

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL,
ESPECIALIDAD EN MECÁNICA
PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
DINÁMICO DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL
EQUIPADO CON AMORTIGUACIÓN
MAGNETO-REOLÓGICA

AUTOR: D. Manuel Lorite Gutiérrez
TUTORA: Dra. D^a M^a Jesús López Boada

Septiembre 2011

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos del proyecto	2
1.3. Estructura del proyecto	4
CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO.....	7
2.1. Funciones del sistema de suspensión en un vehículo	7
2.2. Elementos del sistema de suspensión	10
2.2.1. Elementos elásticos	10
2.2.1.1. Ballestas.....	10
2.2.1.2. Muelles helicoidales	12
2.2.1.3. Barras de torsión.....	12
2.2.2. Elementos de amortiguación	14
2.2.2.1. Amortiguador de fricción	14
2.2.2.2. Amortiguador telescópicos	15
2.2.2.2.1. Amortiguador bitubo	17
2.2.2.2.2. Amortiguador monotubo	18
2.2.3. Elementos constructivos	19
2.2.4. Elementos de mejora	19
2.2.4.1. Barras estabilizadoras	19
2.3. Clasificación de los sistemas de suspensión	21
2.3.1. Según la geometría de sus elementos de suspensión.....	21
2.3.1.1. Sistemas de suspensión rígidos	21
2.3.1.2.. Sistemas de suspensión semirígidos	22
2.4.1.3. Sistemas de suspensión independientes.....	24
2.3.2. Según el sistema de control de la suspensión	32
2.3.2.1. Sistemas de suspensión pasiva	32
2.4.2.2.. Sistemas de suspensión activa	33
2.4.2.3. Sistemas de suspensión semiactiva	35
CAPÍTULO 3. LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS	39
3.1. Introducción	39
3.1.1. Propiedades reológicas	40

3.2.	Los materiales inteligentes.....	42
3.2.1.	Materiales piezoeléctricos y electrostrictivos	42
3.2.2.	Materiales con memoria de forma.....	43
3.2.3.	Materiales cromóactivos y fotoactivos	44
3.2.4.	Fluidos reológicos	45
3.2.4.1.	Fluidos magneto-reológicos	46
3.2.5.	Aplicaciones actuales de los materiales inteligentes	48
3.2.5.1.	Amortiguadores magneto-reológicos en vehículos industriales	48
3.2.5.2.	Control de vibraciones sísmicas en estructuras	49
3.2.5.3.	Frenos rotativos magneto-reológicos	51
3.2.5.4.	Sistemas de suspensión en asientos para vehículos de trabajo pesado	52
3.3.	El amortiguador magneto-reológico en los sistemas de suspensión de los vehículos.....	52
3.3.1.	Ventajas de los amortiguadores magneto-reológicos	56
3.3.2.	Inconvenientes de los amortiguadores magneto-reológicos.....	56
CAPÍTULO 4. EQUIPOS EMPLEADOS.....		59
4.1.	Hardware.....	59
4.1.1.	PC de control	60
4.1.1.1.	Chasis NI PXI 1031DC	60
4.1.1.2.	Módulo NI PXI 6230.....	61
4.1.1.3.	Módulo NI PXI 4472B	62
4.1.2.	Sensores de desplazamiento utilizados.....	62
4.1.2.1.	Descripción de los sensores de desplazamiento	63
4.1.2.2.	Ubicación de los sensores de desplazamiento	65
4.1.2.3.	Calibración de los sensores de desplazamiento.....	66
4.1.3.	Amortiguador magneto-reológico.....	69
4.1.4.	Dispositivo controlador <i>kit-controller</i>	69
4.1.4.1.	Descripción del dispositivo controlador	69
4.1.4.2.	Ubicación del dispositivo controlador.....	71
4.1.4.3.	Calibración del dispositivo controlador.....	72
4.2.	Software	75
4.2.1.	Introducción	75

