto, Lógica Borrosa o *Fuzzy*, sus principales características, forma de ejecución así como un pequeño ejemplo para una mejor comprensión del mismo.

En el *Capítulo 4 Creación del modelo y pasos para simulación*, se detallará como crear el modelo y sus diferentes características en *ADAMS*, como exportarlo y plantear el sistema en *Simulink* y proceder a la simulación para la obtención de los datos de resultado.

En el *Capítulo 5 Resultados de la simulación*, se presentarán los resultados que se obtienen tras el estudio tanto del vehículo equipado con suspensión pasiva como de los diferentes modelos de lógica utilizados en la suspensión semi-activa. Los valores a estudiar serán la aceleración vertical del chasis, el desplazamiento relativo de la suspensión y dos parámetros de comodidad, *RMS (Root Mean Square)* y *PSD (Power Spectral Density)*.

Con el *Capítulo 6 Conclusiones y futuros trabajos*, se desarrollarán las principales conclusiones que se obtienen a partir de los resultados obtenidos en el capítulo 5, seleccionando los modelos de lógica de suspensión semi-activa más efectivos, y además, se darán nociones sobre posibles planteamientos o caminos que podrían tomarse para continuar la línea de este proyecto.

Por último, se añade un capítulo más, el número 7, en el que se listan las principales referencias tomadas para el desarrollo de la investigación.

# Capítulo 2

## La suspensión

### 2.1. Introducción

Si se acude al diccionario de la *Real Academia Española* [5], se define suspensión para un vehículo automóvil o vagón de ferrocarril, como el conjunto de piezas y mecanismos destinados a hacer elástico el apoyo de la carrocería sobre los ejes de las ruedas.

De una forma más explícita se puede entender igualmente suspensión como una serie de elementos elásticos que se interponen entre los elementos suspendidos y los no suspendidos de un vehículo.

Antes de continuar, y para una mejor comprensión posterior de conceptos, se va a definir en qué consisten los elementos suspendidos y no suspendidos, las dos categorías en las que se pueden dividir la masa de un vehículo desde un punto de vista ingenieril:

- Elementos suspendidos: todos aquellos elementos cuya masa es soportada por el bastidor o el chasis, como pueda ser el caso del motor, carrocería, componentes, etc.
- Elementos no suspendidos: resto de masas que no se encuentran definidas dentro del grupo anterior como puedan ser los ejes, llantas, neumáticos o frenos.

En la *Figura 2.1. Masas suspendidas y no suspendidas en un Renault Laguna* se puede observar de una forma más gráfica, los términos anteriormente definidos.

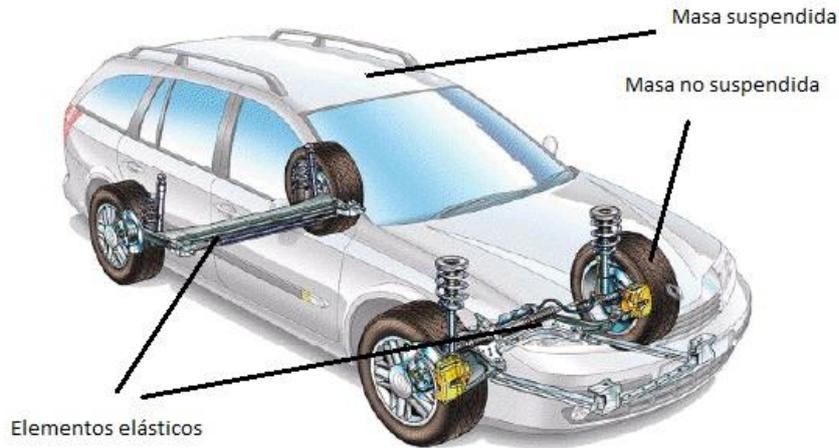


Figura 2. 1 Masas suspendidas y no suspendidas en un Renault Laguna [6]

Además, la suspensión estará destinada a la absorción de irregularidades en la calzada con tres fines básicos:

- Proporcionar comodidad a los pasajeros del vehículo, filtrando las desigualdades de la carretera.
- Mantener la estabilidad y direccionalidad del vehículo para que el conductor mantenga el control en todo momento.
- Maximizar el contacto entre la rueda y la calzada para aumentar la adherencia.

Estas son las tres principales funciones, sin embargo, existen otras tareas complementarias en las que el sistema de suspensión también realiza un papel activo [7]:

- Transmisión de las fuerzas de aceleración entre los ejes y el bastidor: tanto los pares necesarios a la hora de acelerar como de frenar se producen en los ejes del vehículo, por tanto, el sistema que une a los ejes con la carrocería, a saber sistema de suspensión, será el encargado de la transmisión de dichas fuerzas.
- Resistir el par motor y el par de frenada: durante la aceleración y la frenada se produce una transferencia de masa entre los distintos ejes (dependiendo de que sea una u otra cosa) por tanto, en momentos

puntuales, la suspensión puede llegar a soportar cargas muy superiores a las que tendría con el vehículo en estática.

- Resistir los efectos de las curvas: se sabe que cuando un vehículo toma una curva y por efecto de la fuerza centrífuga, se tiende a transferir la carga a la parte del vehículo que circula por el exterior de la curva. Por tanto, la suspensión debe ser capaz de mantener el contacto de la rueda interior con la calzada para minimizar las posibilidades de vuelco por despegue de la rueda.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido: es indispensable que, durante todo el recorrido de la suspensión, los valores de giro de las ruedas no varíen. En caso contrario, ante una irregularidad y por ejemplo en la toma de una curva, si el ángulo de dirección variase, podría producirse un accidente.
- Conservar el paralelismo entre los distintos ejes y la perpendicularidad del bastidor: en caso contrario, el contacto entre neumático y calzada no sería el óptimo, produciéndose desgastes desiguales entre los distintos neumáticos.
- Proporcionar estabilidad al eje de balanceo: se deberá intentar durante el diseño, que la suspensión limite el movimiento de balanceo del vehículo.
- Aguantar la carga del vehículo: al igual que en la transferencia de masas, la suspensión deberá ser capaz de ser funcional tanto con el vehículo en vacío, como en máxima carga.

Además del sistema de suspensión, el vehículo cuenta con otra serie de elementos que contribuyen a disminuir las oscilaciones transmitidas al habitáculo por acción de las irregularidades. En el caso de que estas sean pequeñas, bastará con la elasticidad presente en los neumáticos para filtrarlas. Si las irregularidades son de mayor frecuencia, y para que los ocupantes no se vean afectados por el impacto que se transmitiría desde las ruedas a través de los elementos de unión al interior, se interpone el sistema de suspensión, encargado de absorber dichas reacciones.

Existe otro elemento de filtrado presente en el vehículo, los asientos, los cuales resultan realmente útiles y además ofrecen grandes valores de absorción de vibraciones en el caso de asientos de vehículos de gran tonelaje y autobuses. Los conductores de estos vehículos deben circular durante grandes intervalos de tiempo, necesitarían por tanto suspensiones blandas, sin embargo y para no

comprometer la estabilidad del vehículo con carga, se mantienen las suspensiones y se recurre entonces a asientos con suspensión por aire.

En la *Figura 2.2 Elementos destinados a absorber irregularidades* se pueden observar los distintos elementos explicados anteriormente y con los que el vehículo debe absorber las irregularidades antes de que estas lleguen a los ocupantes.

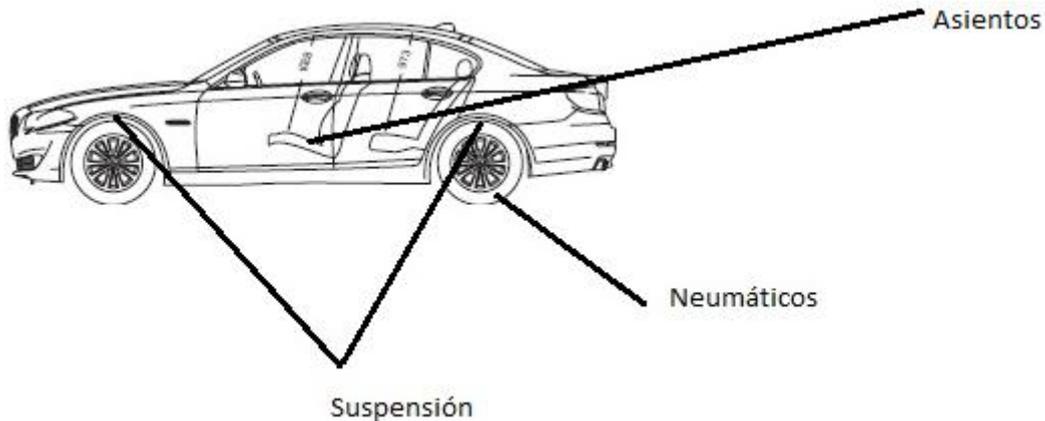


Figura 2. 2 Elementos destinados a absorber irregularidades

Anteriormente se ha hecho una hipótesis que no era del todo cierta y es que la suspensión no se encarga solo de filtrar las irregularidades (aunque esta es su principal función) si no que también se encarga de contrarrestar las vibraciones generadas por la acción de las masas giratorias del vehículo tales como el motor o la transmisión, así como de las acciones aerodinámicas.

Llegados a este momento, se puede plantear cual será el principal problema que van a encontrar los ingenieros a la hora de diseñar una suspensión y no es otro que la relación que deberán buscar entre el confort de los pasajeros y la estabilidad del vehículo.

Si se opta por un diseño en el que prime el confort, típicamente usado por ejemplo en grandes berlinas, se intentará ofrecer una transmisibilidad óptima frente a las irregularidades de la calzada a costa de perder en prestaciones.

Si por el contrario se recurre a un planteamiento en el que prime el comportamiento, típico de vehículos deportivos, se estará buscando el gobierno y transmisibilidad de las fuerzas al neumático en todo momento y situaciones dinámicas, encontrándose el inconveniente del poco filtrado de las irregularidades.

Hasta hace relativamente pocos años, la solución era buscar un punto óptimo entre ambas situaciones, sin embargo, y tras los avances recientes en el campo sobre todo de la electrónica, este problema queda parcialmente solventado mediante el uso de suspensiones semi-activas y activas.

Tal y como se menciona en las funciones complementarias de la suspensión, al pasar por una irregularidad que afecte de distinta manera a cada rueda o a cada eje, se producen movimientos en la carrocería en forma de oscilaciones. Estas pueden producir que el comportamiento del vehículo varíe, llegando incluso a generar reacciones no habituales que conlleven a un accidente. A través de los distintos sistemas de los que consta el sistema de suspensión, se actuará de una manera activa para remitir dichos movimientos de carrocería, que se describen a continuación:

- Velocidad de cabeceo: se genera durante aceleraciones o frenadas fuertes en las que se produce una rápida transferencia de carga entre los ejes delantero y trasero.
- Velocidad de vuelco: suele producirse en curvas cuando la transferencia de carga en el vehículo se produce entre ambos lados de un mismo eje.
- Velocidad de guiñada: en este caso influye el comportamiento dado al vehículo, generalmente los vehículos tienden a diseñarse levemente subviradores debido a su comportamiento más intuitivo.

En la *Figura 2.3. Movimientos sufridos por la carrocería* se pueden observar los movimientos anteriormente descritos.

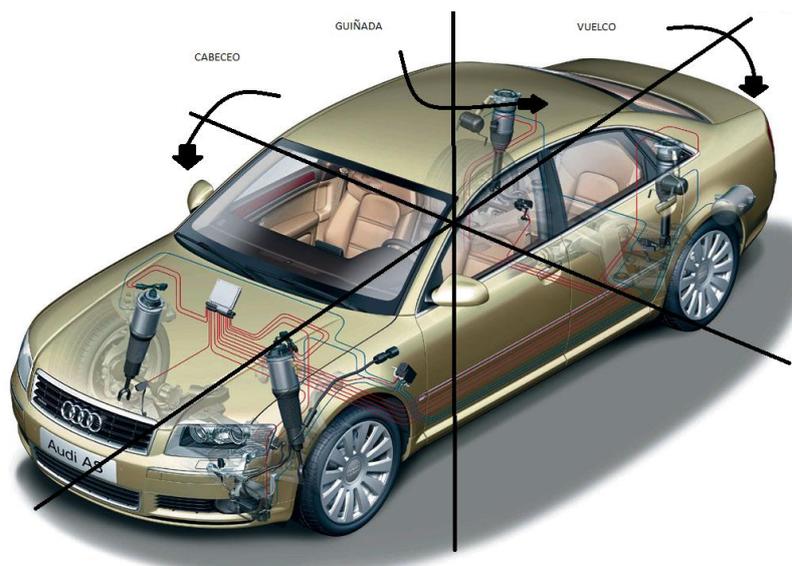


Figura 2. 3 Movimientos sufridos por la carrocería [8]

## 2.2. Evolución de las suspensiones

Las suspensiones de los primeros vehículos recurrían a ballestas similares a las de los carruajes de las que derivaban [9].

Sin embargo, los fabricantes rápidamente advirtieron que debían diseñar nuevos sistemas, las ballestas servían para las bajas velocidades que alcanzaban los carruajes, no así para los nuevos vehículos. El mal funcionamiento del sistema de suspensión provocó numerosos accidentes.

Fue en el año 1901 cuando en Alemania se presentó el primer vehículo de la historia con amortiguadores del fabricante *Mors*.

La siguiente evolución se produciría en el año 1920 cuando *Leyland* utilizaría barras de torsión en una suspensión semi-independiente.

Sería en el año 1922 cuando el fabricante *Lancia* lanzara la primera suspensión independiente de la historia que empezaría a ser el tipo más usado para el eje delantero a partir del año 1932. A partir de este año, se produciría una gran evolución en cuanto a sistemas y componentes que todavía dura hasta nuestros días, pasando desde la suspensión semi-activa hasta la máxima expresión en forma de suspensiones activas de las que más adelante se profundizará en mayor medida.

## 2.3. Características que debe reunir una suspensión

Tras esta pequeña introducción sobre las funciones de la suspensión y su evolución, se pasará a describir las características que han de tenerse en cuenta a la hora del diseño de una suspensión [7] y [10].

En primer lugar, debido a que los elementos que forman parte del sistema de suspensión son los encargados de soportar la carga del vehículo, así como de las acciones externas, estos deberán presentar la suficiente rigidez como para que en ellos no se produzcan deformaciones plásticas.

Sin embargo, al mismo tiempo deben presentar una notable elasticidad, de modo que los neumáticos se encuentren en todo momento en contacto con la calzada, disminuyendo las pérdidas de adherencia.

Para dar esta elasticidad se recurre al uso de muelles, sin embargo, en los actuales vehículos, además es indispensable el uso de amortiguadores, encargados de disminuir las oscilaciones producidas por los muelles. Esto es necesario debido a que, dependiendo de las frecuencias a las que trabajen los muelles, las vibraciones podrían llegar a ser perjudiciales para el cuerpo humano.

Nuevamente se reincide en la elección entre comportamiento o confort, la elección de muelles blandos con grandes recorridos, y por tanto, pequeñas oscilaciones (confort) o muelles rígidos con menor recorrido pero mayor número de oscilaciones (prestaciones). En la *Figura 2.4 Oscilaciones de un muelle blando vs muelle rígido* se puede observar el comportamiento de uno y otro muelle.

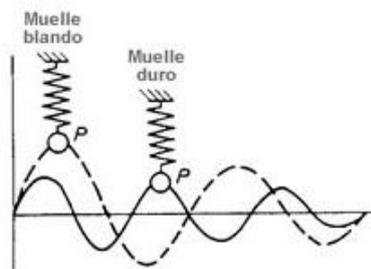


Figura 2. 4 Oscilaciones de un muelle blando vs muelle rígido [11]

Con estas hipótesis sería sencillo el diseño de una suspensión en función del uso que se fuera a dar al vehículo, sin embargo, no existe una situación ideal de funcionamiento, por el contrario, las condiciones a las que puede enfrentarse el sistema de suspensión pueden variar de forma drástica. A modo de ejemplo, la carga del vehículo puede verse incrementada en algunos casos hasta llegar al orden de peso del vehículo en vacío, por tanto, a la hora del diseño de los muelles, se deberán estudiar las situaciones más desfavorables, de modo que no se produzcan deformaciones en ellos en los casos de carga máxima. Atendiendo a este planteamiento, se deberán endurecer para las situaciones más favorables. Caso contrario sería estudiarla para el caso de mínimo peso ya que, la suspensión resultaría excesivamente blanda cuando la carga aumentase.

Haciendo alusión al uso de amortiguadores, estos resultan necesarios en el caso de usar elementos elásticos tales como muelles o ballestas, de modo que limiten las oscilaciones y eviten que las mismas se transmitan al interior del vehículo. Como más adelante se describirá, existe otro tipo de elemento en el que no es necesario el uso de amortiguadores, es el caso de las suspensiones neumáticas, en las que las oscilaciones se limitan mediante la presión interna.

## 2.4. Principales componentes de una suspensión

A continuación, se realizará la descripción de los componentes básicos presentes en las suspensiones del tipo pasivo y que suelen conservarse en el caso de las suspensiones del tipo semi-activo. En las suspensiones activas, estos sistemas suelen sustituirse por actuadores, generalmente del tipo hidráulico.

El sistema de suspensión está compuesto básicamente por tres tipos de elementos:

- Elementos elásticos: maximizan el contacto con la carretera adaptándose a las condiciones del terreno.
- Elementos de amortiguación: neutralizan las oscilaciones de la masa suspendida que son producidas por los elementos elásticos.
- Otros elementos: tales como los brazos de suspensión o bieletas que son parte complementaria del sistema de suspensión.

### 2.4.1 Elementos elásticos

En el caso de suspensiones simples o pasivas, para la unión entre masas suspendidas y no suspendidas, se puede recurrir a tres elementos elásticos distintos [7]:

- Ballestas: típicamente usadas en las suspensiones del tipo dependiente.
- Muelles helicoidales: normalmente usados en suspensiones independientes.
- Barras de torsión: para el tipo semi-independiente.

#### 2.4.1.1 Ballestas

Las ballestas están formadas por tres elementos. El principal son una serie de hojas o láminas de acero, equivalentes a los muelles, que se encargan de realizar la función elástica, además de servir de unión entre el bastidor y ejes. Debido a que el conjunto se encuentra formado por varias láminas, será necesario recurrir a abrazaderas especiales como método de unión, de modo que todas trabajen en sintonía.

Además, la primera lámina, conocida como hoja maestra, se encuentra retorcida en sus extremos. Sobre ellos se montan unos casquillos de cobre que unen a la ballesta con los soportes del bastidor del vehículo mediante pernos.

En la *Figura 2.5. Elementos que componen una ballesta* se muestran las diferentes partes de las que se encuentra formada una ballesta.

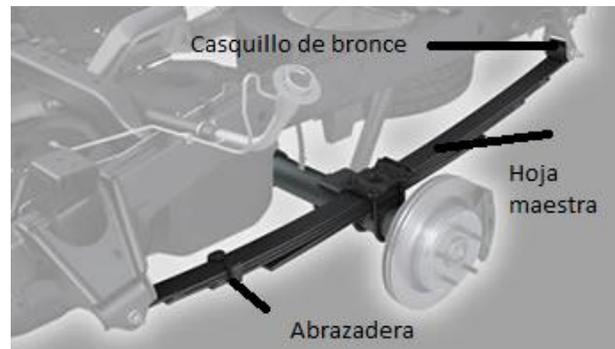


Figura 2. 5 Elementos que componen una ballesta [12]

La elección del número de láminas y espesor de las mismas deberá hacerse en función del uso que se le vaya a dar a la suspensión, y además, en el caso de vehículos que transporten grandes cargas, las ballestas también realizarán una función de absorción de esfuerzos provocados por la propulsión, mediante la deformación longitudinal de la ballesta.

Para la construcción de las ballestas y elección de los materiales a usar, en función de la suspensión, se usa la norma *UNE 26 224-5-6-7*.

#### 2.4.1.2 Resortes helicoidales

Los resortes helicoidales surgen como sustitución de los sistemas de ballesta por la serie de ventajas que presentan con respecto a estas [7]. La rigidez suele ser inferior, consiguiéndose un mejor seguimiento de la calzada, proporcionando además un gran recorrido y ocupando menos espacio que las ballestas. Además, el peso del conjunto no se ve incrementado de manera excesiva.

En la mayoría de los casos, para la construcción de los resortes suele recurrirse a materiales del tipo metálico, sin embargo, en ocasiones, suelen utilizarse otros materiales tales como la goma, el caucho o incluso se utiliza el del tipo neumático, usado en las suspensiones neumáticas, siendo el muelle y el amortiguador un único cuerpo.

La constitución de los resortes helicoidales es básicamente un arrollamiento helicoidal del material elástico formado por un hilo de diámetro variable, elegido en función del peso que vaya a soportar. Las últimas espiras de cada extremo del

muelle se encuentran recortadas para crear una superficie plana y conseguir de esta forma un mejor asentamiento sobre los elementos de soporte.

En la *Figura 2.6. Muelles metálicos de un vehículo* se puede observar un ejemplo de un muelle de material metálico.



Figura 2. 6 Muelles metálicos de un vehículo [13]

Los muelles no trabajan ante esfuerzos laterales, no se encuentran diseñados para desempeñar dicha función, sin embargo, si deben poder desplazarse lateralmente de modo que absorban las reacciones provenientes de la rueda, para ello, se les acoplan unas bielas que proporcionan empuje lateral y transversal. Si que pueden trabajar a torsión, retorciéndose proporcionalmente a la carga soportada, almacenando energía mediante su acortamiento y desprendiéndose de dicha energía y recuperando su forma original al dejar de aplicarse dicha carga.

La flexibilidad de un muelle es función de distintos parámetros: número de espiras de las que se compone, diámetro del hilo, paso entre espiras o características del material entre otros. Los muelles usados no tienen por qué ser uniformes, se puede variar su diámetro de enrollamiento, consiguiendo una distribución distinta de flexibilidad, por ejemplo, un comportamiento blando inicial y una mayor dureza ante mayores acortamientos.

En la *Figura 2.7. Distintas disposiciones de muelles* se muestran ejemplos de muelles usando distintas configuraciones para variar su flexibilidad.



Figura 2. 7 Distintas disposiciones de muelles

Otra forma de variar el comportamiento de un muelle es incluir muelles adicionales de tal forma que en función del recorrido actúe uno, otro o en conjunto. Sin embargo, este tipo de soluciones presenta problemas de espacio.

Por último, a la hora de la elección de los muelles para un sistema de suspensión, se debe tener en cuenta que estos nunca deben alcanzar su longitud de bloqueo en compresión, en caso contrario, las espiras contactarían entre sí, el muelle dejaría de trabajar y se perdería el contacto rueda-calzada.

### 2.4.1.3 Barras de torsión

Se suele recurrir a las barras de torsión en vehículos con suspensión semi-independiente [7]. Su principio de funcionamiento es la utilización de la capacidad del material usado de recuperar su forma tras una deformación debida a la aplicación de una fuerza de torsión.

Se componen de una barra de acero elástico fijada por uno de sus extremos, por el otro extremo se les aplica una fuerza de torsión. Dicha fuerza tenderá a retorcer la barra. Si no se supera el límite elástico del material, al cesar la fuerza, la barra recuperará su forma original. La *Figura 2.8. Funcionamiento de una barra de torsión* muestra un ejemplo de barra de torsión.

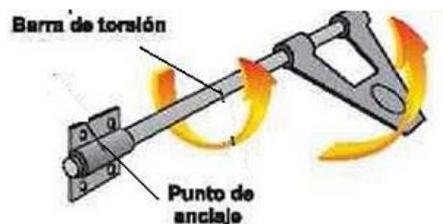


Figura 2. 8 Funcionamiento de una barra de torsión [14]

En el vehículo, el extremo fijo se ancla a la carrocería, de modo que se impide todo movimiento, mientras que el otro extremo libre se une a una palanca solidaria a la barra de torsión, que a su vez está unida al eje de la rueda.

Debido a las irregularidades de la carretera, la rueda subirá y bajará, provocando un esfuerzo torsor sobre la barra, y produciéndose la deformación de la misma.

Las barras de torsión pueden disponerse de dos formas distintas en el vehículo, longitudinalmente (en dirección al avance del vehículo) y transversalmente (en perpendicular al avance del vehículo) tal y como puede verse en la *Figura 2.9. Montaje de barra de torsión longitudinalmente y transversalmente.*

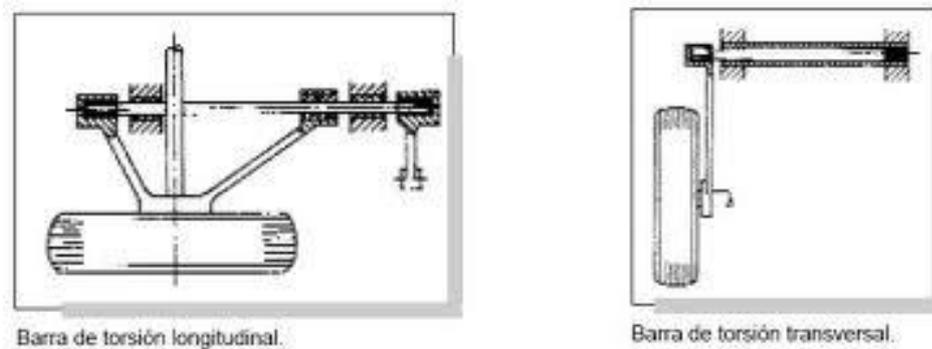


Figura 2. 9 Montaje de barra de torsión longitudinalmente y transversalmente [15]

#### 2.4.1.4 Barras estabilizadoras

Las barras estabilizadoras no actúan como filtro de las irregularidades de la carretera, sino que es un elemento de seguridad activa [7]. Al tomar una curva, y por efecto de la fuerza centrífuga, se produce una transferencia de carga de la parte interior del vehículo (la que toma el interior de la curva) a la parte exterior. Además de ser peligroso por la posibilidad de vuelco por despegue de la rueda interior, esta inclinación de carrocería debida a la compresión por carga de los muelles de la parte exterior del coche, puede llegar a ser molesta para los pasajeros.

En la *Figura 2.10. Balanceo de la carrocería por efecto de la fuerza centrífuga* puede observarse los efectos sobre la carrocería de un vehículo al tomar una curva.



Figura 2. 10 Balanceo de la carrocería por efecto de la fuerza centrífuga [16]

Una posible solución pasaría por la utilización de muelles o ballestas con mayor rigidez, sin embargo, se retomaría el problema inicial, confort o prestaciones.

Se puede solucionar parcialmente el problema recurriendo a barras estabilizadoras, las cuales suelen ir montadas tanto en el eje delantero como en el eje trasero.

La barra estabilizadora consiste básicamente en una barra, normalmente de acero con propiedades elásticas, fijada en sus extremos a cada soporte de la suspensión de cada lado del mismo eje.

Al tomar una curva, la carrocería inclinará de tal forma que una parte de la suspensión se comprima (se acorte su distancia) y otra parte se expanda (aumente su distancia), por tanto, una rueda tenderá a subir y la otra a bajar, provocando un esfuerzo torsor sobre la barra estabilizadora. Según sea el diámetro de la misma, se opondrá en mayor o menor medida a que la distancia relativa entre ambas ruedas varíe y por tanto que la carrocería se incline.

En la *Figura 2.11. Ejemplo de barra estabilizadora en un eje trasero* se puede observar la disposición de una barra estabilizadora.

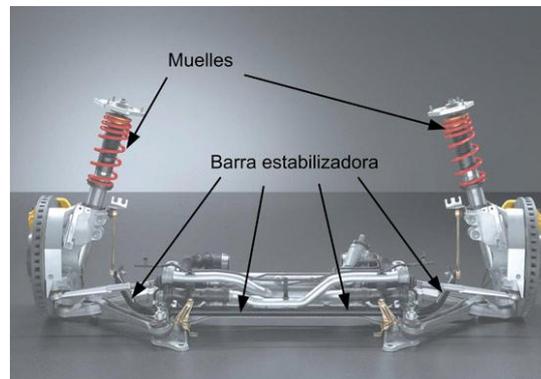


Figura 2. 11 Ejemplo de barra estabilizadora en un eje trasero [17]

Una segunda opción con la cual también se conseguiría reducir el balanceo de la carrocería sería por medio de suspensiones semi-activas o activas.

### 2.4.2 Elementos de amortiguación

Los elementos de amortiguación son los encargados de absorber las vibraciones mecánicas generadas por los elementos elásticos de la suspensión, convirtiendo la energía mecánica en calor [7] y [18].

Debido a las irregularidades de la calzada, los elementos elásticos, normalmente muelles, se comprimirán o se alargarán, almacenando energía mecánica, y devolviendo dicha energía una vez cesa la irregularidad. Al devolverse la energía, se generan vibraciones sobre la carrocería que el amortiguador debe ser capaz de disipar, recogiendo en primer lugar los efectos de la compresión y después los efectos de la reacción producida por el muelle. Este tipo de funcionamiento se denomina de doble efecto.

Los amortiguadores pueden ser de dos tipos: fijos, en los que su dureza es constante, y variables, en los que se puede variar la dureza en función de las preferencias del conductor. En los vehículos más modernos se está tendiendo a que en los amortiguadores variables el encargado de variar la dureza sea el propio vehículo en tiempo real, en función del estado de la calzada, estilo de conducción o condiciones dinámicas entre otros, o lo que se denomina de otra forma como suspensión semi-activa en culturas anglosajonas.

A continuación se muestra en la *Figura 2.12. Ejemplo de amortiguador de un vehículo* un ejemplo de amortiguador usado generalmente en vehículos.



Figura 2. 12 Ejemplo de amortiguador de un vehículo [19]

Los amortiguadores más usados en los vehículos automóviles son los del tipo telescópico con aceite como fluido de trabajo. Como evolución existen estos mismos amortiguadores pero presurizados, que cuentan con una cámara de gas en su interior. A continuación se pasará a describir estos dos tipos de amortiguadores.

#### 2.4.2.1 Amortiguador hidráulico convencional

El efecto de amortiguamiento en los amortiguadores hidráulicos convencionales se consigue forzando el paso del fluido a través de unos pasos calibrados de apertura diferenciada para obtener la flexibilidad necesaria en diferentes situaciones.

Son los más utilizados por la gran mayoría de vehículos y se encuentran prefijados con anterioridad. Como ventaja presentan un precio muy competitivo de venta, sin embargo, tienen como inconvenientes una vida limitada de funcionamiento y una pérdida importante de prestaciones por un uso continuado debido principalmente al aumento de la temperatura del fluido. Es por esto que los vehículos de altas prestaciones y de competición suelen recurrir a amortiguadores con cámaras de gas.

Como ya se ha comentado anteriormente, su funcionamiento se basa en el paso de líquido entre cámaras para provocar el frenado de los cilindros de los que se compone el amortiguador. La energía generada en este proceso será absorbida por el fluido de trabajo.

En la *Figura 2.13. Partes de un amortiguador hidráulico* se muestran las diferentes partes de las que se encuentra compuesto un amortiguador de este tipo. Los amortiguadores hidráulicos convencionales son de doble efecto, sin embargo, su comportamiento es diferente en expansión y en compresión. Cuando la rueda sube, el efecto del amortiguador es pequeño, casi todo el trabajo lo realiza el elemento elástico de la suspensión, mientras que cuando la rueda baja, el efecto de amortiguamiento es muy superior, consiguiéndose disminuir las oscilaciones.

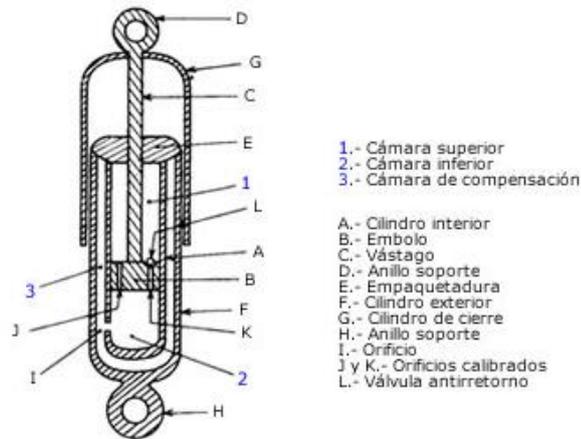


Figura 2. 13 Partes de un amortiguador hidráulico [20]

La unión de los amortiguadores se realiza entre la carrocería y el eje oscilante de las ruedas mediante elementos elásticos.

#### 2.4.2.2 Amortiguador hidráulico presurizado

Los amortiguadores hidráulicos presurizados surgieron como evolución de los no presurizados ya que en estos podían llegar a generarse bolsas de aire en su interior, situación que variaba totalmente su comportamiento.

Por tanto, los presurizados son la solución adoptada en la mayoría de vehículos actuales con amortiguadores hidráulicos de doble tubo.

La diferencia radica en el añadido de una cámara de gas a baja presión, generalmente unos cuatro bares. Durante la compresión sigue siendo el fluido el que realiza el mayor trabajo, mientras que durante la expansión disminuye.

Las principales ventajas que presentan los amortiguadores presurizados con respecto a los que no lo están son:

- La respuesta de las válvulas internas del amortiguador son más sensibles ante menores amplitudes.
- El confort en marcha se ve mejorado.
- En expansiones y compresiones límite se ve mejorada la respuesta del amortiguador
- Se reducen los ruidos provocados por el paso entre cámaras del aceite.
- Aunque se produzca una fuga del gas contenido en su interior pueden seguir desempeñando su función.

Además, este tipo de amortiguador presenta la ventaja de un menor tamaño y menor fricción con respecto a los amortiguadores monotubo normales.

En la *Figura 2.14. Amortiguador hidráulico no presurizado vs presurizado* se pueden observar las diferentes partes de un amortiguador hidráulico presurizado frente a uno que no lo está.

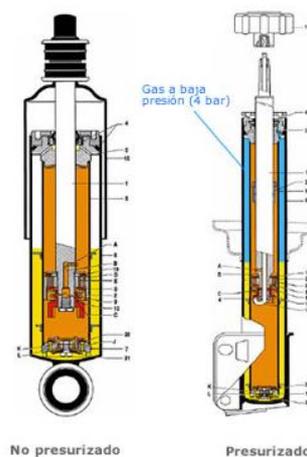


Figura 2. 14 Amortiguador hidráulico presurizado vs no presurizado

### 2.4.3 Otros elementos

Si bien no son tan importantes desde el punto de vista de estudio de una suspensión, son elementos indispensables para que esta funcione de una manera correcta.

#### 2.4.3.1 *Silentblocks* y cojinetes elásticos

Los *Silentblocks* son aislantes interpuestos entre los componentes móviles de la suspensión y el chasis, suelen ser de material elastómero y se encargan de

amortiguar las reacciones que se producen en los apoyos por el movimiento de los componentes [7] y [21].

Hay dos posibilidades de montaje, una primera mediante su atornillado y una segunda por presión. Por ser materiales elastómeros su duración es limitada y deben ser sustituidos cuando presenten holguras o desgaste.

En la *Figura 2.15. Ejemplos de Silentblocks en un vehículo* se puede observar un ejemplo de *Silentblocks*.

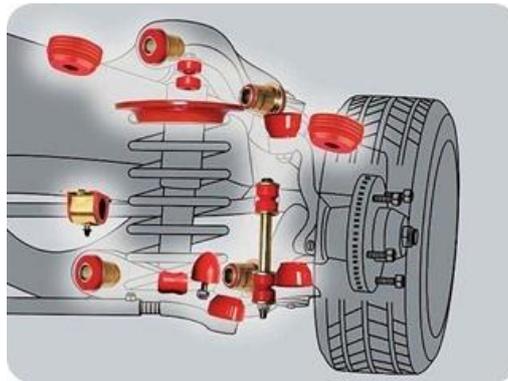


Figura 2. 15 Ejemplos de Silentblocks en un vehículo [22]

Los cojinetes elásticos realizan una función muy similar al de los *Silentblocks*, pero además permiten pequeños desplazamientos [7] y [23]. Se montan mediante bridas o casquillos metálicos y se suelen utilizar sobre todo en el montaje de barras estabilizadoras.

En la *Figura 2.16. Ejemplo de cojinetes elásticos para una suspensión* se muestra un ejemplo.



Figura 2. 16 Ejemplo de cojinetes elásticos para una suspensión [24]

### 2.4.3.2 Rótulas

Las rótulas sirven de unión y fijación de los sistemas de suspensión y dirección, permitiendo el pivotamiento y el giro sin que varíe la geometría de las ruedas [7]. Suelen ser piezas esféricas que permiten el movimiento vertical y el giro de las ruedas directrices del vehículo.

La fijación se realiza mediante tornillos o roscado (interior o exterior) y se deben sustituir tras golpes en las ruedas o cuando se detecte la presencia de holguras en la dirección. En la *Figura 2.17. Rótulas del sistema de suspensión del eje delantero de un Audi R8* se muestra un ejemplo de rótula.

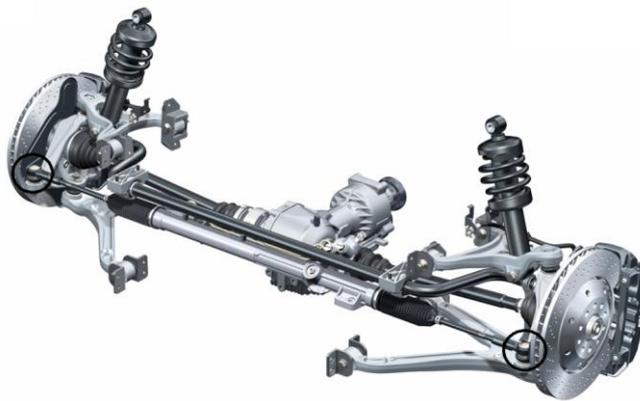


Figura 2. 17 Rótulas del sistema de suspensión del eje delantero de un Audi R8 [25]

### 2.4.3.3 Mangueta y buje

La mangueta es una pieza generalmente fabricada en acero aleado y que une el buje en el que se alojará más tarde la llanta de la rueda, con los elementos de suspensión [7]. Dependiendo del tipo de suspensión, estos podrán ser desde el propio amortiguador a bieletas entre otros.