4.2.2. Entorno del programa	75
4.2.3. Implementación del software LabVIEW	78
4.2.3.1. Adquisición y tratamiento de las señales de entrada en el software LabVIEW	78
4.2.3.2. Generación de las señales de entrada en el software LabVIEW	80
CAPÍTULO 5. INSTALACIÓN, ALIMENTACIÓN Y CONEXIONADO.....	83
5.1. Introducción	83
5.2. Instalación de los equipos	84
5.3. Alimentación de los equipos instalados en el vehículo automóvil	86
5.4. Conexionado entre equipos.....	87
CAPÍTULO 6. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	89
6.1. Introducción	89
6.2. Ensayos realizados sobre terreno adoquinado	90
6.3. Ensayos realizados sobre escalón	91
6.4. Ensayos realizados sobre badén.....	92
CAPÍTULO 7. RESULTADOS EXPERIMENTALES	95
7.1. Tratamiento del ruido de la señal.....	95
7.2. Resultados experimentales sobre terreno adoquinado a 20 km/h	97
7.2.1. Comparación del valor <i>Root Mean Square</i> (RMS).....	99
7.3. Resultados experimentales sobre terreno adoquinado a 30 km/h	99
7.3.1. Comparación del valor <i>Root Mean Square</i> (RMS).....	101
7.4. Resultados experimentales sobre terreno adoquinado a 40 km/h	102
7.4.1. Comparación del valor <i>Root Mean Square</i> (RMS).....	104
7.5. Resultados experimentales sobre escalón	104
7.5.1. Comparación del valor <i>Root Mean Square</i> (RMS).....	106
7.6. Resultados experimentales sobre badén	107
7.6.1. Comparación del valor <i>Root Mean Square</i> (RMS).....	109
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	111
8.1. Conclusiones.....	111
8.2. Futuros desarrollos	114
ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS	115

A.1. Introducción	115
A.2. Especificaciones técnicas del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3	116
A.3. Especificaciones técnicas de los equipos de National Instruments	118
A.3.1. Especificaciones de NI PXI 1031DC	119
A.3.2. Especificaciones de NI PXI 4472B	121
A.3.3. Especificaciones de NI PXI 6230.....	122
A.4. Especificaciones técnicas del dispositivo controlador <i>kit-controller</i>	123
REFERENCIAS	125

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1. Peugeot 207	3
Figura 2.1. Esquema de la amortiguación de un vehículo automóvil	8
Figura 2.2. Estructura de las ballestas del sistema de suspensión	11
Figura 2.3. Disposición de los muelles helicoidales.....	12
Figura 2.4. Esquema de una barra de torsión	13
Figura 2.5. Disposición y montaje de las barras de torsión.....	13
Figura 2.6. Amortiguadores de fricción	15
Figura 2.7. Flujo de aceite a través de paso permanente	16
Figura 2.8. Flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión	16
Figura 2.9. Esquema simplificado de un amortiguador bitubo	17
Figura 2.10. Estructura de un amortiguador bitubo.....	18
Figura 2.11. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo	18
Figura 2.12. Ejemplo de casquillo en una suspensión delantera	19
Figura 2.13. Barra estabilizadora en forma de U.....	20
Figura 2.14. Componentes de un sistema de suspensión rígido	21
Figura 2.15. Vista trasera de una suspensión semirrigida de eje torsional en un vehículo	23
Figura 2.16. Estructura de una suspensión semirígida de eje de Dion	24
Figura 2.17. Esquema de una suspensión independiente de brazos arrastrados o tirados	25
Figura 2.18. Esquema de una suspensión independiente de brazos semi-arrastrados o semi-tirados	26
Figura 2.19. Estructura de una suspensión independiente de eje oscilante	26
Figura 2.20. Esquema de una suspensión independiente de eje oscilante con una sola articulación	27
Figura 2.21. Montaje de una suspensión independiente multibrazo	27
Figura 2.22. Estructura de una suspensión independiente multibrazo montada en el eje delantero	28
Figura 2.23. Estructura de una suspensión independiente multibrazo montada en el eje	

trasero	28
Figura 2.24. Esquema de una suspensión independiente McPherson montada en el tren trasero	29
Figura 2.25. Esquema de una suspensión independiente McPherson con barra estabilizadora y brazo inferior	30
Figura 2.26. Estructura de una suspensión independiente de falsa McPherson con un triangulo inferior	31
Figura 2.27. Esquema de una suspensión independiente multibrazo montada en el tren delantero	32
Figura 2.28. Estructura de una suspensión pasiva	33
Figura 2.29. Esquema de una suspensión activa	34
Figura 2.30. Detalle del sistema de suspensión ABC del Mercedes SL.....	34
Figura 2.31. Estructura de una suspensión semiactiva	35
Figura 2.32. Sistema <i>Airmatic</i> del Mercedes clase E	36
Figura 2.33. Sistema Tour-C del Volvo 560 R.....	36
Figura 2.34. Sistema <i>Electronic Camping Control</i> de BMW	37
Figura 2.35. Vista en corte de un amortiguador magneto-reológico <i>Magnetic Ride</i> de Delphi	37
Figura 3.1. Esfuerzo de corte .vs. densidad de flujo magnético a alta velocidad de corte	41
Figura 3.2. Esfuerzo de corte .vs. velocidad de corte.....	41
Figura 3.3. Proceso evolutivo del efecto memoria	43
Figura 3.4 Proceso evolutivo de la estructura cristalina de las aleaciones durante el cambio de fase	43
Figura 3.5. Esfuerzo viscoso .vs. velocidad de deformación	45
Figura 3.6. Campo de velocidades en un fluido magnético provocado por un campo externo	47
Figura 3.7. Estructura de un amortiguador de vibraciones en aplicaciones industriales tipo Rheonetic.....	49
Figura 3.8. Disposición de los amortiguadores magneto-reológicos en una lavadora	49