El buje es la pieza en la que posteriormente irá fijada la llanta y que en su interior contiene los rodamientos o cojinetes con los que se permitirá que la rueda gire libremente con respecto al vehículo.

En la *Figura 2.18. Mangueta y buje de un vehículo* se puede observar el conjunto mangueta-buje.

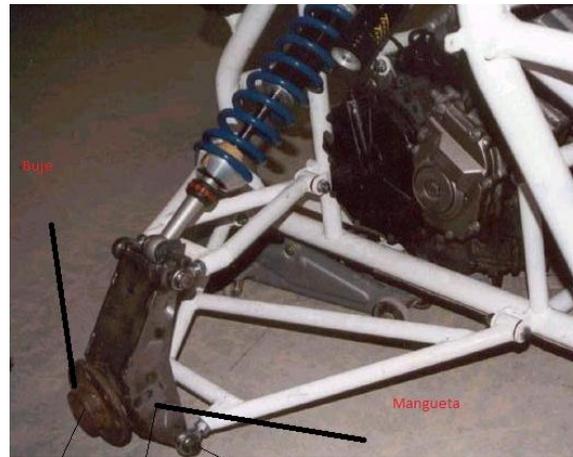


Figura 2. 18 Mangueta y buje de un vehículo [26]

#### 2.4.3.4 Trapecios o brazos de suspensión

Los trapecios o brazos de suspensión son brazos articulados, normalmente de acero embutido o de fundición en el caso de automóviles normales, y de fibra de carbono en el caso de vehículos de competición.

Su misión es la de unir la mangueta y el buje con el vehículo, además de soportar las tensiones generadas en la suspensión por los movimientos de la rueda. Para unir los brazos con el bastidor y las manguetas se recurre a *Silentblocks* y cojinetes.

En la *Figura 2.19. Trapecios de la suspensión en un Fórmula 1 de los años 50* se tiene un ejemplo de trapecios en un vehículo de fórmula 1.



Figura 2. 19 Trapecios de la suspensión en un Fórmula 1 de los años 50 [27]

### 2.4.3.5 Tirantes de suspensión

Los tirantes de suspensión son brazos de acero, dispuestos longitudinalmente o transversalmente, y usados generalmente en suspensiones del tipo semi-independiente [7]. Sirven de unión entre la carrocería y las manguetas, y además facilitan el guiado de las manguetas. Absorben los esfuerzos generados en ellas mediante *Silentblocks* y cojinetes que llevan montados en sus extremos.

En la *Figura 2.20. Suspensión por tirantes de un vehículo* se tiene un ejemplo de vehículo con suspensión del tipo brazos tirantes.

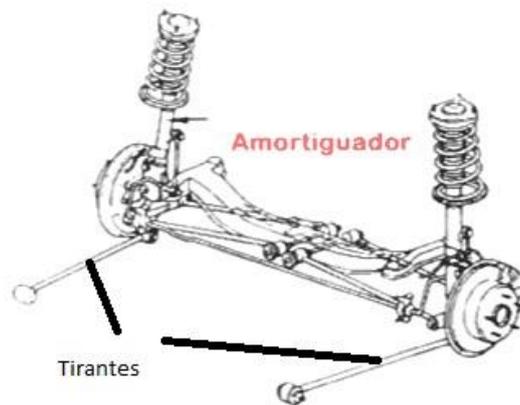


Figura 2. 20 Suspensión por tirantes de un vehículo [28]

## 2.5 Tipos de suspensiones

A la hora de definir los tipos de suspensiones se puede atender a dos definiciones distintas, una primera, atendiendo a la arquitectura de la suspensión y una segunda, en función de la capacidad que puedan tener de poder variar sus propiedades y mediante qué mecanismos puedan hacerlo.

Desde un punto de vista de construcción y ensamblaje, se puede diferenciar entre suspensiones rígidas, semi-independientes e independientes [29]. Definir las características, ventajas e inconvenientes de cada una de ellas podría llevar otro proyecto más, y además, en el presente interesa la otra definición que se utilizará sobre tipos de suspensiones, por lo que solo se hablará de esta a grandes rasgos.

En la actualidad, son diversos los tipos de suspensiones y montajes en función de las preferencias del conductor, pero esto no ocurriría así inicialmente. En un principio y como herencia de los carros de caballos, la suspensión consistía en un

eje rígido sobre el que se montaba la carrocería y en sus extremos se colocaban las ruedas. Ante cualquier movimiento de una rueda, este se transmitía directamente a la otra y a la carrocería. Este tipo de montaje aun se mantiene, ya que si bien peca de poca seguridad e incomodidad, se trata de un sistema fiable y económico.

La evolución condujo a sistemas independientes en los que cada rueda de cada eje contaba con su propio sistema elástico, se consigue de esta forma transmitir los esfuerzos entre ruedas, mejorando la comodidad y prestaciones.

Por tanto, las tres distintas posibilidades de suspensión, en función del grado de independencia, se reducen básicamente a tres:

- De eje rígido: existe un elemento no flexible que une las ruedas de un mismo eje.
- Semi-independiente: existe cierto grado de dependencia en el movimiento de las ruedas de un mismo eje.
- Independiente: no hay unión rígida entre las ruedas de un mismo eje.

En la *Figura 2.21. Imágenes con los tres distintos tipos de esquema de suspensión existentes* puede observarse gráficamente estas definiciones.



c) Rígida

b) Semi-independiente

a) Independiente

Figura 2. 21 Imágenes con los tres distintos tipos de esquema de suspensión existentes

Ya se introdujo en la introducción a las suspensiones el problema existente a la hora del diseño de una suspensión en lo referente a su comportamiento.

Se puede optar por una suspensión blanda, en la que prime el confort de los ocupantes del vehículo, o por una suspensión rígida en la que se busca una buena respuesta prestacional del vehículo.

Debido a que el uso del vehículo no suele estar destinado a un fin específico, sino que dicho automóvil se moverá por distintas superficies y con distintas irregularidades, es muy difícil diseñar un tipo u otro de suspensión. Se deberá buscar, por tanto, un término medio que permita un buen funcionamiento en distintas condiciones.

Sin embargo, gracias a la actual tecnología, se ha conseguido ir un paso más allá, permitiendo variar las características de la suspensión de manera instantánea y en muchas ocasiones de manera automática.

Se va a encontrar por tanto tres tipos de suspensiones diferentes, atendiendo a la segunda definición, es decir, dependiendo de la forma en la que estas puedan variar su comportamiento:

- Suspensiones pasivas: no permiten la variación de su comportamiento con el vehículo en movimiento.
- Suspensiones activas: recurren a actuadores para mitigar los movimientos de la carrocería entre otros.
- Suspensiones semi-activas: permiten variar el comportamiento de los elementos de suspensión (normalmente actúan sobre los amortiguadores) con el vehículo en movimiento.

Estas definiciones o clases pueden variar según la bibliografía utilizada. Las suspensiones pasivas recurren a dos tipos de elementos para su funcionamiento, a saber, elementos elásticos, como pueden ser los muelles, y elementos de amortiguación. Este tipo de suspensión sí es universal, las divergencias surgen en la definición de los otros dos tipos.

En la bibliografía anglosajona se define como suspensión semi-activa a aquella en la que para variar el comportamiento de la suspensión se actúa únicamente sobre las propiedades del amortiguador, consiguiendo variar su constante de amortiguamiento [30]. Queda reservada para las suspensiones activas la utilización de actuadores hidráulicos.

Sin embargo, existe otra corriente, que será la que se utilice en el presente proyecto, y es en la que se define la suspensión semi-activa como aquella en la que

además de los elementos de la suspensión pasiva, se recuerda, elementos elásticos y amortiguadores, se le añade un tercer elemento, en este caso, el elemento actuador [2]. La suspensión activa queda definida por la supresión total de los elementos pasivos.

A continuación, se describen cada uno de los distintos sistemas anteriormente citados.

### 2.5.1 Suspensión pasiva

La suspensión pasiva es el sistema tradicionalmente usado en los vehículos automóviles [1], [7] y [31]. Consta de un sistema compuesto por un muelle más un amortiguador funcionando en paralelo tal y como se muestra en la *Figura 2.22. Sistema muelle-amortiguador en una suspensión pasiva.*

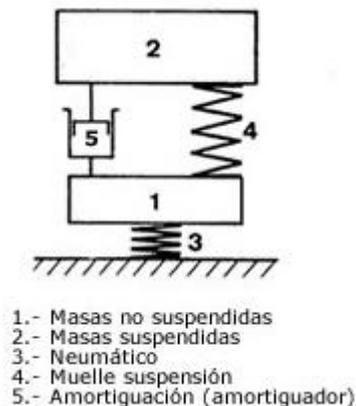


Figura 2. 22 Sistema muelle-amortiguador en una suspensión pasiva [32]

Dicho sistema debe ser capaz de mitigar los movimientos que se transmitan a la carrocería debido a las irregularidades de la calzada y a las maniobras de conducción. Al mismo tiempo, debe maximizar el contacto neumático-calzada para que la transmisión de fuerza entre ambos sea óptima y no se produzcan pérdidas.

No obstante, este tipo de suspensión presenta como principal inconveniente la difícil gestión sobre su comportamiento. Desde el punto de vista del confort, la solución idónea sería recurrir a una suspensión blanda, sin embargo, de esta forma se estará comprometiendo la seguridad del vehículo, ya que aparecen dos efectos adversos: el aumento de balanceo de la carrocería en curva y un mayor cabeceo del vehículo en fases de frenado fuerte.

La solución pasaría entonces por modificar la dureza del sistema. Aumentando su rigidez, se mitigan los efectos de balanceo y de cabeceo, sin embargo, se reduce de igual forma el confort de los pasajeros.

Otra solución distinta pasaría por usar un sistema intermedio de ambas situaciones. Sin embargo, el problema no queda totalmente resuelto, de ahí que hayan surgido nuevos sistemas de suspensión.

### 2.5.2 Suspensión activa

La suspensión activa surge como respuesta a la exigencia de una mayor respuesta del mecanismo de suspensión respecto al estado de la calzada, velocidad y comportamiento de conducción entre otros, para ello, recurre a una regulación continua y de forma independiente en cada rueda. Además, con los actuadores que se introducen en el sistema, se consigue eliminar los efectos de balanceo y cabeceo en el vehículo [1] y [31].

El primer vehículo sobre el que se desarrolló este tipo de suspensión fue el Fórmula 1 del equipo *Lotus* a principios de los años 80, viviéndose su máximo esplendor a finales de los 80 y principio de los 90 [33] y [34]. Sin embargo, sería el equipo *Williams* quien consiguiese desarrollarlo a niveles superiores, debido a que el equipo *Lotus* pecaba de software poco desarrollado para la época y pérdida excesiva de potencia del motor en determinadas ocasiones para conseguir que los actuadores hidráulicos funcionasen.

A mitad de los años 90, la *FIA, Federation International of Automovilism*, decidió prohibir este tipo de sistemas como medida de contención de gastos y debido a la superioridad que ofrecía. Además, el deporte del automóvil ha sido utilizado como lanzadera de proyectos para vehículos de calle y en este caso, el modelo de suspensión activa no ha conseguido generalizarse todavía a vehículos normales debido al alto precio y consumo de energía.

En la actualidad, únicamente la marca *BOSE* ha desarrollado una suspensión de este tipo, aunque no ha pasado de simple prototipo y aun no ha llegado a generalizarse.

Puede observarse el comportamiento de este tipo de suspensión en la *Figura 2.23. Suspensión activa BOSE.*



Figura 2. 23 Suspensión activa BOSE [35]

Debido al mayor volumen de funciones que debe desempeñar este tipo de suspensión, la fuerza a ejecutar por los actuadores deberá provenir de una fuente de energía externa, de lo contrario, se restaría potencia al motor del vehículo, algo peligroso en determinadas situaciones. En la *Figura 2.24 Esquema de una suspensión activa* se representan los diferentes elementos que incluye una suspensión de este tipo.

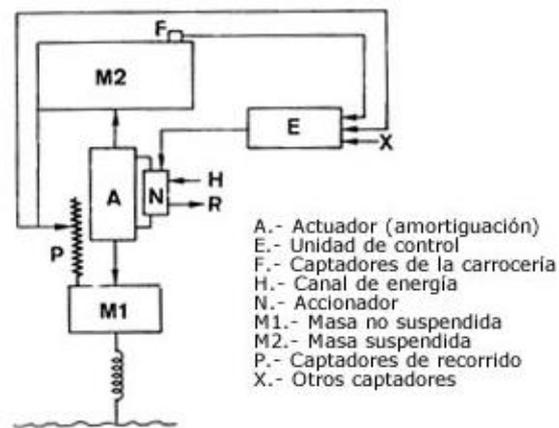


Figura 2. 24 Esquema de una suspensión activa [36]

Los principales elementos de los que consta una suspensión activa son:

- Los actuadores, normalmente de tipo hidráulico, se encargan de generar las fuerzas necesarias para contrarrestar los efectos de balanceo y cabeceo. Dichos actuadores vendrán dados por una serie de bombas y servoválvulas.
- Una centralita, encargada de procesar toda la información que le llega a través de los sensores del vehículo, y de enviar las señales de actuación a los actuadores de cada rueda.

Las suspensiones activas suelen recurrir a sistemas de suspensión hidráulicos o neumáticos con los que se consigue variar el amortiguamiento de la suspensión, manteniendo la carrocería en una posición casi plana, en contraposición con los sistemas de suspensión del tipo pasivo en los que los amortiguadores se encuentran prefijados, algo que no siempre responde al estado de carga del vehículo o a las irregularidades de la carretera.

La efectividad de una suspensión activa se mide a través de su tiempo de respuesta. Cuanto menor se consiga que este sea, más rápidamente será capaz de actuar el sistema ante irregularidades, frenazos, curvas pronunciadas, etc.

El tiempo de respuesta viene definido por el ancho de banda. Se denomina ancho de banda de baja frecuencia cuando el sistema de suspensión transmite entre los 3 y 5 Hz. Por el contrario, se denomina ancho de banda de alta frecuencia cuando la transmisión se realiza entre los 10 y 12 Hz.

En un sistema de suspensión tradicional, se puede trabajar tanto con las frecuencias de alta como de baja, mientras que con un sistema de suspensión activa se podrá controlar ambos rangos de frecuencia y adecuarlos a las necesidades de cada momento.

Sin embargo, en la actualidad no se ha generalizado el uso de suspensiones activas que trabajen con rangos altos de ancho de banda debido al alto coste de implementación del sistema. Por lo general el uso actual se reduce a una suspensión semi-activa que trabaje para los rangos de baja frecuencia y a elementos pasivos para los de alta.

Como ya se mencionó en los tipos de suspensiones existentes, en este sistema se suelen sustituir los elementos pasivos, tanto los muelles como los amortiguadores, por actuadores hidráulicos que se encarguen de ejercer las fuerzas necesarias para la corrección de la carrocería.

Se puede ver un ejemplo en la *Figura 2.25 Imagen de la arquitectura de una suspensión activa*.



Figura 2. 25 Imagen de la arquitectura de una suspensión activa [37]

### 2.5.3 Suspensión semi-activa

En las suspensiones semi-activas se suele recurrir a sistemas regulados que permiten la variación de los mecanismos de suspensión y amortiguación de modo que se pueda obtener dos suspensiones en una, optándose por una suspensión blanda en caso de grandes irregularidades en el terreno y cambiándose a una configuración más rígida en el caso de toma de curvas o virajes fuertes [1], [30] y [31].

Su disposición es muy similar a la de una suspensión del tipo pasivo, sin embargo, se sustituyen los amortiguadores convencionales por amortiguadores modulables y además se añaden una serie de componentes electrónicos encargados de dar la información necesaria a la centralita del sistema para que esta elija la configuración óptima de suspensión. Esta es una primera opción, la más sencilla y más generalizada por la mayoría de fabricantes de automóviles, sin embargo, existe una segunda alternativa, desarrollada en el presente proyecto y que difiere por la inclusión de actuadores, normalmente del tipo hidráulico, en paralelo con el sistema pasivo.

En la *Figura 2.26. Sistema de una suspensión semi-activa* se muestra el esquema de una suspensión semi-activa.

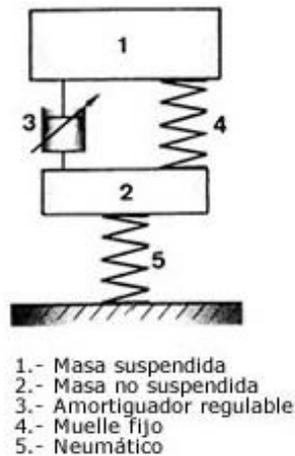


Figura 2. 26 Sistema de una suspensión semi-activa [36]

A continuación se desarrollan los dos tipos de suspensiones semi-activas existentes, a saber, las que poseen el control en el amortiguador y las de control mediante actuador.

### 2.5.3.1 Control en el amortiguador

En las suspensiones semi-activas con control en el amortiguador los diferentes modos de suspensión, normalmente tres, son, o bien elegidos por el conductor (modo confort, modo normal o modo sport) o por un calculador de forma automática, permitiendo una variación en continuo de la suspensión. Dicho calculador es el encargado de transmitir las órdenes necesarias a los dispositivos pertinentes tras recibir y procesar la información que le llega desde los distintos sensores repartidos por el vehículo y que toman datos tales como aceleración o posición del volante entre otros.

El paso entre modos de forma automática se realiza en intervalos de tiempo de milisegundos siguiendo las estrategias que el calculador tiene memorizado.

El nombre de semi-activa en este caso proviene del hecho de que en este tipo de suspensiones no se recurre a canales externos de energía, sino que únicamente se actúa en la forma de funcionamiento de los amortiguadores, normalmente limitando el paso de aceite o de gas por las diferentes cámaras de las que se componen.

Los sistemas de control en el amortiguador suelen estar compuesto por los siguientes componentes:

- Cuatro amortiguadores pilotados bitubo con dos válvulas de derivación entre las cámaras de trabajo y de compensación. Las compuertas de las válvulas se activan por medio de electroválvulas controladas a su vez por el calculador del sistema.
- Un calculador que actúa sobre las electroválvulas siguiendo el programa implementado y de la información recibida por los captadores y sensores del vehículo.
- Tres captadores de aceleración: uno para la aceleración longitudinal, otro para la aceleración lateral y un último captador para el ángulo y velocidad del volante del vehículo.
- Tres captadores de información: uno para la carga, otro para la velocidad y un último para una eventual acción sobre el pedal del freno.
- Un interruptor con el que el conductor pueda seleccionar un funcionamiento automático o manual del sistema de suspensión.

En la *Figura 2.27. Sistema de suspensión semi-activa de regulación continua desarrollado por Bosch* representa un esquema de un vehículo con los diferentes componentes necesarios en una suspensión de este tipo.

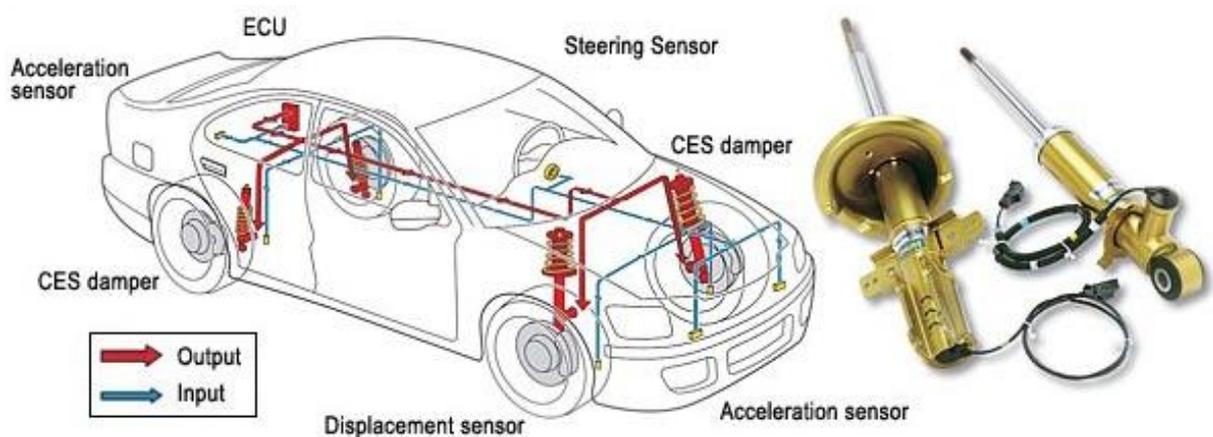


Figura 2. 27 Sistema de suspensión semi-activa de regulación continua desarrollada por Bosch [38]

Existe también otro modelo de suspensión semi-activa conocida por el nombre de pilotada y que es controlada electrónicamente, permitiendo dos funciones distintas e independientes como son la amortiguación variable (como en el resto de suspensiones semi-activas) y además permite la corrección de la altura de la carrocería.

El modo de funcionamiento de corrección de altura de la carrocería consiste en la intervención del sistema en ambos ejes de tal modo que compense automáticamente la diferencia de altura, independientemente del estado de carga, y posibilitando todo el recorrido de la suspensión para un mejor confort.

Del mismo modo, da la posibilidad de reducir la altura de la carrocería a altas velocidades, desarrollando una mejor aerodinámica y mejorando al mismo tiempo el comportamiento del vehículo al reducir la altura del centro de gravedad.

Normalmente este tipo de suspensiones permite tres modos de altura, pudiéndose seleccionar de forma manual o automática:

- Una posición normal de referencia, que en la práctica suele ser la misma que en cualquier automóvil que no cuente con un sistema de corrección de altura.
- Una posición baja, en la que se suele rebajar la altura de la carrocería en unos 15 mm. Esta función la realiza el sistema de forma automática cuando el vehículo circula a altas velocidades (depende de cada fabricante, pero normalmente suelen ser 120 km/h) volviendo a la posición inicial cuando se baja de los 80 km/h.
- Una posición elevada, la carrocería se suele elevar unos 30 mm.

La función de corrección se realiza por medio de cuatro cojinetes neumáticos montados en la parte superior de los amortiguadores y en paralelo con los muelles de la suspensión, tres captadores de altura y cinco electroválvulas neumáticas que permiten cargar o descargar los cojinetes.

El sistema de control recibe la información de entrada a partir de los captadores de altura (tanto trasero derecho como izquierdo), del captador de presión de aceite del circuito de suspensión, del contactor del freno y del sensor de velocidad del vehículo.

La actuación sobre el sistema para corregir la altura se efectúa mediante las cuatro electroválvulas existentes (una por cada cojinete en cada amortiguador), una válvula de descarga para todo el conjunto, un grupo moto-compresor encargado de dar presión al circuito, un cajetín electrónico y un interruptor eléctrico.

En la *Figura 2.28. Diferentes posiciones de altura en una suspensión hidractiva* se puede observar como el sistema anteriormente explicado puede variar de forma significativa la altura del chasis.



Figura 2. 28 Diferentes posiciones de altura en una suspensión hidractiva [39]

Este tipo de suspensión semi-activa y en concreto con control del amortiguador, es la más utilizada por los fabricantes, bajo distintas denominaciones y distintas arquitecturas, aunque siempre bajo el mismo concepto. Algunos ejemplos de las mismas son la *AIRMATIC DC* de *Mercedes*, la suspensión *Hidractiva III* de *Citroën* o el sistema de suspensión magnetoreológica desarrollado por la compañía estadounidense *Delphi*.

### 2.5.3.2 Control en la posición mediante actuador

La principal diferencia de las suspensiones semi-activas con control en la posición mediante actuador con respecto a las de control en el amortiguador es la existencia de un actuador encargado de contrarrestar los efectos dinámicos y de confort general en el vehículo.

Este sistema se encuentra menos desarrollado que el anterior, y el modelo más representativo puede tomarse como el sistema *ABC* de *Mercedes*.

De la parte de sustentación, tanto de manera estática como de manera dinámica, se encargan cuatro patas telescópicas dispuestas cada una en una rueda. Cada una de las patas se encuentra formada por un cilindro regulable alineado con

un muelle helicoidal y al mismo tiempo en paralelo con el amortiguador. El cilindro será el encargado al desplazarse de crear las fuerzas que mitiguen los movimientos de las ruedas y de la carrocería.

Además, estas patas también son capaces de realizar las funciones explicadas anteriormente en suspensiones con control de amortiguación como son la variación y corrección de la altura del vehículo.

Se ha mencionado la parte física del sistema de suspensión, pero además, este debe contar con un sistema electrónico encargado de monitorizar las aceleraciones y desplazamientos del vehículo y con ellas realizar el cálculo de las fuerzas que deberá aplicar el sistema hidráulico sobre los actuadores.

En la *Figura 2.29. Suspensión ABC de Mercedes* se tiene el esquema de la suspensión *ABC*.

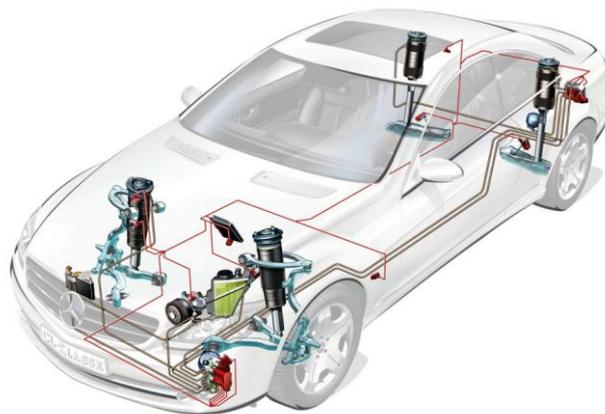


Figura 2. 29 Suspensión ABC de Mercedes [40]

Debido a las dificultades de respuesta del sistema actuador a altas frecuencias, el sistema deja de trabajar para frecuencias superiores a los 5 Hz, realizando la función de suspensión únicamente la parte pasiva. Para menos de 5 Hz serán los cilindros actuadores los encargados de generar las fuerzas.

Además, el sistema *ABC* es un modelo de suspensión con sustentación integral, es decir, mantiene constante el nivel del vehículo independientemente del estado de carga siempre y cuando el motor se encuentre encendido.

Sin embargo, presenta los inconvenientes de un alto coste de adquisición, mantenimiento y una instalación con presiones de funcionamiento cercanas a los 200 bares.

# Capítulo 3

## Lógica Fuzzy

### 3.1 Lógica de control

Una vez desarrollada la parte física de la que deberá estar compuesta la suspensión del vehículo, se pasará a describir la parte de control necesaria en una suspensión semi-activa.

Son numerosos los tipos de lógica usados en el campo del control de automatismos y máquinas, desde los iniciales *PID*, hasta los controles adaptativos, pasando por las redes neuronales.

Sin embargo, para el campo de suspensiones semi-activas, se ha generalizado en los últimos años el uso de la *Lógica Difusa* o *Borrosa*, también conocida como *Fuzzy*, término proveniente del inglés.

A groso modo, la *Lógica Borrosa* consiste básicamente en un sistema de control que posee una capacidad de razonamiento muy similar a la que tendría un ser humano [41]. Mediante ella, se puede introducir a los sistemas de control la propiedad de razonar mediante la asignación de valores a conceptos vagos o poco precisos que no estén definidos en la lógica clásica, como pueden ser los términos frío, alto, oscuro, etc. En los siguientes apartados del capítulo se profundizará en mayor medida en este tipo de lógica.

Entre las principales ventajas encontradas en el desarrollo de la *Lógica Fuzzy* frente a las de otro tipo de lógicas, se pueden nombrar las siguientes [41]:

- El uso de expresiones lingüísticas que permiten introducir en el sistema reglas y premisas de razonamiento imprecisas, resultando más intuitivo y con mejor comportamiento de cara al usuario. Además, una descripción lingüística resulta menos específica y más efectiva que una descripción numérica o matemática.

- Se trata de un control muy robusto, atendiendo a muchas variables a través de diversas reglas. La salida del sistema será resultado del conjunto de reglas introducido por el usuario, por lo que no se verá muy afectada en caso de que se produzcan perturbaciones sobre él.
- Es altamente tolerable a los ruidos.
- Debido a su robustez, mantiene la estabilidad de funcionamiento aun cuando el sistema caiga, ya que, aunque es verdad que este decaería, lo haría de manera lenta, dando tiempo al responsable a tomar las medidas necesarias.
- No necesita de un usuario experto debido a la ausencia de modelo matemático del ente a controlar.
- En muchas aplicaciones, los controladores *Fuzzy*, alcanzan mucho antes la estabilidad en etapas transitorias.
- Menor coste y menor complejidad de los equipos con lógica borrosa instalada en ellos.

## 3.2 Introducción a la *Lógica Borrosa*

La mayoría de procesos usados cotidianamente resultan imprecisos en su planteamiento, es decir, poseen un cierto grado de difusividad en la descripción de su naturaleza [41] y [42]. Dicha imprecisión puede venir dada por su forma, posición o semántica entre otros. Además, puede depender igualmente del contexto, ya que, no es lo mismo la sensación de calor o de frío en un día de verano que en un día de invierno, así mismo, la definición de caliente o frío no corresponde a una temperatura precisa. Este tipo de imprecisión o difusividad asociada a la mayoría de fenómenos es común en la mayoría de campos de estudio.

La *Lógica Difusa* es una rama de la inteligencia artificial basada en el concepto "no todo es negro o blanco", es decir, permite el uso de información vaga o de difícil especificación.

La denominada *Lógica Borrosa* permite procesar la información imprecisa en términos de conjuntos borrosos o difusos. Además, mediante estos, se deberán crear reglas para definir las acciones del sistema. Estas reglas serán del tipo "sentido común", referidas a cantidades indefinidas y que suelen crearse a través de la experiencia.

Los sistemas de control basados en *Lógica Borrosa* combinarán una o varias variables de entrada, definidas en términos de conjuntos borrosos, por medio de grupos de reglas que producirán salidas.

Además, los sistemas borrosos permitirán modelar cualquier proceso no lineal y aprender de los datos usados haciendo uso de determinados algoritmos de aprendizaje. A diferencia de otros sistemas de lógica, la borrosa permite utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos en un tema directamente o como punto de partida para una optimización automática.

### 3.3 Historia de la *Lógica Difusa*

El profesor Lofti A. Zaded fue la primera persona en acuñar el concepto de *Lógica Difusa* en el año 1965, rompiendo con el concepto de la *Lógica Clásica* que solo permitía dos opciones, la pertenencia o no de un elemento a un conjunto [43], [44] y [45].

Sería en el año 1971 cuando Zaded lanzase un nuevo artículo en el que introduciría los elementos formales que terminarían siendo parte principal de la *Lógica Difusa*, así como de sus aplicaciones, y que aún siguen siendo vigentes en la actualidad.

En su definición de la *Lógica Difusa*, el profesor Zaded, permitía que un elemento perteneciese de forma parcial a un conjunto, denominando dicho grupo como "Conjunto Difuso".

Sin embargo, este pensamiento tuvo inicialmente problemas de aceptación por parte del mundo. La búsqueda de la precisión por parte del hombre le llevó inicialmente a usar modelos matemáticos rígidos para ajustar así el mundo real. En la antigua Grecia, se propusieron las máximas del *Centro Excluido*, es decir, algo podía ser verdadero o falso, por ejemplo, el agua puede estar fría o caliente pero no ambas cosas al mismo tiempo.

La teoría de conjuntos difusos pretende describir y formalizar la realidad empleando modelos flexibles que interpreten las leyes que rigen el comportamiento humano y relaciones entre ellos [42]. Esa realidad incierta debe ser descrita, tanto en orden natural como social, mediante predicados nítidos o difusos.

La teoría propuesta por Zaded rompía con la antigua teoría lógica, de ahí que muchos científicos, sobre todo europeos de su época, no la aceptaran bajo la premisa de que Zaded únicamente trataba de estudiar el campo de la vaguedad y además, esta permitía la manipulación de conceptos del lenguaje, o incluso, de que no se trataba más que de una probabilidad disimulada.

Sin embargo, en el año 1974, el británico Ebrahim H. Mamdani demuestra que la lógica difusa es aplicable al campo del control desarrollando un sistema de control difuso práctico para la regulación de un motor de vapor. Este sería el punto de partida de las aplicaciones a los sistemas de control ya que seguirían evolucionando conforme lo hicieron los procesadores de los ordenadores y sus capacidades de cálculo.

A partir de finales de los *años 80* se sufrió un auténtico *boom* desde Japón con el desarrollo de numerosas aplicaciones que utilizaban la lógica borrosa. El investigador Michio Sugeno reunía complejos desarrollos matemáticos con aplicaciones tecnológicas de gran importancia. Se acuñaría el término de "ingeniería difusa".

## 3.4 Conjuntos difusos

En los conjuntos clásicos algo estaba incluido completamente en él o no lo estaba en absoluto. Dicha situación puede describirse asignando un 1 a los elementos incluidos en el conjunto y un 0 a los que no lo están. La asignación del valor que tomarán los elementos vendrá dada por la función de inclusión o pertenencia que más tarde se definirá.

Los conjuntos borrosos permiten describir el grado de pertenencia o inclusión de un objeto al concepto dado por medio de la etiqueta que se le da al nombre, asignándole un número real entre 0 y 1 [42].

Se define un conjunto de objetos  $U$ , denominado *Universo de Discurso*. En términos matemáticos, un conjunto borroso  $F$  en  $U$  quedará caracterizado por una función de inclusión  $\mu_F$  que tomará valores en el rango  $[0,1]$ , es decir:

$$\mu_F: U \rightarrow [0,1]$$

donde  $\mu_F(u)$  representa el grado en el que  $u \in U$  pertenece al conjunto borroso  $F$ .

### 3.4.1 Función de inclusión o pertenencia

La función de inclusión o de pertenencia de un conjunto borroso consiste en una serie de pares ordenados  $F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in U\}$  si la función es discreta, o una función continua si no lo es [42].

Para la definición de estas funciones de pertenencia se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar debido a las coincidencias con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más frecuentes suelen ser las funciones del tipo trapezoidal, *singleton*, triangular,  $S$ , exponencial y tipo  $\pi$ . En el presente proyecto, se utilizarán las del tipo trapezoidal y triangular, de las cuales se hará una pequeña descripción a continuación.

#### 3.4.1.1 Función tipo trapezoidal

La función trapezoidal viene definida por:

$$\text{Trapezoidal}(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ 1 & b \leq u \leq c \\ [0 - 1] & a \leq u \leq b \text{ y } c \leq u \leq d \\ 0 & u > d \end{cases}$$

Suele utilizarse en sistemas borrosos sencillos ya que permite la definición de un conjunto borroso con pocos datos y la posibilidad de calcular su valor de pertenencia mediante pocos cálculos.

En la *Figura 3.1 Función de pertenencia de tipo trapezoidal* se tiene un ejemplo de la función descrita anteriormente.

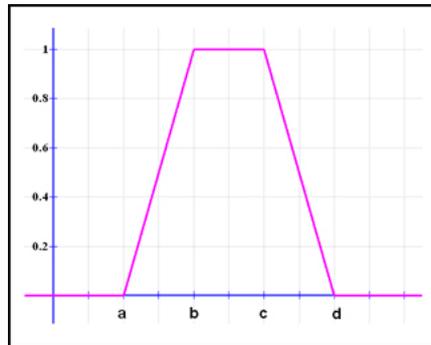


Figura 3. 1 Función de pertenencia de tipo trapezoidal [46]

### 3.4.1.2 Función del tipo T (triangular)

La función del tipo triangular viene definida por la siguiente distribución:

$$T(u; a, m, b) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u - a}{m - a} & a \leq u \leq m \\ \frac{b - u}{b - m} & m \leq u \leq b \\ 0 & u > b \end{cases}$$

Esta función es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de 0 para un rango de valores estrecho en torno al punto  $m$ . En la *Figura 3.2 Función de pertenencia triangular* se tiene un ejemplo de dicha función de pertenencia.

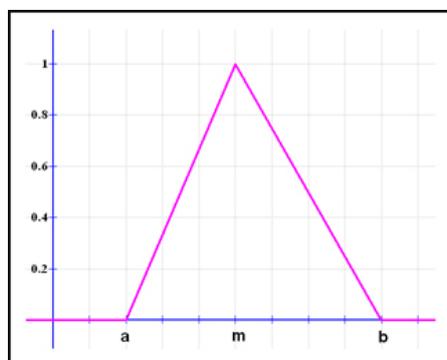


Figura 3. 2 Función de pertenencia triangular [46]

### 3.4.1.3 Ejemplo de función de inclusión o pertenencia

Para una mejor comprensión, se va a aplicar la teoría de conjuntos difusos anteriormente vista a un sencillo ejemplo de pertenencia o no de conjuntos.

En primer lugar, se seleccionará el conjunto  $X$  que contendrá a todos los números reales entre 0 y 10, este será por tanto el *Universo de Discurso*. En segundo lugar se elegirá un subconjunto  $A$  contenido en  $X$  del intervalo de números reales entre 5 y 8 tal y como puede verse en la *Figura 3.3 Subconjunto A preciso*.

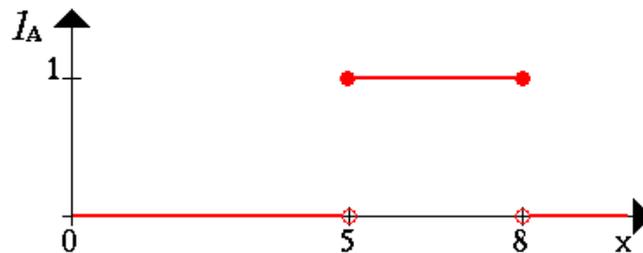


Figura 3. 3 Subconjunto A preciso

Este ejemplo se trataría de un subconjunto preciso.

En un segundo ejemplo, se definirá el subconjunto  $B$  que contendrá a la gente joven. Dicho grupo es difuso ya que, si bien se considera joven a la gente de entorno a 20 años, dejar de ser joven no se realiza instantáneamente sino que es un proceso que se alarga en el tiempo tal y como puede verse en la *Figura 3.4 Subconjunto B impreciso o borroso*.

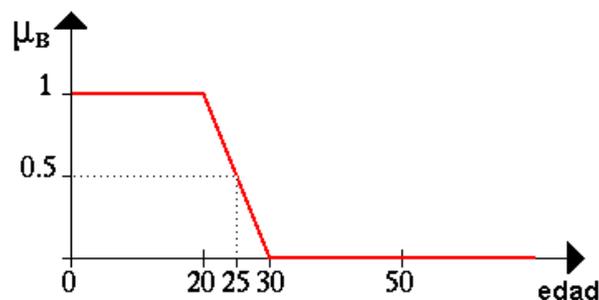


Figura 3. 4 Subconjunto B impreciso o borroso

De esta forma, una persona con 25 años pertenecerá al subconjunto B al 50%, mientras que a los 30 años quedará definitivamente excluido del grupo de gente joven.

### 3.4.2 Particiones borrosas

Se conoce como partición a un conjunto de los conjuntos definidos para una variable cualquiera  $A$  [42]. Una partición de  $A$  es uno de los subconjuntos que pueden formarse con los elementos de  $T(A)$ . Así, para la variable altura definida en la *Figura 3.5. Componentes de la Lógica Fuzzy*, se encuentran tres subconjuntos borrosos, cada uno identificado con la etiqueta bajo, medio y alto respectivamente.

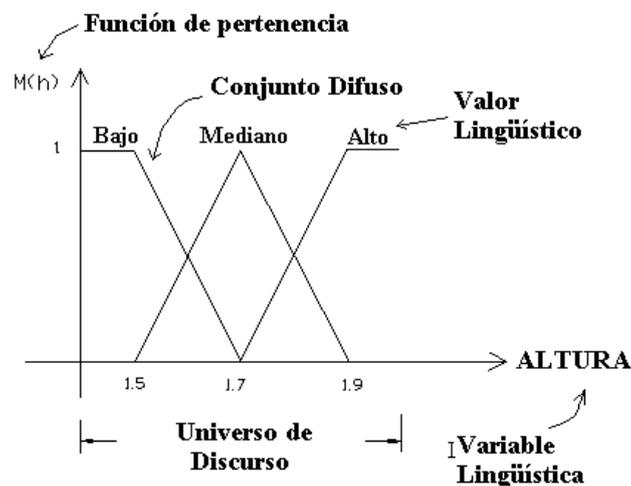


Figura 3. 5 Componentes de la Lógica Fuzzy [47]

Para la realización de controladores basados en *Lógica Borrosa* se han de definir particiones de las variables del controlador. Normalmente estas deben ser completas, con solapamientos del 20 al 50% y en número impar. Se suelen emplear de 3 a 7 conjuntos, ya que permiten la precisión suficiente en la descripción de los valores de la variable.

Los nombres de los conjuntos borrosos que forman una partición suelen expresarse de forma abreviada por sus iniciales, como será el caso del presente proyecto en el que se tomarán las denominaciones de la *Tabla 3.1 Denominación de las particiones borrosas*.

Tabla 3. 1 Denominación de las particiones borrosas

Etiqueta	Nomenclatura
NVB	Negative Very Big
NB	Negative Big
NM	Negative Medium
NS	Negative Small
Z	Zero
PS	Positive Small
PM	Positive Medium
PB	Positive Big
PVB	Positive Very Big

### 3.4.3 Operaciones borrosas

A los subconjuntos borrosos se les puede aplicar determinados operadores, o bien, se pueden realizar operaciones entre ellos [42]. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto borroso, se obtiene otro conjunto borroso, lo mismo ocurrirá al usar dos o más subconjuntos.

Dados los subconjuntos borrosos identificados por las etiquetas  $A$  y  $B$  asociados a una variable lingüística  $x$ , se definen las siguientes operaciones borrosas:

- Igualdad: Dos conjuntos borrosos  $A$  y  $B$  son iguales si y solo si se cumple:

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad x \in U$$

- Inclusión:  $A$  está incluido como subconjunto de  $B$  si:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad x \in U$$

- Intersección: Se define como la intersección de dos conjuntos  $A$  y  $B$  como:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in U$$

La definición de intersección quedará más clara con el siguiente ejemplo en el que se tienen dos conjuntos borrosos, que se pueden ver en las *Figura 3.6. Subconjunto A* y *Figura 3.7. Subconjunto B*, a los que se les realizará la operación de intersección como se muestra en la *Figura 3.8. Intersección entre los conjuntos A y B*.

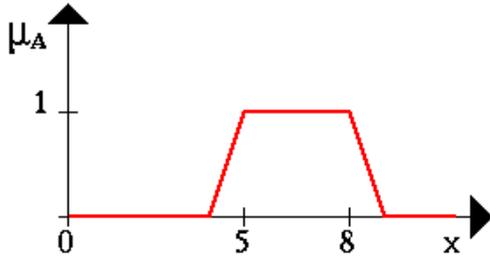


Figura 3. 6 Subconjunto A

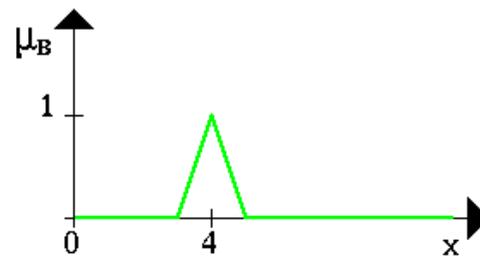


Figura 3. 7 Subconjunto B

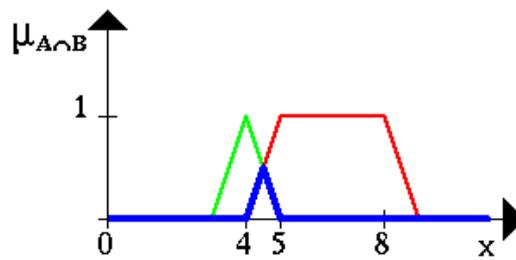


Figura 3. 8 Intersección entre los conjuntos A y B

- Unión: Se define como unión de dos conjuntos borrosos A y B a:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in U$$

tal y como se puede ver en la *Figura 3.9. Unión entre los conjuntos A y B*.

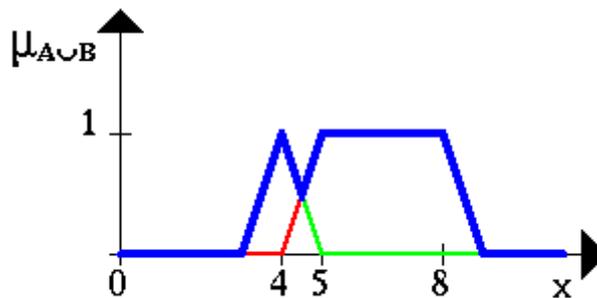


Figura 3. 9 Unión entre los conjuntos A y B

- Complementario: Se define al complementario de un conjunto borroso  $A$  como  $A'$  (Figura 3.10. Complementario del conjunto borroso  $A$ ).

$$\overline{\mu_A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad x \in U$$

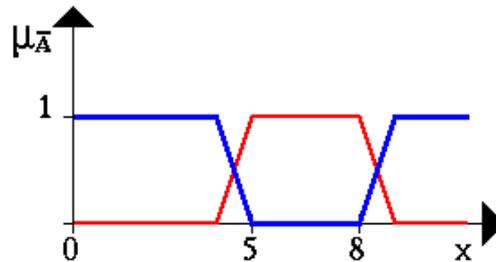


Figura 3. 10 Complementario del conjunto borroso A

### 3.5 Control borroso

Una vez explicada en qué consiste la teoría de la *Lógica Difusa*, se pasa a describir sus componentes, de modo que se pueda implementar en un controlador [42]. El esquema básico que debe presentar, con las partes de las que se encontrará compuesta, se muestran en la *Figura 3.11. Estructura de un controlador borroso o FLC* ("Fuzzy Logic Controller").

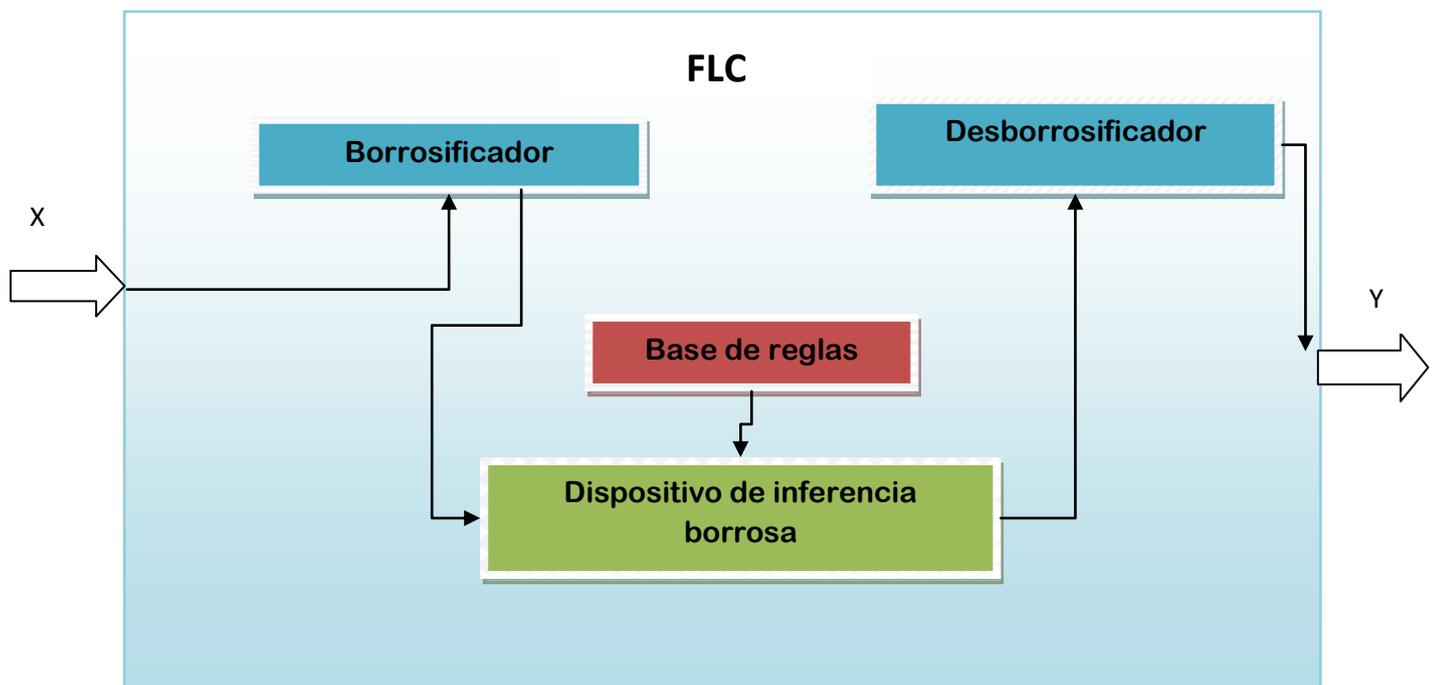


Figura 3. 11 Estructura de un controlador borroso o FLC

En primer lugar se va a desarrollar dicha estructura para un controlador del tipo *Mamdani* que es el más utilizado, más tarde se explicará el de tipo *Sugeno* con el que comparte la mayoría de las características.

### 3.5.1 Borrosificador

El borrosificador establece una relación entre puntos de entrada no borrosos al sistema y sus correspondientes conjuntos borrosos [42]. En general las variables procedentes del exterior tendrán valores no borrosos y se deberán borrosificar con anterioridad.

Para la borrosificación se recurre a dos estrategias principalmente:

- Borrosificador *singleton*. Método más utilizado, sobre todo en sistemas de control. Consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos borrosos, es decir, para cada valor de entrada se define un conjunto en el cual se encuentra soportado. Este será el método que se utilice en el presente proyecto.
- Borrosificador *no singleton*. Se utiliza la siguiente función exponencial:

$$\mu_A(x) = a * \exp \left\{ - \left( \frac{x' - x}{\sigma} \right)^2 \right\}$$

### 3.5.2 Base de reglas borrosas

Las reglas borrosas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada, denominados antecedentes o premisas, y les asocian un conjunto borroso de salida llamado consecuente o consecuencia [42].

Los conjuntos borrosos de la premisa se asocian mediante conjuntivas lógicas como y, o, etc. La asociación se produce mediante la regla "IF-THEN-".

Las reglas borrosas permiten expresar el conocimiento del que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Todo este conocimiento debe expresarse por varias reglas que se agrupen formando lo que se conoce como una base de reglas. Dicha base de reglas puede expresarse o bien como una tabla de reglas que la formen, o de una memoria asociativa borrosa o *FAM* ("Fuzzy Associative Memory").

Las *FAM* son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para la combinación de entradas. Además, permiten realizar una representación gráfica clara de las relaciones, pero por el contrario, precisan que

se indique explícitamente todas las reglas que la puedan formar, lo que puede llegar a convertirse en algo difícilmente manejable si el número de entradas al sistema supera las dos unidades.

### 3.5.3 Dispositivo de inferencia borrosa

Se denomina dispositivo de inferencia borrosa a los sistemas que interpretan las reglas del tipo *IF-THEN*- de una base de reglas con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema [42].

Para ello, se utilizarán las implicaciones borrosas que pueden ser del tipo:

- Regla del mínimo.
- Regla del producto.
- Regla aritmética.
- Regla Max-min.
- Regla Booleana.
- Regla de Goguen.

Por último, la salida final de un dispositivo de inferencia borrosa podrá consistir en un serie de conjuntos borrosos, en un único conjunto borroso o en una serie de escalares.

### 3.5.4 Desborrosificador

Un desborrosificador es un mecanismo que transforma los conjuntos borrosos obtenidos a partir del dispositivo de inferencia borrosa, a un resultado concreto y real, mediante el empleo de distintos métodos matemáticos de desdifusión [42], los cuales se enumeran a continuación:

- Desborrosificador por máximo: proporciona el valor de salida eligiendo el primer punto que tenga el grado de pertenencia más alto.
- Desborrosificador por centro de gravedad o centro de área: consiste en unir el área de todos los conjuntos y hallar el centro de gravedad del conjunto resultante, este dará el valor de la salida. Este tipo de desborrosificador es el más utilizado.
- Desborrosificador de centro de sumas: está basado en el desborrosificador anterior, sin embargo, en este caso las áreas no se

solapan, se halla el centro de cada área independientemente y se realiza la media ponderada, que será la salida.

- Desborrosificador por altura: en este caso se multiplica la altura de cada conjunto por su centro de área resultando la salida la media de dichos valores.
- Desborrosificador por centro de área mayor: basado en el de centro de área, se recurre a él cuando los conjuntos de salida no aparecen unidos, es decir, existen espacios en blanco entre dos o más subconjuntos. Si se da este caso, se utilizará el desborrosificador de centro de área para el subconjunto que posea la mayor de las áreas.

### 3.6 Sistema tipo Sugeno

Anteriormente se ha definido un sistema de control borroso mediante lógica del tipo *Mamdani*, sin embargo, existe una segunda opción, la del tipo *Sugeno*.

En el caso de usar el método *Sugeno*, el módulo de borrosificación y el dispositivo de inferencia borrosa no varían, sin embargo, la base de reglas si difiere [45]. El consecuente de las reglas ya no es una etiqueta lingüística, sino que es función de la entrada que tenga el sistema en cada momento. Por tanto, las reglas pasan a tomar la siguiente forma:

$$IF-THEN=F(Entrada)$$

Los valores arrojados por los consecuentes de las diferentes reglas que han sido activadas en un determinado momento ya son directamente valores numéricos, eliminándose por tanto el módulo de desborrosificación.

Para calcular la salida del sistema difuso, se ponderarán los diferentes consecuentes teniendo en cuenta el valor que activó al antecedente de cada una de las reglas.

### 3.7 Ejemplo

Para una mejor comprensión de la *Lógica Fuzzy*, se procederá a realizar un sencillo ejemplo [42] y [47]. Para ello, se usará el control de un sistema no lineal simple basado en el péndulo inverso tal y como puede observarse en la *Figura 3.12*. *Esquema de un péndulo inverso.*

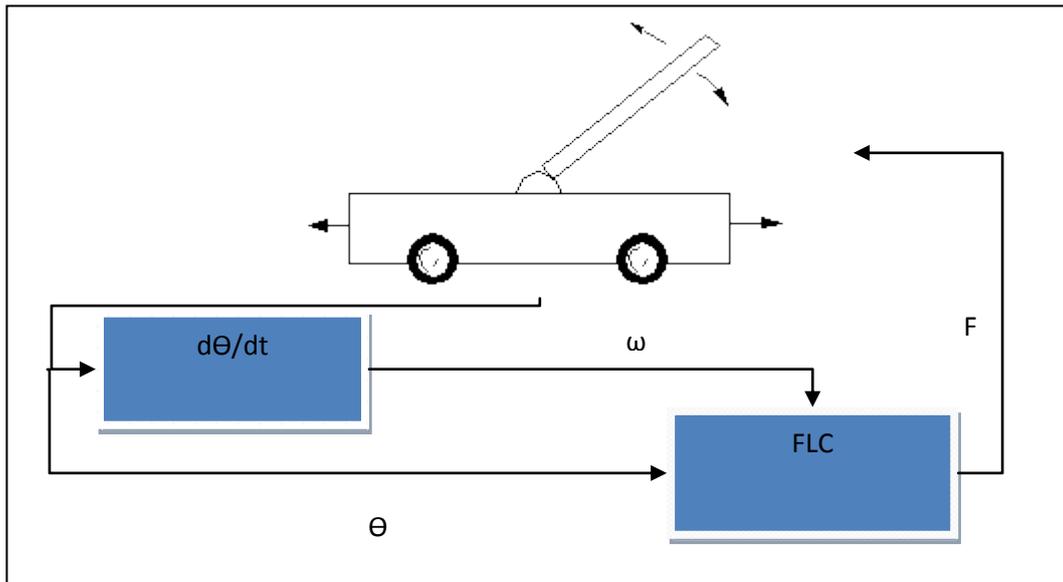


Figura 3. 12 Esquema de un péndulo inverso

Se pretende mantener en posición vertical una varilla apoyada en un carrito movido por un motor. El sistema controlador fijará la fuerza  $F$  que debe realizarse por parte del motor. Las entradas al controlador serán el ángulo  $\theta$  que forma el péndulo con la vertical y la velocidad angular  $\omega$ .

El vector de entrada al *FLC* será  $x = (\theta, \omega)$  y el de salida  $y = F$ . De una manera práctica se usará un escalado de rango para la salida entre  $[-100, 100]$ .

El siguiente paso en el diseño del controlador consistirá en la definición de las particiones correspondientes a las variables lingüísticas de entrada y de salida.

Para este caso, se utiliza la función de pertenencia de la *Figura 3.13. Función de pertenencia.*

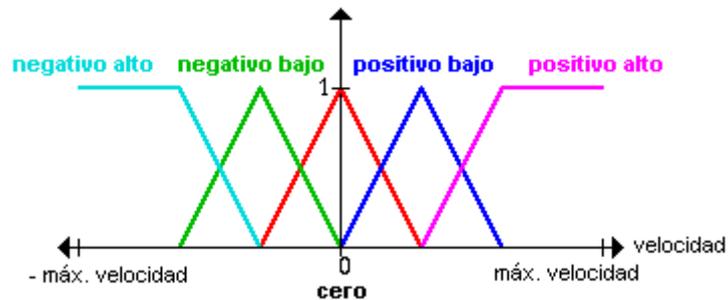


Figura 3. 13 Función de pertenencia

Después, se deberán elegir las reglas a utilizar por el controlador. En este caso, como se conoce de antemano los valores, y solo hay dos entradas, se utilizan las reglas tipo *Mamdani*. Se definirán por tanto las reglas asociadas a cada una de las posibles combinaciones de entrada a un valor de salida. Para ello, se usa la memoria asociativa borrosa mostrada en la *Tabla 3.2 FAM para el control del péndulo inverso.*

Tabla 3. 2 FAM para el control del péndulo inverso

		$\Theta$					
		NA	NB	C	PB	PA	
$\omega$	NA	NB	NB	NB	NB	NB	
	NB	NB	C	PB	C	C	
	C	NB	NB	C	PA	PB	
	PB	C	PB	PB	C	PB	
	PA	PB	PB	PB	PB	PA	

Una vez elegida la base de reglas borrosas, se deberá seleccionar el método de desborrosificación. Se debe considerar los efectos relativos a la eficiencia computacional y facilidad de adaptación, por ello, se elige la desborrosificación por centro de gravedad.

Se va a desarrollar esta desborrosificación para el caso más sencillo, en el que tanto la velocidad angular como el ángulo del péndulo son nulos (C), la fuerza deberá ser por tanto también cero (C).

Las funciones de pertenencia a los conjuntos borrosos son las mostradas en la *Figura 3.14 Reglas para ángulo y velocidad nulos*.

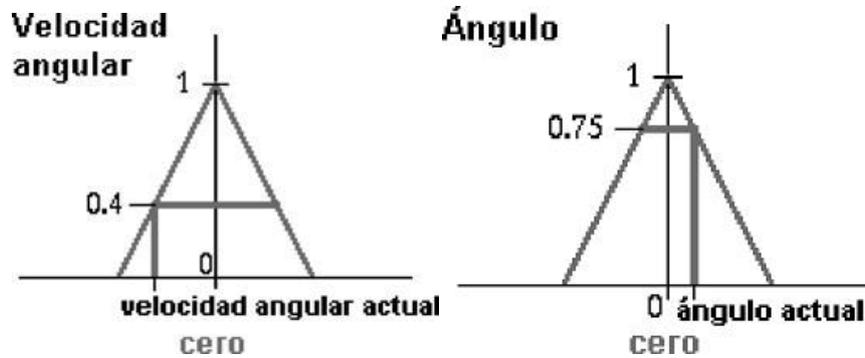


Figura 3. 14 Reglas para el ángulo y velocidad nulos [48]

Al estar las dos condiciones de la regla unidas por un operador "y", la resultante de ambas es la intersección, es decir, el mínimo de ambos valores de acuerdo a la teoría explicada en el apartado de operaciones con lógica borrosa. El conjunto borroso de la variable de salida fuerza se corta a ese nivel, tal y como se indica en la *Figura 3.15 Aplicación del operador "y"*.

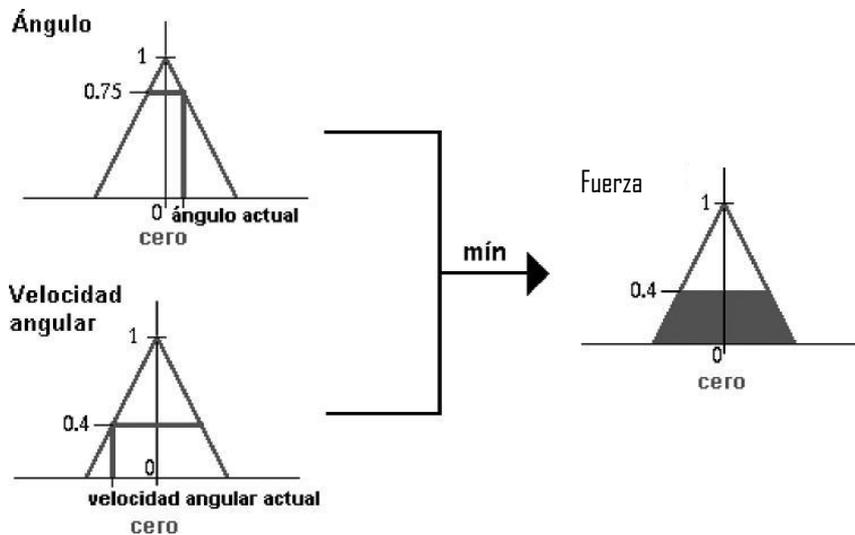


Figura 3. 15 Aplicación del operador y [48]

Se va a realizar una segunda regla con algo mayor de complejidad. En el caso de que el ángulo sea positivo bajo (PB) y la velocidad angular sea negativa baja (NB), entonces la fuerza a actuar deberá ser cero (C) tal y como se indica en la *Figura 3.16 Reglas para el segundo caso*.

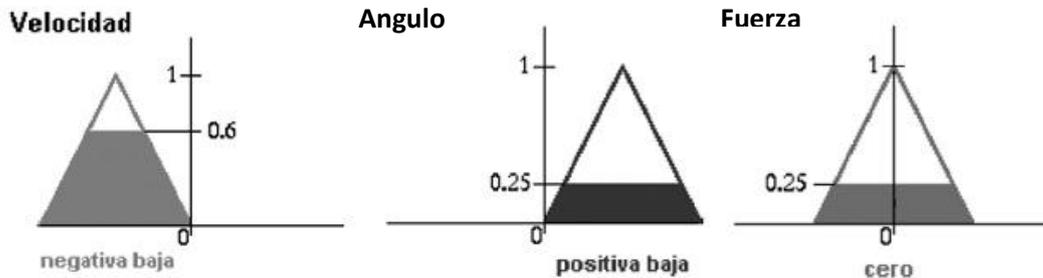


Figura 3. 16 Reglas para el segundo caso [48]

Las reglas solapadas conducen a un resultado único como el de la *Figura 3.17. Resultado de la inferencia y posterior desborrosificación*.

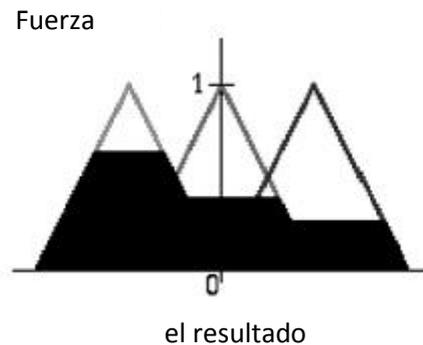


Figura 3. 17 Resultado de la inferencia borrosa y posterior desborrosificación [48]

Sin embargo, esta solución es un resultado borroso, se deberá usar la desborrosificación para poder llegar a un resultado concreto de valor de fuerza. Para ello, se recurre al método de centro de gravedad, utilizándose la parte más oscura de la *Figura 3.17 Resultado de la inferencia borrosa y posterior desborrosificación*, hallándose su centro de gravedad. Ese será el valor de fuerza actuadora que saldrá del sistema.

# Capítulo 4

## Construcción del modelo y pasos para la simulación

El primer paso para la construcción y simulación del vehículo en *MATLAB* es crear dicho vehículo en *ADAMS CAR*. Para la construcción y posterior exportación a *MATLAB*, se han seguido los pasos indicados en proyectos similares [49], [50], [51], [52], [53] y [54].

Para modelar el vehículo, se cuenta con modelos proporcionados por el fabricante del software. Se deben cargar los diferentes subsistemas de los que consta el vehículo y ensamblarlos en un único cuerpo, tal y como se muestra en la *Figura 4.1 Vehículo a simular en ADAMS CAR*.

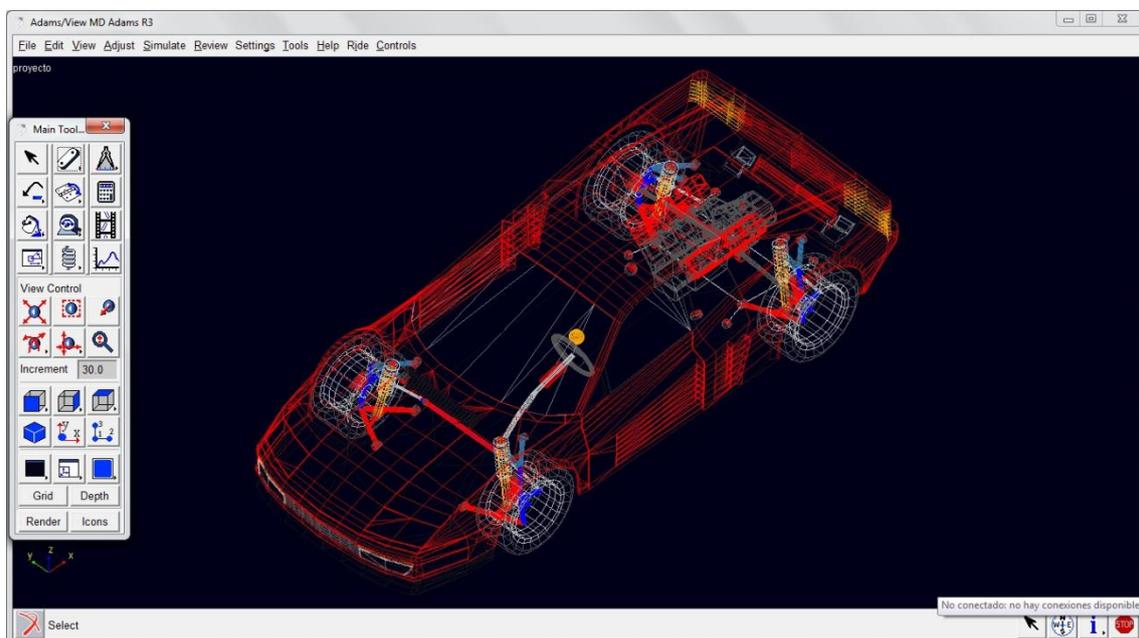


Figura 4. 1 Vehículo a simular en ADAMS CAR

Notar que, si bien se usa la aplicación *ADAMS/CAR*, es necesario el uso de la interfaz *ADAMS/VIEW* para la creación de las fuerzas actuadoras y de los sensores, tanto de aceleración como de desplazamiento, repartidos por el vehículo.

Como ya se definió en el capítulo de suspensiones, una suspensión semi-activa cuenta con una serie de elementos que son capaces de generar fuerzas para evitar o disminuir en mayor o menor medida los balanceos y cabeceos de la carrocería. En el presente modelo, dichos elementos se representan de forma simplificada mediante fuerzas externas aplicadas sobre la carrocería y en dirección paralela a los amortiguadores. Al tratarse de una suspensión independiente de doble triángulo superpuesto, en cada rueda se debe colocar una fuerza distinta, para ello, se selecciona en la barra de herramientas de *ADAMS/VIEW* la opción "Applied force: Force (Single Component)".

Se trata de una fuerza con una única componente, que se debe definir como "Space Fixed", es decir, fija en el espacio. A continuación, el programa pide cuál es el cuerpo que sufrirá la fuerza, en este caso, dicho cuerpo es el chasis, definido como "TR\_Body.ges\_chassis".

Al tratarse de una fuerza fijada en el espacio, la reacción de dicha fuerza es sufrida por la 'tierra'. Esto es así porque se está usando una simplificación en la que no existe un elemento real que esté funcionando como actuador, en caso de que existiera dicho elemento, este sería el objeto que sufriría la reacción de la fuerza.

A continuación, el programa pide el punto de aplicación de la fuerza. Se debe seleccionar el punto superior del amortiguador, lugar en el que queda unido el chasis y la suspensión, definido por el punto "TR\_Front\_Suspension.bkr\_top\_mount.j\_graphic.E1 (center)", para el caso en el que se esté definiendo la fuerza actuadora delantera derecha. Una vez seleccionado dicho punto, el programa pide que se seleccione otro punto para definir la dirección que deberá tomar la fuerza, en este caso se selecciona la parte inferior del amortiguador, dada por el punto "gralin\_lca\_damper\_mount\_1.E1".

Del mismo modo, se deben crear las otras tres fuerzas restantes en cada una de las otras ruedas. El proceso es el mismo, únicamente variarán los nombres de los puntos a seleccionar entre suspensión delantera y trasera y lado izquierdo y derecho.

En este primer paso, las fuerzas creadas tienen un valor constante que podría variarse con *ADAMS* antes del inicio de cada simulación, sin embargo, la finalidad de este proyecto es la de conseguir que estas fuerzas varíen de forma continua en función de las condiciones de la calzada o del vehículo. Esto únicamente se puede conseguir mediante la utilización en *MATLAB*.

Se debe notar que a la hora de 'dibujar' las fuerzas, se ha debido de indicar una dirección de actuación. Como el punto de aplicación se ha tomado en la parte superior del amortiguador y el punto final de la dirección en la base del mismo, se podría llegar a la conclusión de que la fuerza ha sido tomada en sentido contrario, sin embargo, tras analizar los datos obtenidos, se comprobó que esto no era así.

Para que las fuerzas actuadoras creadas anteriormente puedan tomar distintos valores, se deben crear cuatro variables llamadas "State Variable", que son las variables de entrada del sistema de control de *ADAMS* desde *MATLAB*. Cada una de estas cuatro variables se corresponde con una de las fuerzas de cada parte del vehículo, por lo que resultará cómodo denominarlas en función de si es la suspensión delantera o trasera y el lado derecho o izquierdo, tal y como se muestra en la *Figura 4.2 Crear variables de estado para exportar a MATLAB*.

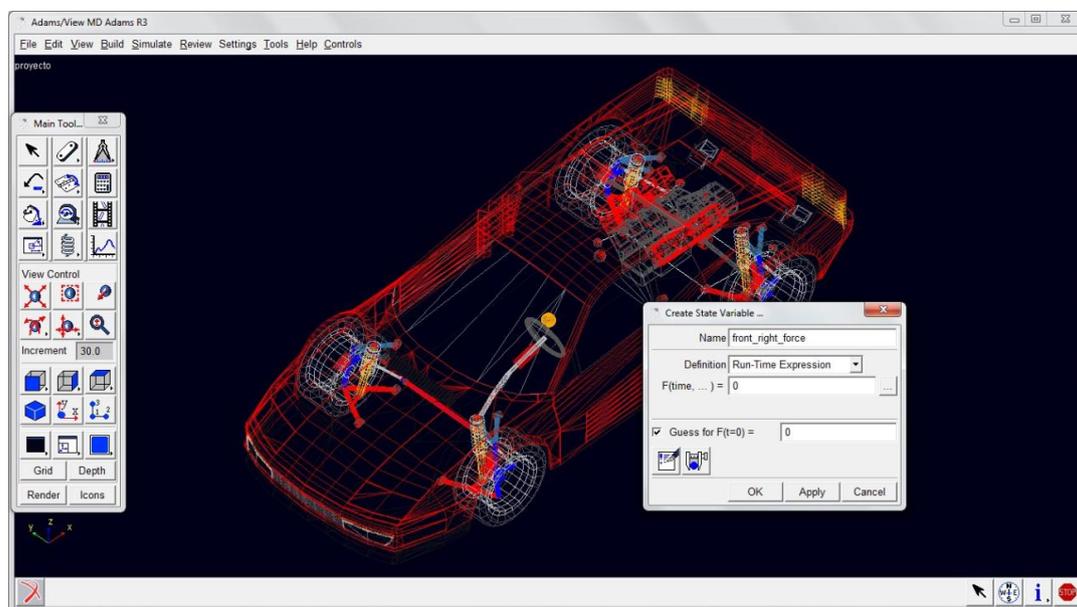


Figura 4. 2 Crear variables de estado para exportar a MATLAB

Una vez creadas esas cuatro variables de estado, se deben asociar a las fuerzas anteriormente creadas, ya que el objetivo es que *MATLAB* calcule la fuerza necesaria para contrarrestar los efectos en el vehículo, devolviendo esos valores a *ADAMS* para que este interactúe y obtenga las variables de salida. Por tanto, las fuerzas creadas deben tomar el valor de las "State variables" que se encontrarán en cada instante actualizadas por *MATLAB*. Para ello, se debe modificar las fuerzas, y como valor de las mismas se escribe el siguiente código:

```
VARVAL (front_right_force)
```

Con esta función lo que se consigue es que la fuerza tome el valor de la variable (VARVAL) de cada caso, tal y como se muestra en la *Figura 4.3 Dar valores a las fuerzas en ADAMS*.

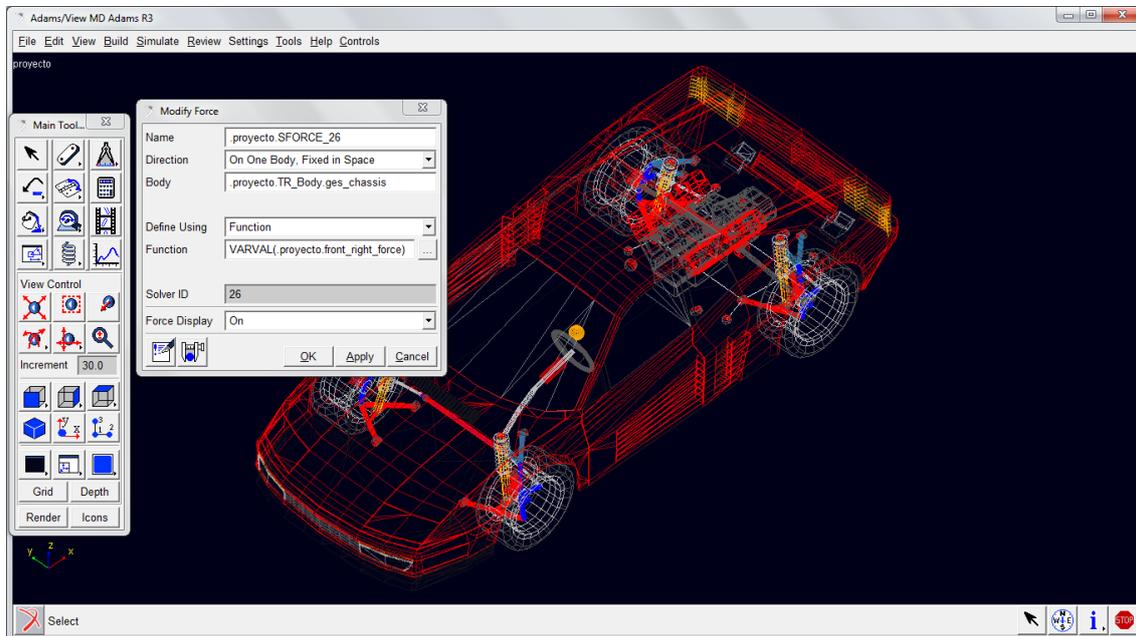


Figura 4. 3 Dar valores a las fuerzas en ADAMS

Este ejemplo es para el caso de la rueda delantera derecha, pero es extensible a las demás, el único cambio a realizar es el del nombre de la "State variable", que toma el correspondiente a cada rueda.

El modelo de vehículo proporcionado por el fabricante cuenta con una serie de sensores de aceleración y desplazamiento, pero únicamente para el centro de gravedad del mismo. Como el sistema de control necesita información sobre cada una de las suspensiones, se deben crear 'sensores' tanto de aceleración vertical como de desplazamiento de cada suspensión. El punto elegido para colocarlos es el mismo que el de actuación de las fuerzas, es decir, la parte superior del amortiguador, en donde se junta la suspensión con la masa suspendida.

*ADAMS/CAR* permite calcular aceleraciones y desplazamientos de cualquier punto sin necesidad de crear sensores tal cual. Desde el modo de interfaz *ADAMS/VIEW*, se van a crear cuatro nuevas "State variables" para la aceleración vertical y otras cuatro para los desplazamientos de la suspensión.

En el caso de las aceleraciones se debe crear la "State variable", y como función, usar el siguiente código, tal y como se indica en la *Figura 4.4 Crear medidores de aceleración vertical*:

```
accz(.MDI_Demo_Vehicle.TR_Front_Suspension.ger_upper_strut.bg10_strut_topmount_1,.MDI_Demo_Vehicle.testrig.ground.iso_eas_mar,.MDI_Demo_Vehicle.testrig.ground.iso_eas_mar)
```

donde "accz" hace referencia a la medición de la aceleración en el eje z, el primer término dentro del paréntesis es el punto del que se quiere medir la aceleración, y el segundo y tercer términos (separados por comas) son los puntos de referencia desde los cuales se toma la aceleración, en este caso desde el eje de referencia del suelo.

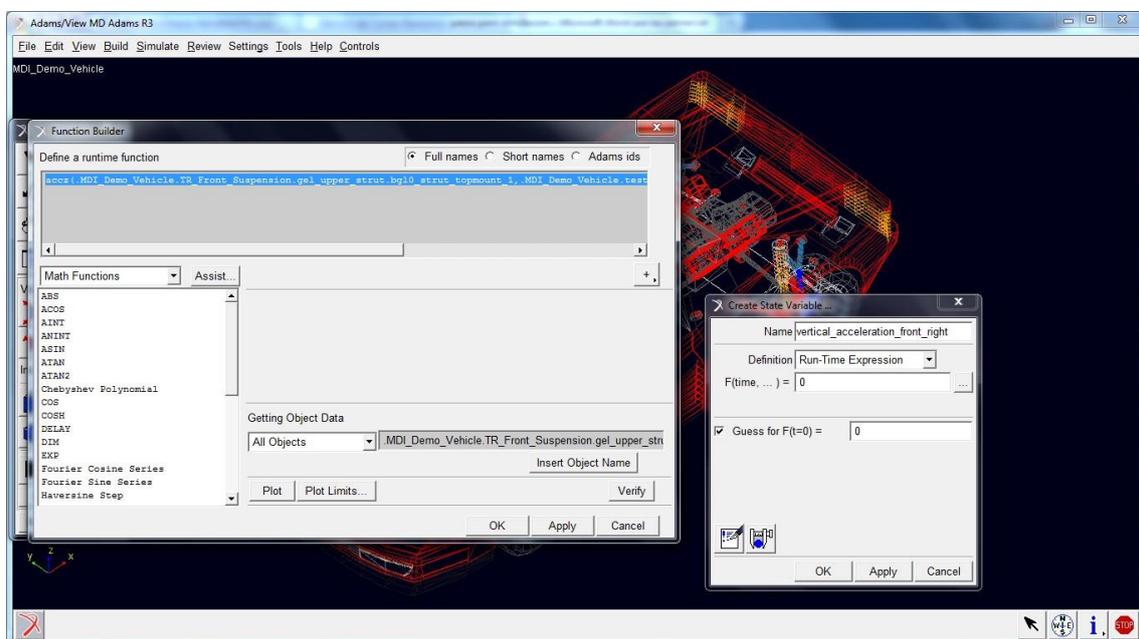


Figura 4. 4 Crear medidores de aceleración vertical

Este ejemplo se ha tomado para la rueda delantera derecha, sin embargo, es extensible nuevamente al resto de los puntos, únicamente se debe variar el primer término dentro del paréntesis de "accz", colocando el punto del que interese conocer la aceleración.

En el caso de las mediciones de los desplazamientos del chasis, la forma de actuación es similar. Notar que normalmente en estos casos, los datos usados para interactuar en la suspensión semi-activa suelen ser los del desplazamiento relativo de la suspensión, sin embargo, en este caso, el programa proporciona la altura del

punto superior del amortiguador (donde se une con la masa suspendida) con respecto al suelo. Para ello se usa el siguiente código:

```
dz(.MDI_Demo_Vehicle.TR_Front_Suspension.ger_upper_strut.bgr0_strut_topmount_1,.MDI_Demo_Vehicle.testrig.ground.iso_eas_mar,.MDI_Demo_Vehicle.testrig.ground.iso_eas_mar)
```

que se debe introducir como una nueva variable tipo "State variable", tal y como se indica en la *Figura 4.5 Crear medidores de desplazamiento vertical*. Los términos son similares a los usados para la aceleración vertical, solo se debe cambiar el término "accz" por "dz" que hace referencia a la medición del desplazamiento. De nuevo, este ejemplo es para el caso de la parte delantera derecha, pero es extensible al resto de partes variando el primer término del paréntesis por el punto requerido.

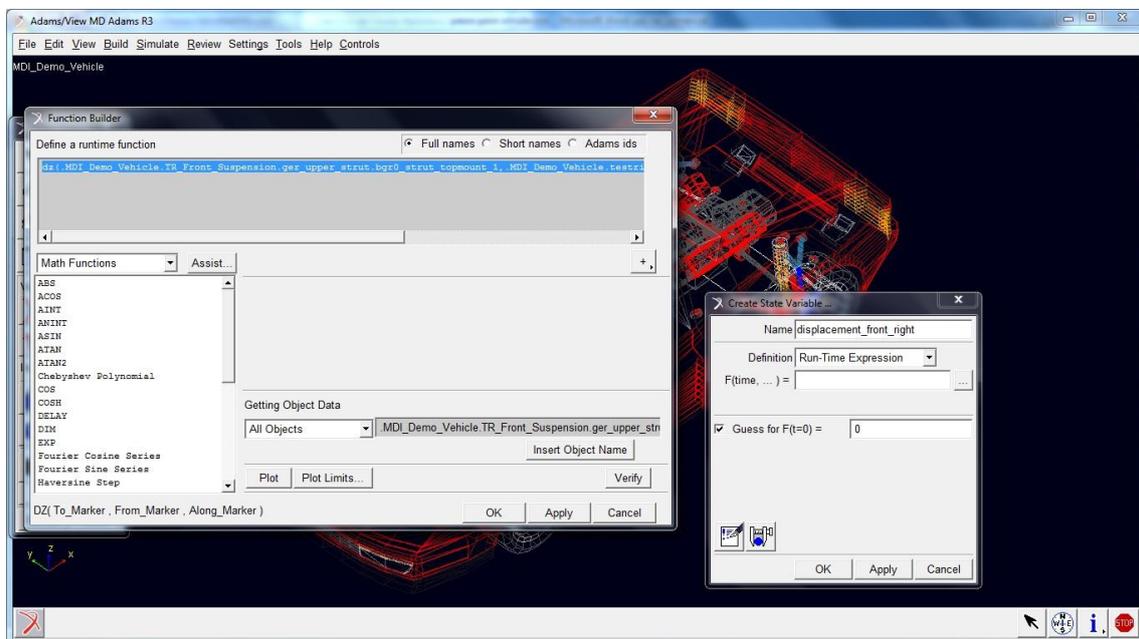


Figura 4. 5 Crear medidores de desplazamiento vertical

En referencia al desplazamiento, se obtiene el movimiento del punto con respecto a una referencia, sin embargo, para usar como entrada del controlador borroso, es necesario como dato el desplazamiento relativo de la suspensión, es decir, la extensión y compresión que sufre el amortiguador y el muelle. Para conseguir dicho resultado, se usarán una serie de operaciones creadas en *Simulink* y que más tarde serán definidas.

El siguiente paso es crear una carretera ficticia con los obstáculos que se quieren simular para comprobar la efectividad de la suspensión semi-activa. Debido

a que el presente proyecto se centrará en la comodidad de los ocupantes, se hace que el vehículo traspase un bache y un badén. Se debe notar que como el modelo de automóvil en cuestión es un vehículo deportivo de baja altura, los obstáculos en la carretera deberán ser de baja magnitud, de lo contrario, podría producirse contacto entre chasis y carretera, haciendo que los valores obtenidos tomen valores dispares.

Para crear la carretera se usa el módulo existente en *ADAMS* denominado "Road Builder". El programa cuenta en su base de datos con una carretera de muestra con obstáculos senoidales por defecto. Se deben cambiar estos obstáculos por un bache y un badén, lo único que se debe hacer es añadir en un primer momento los nombres de los obstáculos tal y como se muestra en la *Figura 4.6. Añadir los obstáculos a la carretera.*

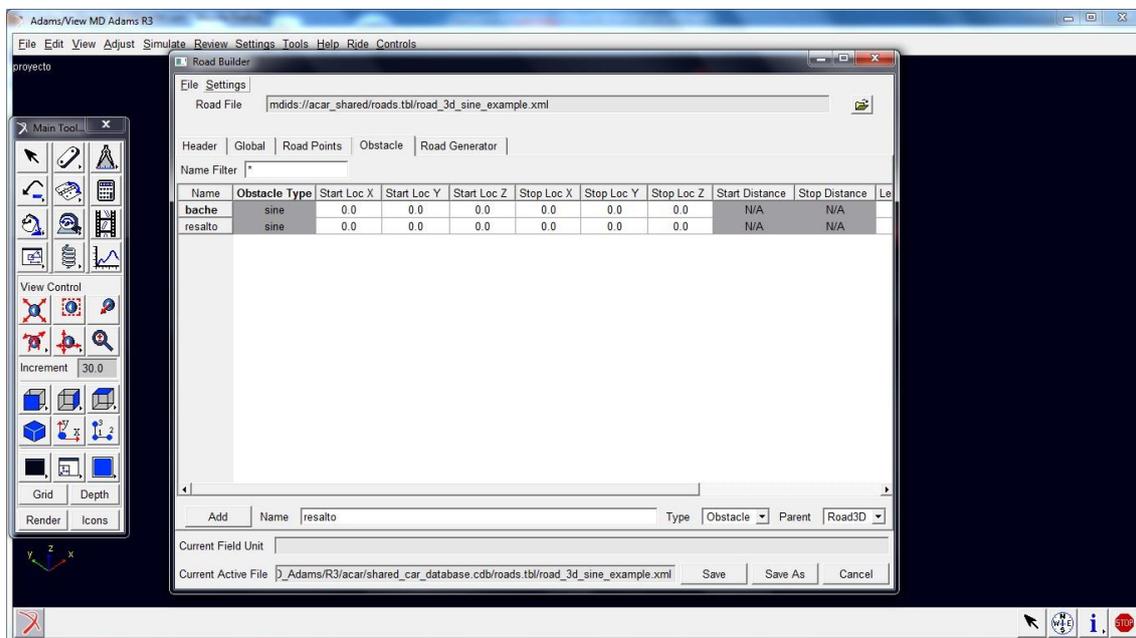


Figura 4. 6 Añadir obstáculos a la carretera

El siguiente paso es la configuración de cada uno de los obstáculos, para ello, se selecciona el objeto que se quiere modificar. El ejemplo es válido para ambos casos ya que solo variarán en pequeños detalles. Lo primero es elegir el tipo de obstáculo del que se trata. En este caso, se selecciona un bache, o protrusión en su defecto, que en el programa es tratado como "pothole". Se debe definir igualmente el ancho del obstáculo "width", la longitud que tiene "length" y la fricción "friction". En segundo lugar se debe posicionar el obstáculo en el espacio. Como el sistema de referencia se encuentra en un plano y la carreta es recta,

únicamente hace falta definirlo en la coordenada X, dónde empieza y dónde acaba el obstáculo. Por último, se debe definir la profundidad "depth" del obstáculo. En la *Figura 4.7 Configuración de parámetros del bache* se muestra como ejemplo la configuración para el bache.

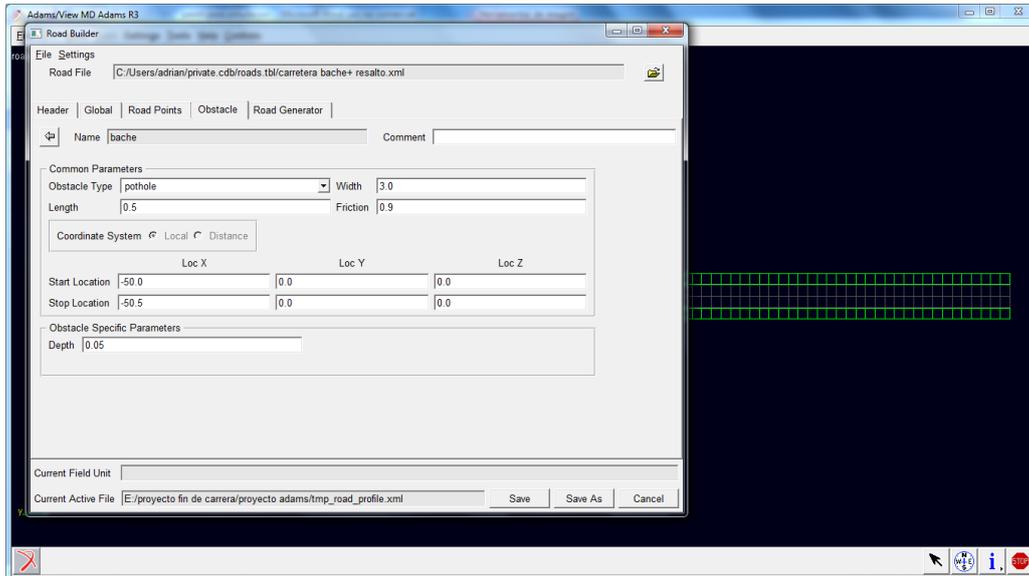


Figura 4. 7 Configuración de parámetros del bache

Una vez completado, se debe guardar y seleccionar el badén. Este se configura de forma similar, cambiando las coordenadas de su posición, para que no coincida con el bache, y además, teniendo especial cuidado en este caso ya que la profundidad "depth" se debe tomar con valor negativo.

Por último, se debe ir al módulo "Road points" y dar al botón "Generate 3d Road". El programa genera una carretera tal y como se muestra en la *Figura 4.8 Carretera generada*.

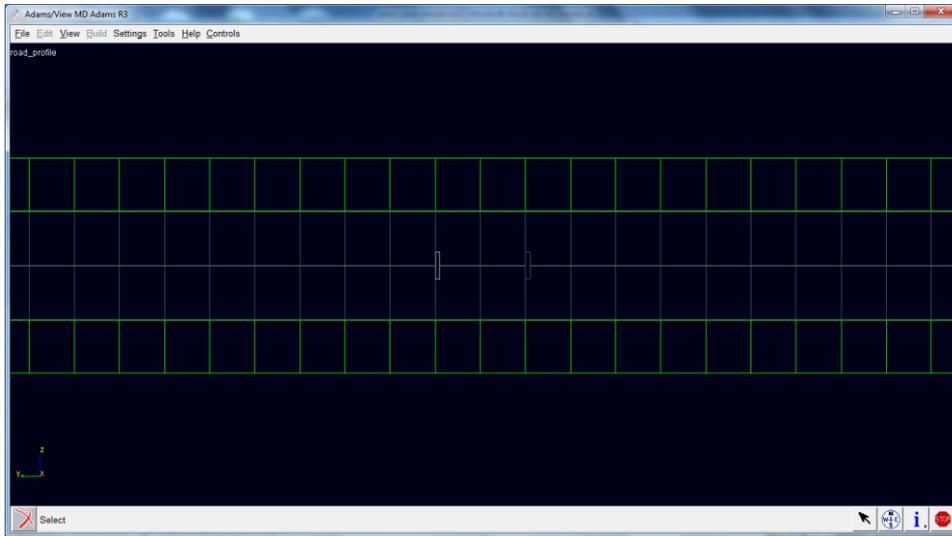


Figura 4. 8 Carretera generada

Una vez hecho esto, se debe volver a la interfaz de *ADAMS CAR* e indicar al programa cuales son las entradas al sistema de control que se exportarán a *MATLAB*, en este caso, las fuerzas actuadoras en cada rueda. Esto se realiza mediante la pantalla "Data Element Create Plant Input", en la que se debe introducir el nombre de las cuatro "State variables" creadas para las fuerzas tal y como se muestra en la *Figura 4.9. Crear el plan de exportación*.

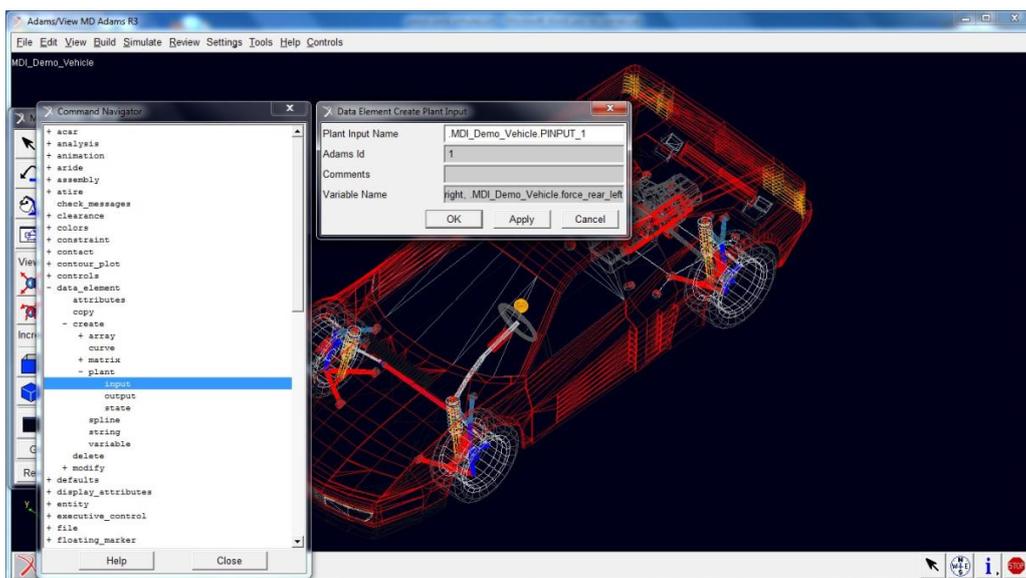


Figura 4. 9 Crear plan de exportación

Del mismo modo, se deben definir cuáles son las salidas del sistema. En este caso, se toman todos los medidores de aceleración y desplazamientos creados con anterioridad tal y como se indica en la *Figura 4.10 Crear el plan de exportación de salidas del sistema*.

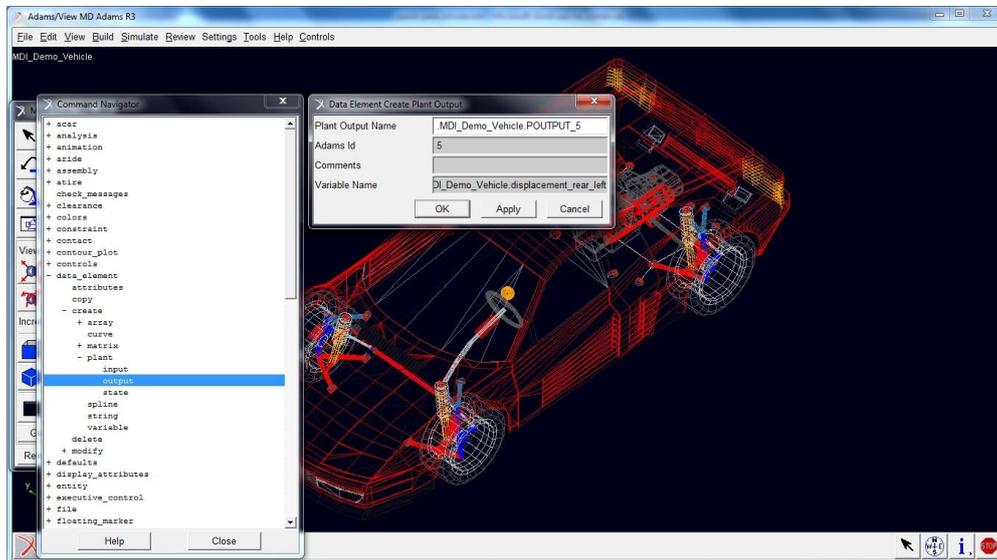


Figura 4. 10 Crear el plan de exportación de salidas del sistema

Una vez realizada esta última acción, ya es posible exportar los datos del vehículo a *MATLAB*. Para ello, se debe seleccionar un análisis o simulación para que *ADAMS* cree los archivos necesarios.

Es importante mencionar que únicamente se pueden realizar simulaciones que no sean cuasiestáticas, es decir que no se encuentren cerca del equilibrio. De lo contrario, los archivos creados no funcionarían en *MATLAB*.

Como únicamente se quiere medir desplazamientos y aceleraciones del chasis para condiciones de circulación en línea recta, basta con hacer una simulación del tipo "3D Road". Para que la creación de archivos se produzca, se deben completar los siguientes parámetros (*Figura 4.11. Simulación de una carreta 3D en ADAMS*):

- Introducir el nombre que tomará el análisis.
- Tiempo de duración de la simulación.
- Importante: seleccionar que únicamente se quiere que la simulación sea de creación de archivos "files only".
- Escoger la carretera creada anteriormente.
- Dar una velocidad inicial al vehículo, en este caso se toman 100 km/h.

- Seleccionar como fichero de características de velocidad el dado por el programa en su base de datos.
- Importante: por último se debe deseleccionar la casilla "Quasi-Static Straight-Line Setup", de lo contrario, los archivos darán error al exportarlos a *MATLAB*.

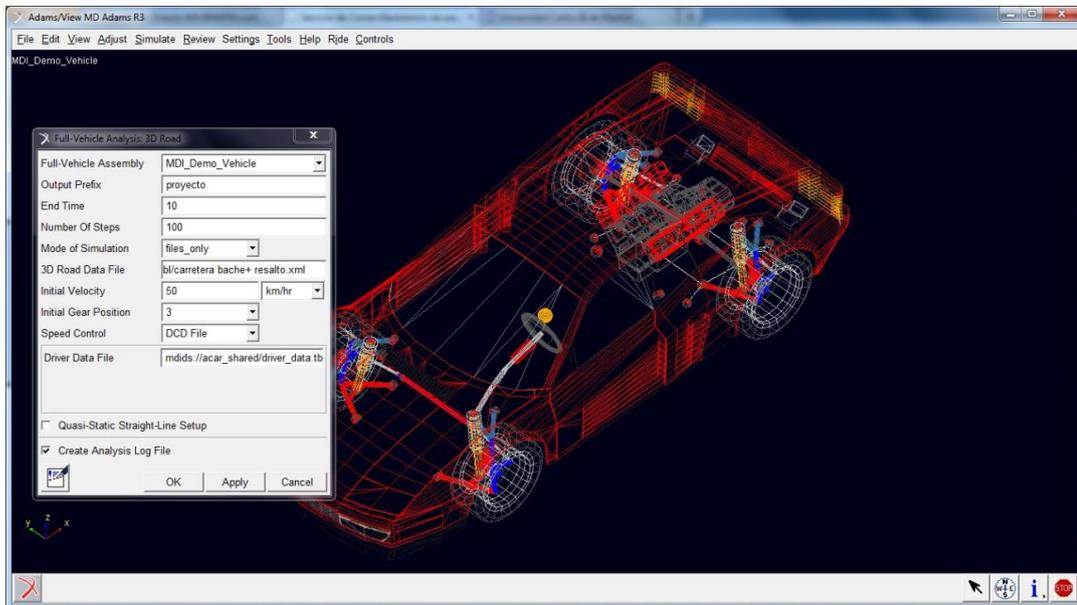


Figura 4. 11 Simulación de una carretera 3D en ADAMS

Tras realizarse la simulación, hay que fijarse que en la carpeta seleccionada para el guardado de los archivos *ADAMS* se hayan creado los archivos siguientes: un archivo con extensión *.m* (fichero de *MATLAB*), un archivo *.acf* y otro *.adm*.

Antes de continuar, hay que cerciorarse de que se cuenta con una versión de *MATLAB* acorde con la versión utilizada de *ADAMS CAR*.

En la ventana principal de *MATLAB*, se debe teclear el nombre del archivo con extensión *.m* que fue creado anteriormente en *ADAMS* con el nombre elegido. El programa proporciona el nombre de todas las variables de entrada y salida del sistema.

A continuación se tecldea "adams\_sys". Se abre una nueva ventana (de *Simulink*) que contiene el sistema importado desde *ADAMS CAR*, con un bloque de control y las salidas del sistema, tal y como se muestra en la *Figura 4.12. Sistema importado desde ADAMS*.

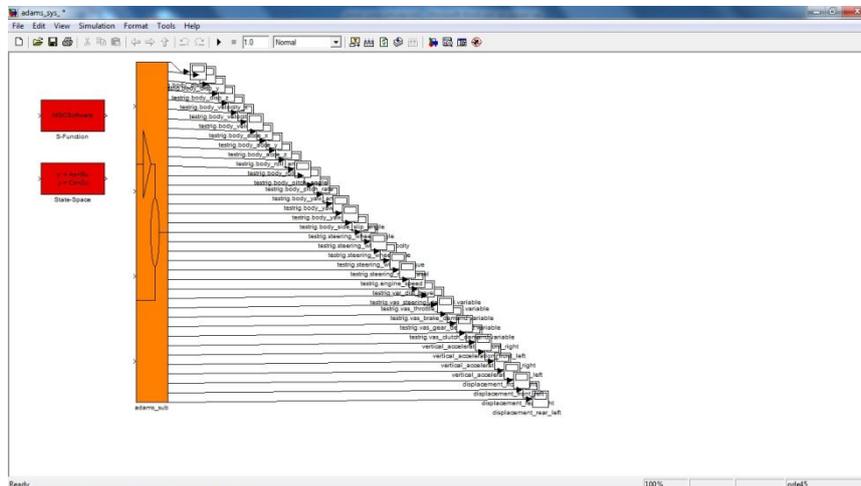


Figura 4. 12 Sistema importado desde ADAMS

El siguiente paso es la creación de un nuevo modelo de *Simulink*. En él se deberá copiar el bloque "adams\_sub" del sistema importado. A partir de él, se comienza a completar el modelo con los diferentes componentes que se necesiten para crear el controlador.

En primer lugar, se construye el modelo correspondiente a la suspensión pasiva, necesario para obtener los datos con los que más tarde poder comparar con los modelos de suspensión semi-activa y así comprobar la efectividad de la misma.

Aunque en la suspensión pasiva, las fuerzas actuadoras deberían ser nulas, para que el sistema de *Simulink* no provoque errores, se deben completar las entradas al sistema "adams\_sub", en adelante 'Sistema de control Adams Car', con cuatro constantes de valor la unidad.

Como se observó en la *Figura 4.12.Sistema importado desde ADAMS*, el programa coge por defecto todas las salidas de los sensores con los que cuenta el modelo, sin embargo, para el presente proyecto únicamente interesan las ocho últimas salidas, correspondientes a las aceleraciones verticales y desplazamientos de los puntos elegidos en el vehículo.

Las cuatro primeras salidas contando desde arriba hacen referencia a las aceleraciones. Debido a problemas en la exportación, el sistema las da en unas

unidades distintas a las requeridas "g's". Se debe, por tanto, hacer una reconversión a través de bloques "Gain". La salida de cada bloque, correspondiente a la aceleración de cada parte del vehículo tomada, tiene dos posibles caminos, uno primero, en el que es conducida a un bloque conjunto "Display", en donde queda reflejada la evolución de la aceleración, y un segundo, a un conjunto de cuatro bloques "To file", en donde se guardan los datos de aceleración en un fichero para su posterior uso, por ejemplo, para hallar el *PSD* (Power Spectral Density).

De igual modo, las cuatro salidas restantes corresponden a los desplazamientos. El primer bloque "Gain" es usado para convertir las unidades de salida a metros. El siguiente bloque "Sum" sirve para convertir la distancia medida desde la referencia al punto deseado en desplazamiento relativo, tal y como se indicó en la construcción del modelo en *ADAMS*. Por último, se usa otro bloque "Gain" de valor 2 para que el valor quede como desplazamiento relativo de la suspensión, ya que anteriormente era únicamente el del punto superior del que se tomaba el desplazamiento y se debe usar el desplazamiento del conjunto amortiguador-muelle.

Del mismo modo que se hizo con las aceleraciones, las salidas de los desplazamientos pueden tomar dos posibles destinos. Uno primero hacia la representación gráfica de la evolución de los mismos y uno segundo para el guardado en archivo.

Tras la construcción del modelo de suspensión pasiva en *MATLAB*, la ventana *Simulink* queda similar a la de la *Figura 4.13. Modelo de suspensión pasiva en Simulink*.

El modo en el que son nombradas las variables es el siguiente:

'spavdd'

- 'sp', hace referencia a que se trata de una suspensión pasiva.
- 'av', la variable es la aceleración vertical, en el caso de que la medición sea del desplazamiento, tomará el término 'd'.
- 'dd', hace referencia a que se trata de la parte delantera derecha del vehículo, tomando 'di' para la delantera izquierda, 'td' para la trasera derecha y 'ti' para la trasera izquierda, respectivamente.

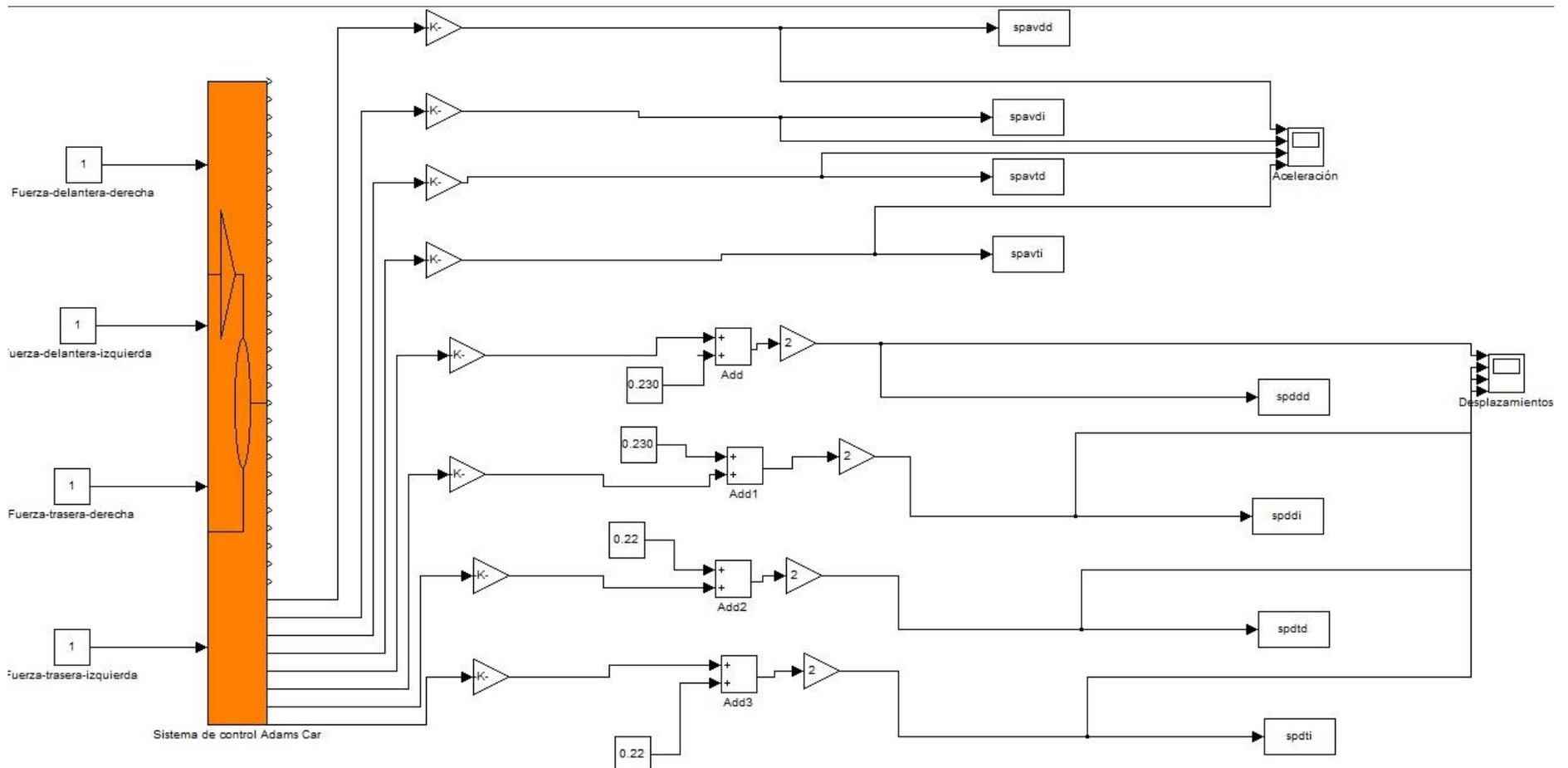


Figura 4. 13 Modelo de suspensión pasiva en Simulink

Para realizar el análisis del modelo se debe antes configurar *Simulink*. Se debe seleccionar el módulo 'Sistema de control Adams Car', abriéndose una nueva ventana con los bloques del sistema de control, se debe seleccionar entonces el bloque "MSCSoftware". Aparece una nueva ventana como la mostrada en la *Figura 4.14*. Parámetros de los bloques de función en la que se debe cambiar el nombre del "Output files prefix" y poner el nombre con el que se quiera guardar el análisis. Las demás variables no deben ser cambiadas a priori, si bien en posibles futuros trabajos se podría probar a cambiar otros parámetros.

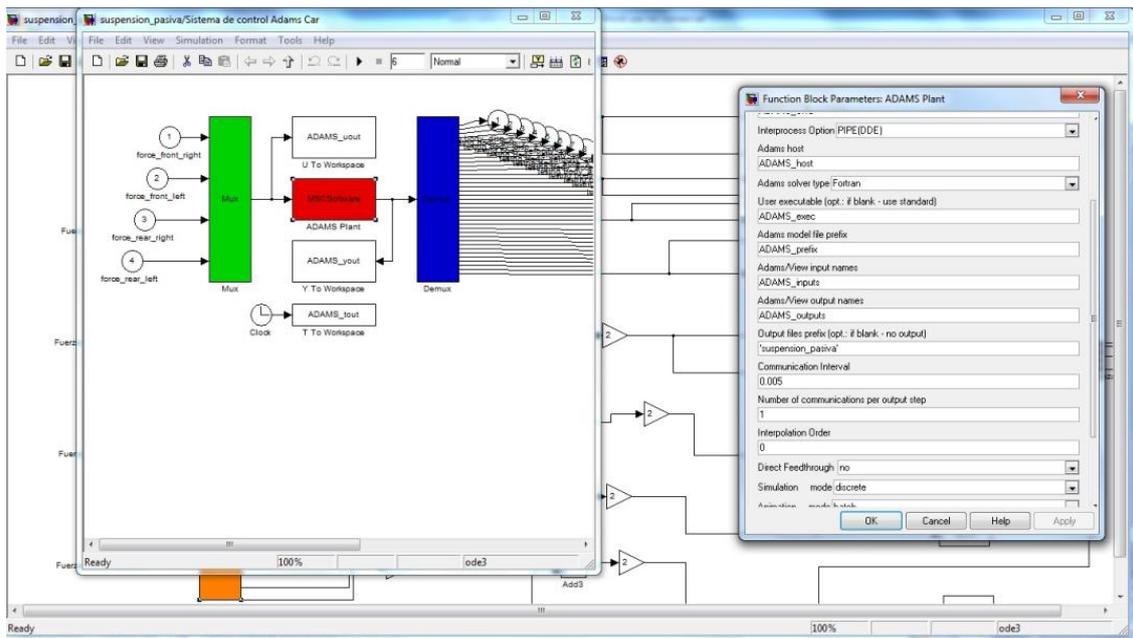


Figura 4. 14 Parámetros de los bloques de función

Por último, se deben configurar los parámetros relativos a la ejecución del análisis, para ello, desde la ventana de *Simulink* se selecciona "Simulation>Configuration Parameters". Se abre una nueva ventana en la que se debe cambiar el tiempo de simulación, por defecto 10 s, ya que para el análisis es suficiente con unos 6 s, y además, se debe cambiar el tipo de integración, eligiendo el tipo "Fixed-Step".

La configuración se muestra en la *Figura 4.15. Configuración de parámetros para el análisis.*

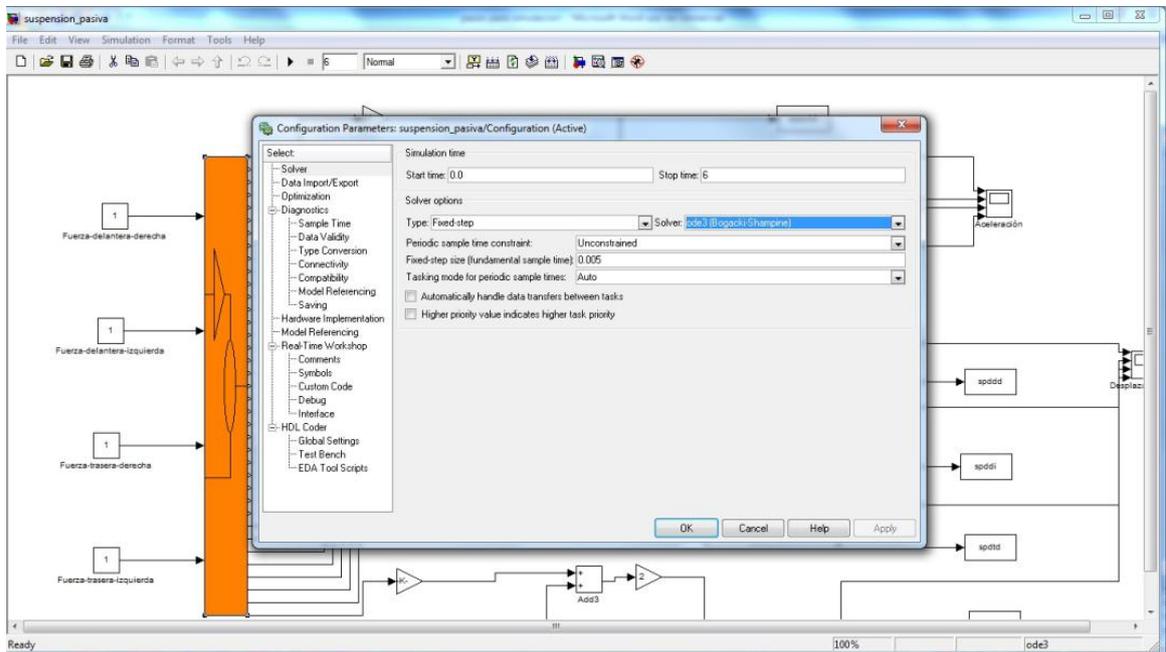


Figura 4. 15 Configuración de parámetros para el análisis

Se puede entonces ejecutar el análisis para el caso de suspensión pasiva, seleccionando el botón 'Start'.

A continuación, se desarrolla el sistema de suspensión semi-activa.

El esquema *Simulink* del modelo de suspensión semi-activa cuenta con muchas similitudes con el modelo pasivo, por lo que se van a indicar las principales diferencias. La primera diferencia se encuentra en los bloques de función *Fuzzy*, uno por cada rueda, que son los encargados de generar un valor de fuerza actuadora para el 'Sistema de control de Adams' en función de dos parámetros de entrada, a saber, la aceleración vertical y el desplazamiento de la suspensión de cada parte del vehículo. Antes de cada entrada de bloque *Fuzzy* es necesario colocar un bus de datos para convertir las dos señales en una. El orden de colocación de las entradas en el bus viene dado por el orden en el que se coloquen las entradas al definir el bloque *Fuzzy*, el cual se explica en la construcción de la *Lógica Fuzzy*.

Las salidas del sistema de control siguen la misma forma que en el caso de la suspensión pasiva y que fueron explicadas con el caso de suspensión pasiva, la única diferencia estriba en que debe existir en cada una de las variables de salida otra

unión que conduzca a la retroalimentación del sistema, es decir, sirva como entrada de los bloques *Fuzzy*.

En un primer momento, se optó por la introducción de dichas variables directamente en los bloques *Fuzzy*, sin embargo, el programa daba errores de compatibilidad de tiempos, por lo que fue necesaria la implantación de bloques de memoria para igualar los tiempos de cálculo entre el bloque *Fuzzy* y el bloque de control del sistema *ADAMS*.

En la *Figura 4.16. Modelo de suspensión semi-activa en Simulink* se puede observar el esquema del modelo.

En este caso, la denominación de las variables tiene el siguiente formato:

'sa1avdd'

- 'sa', hace referencia a que se trata de una suspensión semi-activa.
- 1, es el número de modelo tratado, se van a realizar distintos modelos para conseguir llegar a una solución óptima.
- 'av', se refiere a que se está midiendo aceleración vertical, en caso de medir desplazamiento de la suspensión se usaría 'd'
- 'dd', hace referencia a que se trata de la parte delantera derecha, 'di' sería la parte delantera izquierda, 'td' trasera derecha y 'ti' trasera izquierda, respectivamente.

A la hora de definir el bloque *Fuzzy* desde *Simulink* únicamente se debe indicar el nombre del sistema *Fuzzy*, mediante su selección en el bloque que utilizará el modelo. El programa o lógica *Fuzzy* en sí se construye desde otro módulo de *MATLAB*.

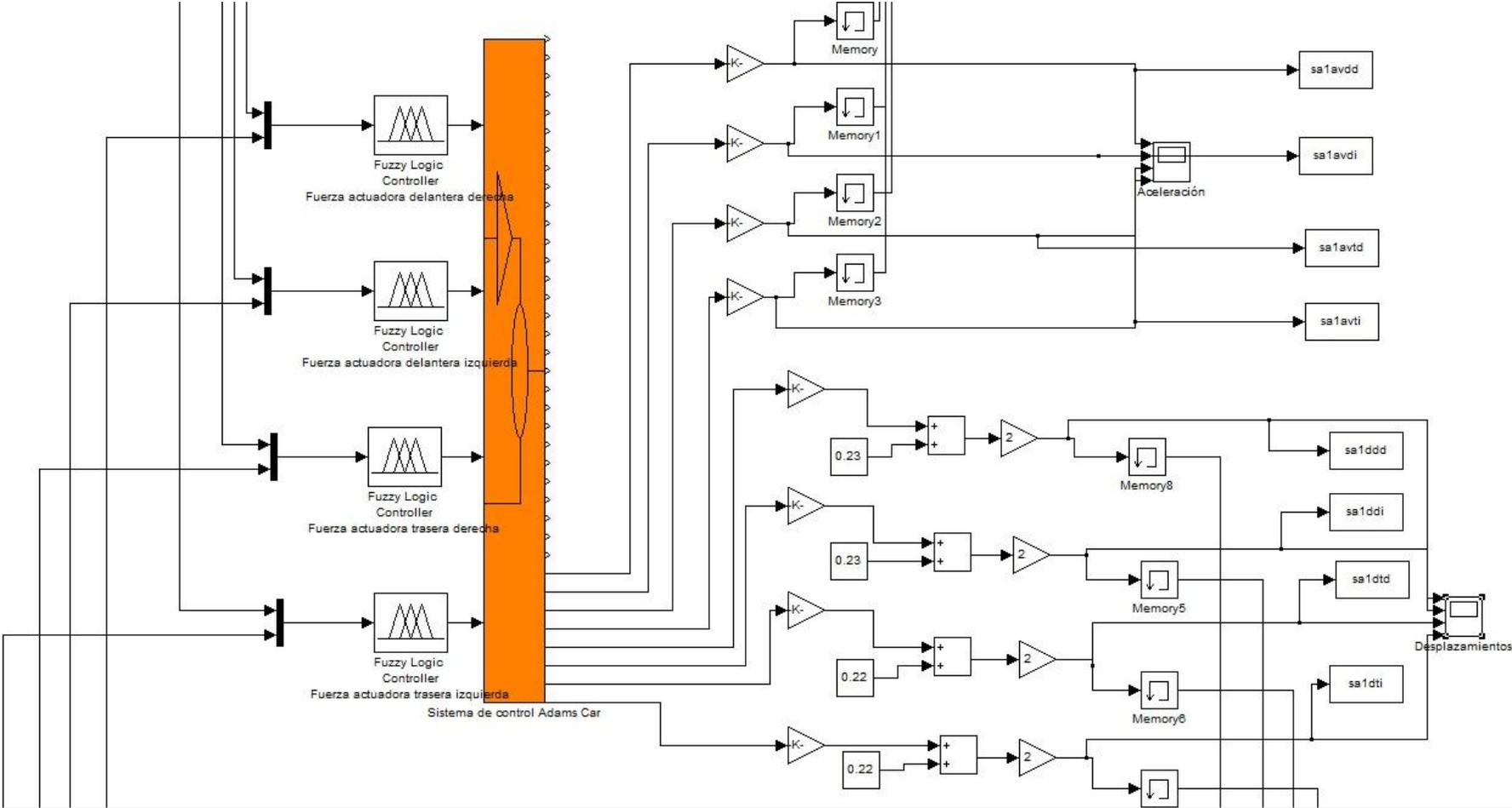


Figura 4. 16 Modelo de suspensión semi-activa en Simulink

Para construir la lógica *Fuzzy* se debe acudir a la ventana principal de *MATLAB* y teclear 'fuzzy'. Se abre una ventana con el editor de *Lógica Fuzzy*. En él se puede elegir el número de variables de entrada, el número de variables de salida o el tipo de lógica a usar para inferir las salidas entre otros.

Se debe, por tanto, acotar las entradas, tanto de aceleración como de desplazamiento, a los valores a los que se quiere que trabaje el sistema, además de la construcción de las funciones de pertenencia tal y como se muestra en la *Figura 4.17. Construcción de variables de entrada en Fuzzy*.

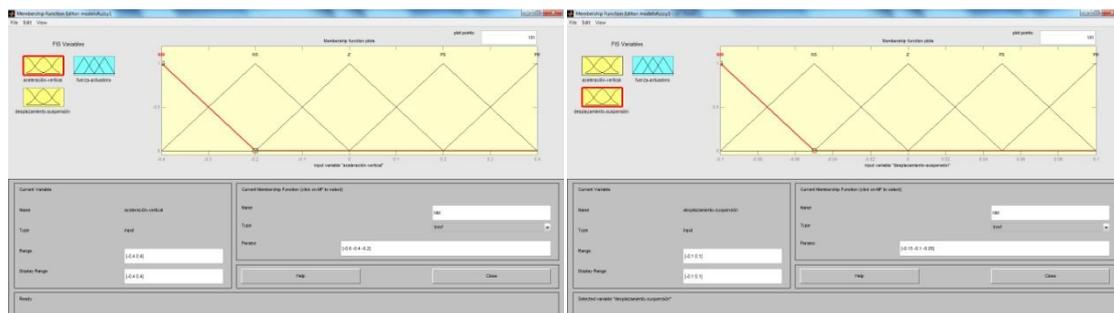


Figura 4. 17 Construcción de variables de entrada en Fuzzy

Del mismo modo, se acota la salida del sistema, es decir la fuerza actuadora, y se construyen las funciones de pertenencia, como se puede observar en la *Figura 4.18. Construcción de variables de salida en Fuzzy*.

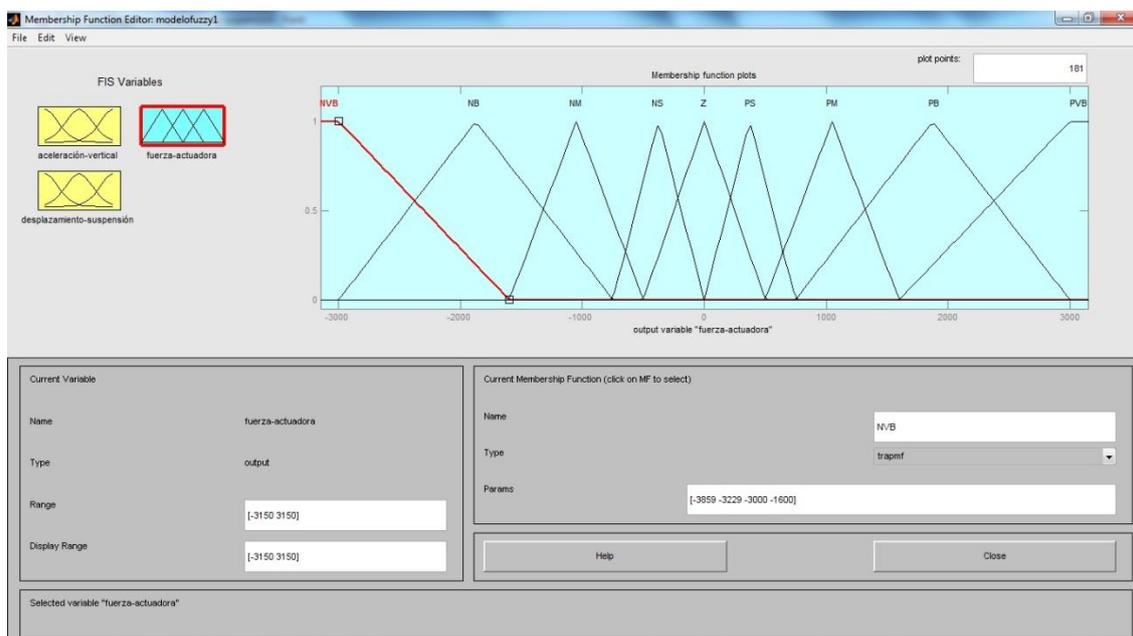


Figura 4. 18 Construcción de variables de salida en Fuzzy

En este capítulo únicamente se explica la construcción del modelo. La elección de valores, cálculos o funciones de pertenencia de la *Lógica Fuzzy* son desarrollados con mayor profundidad en el capítulo de resultados.

El siguiente paso es la construcción de las reglas de inferencia de *Fuzzy*. Para ello, se debe seleccionar el bloque "Mamdani" de la ventana principal del editor, se puede por tanto definir las reglas que se quieran en función de los parámetros de entrada y salida tal y como se muestra en la *Figura 4.19. Construcción de reglas Fuzzy*.

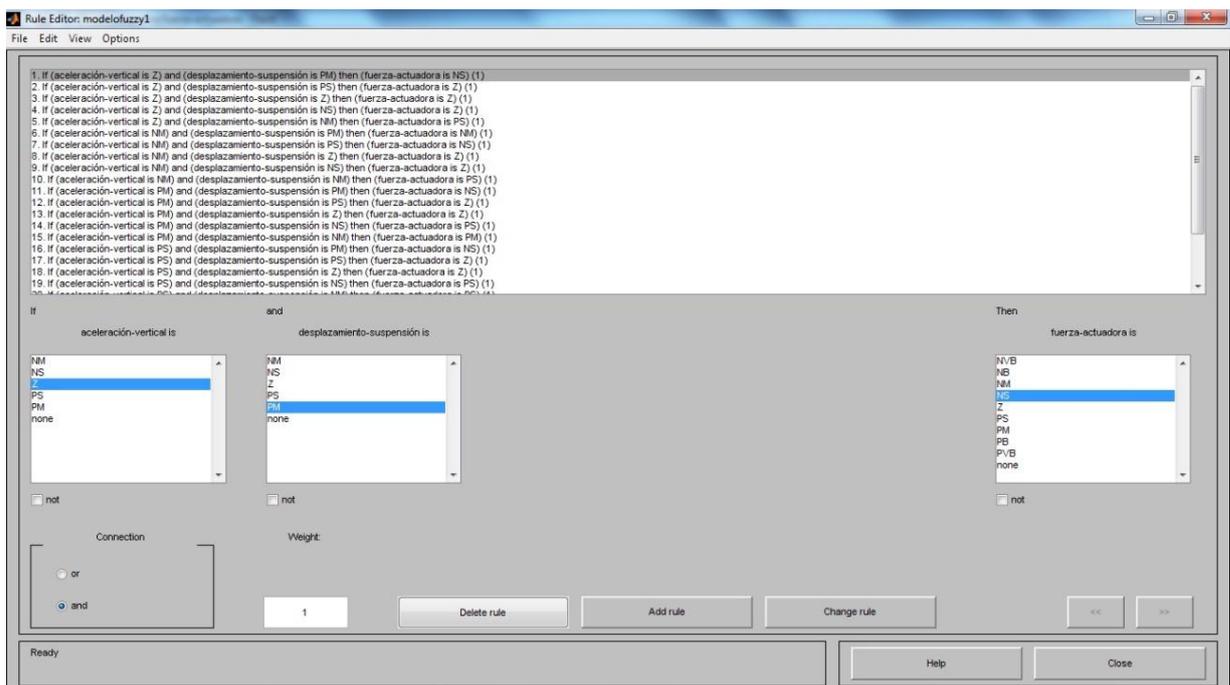


Figura 4. 19 Construcción de reglas Fuzzy

El último paso es el guardado de la *Lógica Fuzzy*, pudiendo tomar dos caminos. Uno primero, guardándola en un archivo para su posterior uso, y uno segundo, el más importante, exportando la lógica al "Workspace" para que el modelo en *Simulink* pueda usarla en los bloques *Fuzzy*.

De modo que el editor queda de la forma de la *Figura 4.20. Esquema final de Fuzzy*. Notar que el nombre con el que se exporte la lógica es el que se debe introducir en los bloques *Fuzzy* de *Simulink* para que la simulación pueda comenzar.

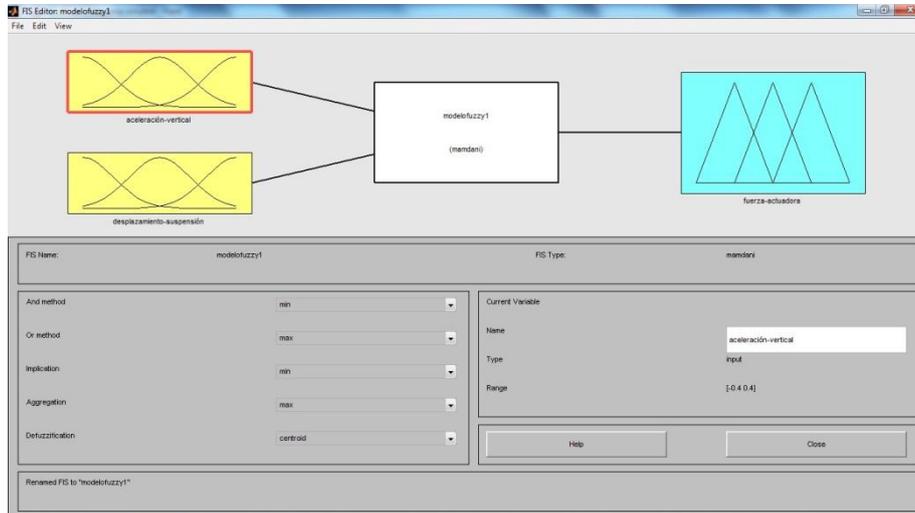


Figura 4. 20 Esquema final de Fuzzy

Como último paso antes de la simulación del modelo semi-activo, se debe cambiar el nombre con el que el sistema guarda la simulación tal y como se explicó en la suspensión pasiva.

En el siguiente capítulo, relativo a los resultados de la simulación, se explican los valores tomados para las variables de entrada y salida de los bloques *Fuzzy*, las funciones de pertenencia utilizadas, así como las reglas y procesos de desborrosificación adoptados para cada uno de los modelos simulados.

# Capítulo 5

## Resultados de la simulación

En el presente proyecto se ha pretendido mejorar los resultados de aceleración vertical del chasis de un vehículo mediante un sistema de suspensión semi-activa controlado por *Lógica Fuzzy*. Para ello, se recurre a la utilización de los programas informáticos *ADAMS/CAR* y *MATLAB*.

*ADAMS* permite la simulación de un vehículo total, incluyendo todos sus componentes, es decir, un modelo de vehículo completo. Esto es importante ya que para estudios anteriores, así como en proyectos de los que se ha tomado referencia en el actual proyecto [2] y [3], el modelo de vehículo utilizado era el de cuarto o medio vehículo. Con la utilización del vehículo completo, se podrá simular de una forma más precisa el comportamiento real que tendría la suspensión semi-activa, debido principalmente a que, se podrán incluir efectos que anteriormente no existían en otros modelos, como pueda ser el caso del cabeceo y del balanceo de la carrocería.

Como se mencionó en el capítulo anterior de construcción del modelo mediante *ADAMS*, se procederá a la simulación del vehículo y además, se generarán las condiciones de la calzada de una manera más sencilla. Se conseguirá, por tanto, ajustar en mayor medida a la realidad que en modelos anteriores, en los que se utilizaba el propio *MATLAB* para crear dichas condiciones y el vehículo, lo cual, no dejaba de ser un planteamiento meramente matemático.

Una vez creado el vehículo, los datos son exportados a *MATLAB* para proceder a la optimización del sistema de suspensión semi-activa mediante el módulo *Simulink*.

El proceso de creación del vehículo, exportación de datos y construcción del sistema de control mediante lógica borrosa en *Simulink* fue planteado en el capítulo anterior *Creación del modelo y pasos para la simulación*. En el presente capítulo, se describe la lógica borrosa implementada en los distintos modelos de controladores estudiados y los resultados que se obtienen a partir de ellos.

## 5.1 Introducción a la simulación

El principal objetivo de la simulación es encontrar un modelo de lógica controladora de suspensión semi-activa que mejore los valores de confort que se obtienen con una suspensión pasiva. Para llevar a cabo dicha simulación, es necesario inicialmente lograr la conexión entre los programas *ADAMS* y *MATLAB*, para una posterior mejora de los valores obtenidos por la suspensión del tipo semi-activo.

Para conseguirlo, el primer paso es añadir un actuador que trabaje de forma paralela al sistema pasivo de suspensión, tal y como se puede ver en la *Figura 5.1. Modelo de suspensión semi-activa*.

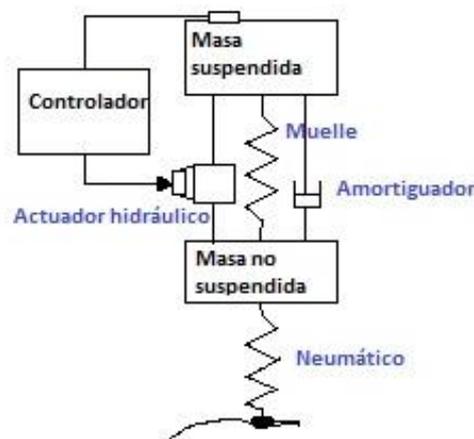


Figura 5. 1 Modelo de suspensión semi-activa

El controlador del sistema consta básicamente de dos entradas que le sirven para la 'toma de decisiones', procedentes de sensores repartidos por el vehículo. Dichas entradas son en este caso, la aceleración vertical de cada parte del vehículo (se divide el vehículo en cuatro zonas, a saber, delantera derecha e izquierda y trasera derecha e izquierda, tomándose como lugar de medición el punto inmediatamente superior a la cabeza de cada amortiguador, en el cual se unen amortiguador y chasis) así como el desplazamiento relativo de la suspensión, tomado en el mismo punto que la aceleración vertical.

Dichas medidas son objeto de estudio, debiendo intentar minimizarlas, ya que, mediante una disminución del desplazamiento de la suspensión, se consigue un

sistema de suspensión más compacto (los componentes ocuparán menos espacio dentro del vehículo, consiguiendo aumentar la capacidad interior del habitáculo) y un mayor control del vehículo, y mediante una disminución de las aceleraciones verticales, se aumenta el confort de los ocupantes. Sin embargo, y como más adelante se advertirá, la disminución de ambas variables al mismo tiempo es sumamente complicado, confort y seguridad son términos contrapuestos en las suspensiones. Inicialmente, se propone estudiar la suspensión para conseguir aumentar la comodidad de los ocupantes, ya que, al tratarse de un vehículo de altas prestaciones, se presupone que la suspensión pasiva con la que cuenta el vehículo antes del proyecto, cumple con el propósito de gobernar el vehículo en la mayoría de las ocasiones.

El confort en un vehículo es una medida demasiado subjetiva, por lo que para el estudio, se utiliza como medida de decisión las vibraciones que puedan llegar a los ocupantes del vehículo.

Son diversos los estudios existentes sobre la capacidad humana para resistir las vibraciones a las cuales se pueda encontrar sometido el cuerpo [55], tal y como puede observarse en la *Tabla 5.1. Efectos debidos a exposiciones a vibraciones mecánicas sobre el cuerpo humano*. Sin embargo, son las frecuencias cercanas a 1 Hz las más sensibles por parte del cuerpo, por tanto, son esos valores de vibración los que se deben intentar minimizar.

Tabla 5. 1 Efectos debidos a exposiciones a vibraciones mecánicas sobre el cuerpo humano

Evaluación de los efectos debidos a la exposición a vibraciones	Valores de $a$ (según ISO 2631-1:1997)
Confort (0,5 a 80 Hz)	$a < 0,315 \text{ m/s}^2$ no molesto $0,315 < a < 0,63 \text{ m/s}^2$ ligeramente molesto $0,5 < a < 1 \text{ m/s}^2$ bastante molesto $0,8 < a < 1,6 \text{ m/s}^2$ molesto $1,25 < a < 2,5 \text{ m/s}^2$ muy molesto $a > 2,5 \text{ m/s}^2$ extremadamente molesto
Percepción (0,5 a 80 Hz)	$0,015 \text{ m/s}^2$ $(0,01 - 0,02) \text{ m/s}^2$
Mareo producido por el movimiento (0,1 a 0,5 Hz)	0,5 m/s

Para el control del confort en el vehículo no basta con el estudio de los resultados obtenidos de aceleración vertical en función del tiempo de los modelos de lógica de suspensión semi-activa y su comparación con los valores obtenidos a partir de la suspensión pasiva. Se debe estudiar además otras dos medidas indirectas para la comparación del confort del vehículo, a saber, el valor eficaz de la aceleración (*RMS*, las siglas en inglés de "Root Mean Square") y el *PSD* (*Power Spectral Density*):

- *RMS* : es una medida del valor eficaz de la aceleración. Con su aplicación se está calculando la raíz cuadrada del valor cuadrático medio de la aceleración [55]. Lo que se pretende es, hallar un valor de aceleración constante, equivalente a los valores de aceleración alterna obtenidos a lo largo de la simulación. Se debe intentar disminuir dicho valor, sin embargo, se trata de una medida un tanto ambigua en el estudio del confort ya que, mide valores absolutos de aceleración y aunque se consiga reducir el valor, se debe tener de igual modo en cuenta la repetitividad y frecuencia de la aceleración.
- *PSD* : es una medida altamente útil en el análisis de frecuencias de señales ya que permite la representación de la energía asociada a cada nivel de frecuencia para la señal de aceleración [55]. Con este método, si se puede comparar realmente la suspensión pasiva con los modelos desarrollados de suspensiones semi-activas, ya que, se puede observar si la energía generada por la aceleración vertical a bajas frecuencias disminuye o no.

Mencionar ya como finalización de la introducción, que los modelos de suspensión semi-activa son desarrollados a partir de modelos anteriores ya existentes [2], [3] y [4], y optimizados mediante el ensayo de prueba y error.

A continuación, se muestran los resultados de los distintos sistemas. Primero se dan los correspondientes a los del vehículo con suspensión pasiva y posteriormente se procede a su comparación con los obtenidos a partir de los modelos de lógica semi-activos. Recordar igualmente que, en este capítulo, se trabaja únicamente en el entorno *Simulink* de *MATLAB*, ya que el modelo fue creado con anterioridad.

## 5.2 Resultados suspensión pasiva

Los resultados obtenidos tanto de aceleración vertical como de desplazamiento relativo de la suspensión al realizar la simulación se muestran en las *Figura 5.2. Aceleración vertical en la suspensión pasiva* y *Figura 5.3. Desplazamiento relativo de la suspensión en la suspensión pasiva*.

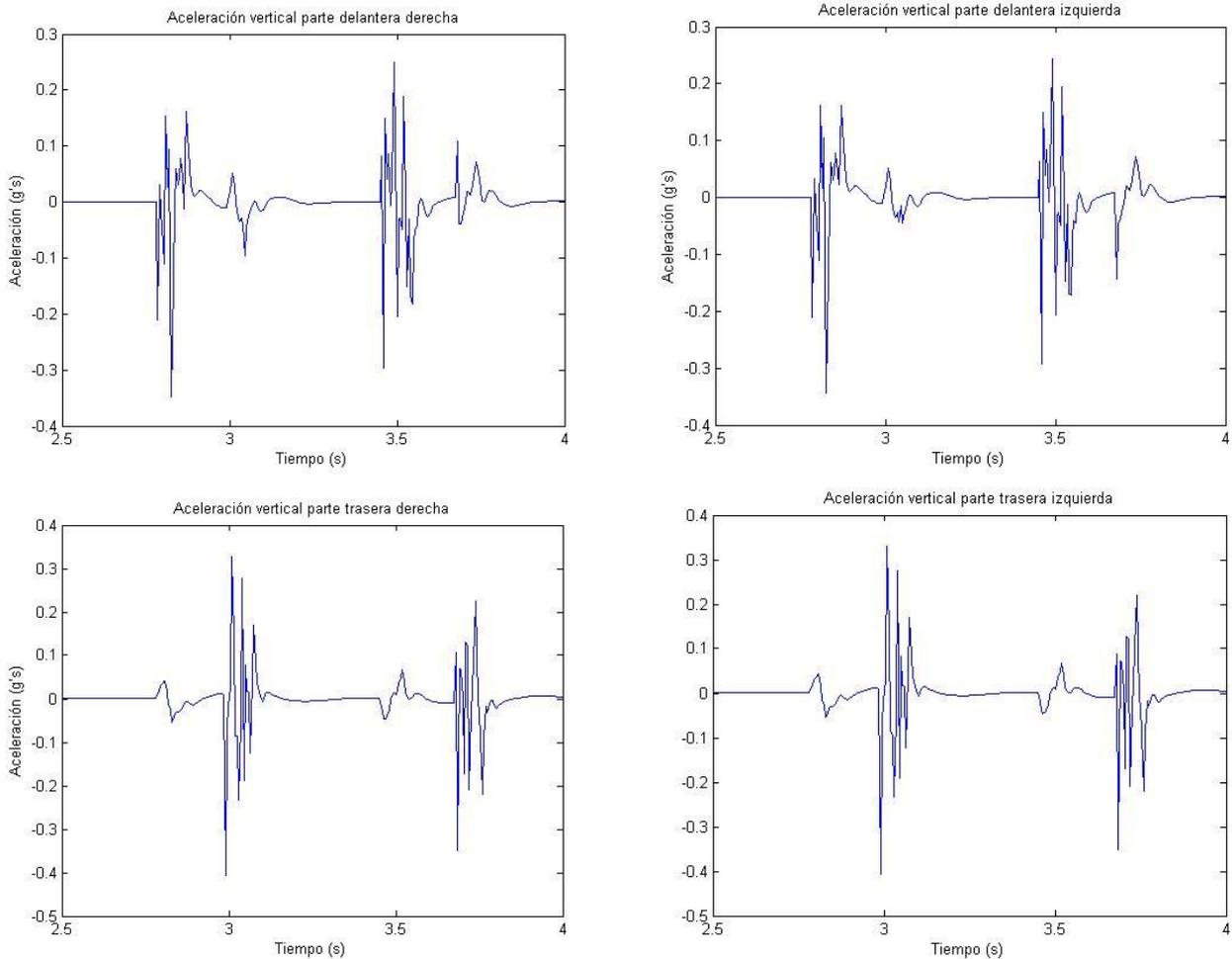


Figura 5. 2 Aceleración vertical en la suspensión pasiva

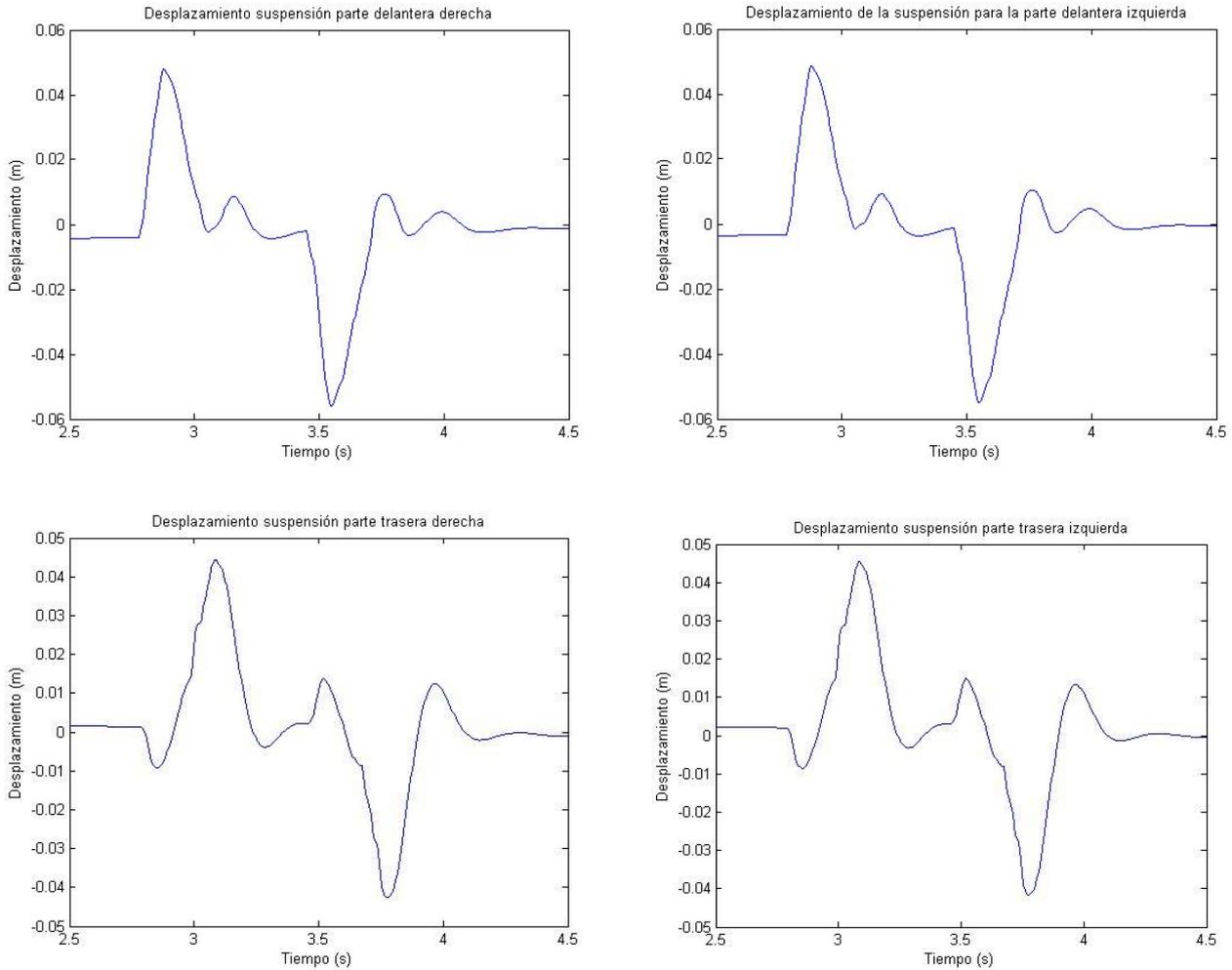


Figura 5. 3 Desplazamiento relativo de la suspensión en la suspensión pasiva

A raíz de estos resultados, se puede observar que al haber utilizado como elementos de excitación en la carretera un bache y un badén simétricos, no existen prácticamente diferencias en los resultados obtenidos en lo que se refiere al lado derecho e izquierdo del vehículo, por lo que, para simplificar resultados, se va a representar de aquí en adelante únicamente uno de los lados, el otro tendrá igual valor. Recordar que, si la excitación no fuese simétrica, sí que habría que tener en cuenta ambos lados del vehículo, ya que existiría, por ejemplo, balanceo, que haría que los valores cambiasen.

Además, se observa que las suspensiones delantera y trasera presentan distintas características ya que, los resultados varían de una a otra. Al tratarse de un vehículo de propulsión y motor trasero, los desarrolladores optaron por una configuración más rígida en la parte posterior debido principalmente al peso y tracción, ya que, según se puede observar en las *Figura 5.2. Aceleración vertical en*

la suspensión pasiva y la Figura 5.3. Desplazamiento relativo de la suspensión en la suspensión pasiva, la aceleración tiende a estabilizarse de una forma más rápida en la suspensión trasera y los desplazamientos de la suspensión son menores.

Como se mencionó en la introducción del presente capítulo, además de los valores de aceleración y de desplazamiento de la suspensión, también se deben hallar los valores de *RMS* y *PSD*.

Para la suspensión pasiva, los valores *RMS* pueden observarse en la Tabla 5.2 Valores *RMS* para la suspensión pasiva.

Tabla 5. 2 Valores *RMS* para la suspensión pasiva

Parte	<i>RMS</i> (g's)
Delantera derecha	0.0258
Trasera derecha	0.0288

Igualmente el *PSD* que se obtiene puede observarse en la Figura 5.4. *PSD* de la aceleración de la suspensión pasiva.

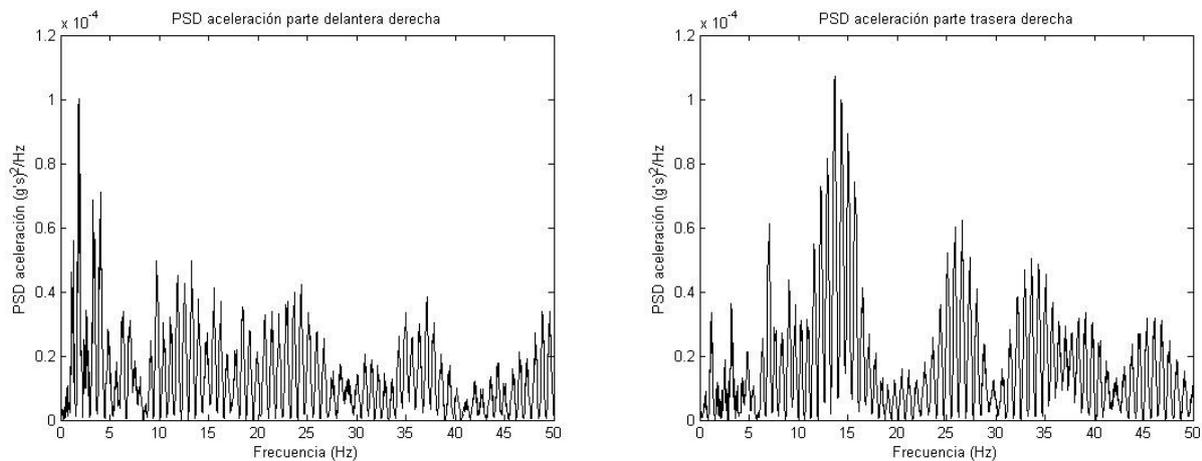


Figura 5. 4 PSD de la aceleración de la suspensión pasiva

Como se aprecia, nuevamente existen diferencias entre la parte delantera y trasera del vehículo. La parte delantera cuenta con menos peso que la trasera y, debido a la cercanía de los pasajeros, debería ser más confortable. Sin embargo, se observa que a bajas frecuencias las vibraciones transmitidas son mayores que en el caso de la parte trasera.

### 5.3. Resultados suspensión semi-activa

Una vez obtenidos los resultados de aceleración vertical, desplazamiento de la suspensión y valores *RMS* y *PSD* del vehículo con suspensión tradicional, se pasa al estudio de la suspensión semi-activa.

Para convertir la suspensión pasiva en suspensión semi-activa, se añaden una serie de actuadores hidráulicos al sistema, además de sus correspondientes controladores. En este caso se recurre a controladores del tipo *Lógica Fuzzy*.

Como se indicó en la introducción del presente capítulo, se estudian diversos modelos de controladores basados en *Lógica Fuzzy* de suspensiones semi-activas para intentar encontrar el modelo que mejore los resultados de la suspensión pasiva, es decir, conseguir que se disminuyan principalmente los valores de aceleración vertical y por consiguiente los valores *PSD* y *RMS*, aumentando el confort.

Todos los modelos, en concreto seis, comparten la arquitectura *Simulink* de suspensión semi-activa que se mostró en el Capítulo 4, la diferencia entre ellos estriba básicamente, en el planteamiento de la *Lógica Fuzzy*, es decir, en sus reglas, valores e incluso funciones de pertenencia.

En lo relativo al desarrollo de la *Lógica Fuzzy*, se tomó como punto de partida trabajos anteriores de naturaleza similar [2], [3] y [4], evolucionando de manera que se buscó un modelo óptimo. Dicha evolución, vino dada por el método de prueba y error.

Todos los modelos comparten estructura de *Lógica Fuzzy*, por ello, a continuación se menciona su desarrollo general y más tarde, en cada apartado, se desarrollan sus características diferenciadoras.

Tal y como se explicó en el *Capítulo 3* de *Lógica Fuzzy*, para su desarrollo, se necesitan definir las entradas al sistema, en este caso 2, la salida, en este caso 1, una serie de reglas de actuación y un motor de inferencia o desborrosificación.

Debido a que se toman valores concretos en la salida del sistema y a la simplicidad de los modelos, se usa el método de desborrosificación por centro de gravedad. De igual modo se usa el método *Mamdani* como base de reglas ya que, su uso permite la utilización de reglas de inferencia de mayor facilidad. Debido a que se tienen dos entradas al controlador, a saber, la aceleración vertical del vehículo

y el desplazamiento relativo de la suspensión, y que cada una de ellas cuenta con cinco posibles conjuntos borrosos de pertenencia (NM, NS, Z, PS, PM), hace que exista un total de  $5^2$  reglas. Dichas reglas, que pueden variar de un modelo a otro, cuentan con la nomenclatura de la *Tabla 5.3. Nomenclatura de las particiones borrosas* y que se corresponden con las denominaciones que se usan comúnmente en los sistema borrosos.

Tabla 5. 3 Nomenclatura de las particiones borrosas

Etiqueta	Nomenclatura
NVB	Negative Very Big
NB	Negative Big
NM	Negative Medium
NS	Negative Small
Z	Zero
PS	Positive Small
PM	Positive Medium
PB	Positive Big
PVB	Positive Very Big

A continuación, se presentan las características y resultados obtenidos para cada uno de los modelos de lógica estudiados.

### 5.3.1 Modelo de suspensión semi-activa 1

Para este primer modelo, se tomó como referencia trabajos realizados con anterioridad [2], [3] y [4]. Así, para los valores de entrada al controlador borroso, se dividió cada entrada en cinco conjuntos.

Para los valores de aceleración vertical, se tomó como referencia los datos de aceleración obtenidos para la suspensión pasiva. De este modo, se usó un rango de trabajo entre los -0.4 y los 0.4 g's. Es un intervalo pequeño, sin embargo, aceleraciones verticales mayores a este orden serían percibidas en exceso por los ocupantes y se estaría por tanto, disminuyendo el confort. En este caso, se divide la entrada en cinco conjuntos borrosos, con funciones de pertenencia del tipo triangular para los conjuntos centrales, de este modo, se consigue que para aceleraciones dentro de dicho intervalo, la respuesta sea más lineal. Por el contrario los conjuntos extremos, tienen función de pertenencia trapezoidal para

responder con mayor contundencia. Puede verse el esquema en la *Figura 5.5. Conjuntos borrosos para la entrada de aceleración al sistema Fuzzy del modelo 1.*

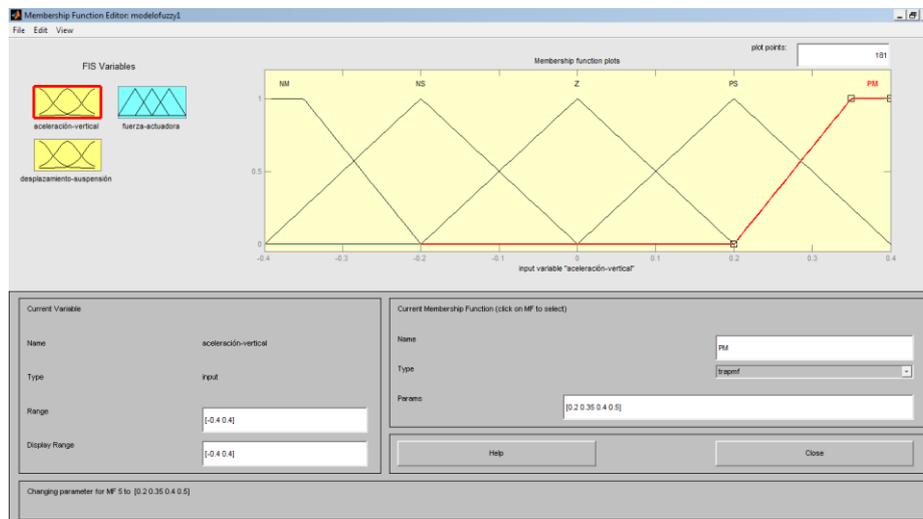


Figura 5.5 Conjuntos borrosos para la entrada de aceleración al sistema Fuzzy del modelo1

En el caso de la entrada del desplazamiento relativo de la suspensión, se actuó de manera similar. Se dividieron los conjuntos borrosos en cinco, con funciones de pertenencia del tipo triangular para los conjuntos centrales, con un rango comprendido entre los -0.1 y 0.1 m, debido igualmente a los datos obtenidos para la suspensión pasiva. Los conjuntos extremos fueron nuevamente trapezoidales. Además, se le añadió un pequeño margen para que los muelles no entrasen en bloque. El esquema de esta entrada puede observarse en la *Figura 5.6. Conjuntos borrosos para la entrada de desplazamiento relativo al sistema Fuzzy del modelo 1.*

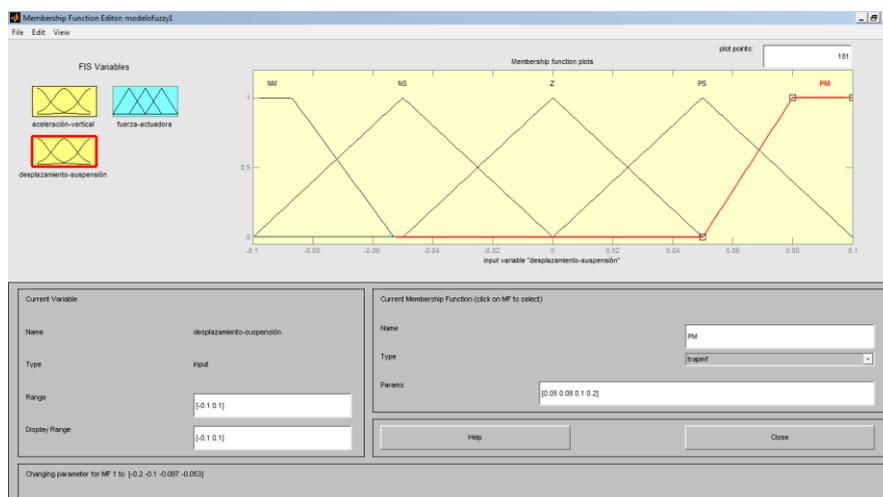


Figura 5.6 Conjuntos borrosos para la entrada de desplazamiento relativo al sistema Fuzzy del modelo 1

En lo referente a la fuerza actuadora, se recurrió a dividir el rango en nueve conjuntos borrosos (mostrados en la Tabla 5.3), de este modo, se consiguió que el sistema actuara de manera distinta ante un mayor número de situaciones. En este caso, se usan funciones de pertenencia de tipo trapezoidal para los extremos y triangulares para los restantes, con ello, se consigue que se actúe de distinta manera ante situaciones extremas, en las que se precisan respuestas más contundentes, de las secciones centrales, con respuestas más suaves. En el rango de actuación de la fuerza, se optó por el funcionamiento entre los -3150 y los 3150 N, debido principalmente a que para valores inferiores y superiores el sistema *ADAMS* producía errores de simulación. Se puede ver un esquema en la *Figura 5.7. Conjuntos borrosos para la salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 1.*

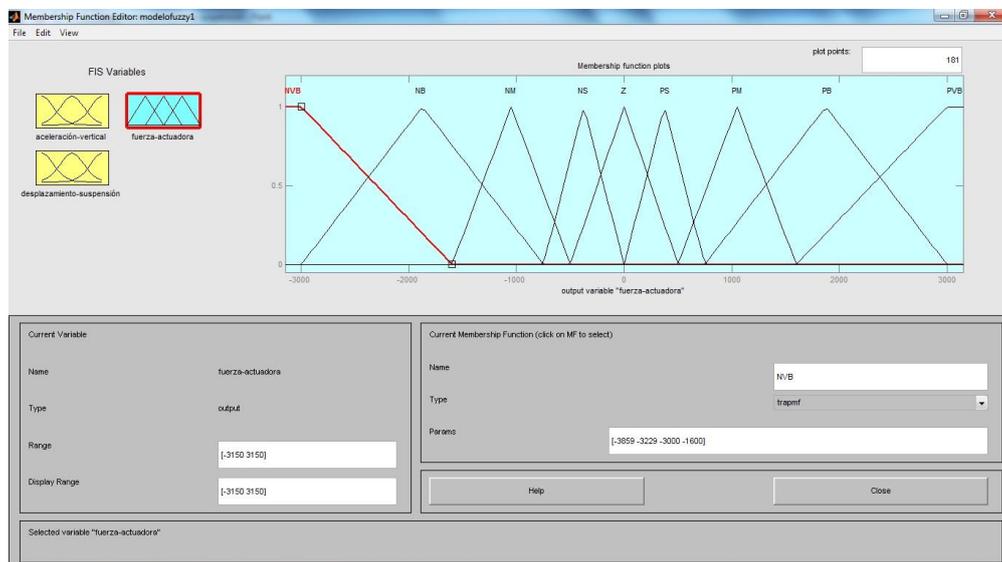


Figura 5. 7 Conjuntos borrosos para la salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 1

Una vez definidas las entradas y salidas del sistema *Fuzzy*, queda por último definir las reglas que se utilizan para controlar el sistema y que se muestran en la *Tabla 5.4. Reglas de actuación del modelo 1.*

Con todo, el controlador de *Lógica Fuzzy* se encuentra definido, pudiéndose realizar ya la simulación. Para una posterior mejor apreciación, se representan las gráficas superpuestas de los valores obtenidos para las suspensiones pasiva y semi-activa.

Tabla 5. 4 Reglas de actuación del modelo 1

	<b>Aceleración</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Fuerza actuadora</b>
<b>1</b>	Z	PM	NS
<b>2</b>	Z	PS	Z
<b>3</b>	Z	Z	Z
<b>4</b>	Z	NS	Z
<b>5</b>	Z	NM	PS
<b>6</b>	NM	PM	NM
<b>7</b>	NM	PS	NS
<b>8</b>	NM	Z	Z
<b>9</b>	NM	NS	Z
<b>10</b>	NM	NM	PS
<b>11</b>	PM	PM	NS
<b>12</b>	PM	PS	Z
<b>13</b>	PM	Z	Z
<b>14</b>	PM	NS	PS
<b>15</b>	PM	NM	PM
<b>16</b>	PS	PM	NS
<b>17</b>	PS	PS	Z
<b>18</b>	PS	Z	Z
<b>19</b>	PS	NS	PS
<b>20</b>	PS	NM	PS
<b>21</b>	NS	PM	NS
<b>22</b>	NS	PS	NS
<b>23</b>	NS	Z	Z
<b>24</b>	NS	NS	Z
<b>25</b>	NS	NM	PS

En las *Figura 5.8. Comparación de la aceleración vertical del modelo 1 y la suspensión pasiva* y la *Figura 5.9. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 1 y la suspensión pasiva* se muestra en una misma gráfica los valores obtenidos en cada tipo de suspensión con mayor detalle.

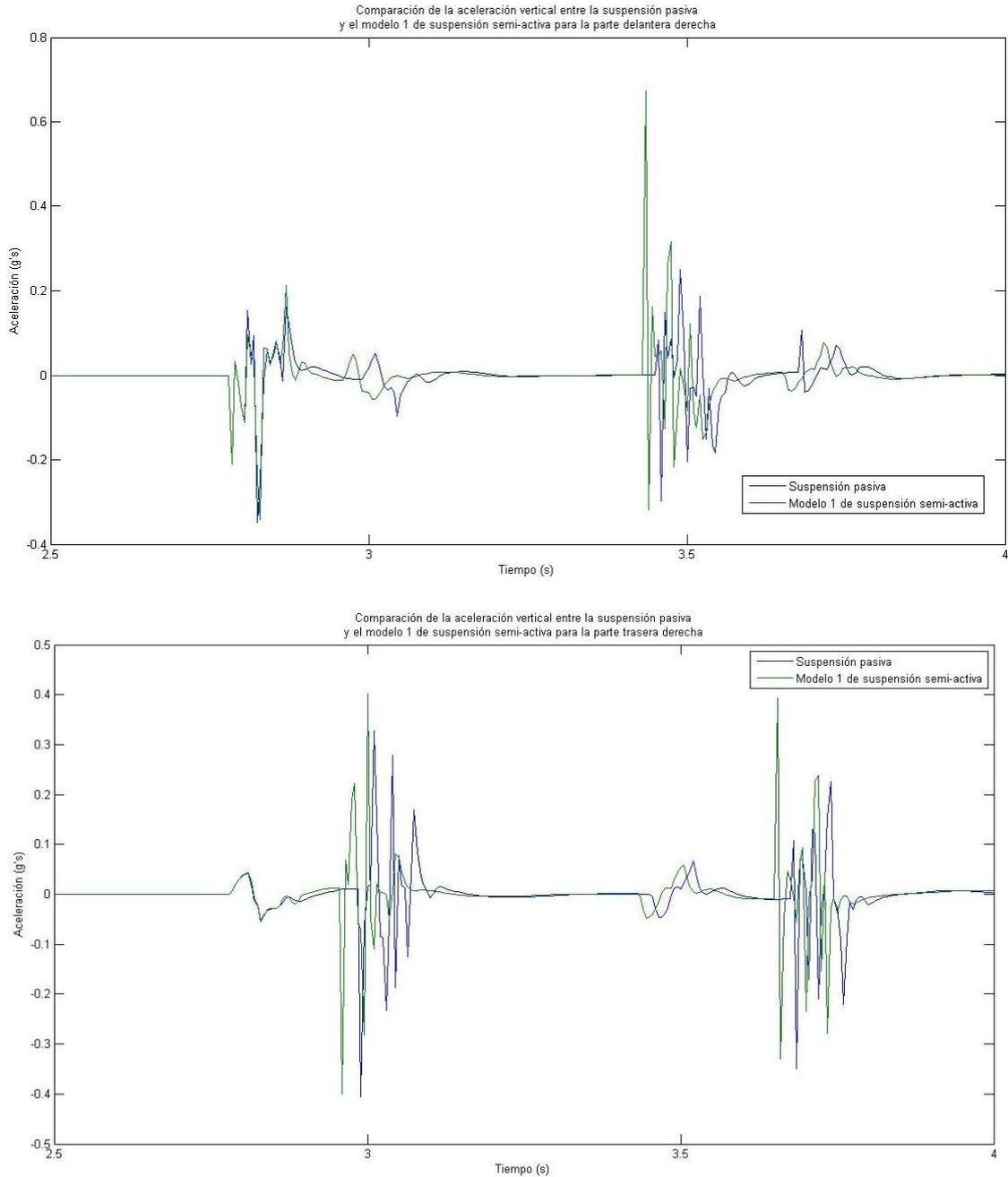


Figura 5. 8 Comparación de la aceleración vertical del modelo 1 y la suspensión pasiva

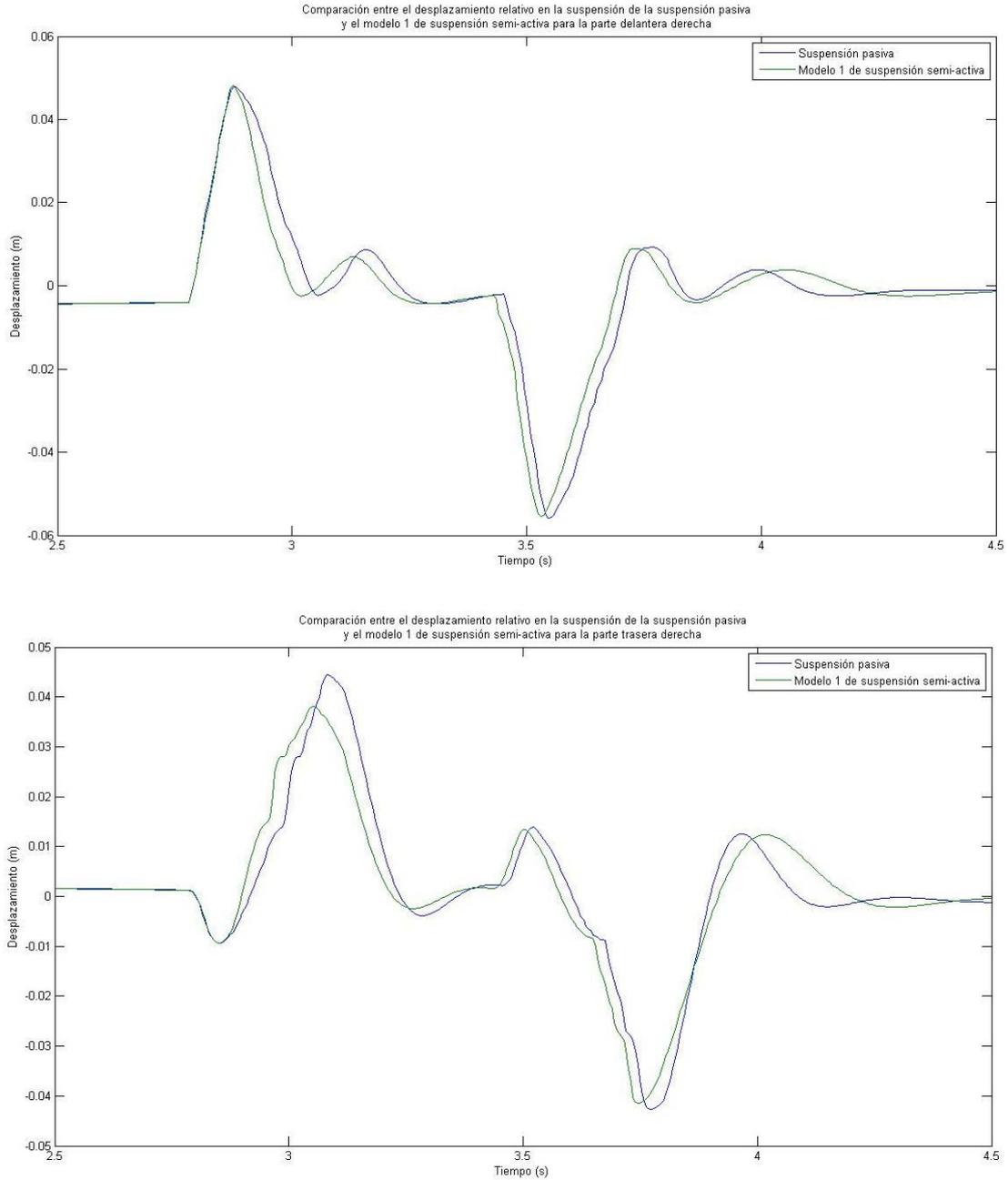


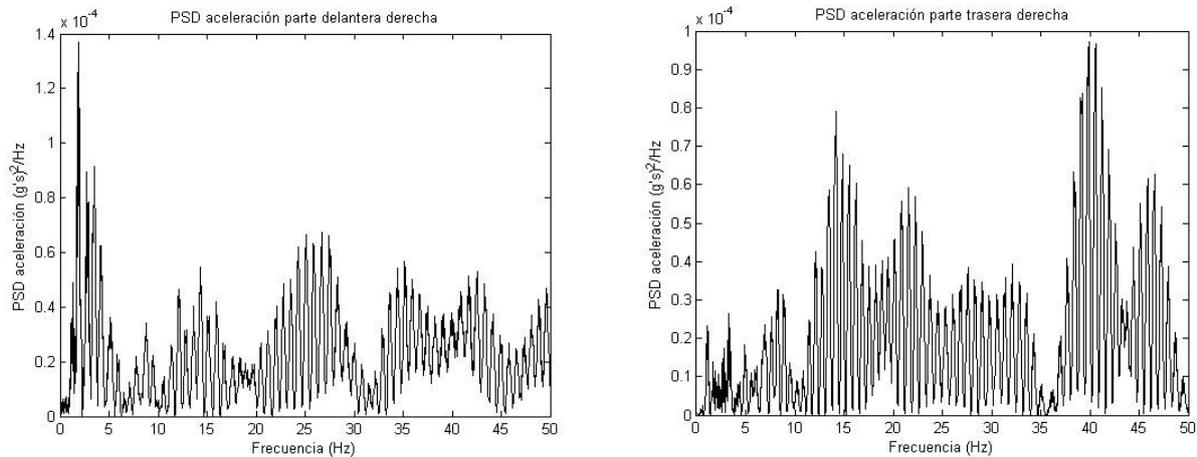
Figura 5. 9 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 1 y la suspensión pasiva

Además, en la *Tabla 5.5. RMS para el modelo 1 de suspensión semi-activa* se muestran los valores de *RMS* del modelo pasivo y el semi-activo.

Tabla 5. 5 RMS para el modelo 1 de suspensión semi-activa

<i>Parte</i>	<i>RMS (g's) PASIVA</i>	<i>RMS (g's) SEMI-ACTIVA</i>
<i>Delantera derecha</i>	0.0258	0.0331
<i>Trasera derecha</i>	0.0288	0.0308

En la *Figura 5.10. PSD para el modelo 1 de suspensión semi-activa*, se muestran los resultados obtenidos para el *PSD* de la aceleración.



**Figura 5. 10 PSD para el modelo 1 de suspensión semi-activa**

A partir de la *Figura 5.8. Comparación de la aceleración vertical del modelo 1 y la suspensión pasiva*, se pueden obtener diversas conclusiones. En primer lugar, se observa que para ambas partes, tanto delantera como trasera, los valores pico de aceleración vertical se ven aumentados en cuanto a magnitud, sin embargo, también se observa que la estabilización de dichas partes se produce antes con la suspensión semi-activa que con la suspensión pasiva. También se puede apreciar que durante el paso del bache o el badén, la parte distinta a la estudiada, es decir, si por ejemplo se está estudiando la parte delantera, y la que pasa el bache es la trasera, el sistema de suspensión semi-activa consigue reducir de manera significativa las aceleraciones con respecto a las que sufriría el sistema de suspensión pasiva.

En cuanto a la *Figura 5.9. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 1 y la suspensión pasiva*, se encuentran diferencias entre la parte delantera y trasera del vehículo. Mientras que para la parte delantera, la reducción del desplazamiento de la suspensión resulta prácticamente insignificante, para la parte trasera esta disminución se muestra algo más apreciable. De igual forma, en ambos casos la estabilización es más rápida y suave.

Como se observa, estas gráficas no ayudan en exceso a comprobar si el sistema de suspensión semi-activa ha mejorado o no el confort del vehículo, para comprobarlo se recurre a los parámetros de *RMS* y *PSD*. De los resultados, se observa en la *Tabla 5.5. RMS para el modelo 1 de suspensión semi-activa* que el *RMS* ha aumentado tanto para la

parte delantera como para la trasera, por lo que si se atiende a este valor, se obtiene que la comodidad de los ocupantes se ve disminuida.

En cuanto a la *Figura 5.10. PSD para el modelo 1 de suspensión semi-activa*, se puede advertir que las vibraciones transmitidas al interior en el entorno de 1 Hz se ven aumentadas para el caso de la parte delantera, no obstante, se observa igualmente una disminución de las mismas en el entorno de los 5 a 15 Hz. Sin embargo, en el caso de la suspensión trasera, si que el *PSD* se ve disminuido en la zona cercana a 1 Hz, mejorandose por tanto el confort, aunque a mayores frecuencias las vibraciones transmitidas al interior si son superiores.

Por tanto, se puede concluir que el modelo 1 no mejora significativamente el confort con respecto a la suspensión pasiva, ya que las aceleraciones verticales se ven aumentadas y el desplazamiento de la suspensión no se reduce en un alto grado. Mediante este modelo de suspensión semi-activa se podría aumentar la rigidez del conjunto, mejorando el comportamiento del vehículo mediante el aumento del gobierno del mismo, pero a costa de sacrificar la comodidad de los ocupantes debido principalmente a que estos, al ir situados más cerca de la parte delantera, sufrirán más a frecuencias cercanas a 1 Hz.

### 5.3.2. Modelo de suspensión semi-activa 2

El segundo modelo de suspensión semi-activa mantiene prácticamente todas las características del primer modelo, lo único que se varía, son las reglas de actuación de la *Lógica Fuzzy*, las cuales pueden observarse en la *Tabla 5.6. Reglas de actuación del modelo 2*. Como ya se mencionó en el primer modelo, la base de reglas se tomaba de proyectos de naturaleza similar, sin embargo, en este caso se procede a variar dichas reglas con un funcionamiento distinto y más intuitivo.

Tabla 5. 6 Reglas de actuación del modelo 2

	<b>Aceleración</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Fuerza actuadora</b>
<b>1</b>	Z	PM	NS
<b>2</b>	Z	PS	NS
<b>3</b>	Z	Z	Z
<b>4</b>	Z	NS	PS
<b>5</b>	Z	NM	PS
<b>6</b>	NM	PM	NS
<b>7</b>	NM	PS	NS
<b>8</b>	NM	Z	PS
<b>9</b>	NM	NS	PS
<b>10</b>	NM	NM	PM
<b>11</b>	PM	PM	NM
<b>12</b>	PM	PS	NM
<b>13</b>	PM	Z	NS
<b>14</b>	PM	NS	PS
<b>15</b>	PM	NM	PS
<b>16</b>	PS	PM	NM
<b>17</b>	PS	PS	NS
<b>18</b>	PS	Z	NS
<b>19</b>	PS	NS	PS
<b>20</b>	PS	NM	PM
<b>21</b>	NS	PM	NS
<b>22</b>	NS	PS	NS
<b>23</b>	NS	Z	NS
<b>24</b>	NS	NS	PS
<b>25</b>	NS	NM	PM

Al igual que se hizo con el modelo 1, se representan con mayor detalle los resultados obtenidos comparándolos con los de la suspensión pasiva en las *Figura 5.11. Comparación de la aceleración vertical del modelo 2 y la suspensión pasiva* y la *Figura 5.12. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 2 y la suspensión pasiva*.

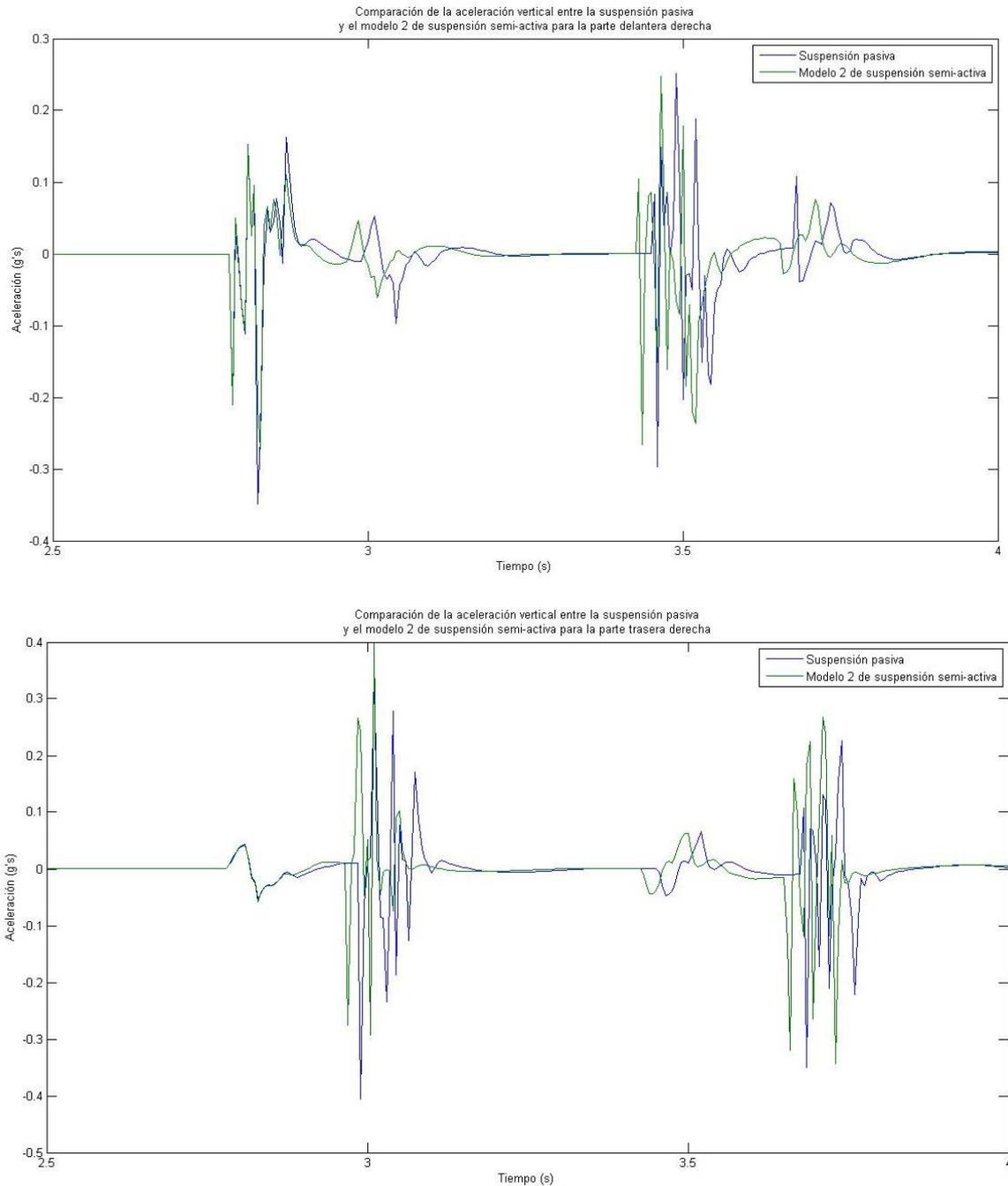


Figura 5. 11 Comparación de la aceleración vertical del modelo 2 y la suspensión pasiva

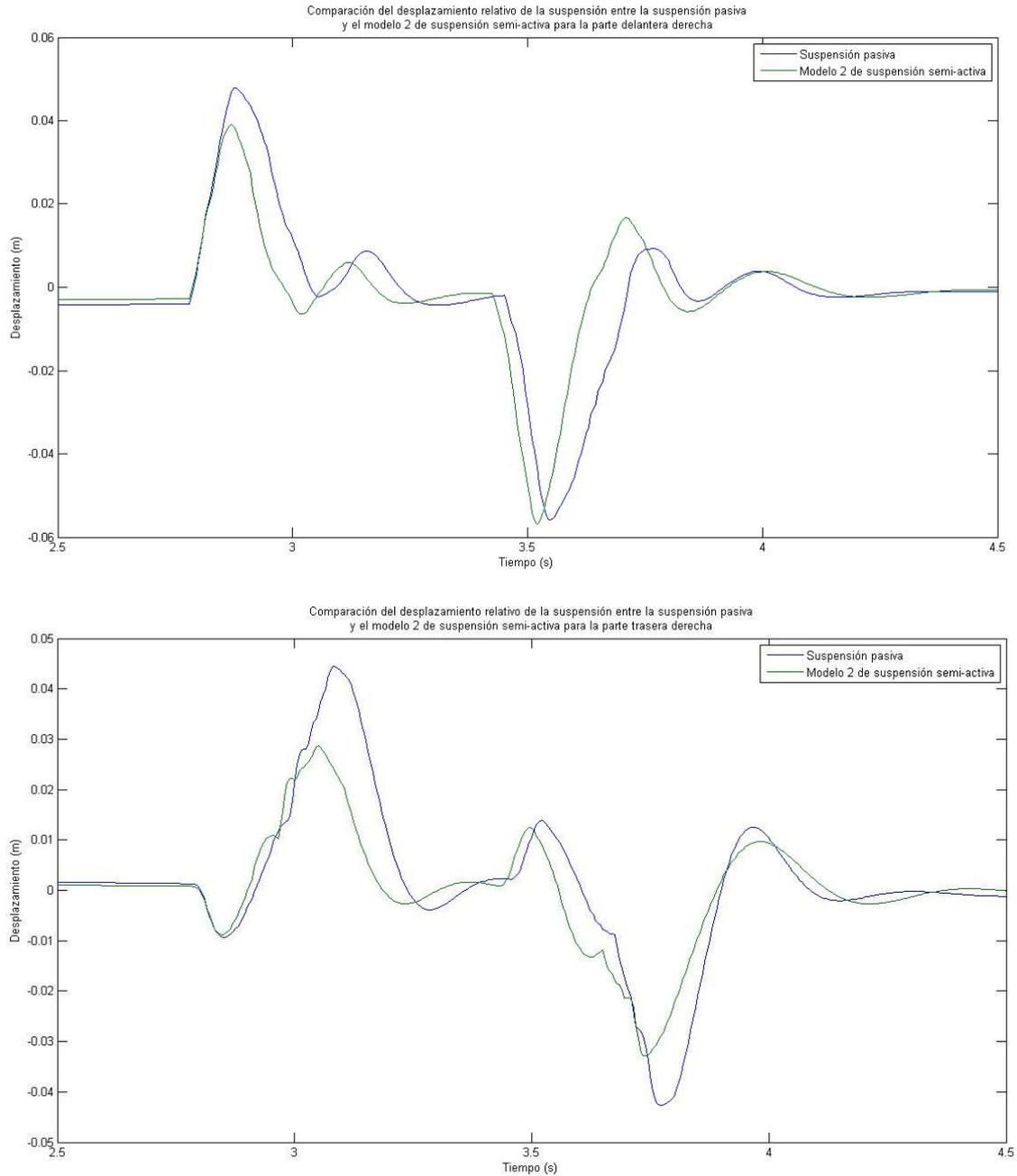


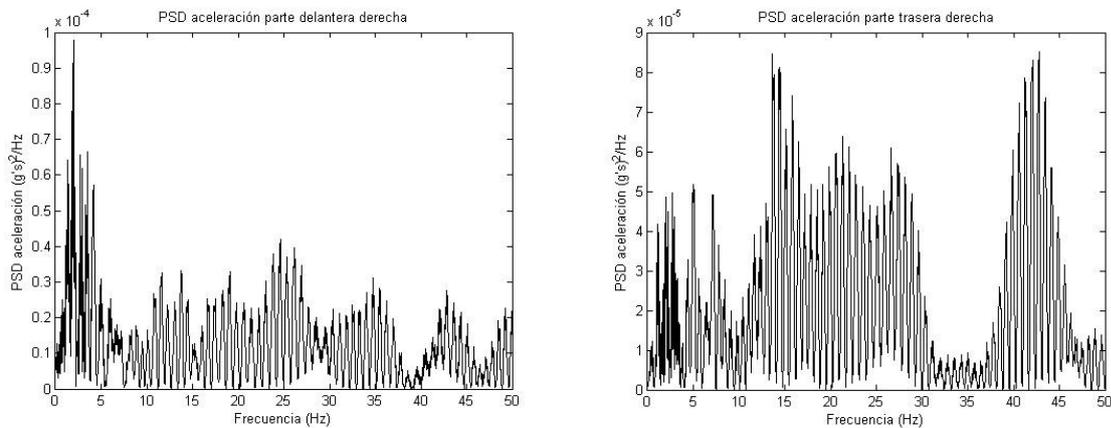
Figura 5. 12 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 2 y la suspensión pasiva

Se obtiene igualmente el *RMS* que se muestra en la *Tabla 5.7. RMS para el modelo 2 de suspensión semi-activa.*

Tabla 5. 7 *RMS* para el modelo 2 de suspensión semi-activa

<i>Parte</i>	<i>RMS (g's) PASIVA</i>	<i>RMS (g's) SEMI-ACTIVA</i>
<i>Delantera derecha</i>	0.0258	0.0249
<i>Trasera derecha</i>	0.0288	0.0313

En la *Figura 5.13. PSD para el modelo 2 de suspensión semi-activa* se muestra el *PSD* de la aceleración para el segundo caso.



**Figura 5. 13 PSD para el modelo 2 de suspensión semi-activa**

Si se observa la *Figura 5.11. Comparación de la aceleración vertical del modelo 2 y la suspensión pasiva*, se pueden obtener diversas conclusiones. Para el caso de la parte delantera del vehículo, los valores de aceleración se ven reducidos con respecto a la suspensión pasiva, sobretodo en cuanto se refiere a las acciones externas, es decir, cuando se produce sobre la suspensión una excitación. De igual modo, la estabilización del sistema se produce también de una manera más rápida con respecto a la pasiva, aunque en menor medida a la ocurrida para el modelo 1 estudiado anteriormente. Asimismo, se observa, que para la parte trasera del vehículo, los valores de aceleración no se ven disminuidos y su funcionamiento es muy similar al del modelo 1.

Si ahora se observa la *Figura 5.12. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 2 y la suspensión pasiva*, se puede concluir que para el caso de la parte delantera del vehículo, durante el traspaso del bache, es decir, cuando se produce la extensión de la suspensión, si se observa una disminución de los valores con respecto a la suspensión pasiva. Sin embargo, durante el paso del badén, el sistema no se muestra tan efectivo, no es capaz de responder tan rápidamente y evitar la compresión, además de producir mayores rebotes en el momento de la estabilización. Por otro lado, también se observa que para la parte trasera del vehículo, el sistema si es efectivo y se consigue disminuir de manera significativa el desplazamiento de la suspensión, disminuyendo igualmente los rebotes durante la estabilización tras el paso de la excitación.

De igual modo que anteriormente, se recurre a los valores *RMS* y *PSD* para estudiar el modelo con respecto al confort. Observando la *Tabla 5.7. RMS para el modelo 2 de suspensión semi-activa*, se obtienen distintos resultados, mientras que para la parte delantera del vehículo, el valor de *RMS* se ve reducido con respecto a la suspensión pasiva, en el caso de la parte trasera del vehículo no solo aumenta, sino que en mayor grado que en el caso del modelo 1. Atendiendo al *RMS*, y debido a que los ocupantes se encuentran en la parte delantera del vehículo, se podría decir que, en este caso, el confort si se ve aumentado.

En cuanto a la *Figura 5.13. PSD para el modelo 2 de suspensión semi-activa*, para la parte delantera del vehículo, en el entorno de 1 Hz, solo se observan disminuciones prácticamente inapreciables del *PSD*, siendo algo mayores en el rango de los 5-15 Hz con respecto a la suspensión del tipo pasivo. En cuanto a la parte trasera del vehículo, a bajas frecuencias, las vibraciones transmitidas al interior se ven aumentadas, sin embargo, el sistema si es capaz de disminuirlas a frecuencias mayores.

Por tanto, se puede concluir que el modelo 2 si sería válido para su uso en la parte delantera del vehículo, ya que con él, se consigue aumentar el confort, debido principalmente a que las aceleraciones verticales se verían disminuidas, al igual que el valor de *RMS*, y además, se disminuiría en cierto grado los desplazamientos relativos de la suspensión.

### 5.3.3. Modelo de suspensión semi-activa 3

Para seguir mejorando el sistema, en este modelo 3, se usan los valores más extremos de los conjuntos borrosos de la *Lógica Fuzzy*. Hasta ahora, en los dos anteriores modelos, no se han utilizados dichos valores extremos intentando que el funcionamiento de la suspensión fuese menos intrusivo, evitando así valores máximos y con ello, aumentar el confort. Por tanto, en este caso, se vuelve a utilizar toda la arquitectura de los dos casos anteriores, cambiando únicamente la base de reglas, la cual puede observarse en la *Tabla 5.8. Reglas de actuación del modelo 3*.

Tabla 5. 8 Reglas de actuación del modelo 3

	<b>Aceleración</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Fuerza actuadora</b>
<b>1</b>	Z	PM	NS
<b>2</b>	Z	PS	NS
<b>3</b>	Z	Z	Z
<b>4</b>	Z	NS	PS
<b>5</b>	Z	NM	PS
<b>6</b>	NM	PM	NM
<b>7</b>	NM	PS	NM
<b>8</b>	NM	Z	PS
<b>9</b>	NM	NS	PM
<b>10</b>	NM	NM	PVB
<b>11</b>	PM	PM	NVB
<b>12</b>	PM	PS	NB
<b>13</b>	PM	Z	NM
<b>14</b>	PM	NS	PM
<b>15</b>	PM	NM	PM
<b>16</b>	PS	PM	NM
<b>17</b>	PS	PS	NS
<b>18</b>	PS	Z	NS
<b>19</b>	PS	NS	PS
<b>20</b>	PS	NM	PM
<b>21</b>	NS	PM	NS
<b>22</b>	NS	PS	NS
<b>23</b>	NS	Z	NS
<b>24</b>	NS	NS	PS
<b>25</b>	NS	NM	PM

De nuevo, para una mejor comparación, se vuelve a representar en una misma gráfica los valores del modelo 3 con los obtenidos para la suspensión pasiva en las *Figura 5.14. Comparación de la aceleración vertical del modelo 3 y la suspensión pasiva* y la *Figura 5.15. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 3 y la suspensión pasiva*.

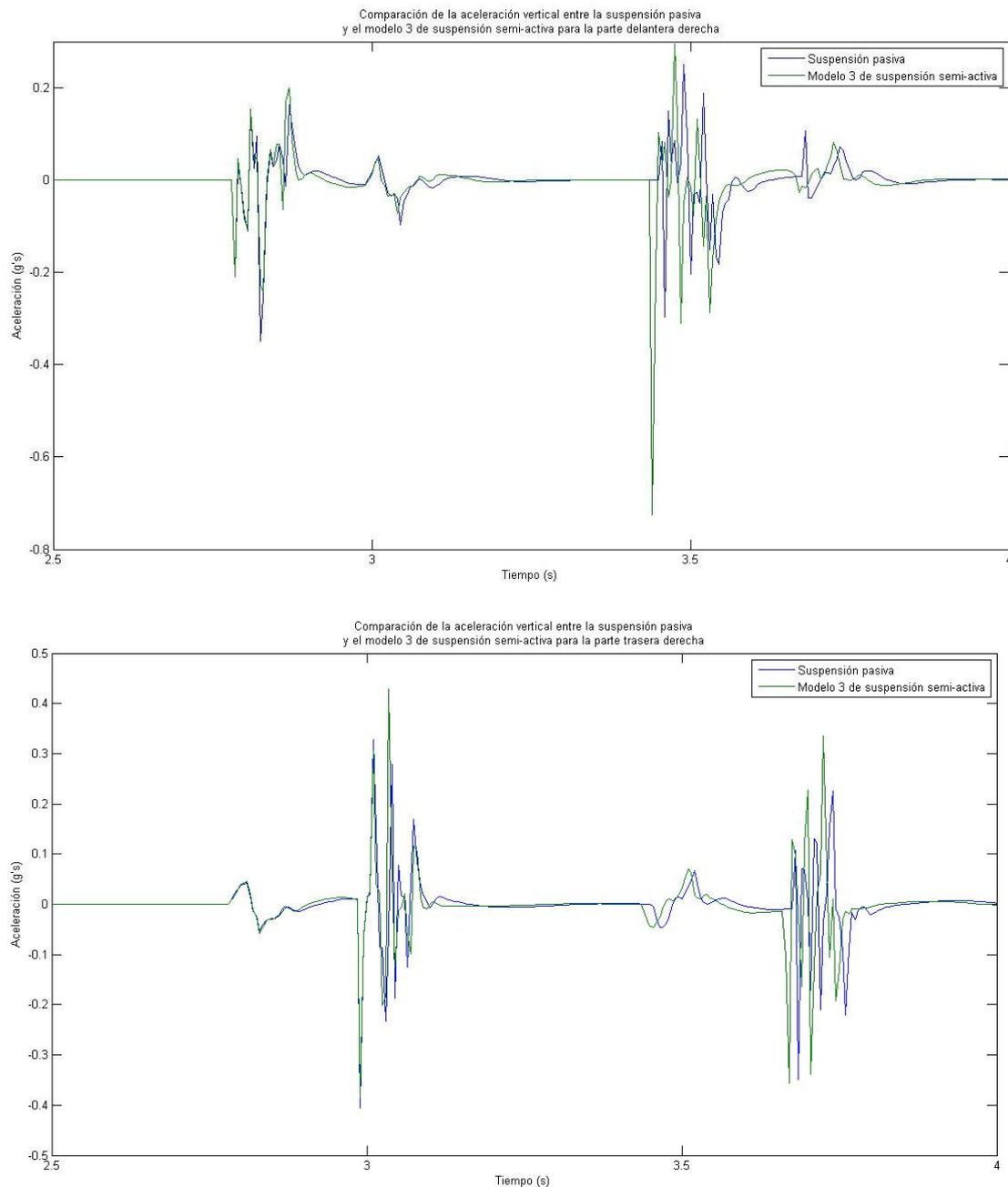


Figura 5. 14 Comparación de la aceleración vertical del modelo 3 y la suspensión pasiva

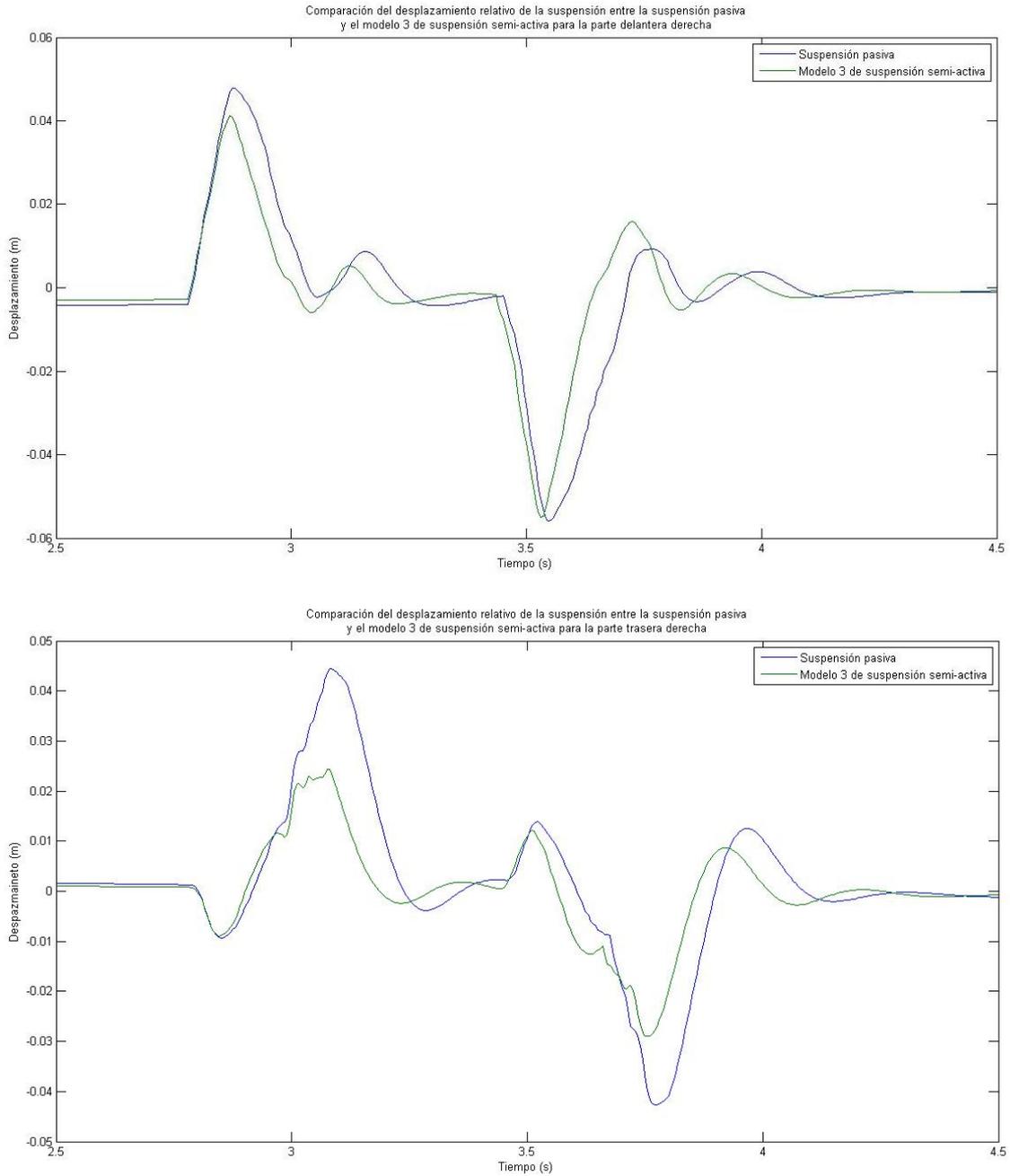


Figura 5. 15 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 3 y la suspensión pasiva

Se obtiene igualmente el *RMS* que se muestra en la *Tabla 5.9. RMS para el modelo 3 de suspensión semi-activa.*

Tabla 5. 9 *RMS* para el modelo 3 de suspensión semi-activa

<i>Parte</i>	<i>RMS (g's) PASIVA</i>	<i>RMS (g's) SEMI-ACTIVA</i>
<i>Delantera derecha</i>	0.0258	0.0333
<i>Trasera derecha</i>	0.0288	0.0318

Del mismo modo en la *Figura 5.16. PSD para el modelo 3 de suspensión semi-activa*, se muestra el PSD del tercer modelo.

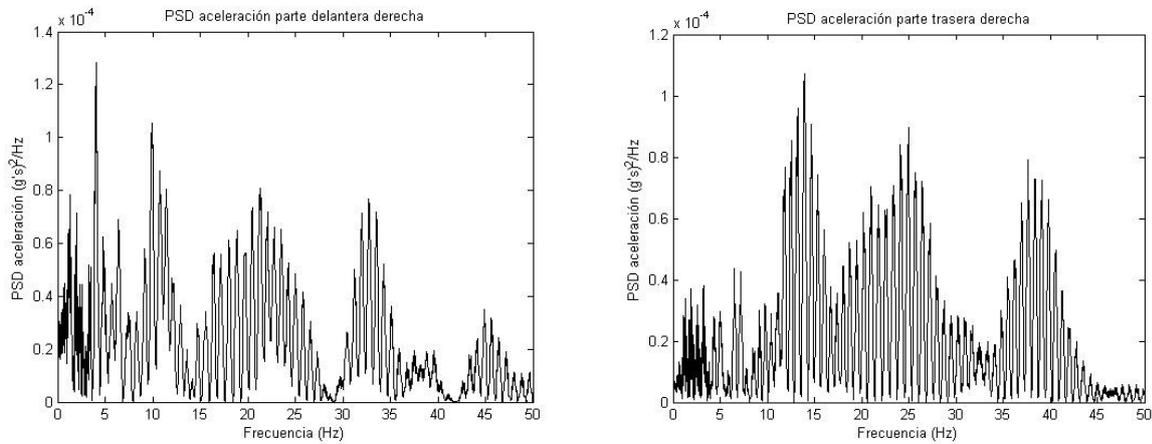


Figura 5. 16 PSD para el modelo 3 de suspensión semi-activa

Atendiendo a la *Figura 5.14. Comparación de la aceleración vertical del modelo 3 y la suspensión pasiva*, se observa que tanto para la parte delantera como para la trasera del vehículo, no se observan grandes progresos ya que, el sistema no se estabiliza con mayor rapidez con respecto a la suspensión pasiva y además aparecen picos de valores muy superiores a esta.

Si se observa ahora la *Figura 5.15. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 3 y la suspensión pasiva*, se puede concluir que para la parte delantera del vehículo se produce una pequeña disminución de los valores máximos, sin embargo, nuevamente esta tiene mayores valores pico durante el rebote tras la excitación. Para la parte trasera del vehículo, el modelo se muestra mucho más efectivo, reduciendo de forma considerable los valores pico, no produciendo mayores valores durante el rebote, y además, con una anterior estabilización del sistema.

Con respecto al confort, en la *Tabla 5.9. RMS para el modelo 3 de suspensión semi-activa*, se observa que el RMS aumenta de manera significativa tanto para la parte delantera como para la trasera del vehículo con respecto a la suspensión pasiva y los anteriores modelos de suspensión semi-activa expuestos. Si se analiza el PSD de la *Figura 5.16. PSD para el modelo 3 de suspensión semi-activa*, para la parte delantera del vehículo, se observa que a frecuencias cercanas a 1 Hz, se consigue disminuir en torno a un 20% el valor de las vibraciones transmitidas al interior, sin embargo, a frecuencias algo superiores, los valores aumentan considerablemente. Para la parte trasera del vehículo, no se consigue

disminuir los valores de *PSD* en frecuencias en torno a 1 Hz y a frecuencias mayores, presenta mayores valores.

Se puede concluir que con este modelo, las aceleraciones verticales transmitidas al interior no disminuyen excesivamente y los desplazamientos de la suspensión solo se reducen de forma considerable en la parte posterior del vehículo. Además, atendiendo al confort, el *RMS* se ve aumentado, en contraposición con el *PSD* para la parte delantera del vehículo, que si se ve disminuido en frecuencias en torno a 1 Hz. Este modelo podría ser apto para la parte delantera, aunque se sigue probando otros casos para mejorar. Igualmente, sería válido para la parte trasera si se estuviese buscando una suspensión más firme, para un mejor control y manejo, por la considerable disminución del desplazamiento relativo de la suspensión.

#### 5.3.4. Modelo de suspensión semi-activa 4

En busca de una mayor mejora, en el siguiente modelo se busca controlar el sistema con una mayor anticipación y de forma menos drástica ante cualquier valor de entrada. Para ello, se disminuyen los valores de salida del controlador *Fuzzy*. El nuevo rango de actuación de la fuerza actuadora se sitúa entre los -1500 y 1500 N, y además, los conjuntos de pertenencia varían con respecto a modelos anteriores, haciendo que en la zona en torno a 0 N de fuerza, los conjuntos se encuentren más próximos entre sí, de modo que la actuación para bajos valores de entrada, sea lo más suave posible tal y como puede verse en la *Figura 5.17. Conjuntos borrosos de salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 4.*

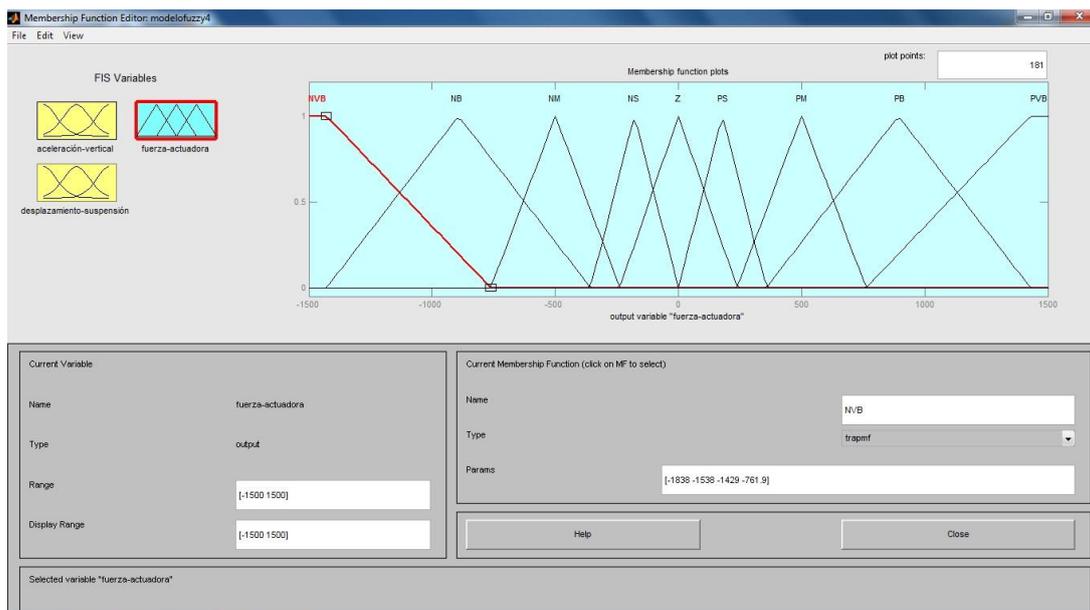


Figura 5. 17 Conjuntos borrosos de salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 4

El resto de la arquitectura se mantiene con respecto a modelos anteriores, al igual que la base de reglas de actuación, repitiéndose los valores tomados para el modelo 3.

De igual manera, se vuelve a comparar los valores obtenidos con los de la suspensión pasiva en las *Figura 5.18. Comparación de la aceleración vertical del modelo 4 y la suspensión pasiva* y la *Figura 5.19. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 4 y la suspensión pasiva*.

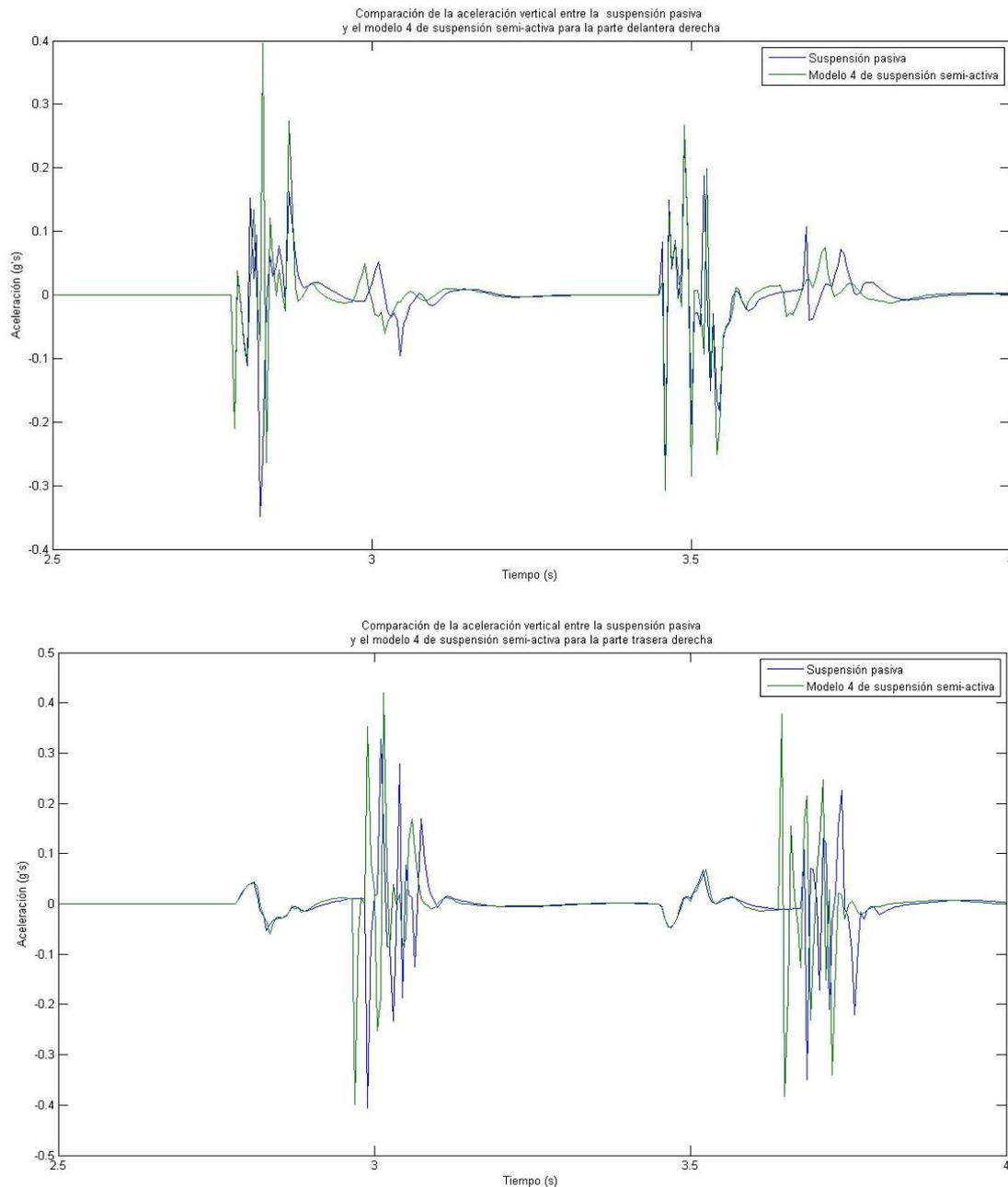


Figura 5. 18 Comparación de la aceleración vertical del modelo 4 y la suspensión pasiva

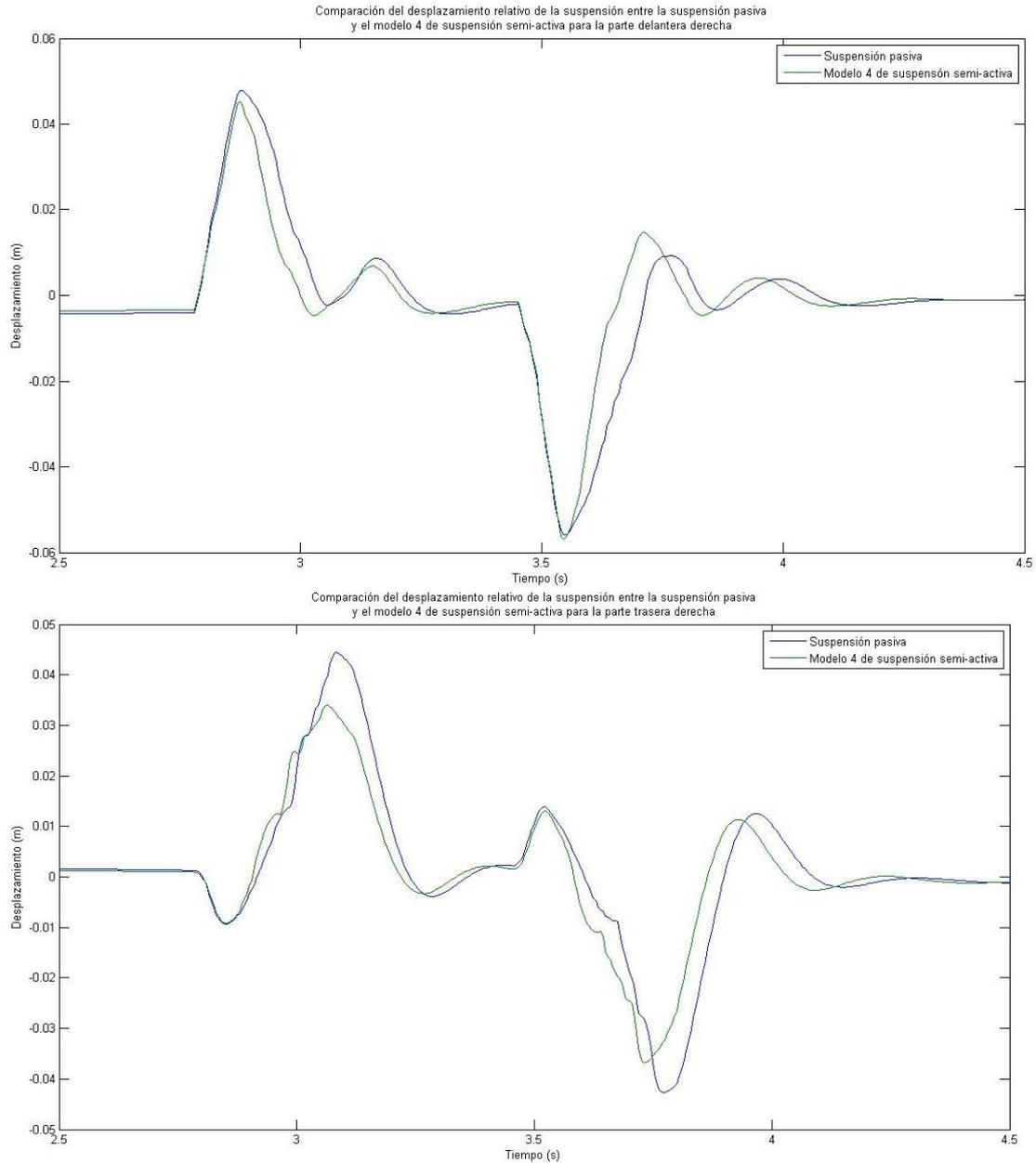


Figura 5. 19 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 4 y la suspensión pasiva

Nuevamente se obtiene el *RMS*, que se muestra en la *Tabla 5.10*. *RMS* para el modelo 4 de suspensión semi-activa.

Tabla 5. 10 *RMS* para el modelo 4 de suspensión semi-activa

<i>Parte</i>	<i>RMS (g's) PASIVA</i>	<i>RMS (g's) SEMI-ACTIVA</i>
<i>Delantera derecha</i>	0.0258	0.0284
<i>Trasera derecha</i>	0.0288	0.0348

Así mismo en la *Figura 5.20. PSD para el modelo 4 de suspensión semi-activa* se muestra el PSD del cuarto modelo.

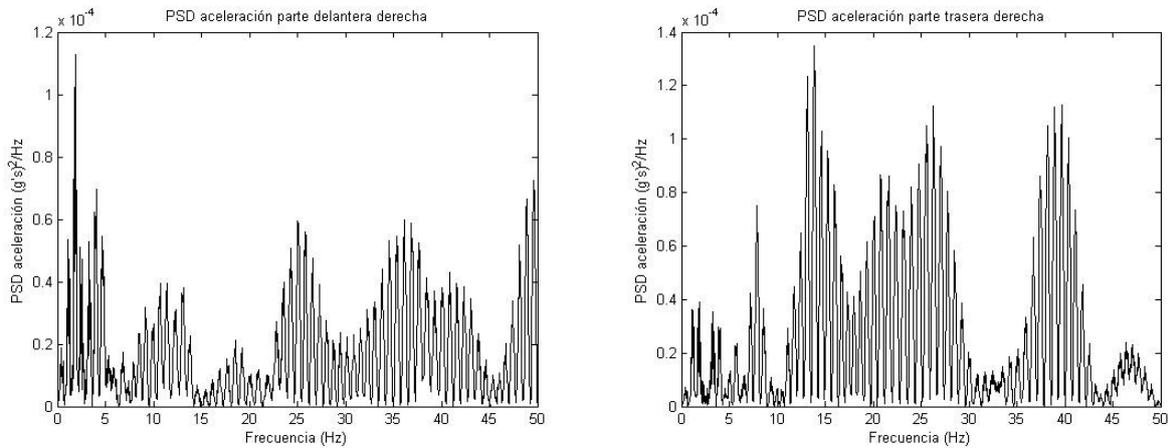


Figura 5. 20 PSD para el modelo 4 de suspensión semi-activa

Si se atiende a la *Figura 5.18. Comparación de la aceleración vertical del modelo 4 y la suspensión pasiva*, para la parte delantera del vehículo, los valores se ven incrementados de forma notable y la estabilización es similar a la del sistema pasivo. Para la parte trasera del vehículo, no se observa que los valores máximos de aceleración varíen en exceso. Lo único reseñable en ambos casos, es que, durante la estabilización, no se producen valores pico, sino que se consigue una forma mucho más lineal.

En lo referente a la *Figura 5.19. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 4 y la suspensión pasiva*, para la parte delantera del vehículo, los valores obtenidos son similares a los de la suspensión pasiva, salvo que el sistema se adelanta a ellos. Para la parte trasera, se observa una pequeña disminución en los valores máximos.

Por último, desde el punto de vista del confort, para ambas partes del vehículo se produce un aumento del *RMS* tal y como se observa en la *Tabla 5.10. RMS para el modelo 4 de suspensión semi-activa*, y en cuanto al PSD visto en la *Figura 5.20. PSD para el modelo 4 de suspensión semi-activa*, se produce un aumento de las vibraciones transmitidas al interior en valores cercanos a 1 Hz en el caso de la parte delantera del vehículo, mientras que para la parte trasera del mismo, los valores de vibraciones no varían excesivamente con respecto a la suspensión pasiva.

Se concluye, por tanto, que este modelo 4 no mejora prácticamente en nada los valores registrados por la suspensión pasiva, y es prácticamente descartable para uso como modelo final.

### 5.3.5. Modelo de suspensión semi-activa 5

Este quinto modelo mantiene la misma construcción que el modelo 4, sin embargo, se cambian las funciones de pertenencia de salida de la fuerza actuadora. Se hace que los conjuntos en torno a 0 N no se encuentren tan próximos entre sí, ya que, según se pudo ver en el modelo 4, esta hipótesis no mejoraba el conjunto, y además también se busca que la actuación en casos algo más extremos, no sea tan brusca, tal y como puede verse en la *Figura 5.21. Conjuntos borrosos de la salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 5.*

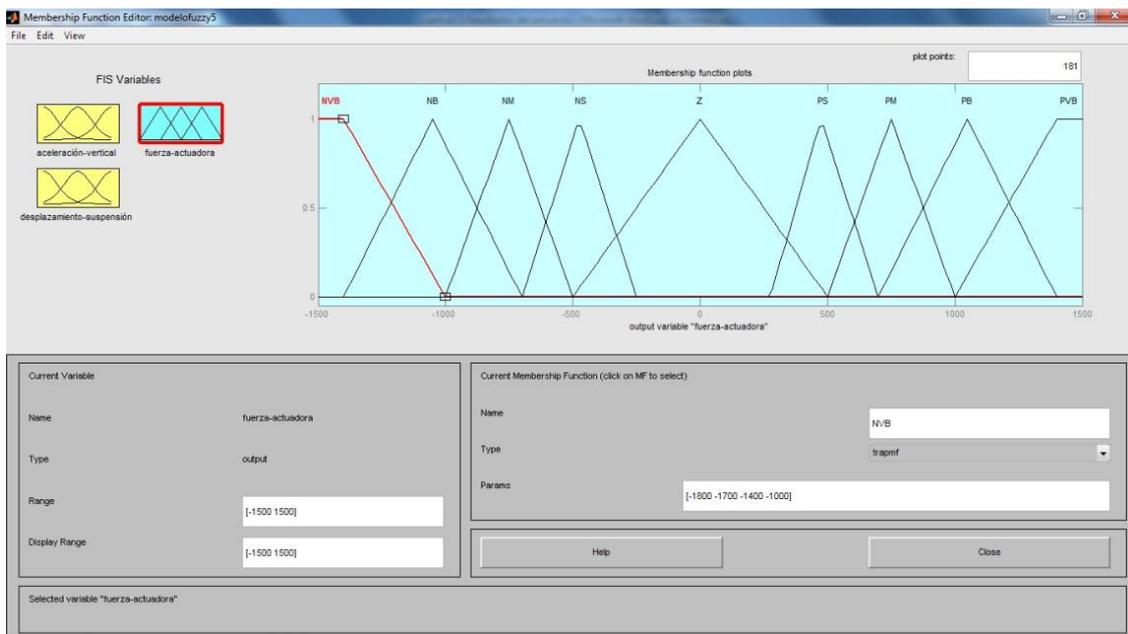


Figura 5. 21 Conjuntos borrosos de la salida de la fuerza actuadora del sistema Fuzzy en el modelo 5

Para una mejor comprensión, se comparan nuevamente los valores obtenidos con los de la suspensión pasiva en las *Figura 5.22. Comparación de la aceleración vertical del modelo 5 y la suspensión pasiva* y la *Figura 5.23. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 5 y la suspensión pasiva*.

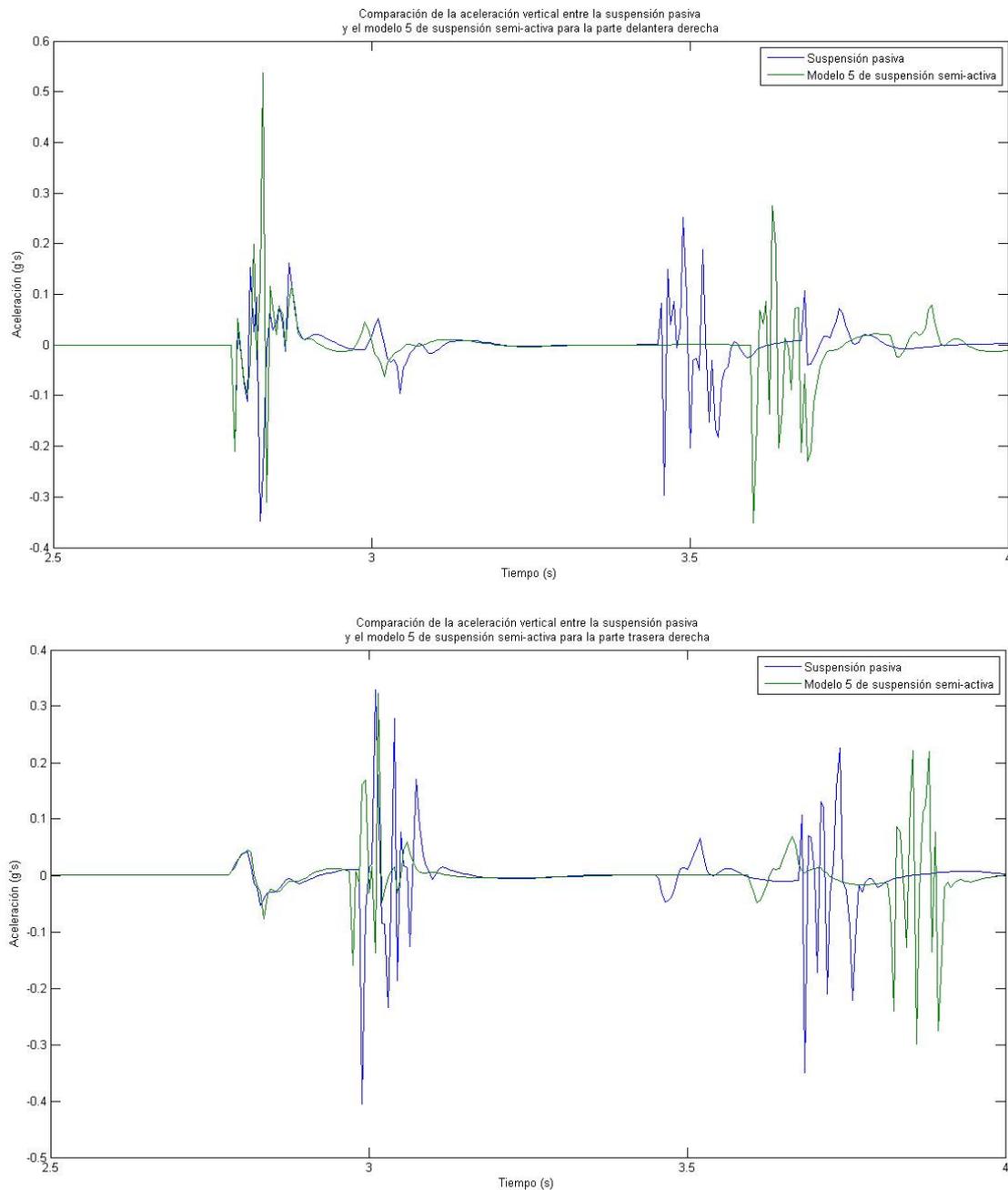


Figura 5. 22 Comparación de la aceleración vertical del modelo 5 y la suspensión pasiva

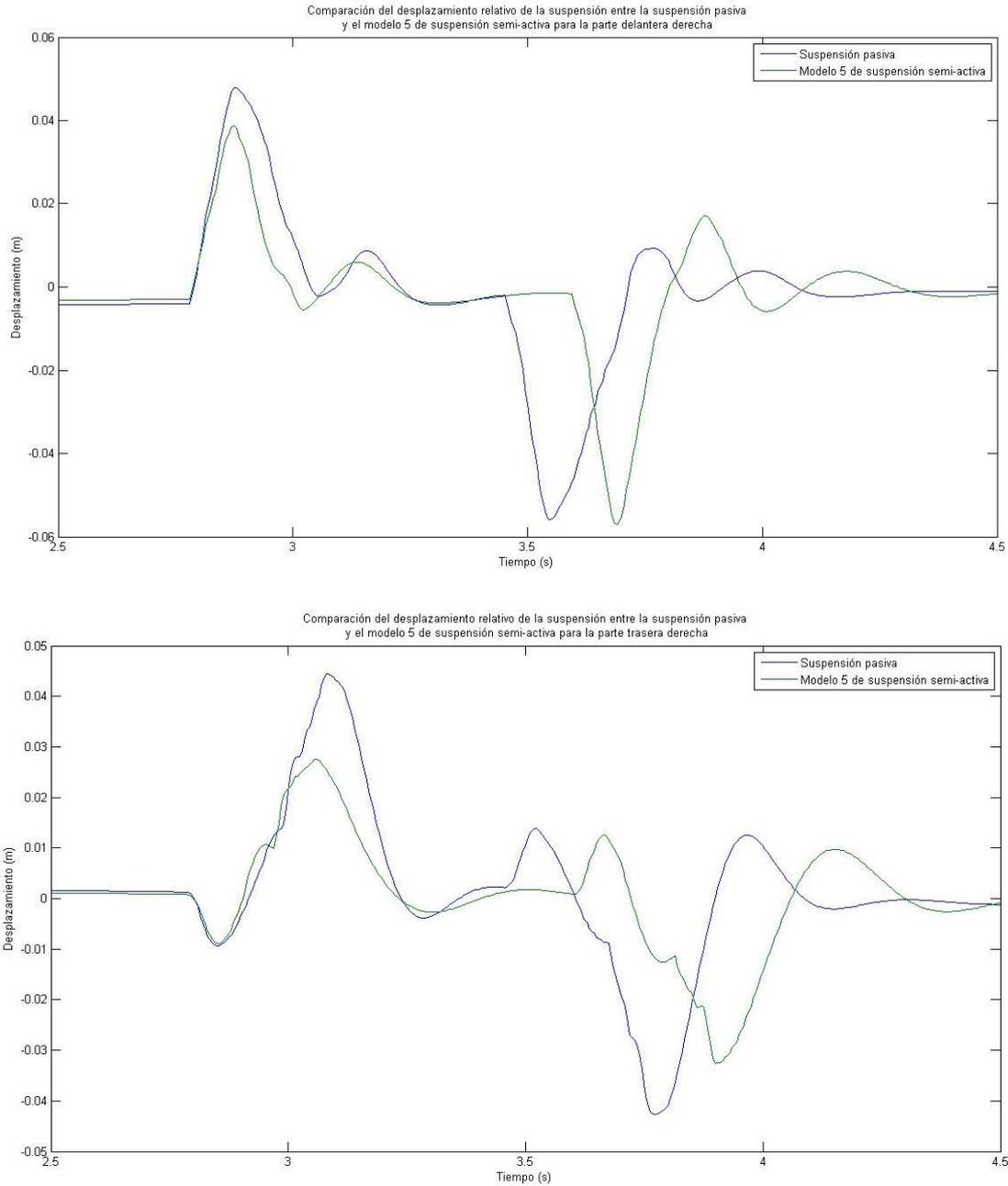


Figura 5. 23 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 5 y la suspensión pasiva

Se obtiene igualmente el *RMS*, que se muestra en la *Tabla 5.11. RMS para el modelo 5 de suspensión semi-activa.*

Tabla 5. 11 *RMS* para el modelo 5 de suspensión semi-activa

<i>Parte</i>	<i>RMS (g's) PASIVA</i>	<i>RMS (g's) SEMI-ACTIVA</i>
<i>Delantera derecha</i>	0.0258	0.0311
<i>Trasera derecha</i>	0.0288	0.0248

De igual modo, en la *Figura 5.24. PSD para el modelo 5 de suspensión semi-activa*, se muestra el PSD para el quinto modelo.

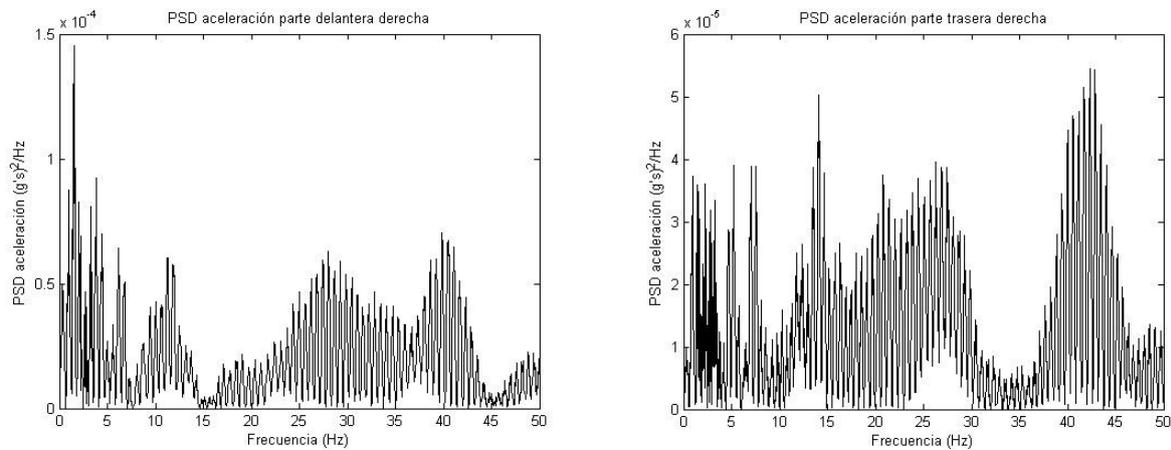


Figura 5. 24 PSD para el modelo 5 de suspensión semi-activa

Atendiendo a la *Figura 5.22. Comparación de la aceleración vertical del modelo 5 y la suspensión pasiva*, para el caso de la parte delantera del vehículo, los valores de aceleración y los tiempos de estabilización del sistema son muy parejos a los del sistema pasivo. Por contra, en el caso de la parte trasera del vehículo, los valores máximos se reducen de manera considerable al rebasar el bache, no tanto si el vehículo se encuentra con el badén, así como el tiempo de estabilización, que también se reduce de manera notable.

Si se observa ahora la *Figura 5.23. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 5 y la suspensión pasiva*, para la parte delantera del vehículo, el modelo se muestra efectivo en el paso de baches pero no tanto en el caso del paso del badén, en donde se incrementan los valores pico y la estabilización es similar a la de la suspensión pasiva. Nuevamente el modelo 5 se muestra mucho más efectivo para la parte trasera del vehículo, reduciendo de manera notable los valores máximos tanto para el bache como para el badén.

Continuando ahora desde el punto de vista del confort, el *RMS* de la *Tabla 5.11. RMS para el modelo 5 de suspensión semi-activa*, para la parte delantera del vehículo se ve incrementado, mientras que para la parte trasera del mismo se consigue disminuir dicho valor de manera notable. Con el PSD de la *Figura 5.24. PSD para el modelo 5 de suspensión semi-activa*, se observa que las vibraciones transmitidas al interior se ven incrementadas en la región de 1 Hz para la parte delantera del vehículo, consiguiéndose una disminución de la misma en el rango de

los 10-20 Hz. Para la parte trasera del vehículo, los valores son muy similares a los de la suspensión pasiva para el entorno de 1 Hz, sin embargo, se consigue disminuir para rangos mayores, y sobre todo, se evitan mayores picos, mostrándose mucho más constante en su funcionamiento.

Por tanto, se puede concluir que el modelo 5 si sería válido para su uso en el caso de la suspensión semi-activa para la parte trasera, ya que, se consigue disminuir en menor o mayor medida las aceleraciones, los desplazamientos y sobre todo los valores de *PSD* y *RMS* con respecto a la suspensión pasiva.

### 5.3.6. Modelo de suspensión semi-activa 6

Este último modelo de estudio es resultado de la observación de los modelos anteriores y sus diferentes resultados. Una de las conclusiones más llamativa que presentaba cada uno de los anteriores modelos era que, funcionaban de distinta forma para la parte delantera y para la parte trasera del vehículo, por lo que se decidió hacer una combinación de ellos para observar el resultado que se obtendría en conjunto.

Así, a partir de los resultados obtenidos con anterioridad, se decidió utilizar el modelo 2 para la parte delantera y el modelo 5 para la parte trasera del vehículo. La diferencia se encuentra básicamente en el modelo *Simulink*, en el que los bloques de *Lógica Fuzzy* tienen distinto tipo de lógica, cada uno correspondiente a la del modelo utilizado.

De nuevo para un mejor estudio de los resultados de aceleración y de desplazamiento relativo de la suspensión, se vuelve a comparar los datos obtenidos en el modelo 6 con los de la suspensión pasiva en las *Figura 5.25. Comparación de la aceleración vertical del modelo 6 y la suspensión pasiva* y la *Figura 5.26. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 6 y la suspensión pasiva*.

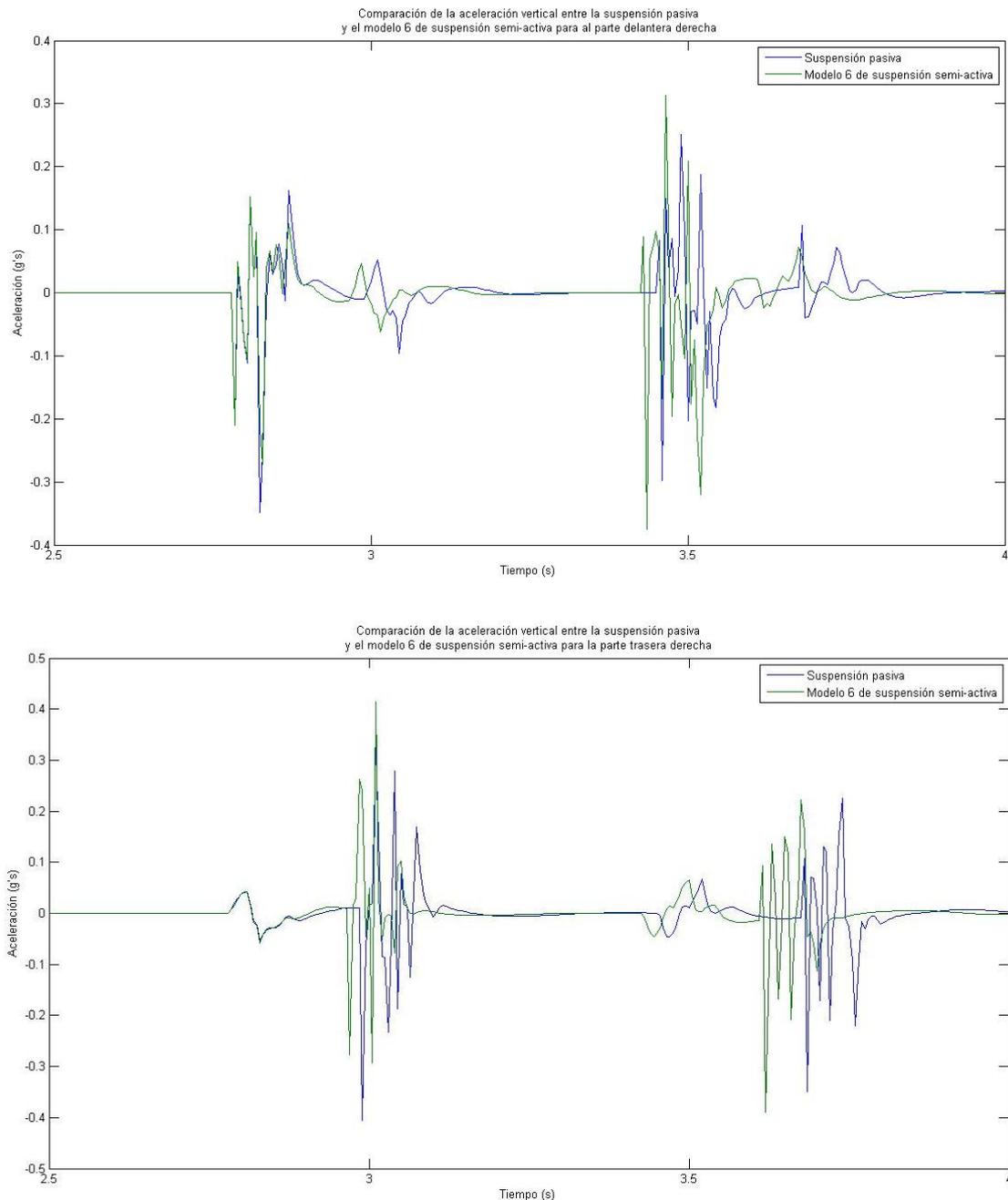


Figura 5. 25 Comparación de la aceleración vertical del modelo 6 y la suspensión pasiva

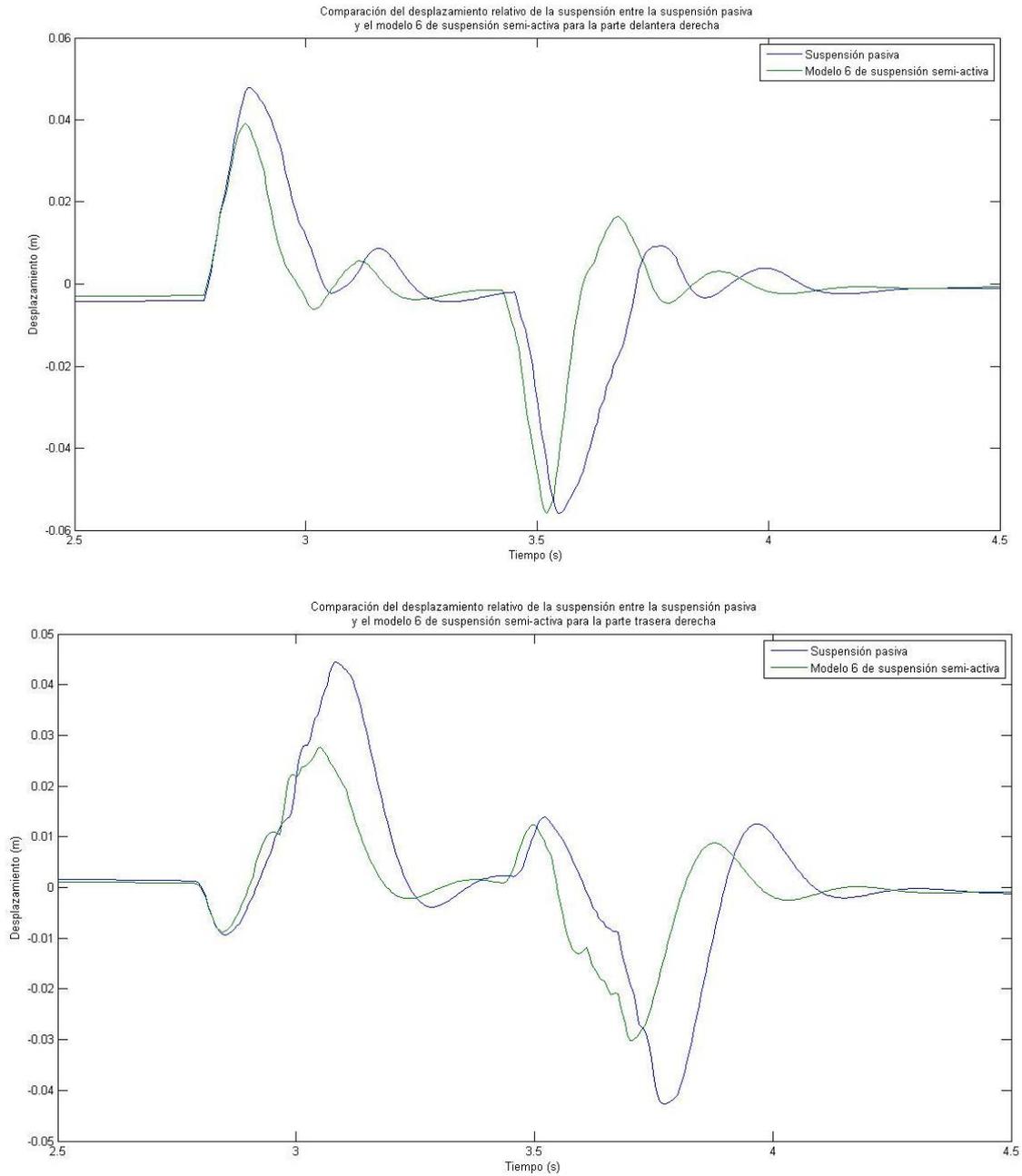


Figura 5. 26 Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 6 y la suspensión pasiva

Y por último, para poder comparar tomando como referencia el confort, se usa el *RMS* de la *Tabla 5.12. RMS para el modelo 6 de suspensión semi-activa.*

Tabla 5. 12 *RMS* para el modelo 6 de suspensión semi-activa

<i>Parte</i>	<i>RMS (g's) PASIVA</i>	<i>RMS (g's) SEMI-ACTIVA</i>
<i>Delantera derecha</i>	0.0258	0.0279
<i>Trasera derecha</i>	0.0288	0.0283

Del mismo modo en la *Figura 5.27. PSD para el modelo 6 de suspensión semi-activa* se muestra el PSD del sexto modelo.

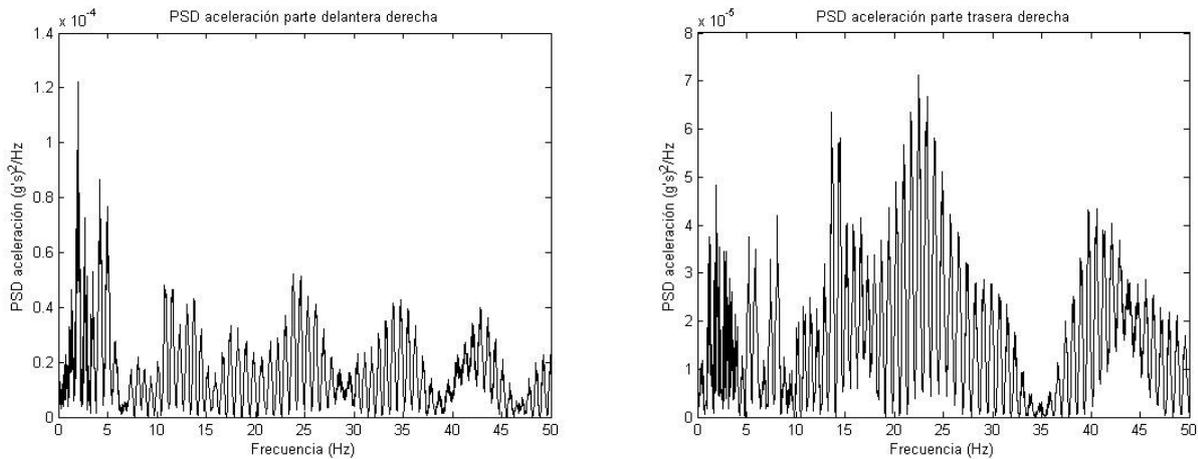


Figura 5. 27 PSD para el modelo 6 de suspensión semi-activa

Si se atiende a la *Figura 5.25. Comparación de la aceleración vertical del modelo 6*, que sufre el vehículo, se encuentran diferencias entre la parte delantera y la parte trasera del vehículo. En la parte delantera del vehículo, se observa que el sistema si es capaz de disminuir las aceleraciones sufridas durante el paso del bache, sin embargo, durante el paso del badén estos valores aumentan con respecto a la suspensión pasiva, por el contrario, en ambas situaciones, el sistema es capaz de estabilizar antes el vehículo. Para el caso de la parte trasera del vehículo, los resultados difieren, en el paso del bache los valores aumentan con respecto a la pasiva y durante el badén no varían en exceso, no obstante, los tiempos de estabilización se reducen de manera significativa.

Si se observa ahora la *Figura 5.26. Comparación del desplazamiento relativo de la suspensión del modelo 6 y la suspensión pasiva*, para el caso de la parte delantera del vehículo, al sobrepasar el bache se reduce de manera poco significativa los valores máximos, de igual forma, aumentan levemente al traspasar el badén. La estabilización si es sensiblemente inferior a la del sistema pasivo. En cuanto a la parte trasera del vehículo, en esta sí que se consigue una reducción significativa de los valores máximos de desplazamiento con respecto a los presentados por la pasiva, además de una mayor rapidez en la estabilización.

Por último, atendiendo al confort, en la *Tabla 5.12. RMS para el modelo 6 de suspensión semi-activa*, el RMS se ve aumentado para la parte delantera del vehículo y disminuido levemente para la trasera del mismo. Si se observa el PSD de

la *Figura 5.27. PSD para el modelo 6 de suspensión semi-activa*, los valores cercanos a 1 Hz para la parte delantera del vehículo, se ven aumentados, mientras que para la parte trasera también estos valores se ven incrementados.

Se observa en este último modelo 6 que, aunque se haga una combinación de dos modelos anteriores, los cuales funcionaban separadamente, no se consigue una mejora global del sistema. Se vuelven a conseguir mejores resultados en la parte trasera que en la delantera del vehículo, pero sin mejoras significativas con respecto a ellos trabajando en solitario. No obstante, este modelo podría llegar a utilizarse ya que, también presenta ventajas, sobre todo en cuanto a la reducción de desplazamientos, con lo que se estaría consiguiendo una mayor eficacia en la conducción.

En el siguiente capítulo, se explican las conclusiones pertinentes inferidas a partir del estudio de los diferentes modelos utilizados y resultados obtenidos.

# Capítulo 6

## Conclusiones y futuros trabajos

### 6.1 Conclusiones

Uno de los objetivos del presente proyecto era conseguir la conexión entre *ADAMS/CAR* y *MATLAB*. Conseguir dicho objetivo resultó arduo y laborioso, además de extenso en el tiempo ya que a cada avance que se producía, siempre surgían nuevos problemas. Así mismo, tanto *ADAMS* como *MATLAB*, son programas que no cuentan con una interfaz especialmente sencilla e intuitiva, por lo que fue necesario aprender a utilizarlos [56], [57], [58], [59] y [60], previo paso a comenzar su uso más en profundidad.

Como ya se comentó en el capítulo de introducción, el intento de conexión entre ambos programas no fue del todo satisfactorio. Según los tutoriales incluidos por el desarrollador de *ADAMS* [61], [62] y [63], así como de los ejemplos dados por el mismo, para el uso de dicha conexión, el programa debería ser capaz de trabajar en paralelo con *MATLAB*, es decir, se debería haber podido usar ambos programas al mismo tiempo, obteniendo los resultados de aceleraciones y desplazamientos en *ADAMS* y recurriendo únicamente a *MATLAB* como encargado de controlar la lógica de control de la suspensión semi-activa y de obtener los valores de fuerza necesarios en cada momento para que fueran enviados a los actuadores colocados en el vehículo en *ADAMS*.

Finalmente se consiguió una solución parcial, en la que el trabajo se desarrollaba en serie, es decir, primero se creaban todos los datos necesarios en *ADAMS* y más tarde se exportaban a *MATLAB* para proceder a la simulación. Si bien este resultado es aceptable, recorta enormemente las ventajas que presentaba la utilización de este modelo, ya que las condiciones del vehículo no podían ser variadas de una forma rápida y precisa, evitando del mismo modo posibles automatizaciones del sistema.

En cuanto al principal objetivo del proyecto, correspondiente a la mejora del controlador de la suspensión semi-activa mediante el estudio de los seis distintos

modelos, se obtuvieron diversas conclusiones. Si bien en las suspensiones semi-activas se intenta reducir o los valores de aceleración vertical o los desplazamientos de la suspensión, en este caso se pretendía estudiar el vehículo desde un punto de vista de mejora del confort, es decir, intentando reducir los valores de aceleración.

En esta parte, resultaron llamativas las diferencias obtenidas en los resultados de los diferentes modelos ante cualquier sutil cambio que se realizase a la hora de la construcción y desarrollo de la lógica controladora, por lo que, a la hora de su creación y mejora, podría decirse que no existen límites, siempre se podría encontrar un modelo con un funcionamiento totalmente distinto.

Una vez realizadas las simulaciones, se observó que los modelos más interesantes se redujeron finalmente a tres: los modelos 2, 5 y 6, respectivamente.

Para el modelo 2, se observó una disminución de los valores máximos de aceleración vertical, así como una estabilización más rápida del sistema con respecto a la producida en el caso de la suspensión pasiva para la parte delantera del vehículo. Igualmente, el funcionamiento del modelo para dicha parte delantera se mostraba efectivo en la disminución del recorrido de la suspensión en el caso del paso del resalto, sin embargo, aumentaba en el caso del badén. Esto podría deberse a que el actuador además de tener que 'bajar' la carrocería, debe superar también las resistencias que producen tanto el muelle como el amortiguador. De igual modo, el *RMS* se veía disminuido y el *PSD* tomaba valores muy similares a los obtenidos por la suspensión pasiva en el entorno de 1 Hz. Para la parte trasera del vehículo, en general, los resultados se veían aumentados.

Tras el estudio del modelo 5, los resultados fueron de índole similar a los obtenidos para el caso 2, pero esta vez, los resultados mejoraban para el caso de la parte trasera del vehículo en vez de la delantera, en la que los resultados empeoraban. En este modelo, resultaba así mismo llamativo tanto la disminución notable de los desplazamientos de la suspensión, como de los valores de *RMS* y en menor medida de *PSD*.

Por último, en el modelo 6 se intentó realizar una combinación de los dos anteriores modelos, utilizándose en cada parte del vehículo, a saber delantera y trasera, el modelo con el que se conseguía disminuir los valores. El resultado, sin embargo, no fue del todo satisfactorio, ya que, si bien en algunos casos si se conseguía una disminución de los valores, como es el caso de los desplazamientos de

la suspensión o en algunos casos el *RMS*, en general los resultados obtenidos eran similares o superiores a los de la suspensión pasiva y además, siempre empeoraban a los de los modelos por separado.

Se podría concluir entonces que, una posible solución podría pasar por la utilización de los modelos 2 y 5 de manera aislada. En la actualidad, y como se desarrolló en el capítulo referente a suspensiones, los vehículos que cuentan con suspensiones semi-activas suelen recurrir a mandos en su interior con los que el conductor puede variar el comportamiento de la suspensión entre los distintos modos con los que cuente. Así, para este caso, se podría seleccionar entre un modo *comfort*, en el que se recurriría al modelo 2, ya que con él, se conseguiría disminuir los valores de aceleración en la parte delantera, aumentándose por tanto la comodidad de los ocupantes. Un segundo modo de utilización sería el *sport*, en el que se adoptaría el modelo estudiado 5, en este primaría el control y el gobierno del vehículo, acosta principalmente de reducir los desplazamientos en la suspensión y aumentar las aceleraciones sufridas, sin embargo, se estaría perdiendo confort.

## 6.2 Futuros trabajos

Como posible futuro trabajo, se podría intentar nuevamente la conexión con versiones más modernas tanto de *ADAMS* como de *MATLAB*, que se encuentren en un futuro disponibles para los usuarios y que permitan la interacción sin los numerosos problemas y errores surgidos en el transcurso del presente proyecto. Trabajando de forma paralela, se podría conseguir un mayor número de modelos estudiados, en muy diferentes condiciones y en menores intervalos de tiempo.

En cuanto a la mejora de los modelos de suspensión semi-activa, y como punto de partida de posibles futuros trabajos para la mejora del presente proyecto, se podría seguir con el estudio de la optimización de la *Lógica Fuzzy* desde dos vías distintas. Una primera, podría ser proseguir con la prueba de distintos valores de entrada y salida de los conjuntos borrosos, así como el 'juego' con la base de reglas. La segunda sería el cambio de los motores de inferencia y desborrosificación, es decir, utilizar la lógica del tipo *Sugeno*, en la que los valores de salida del sistema son función de las entradas, o, en vez del uso de la desborrosificación por centro de gravedad, usar alguna de las alternativas presentadas en el capítulo de *Lógica Fuzzy*.

También se debería tener en cuenta en un posible futuro estudio de la suspensión semi-activa no tomar valores simétricos a la hora de la elección de las funciones de pertenencia de la Lógica Fuzzy ya que el comportamiento de los amortiguadores no es simétrico, presentan mayor rigidez en extensión que en compresión.

Por último, y ya como posible evolución de esta investigación, podría plantearse el estudio de todo el sistema físico necesario para la implementación de los actuadores en un vehículo real y de este modo hallar los resultados para condiciones reales, así como su posible viabilidad económica para su uso a gran escala. Otra posible vía de estudio sería la de la investigación de la suspensión del tipo activo, eliminando totalmente todo elemento pasivo del sistema, y dejando todo el trabajo de suspensión a realizar por el actuador hidráulico.

# Capítulo 7

## Referencias

- [1]. C. Gil Guerrero, M. Miranda Robredo, F. Nogue Collgros, N. Salustiano Esnoz, E. Puigercós Aguiló. *Suspensiones Inteligentes*. Universidad de Navarra. San Sebastián 2000.
- [2]. J.L. Oliva. *Simulación de un Sistema de Suspensión Semiactiva Controlado por Lógica Fuzzy en Matlab*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2003.
- [3]. M.R. Brox García. *Simulación de un Sistema de Suspensión Semiactiva Controlado por Lógica Fuzzy en Matlab*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2005.
- [4]. N. Sánchez Castillo. *Control de un Sistema de Suspensión Semiactiva basada en Lógica Difusa: Modelo de Vehículo Completo*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2006
- [5]. [http://buscon.rae.es/drael/SrvItConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=suspension](http://buscon.rae.es/drael/SrvItConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=suspension), accedido octubre 2010.
- [6]. [http://www.km77.com/marcas/renault/laguna\\_01/0primera/sumario3.asp](http://www.km77.com/marcas/renault/laguna_01/0primera/sumario3.asp), accedido noviembre 2010.
- [7]. [http://www.mecanicavirtual.org/indice\\_cursos.html](http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html), accedido junio 2011.
- [8]. [http://www.km77.com/marcas/audi/a8\\_03/0primera/sumario6.asp](http://www.km77.com/marcas/audi/a8_03/0primera/sumario6.asp), accedido febrero 2011.
- [9]. [http://translate.google.es/translate?hl=es&langpair=en|es&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Suspension\\_%28vehicle%29](http://translate.google.es/translate?hl=es&langpair=en|es&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Suspension_%28vehicle%29), accedido febrero 2011.
- [10]. <http://es.scribd.com/doc/6588309/Sistema-de-Suspension>, accedido junio 2011.
- [11]. <http://lucassotelo.es.tl/Suspensi%F3n.htm>, accedido febrero 2011.

- [12]. <http://www.pracodidacol.com/Pasajeros/Hino/BusetaFC4J/tabid/259/language/es-CO/Default.aspx>, accedido febrero 2011.
- [13]. [http://www.siekmann-tuning.com/mercedes/deporte-suspensiones-kits-de-reducci%C3%B3n-suspensi%C3%B3n-c-187\\_201.html?sort=2a&language=es](http://www.siekmann-tuning.com/mercedes/deporte-suspensiones-kits-de-reducci%C3%B3n-suspensi%C3%B3n-c-187_201.html?sort=2a&language=es), accedido febrero 2011.
- [14]. <http://mecanicayautomocion.blogspot.com/2009/03/sistema-de-suspension.html>, accedido febrero 2011.
- [15]. <http://motor.terra.es/informacion-utilidades/diccionario-motor/definicion.cfm?id=11>, accedido febrero 2011.
- [16]. <http://debates.motos.coches.net/showthread.php?t=215226&page=2>, accedido febrero 2011.
- [17]. <http://www.km77.com/tecnica/bastidor/balanceo/t03.asp>, accedido febrero 2011.
- [18]. [http://www.tecnun.es/automocion/files/ebooks/Amortiguadores\\_y\\_suspension.pdf](http://www.tecnun.es/automocion/files/ebooks/Amortiguadores_y_suspension.pdf), accedido febrero 2011.
- [19]. <http://www.motorspain.com/07-05-2010/marcas/los-amortiguadores-salvan-vidas>, accedido febrero 2011.
- [20]. <http://lucassotelo.es.tl/Suspensi%C3%B3n.htm>, accedido febrero 2011.
- [21]. <http://ingenieriadelautomovil.wordpress.com/2010/10/24/qu-son-los-bushing-o-silentblocks/>, accedido febrero 2011.
- [22]. <http://ingenieriadelautomovil.wordpress.com/2010/10/24/qu-son-los-bushing-o-silentblocks/>, accedido febrero 2011.
- [23]. [http://www.suspension-parts.es/ball\\_joint.html](http://www.suspension-parts.es/ball_joint.html), accedido febrero 2011.
- [24]. <http://www.decorfx.net/misaab93/page4/page4.html>, accedido febrero 2011.
- [25]. <http://www.km77.com/00/audi/r8/gra/216.asp>, accedido febrero 2011.
- [26]. <http://kart-cross.tripod.com/susgrup.htm>, accedido febrero 2011.
- [27]. <http://f1.superforos.com/viewtopic.php?p=60274&sid=a3d10a7a470744f5ee402bc96c2c5327>, accedido febrero 2011.

- [28]. <http://www.automotriz.net/tecnica/conocimientos-basicos-38.html>, accedido febrero 2011.
- [29]. V. Díaz. *El Sistema de Suspensión*. Apuntes de la asignatura Teoría de Vehículos. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2010
- [30]. E. Guglielmino. 'Semi-active Suspension Control'. Año 2008.
- [31]. G. Martínez. 'Manual del automóvil: reparación y mantenimiento'. Año 2003.
- [32]. <http://www.mecanicavirtual.org/suspension8.htm>, accedido junio 2011.
- [33]. <http://www.ukcar.com/features/tech/suspension/lotus.htm>, accedido agosto 2011.
- [34]. <http://www.suspensionactiva.com/2010/09/por-que-suspension-activa.html>, accedido agosto 2011.
- [35]. <http://tdaveblog.blogspot.com/2007/12/el-sistema-de-suspension-bose.html>, accedido junio 2011.
- [36]. <http://www.mecanicavirtual.org/suspension8.htm>, accedido junio 2011.
- [37]. <http://tdaveblog.blogspot.com/2007/12/el-sistema-de-suspension-bose.html>, accedido junio 2011.
- [38]. <http://www.monroe.com/about-monroe/Original-Equipment?lang=es>, accedido junio 2011.
- [39]. <http://www.automovilsport.com/historia/citroen19/Nota.html>, accedido junio 2011.
- [40]. <http://jashwanthauto.blogspot.com/2010/01/uniqueness-of-mercedes-abcsuspension.html>, accedido julio 2011.
- [41]. SUR A&C. 'Lógica Fuzzy para principiantes'. Año 1997
- [42]. B. Martín del Brío, A. Sanz Molina. 'Redes Neuronales y Sistemas borrosos'. 3ª Edición. Año 2006.
- [43]. <http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/08-09/10.pdf>, accedido agosto 2011.
- [44]. <http://www.slideshare.net/renatolachira/logica-difusa>, accedido agosto 2011.
- [45]. <http://www.slideshare.net/mentelibre/logica-difusa-introduccion>, accedido agosto 2011.

- [46]. <http://www.dma.fi.upm.es/research/FundMatSoftComputing/fuzzyinf/funpert.htm>, accedido julio 2011.
- [47]. <http://proton.ucting.udg.mx/posgrado/cursos/idc/logica/fuzzy/index.html>, accedido agosto 2011.
- [48]. [http://www.utpl.edu.ec/ecc/wiki/index.php/Inteligencia\\_Artificial\\_%28Materia%29](http://www.utpl.edu.ec/ecc/wiki/index.php/Inteligencia_Artificial_%28Materia%29), accedido agosto 2011.
- [49]. S. Jagannatha Rao. *Vehicle Modeling and ADAMS-SIMULINK Co-Simulation with Integrated Continuously Controlled Electronic Suspension (CES) and Electronic Stability Control (ESC) Models*. Tesis Doctoral. Universidad Del Estado de Ohio. 2009
- [50]. M. Datar, D. Negrut. *Technical Report on Virtual Prototyping of Ground Vehicles*. 2007
- [51]. D. Westbom, P. Frejinger. *Yaw Control using Rear Wheel Steering*. Linköping University. Linköping 2002.
- [52]. M.S. Fallah, R. Bhat, W.F. Xie. *New Model and Simulation of McPherson Suspension System for Ride Controls Application*. Concordia University. Montreal 2008.
- [53]. M.J.L. Boada, B.L. Boada, B. Muñoz, V. Díaz. *Neural control for semi-active suspension of a half-vehicle model*. International Journeys of Vehicle Autonomous Systems.
- [54]. A. Arce Rubio, G. Vianna Raffo. *Manual de Simulink para la Asignatura de Teoría de Sistemas*. Universidad de Sevilla. Sevilla 2009
- [55]. S. Morales Barca. *Comparativa Dinámica de Modelos del Cuerpo Humano*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Leganés 2010
- [56]. MSC Software. *Learning the Basics*. Manuales de introducción a ADAMS.
- [57]. MSC Software. *Building Models*. Construcción de modelos en ADAMS.
- [58]. Mechanical Dynamics. *ADAMS/Car Training Guide Version 11.0*. Guía de uso del modulo Car de ADAMS. 2001.
- [59]. MSC Software. *Working with Components*. Tutorial de construcción de componentes de ADAMS.
- [60]. MSC Software. *Getting Started Using ADAMS/Car*. Tutoriales de introducción al uso del módulo Car de ADAMS.

- [61]. MSC Software. *ADAMS/Controls Version 12 Training*. Guía de uso del modulo Controls de ADAMS.
- [62]. MSC Software. *Getting Started Using Adams/Controls. Introducing and Starting the Tutorials*. Tutoriales de aprendizaje del uso del modulo Controls de ADAMS.
- [63]. MSC Software. *Learning Adams/Controls with Control System Import*. Guía de uso del modulo Controls de ADAMS.