Figura 3.9. Amortiguador sísmico magneto-reológico tipo Rheonetic	50
Figura 3.10. Disposición de los amortiguadores magneto-reológicos en un edificio	50
Figura 3.11 Disposición de los amortiguadores magneto-reológicos en un puente suspendido por cables	51
Figura 3.12. Estructura de un freno magneto-reológico.....	51
Figura 3.13. Estructura de un amortiguador magneto-reológico tipo Rheonetic diseñado para vehículos de trabajo pesado	52
Figura 3.14. Estructura de un amortiguador <i>Magnetic Ride</i> de Delphi.....	53
Figura 3.15. Estructura de un amortiguador magneto-reológico y comportamiento del fluido que circula por su interior	54
Figura 3.16. Montaje del sistema <i>Magnetic Ride</i> de Delphi en un Audi R8.....	55
Figura 3.17. Disposición de los dispositivos electrónicos en un Audi R8 con amortiguadores magneto-reológicos instalados.....	57
Figura 4.1. Chasis modelo NI PXI 1031DC.....	61
Figura 4.2. Módulo modelo NI PXI 6230	61
Figura 4.3. Módulo modelo NI PXI 4472B.....	62
Figura 4.4. Sensor de desplazamiento LVDT MTN/E.....	63
Figura 4.5. Plano de un sensor de desplazamiento LVDT MTN/E.....	64
Figura 4.6. Ubicación del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión izquierda	65
Figura 4.7. Ubicación del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión derecha.....	65
Figura 4.8. Linealidad del sensor de desplazamiento derecho	67
Figura 4.9. Linealidad del sensor de desplazamiento izquierdo.....	68
Figura 4.10. Amortiguador magneto-reológico RD 1005.3	69
Figura 4.11. Dispositivo controlador <i>kit-controller</i>	70
Figura 4.12. Ubicación del controlador de corriente del amortiguador magneto-reológico, <i>kit-controller</i>	72
Figura 4.13. Linealidad del dispositivo controlador <i>kit-controller</i>	74
Figura 4.14. Ejemplo de informe interactivo (Ventana <i>front panel</i>).....	77

Figura 4.15. Ejemplo de informe interactivo (Ventana <i>block diagram</i>)	77
Figura 4.16. Localización del asistente DAQ <i>Assistant</i> (<i>Data Acquisition with NI my DAQ</i>).....	78
Figura 4.17. Menú de selección del tipo de señal.....	78
Figura 4.18. Menú de selección de la tarjeta y el canal.....	78
Figura 4.19. Cuadro de ajustes del DAQ <i>Assistant</i>	79
Figura 4.20. Recta de conversión de tensión a desplazamiento	79
Figura 4.21. Definición gráfica de la adquisición de datos en el diagrama de bloques (<i>Block diagram</i>) del software LabVIEW	80
Figura 4.22. Definición gráfica de la generación de señal en el diagrama de bloques (<i>Block diagram</i>) del software LabVIEW	81
Figura 4.23. Definición gráfica de la generación de señal en el panel de control (<i>Control panel</i>) en el software LabVIEW	81
Figura 5.1. Ubicación del equipo controlador PXI.....	85
Figura 5.2. Ubicación de los dispositivos periféricos: pantalla, teclado y ratón.....	85
Figura 5.3. Esquema de las conexiones realizadas en el módulo PXI 6230	86
Figura 5.4. Esquema de las conexiones realizadas.....	88
Figura 6.1. Ensayo sobre terreno adoquinado	90
Figura 6.2. Esquema de los ensayos realizados sobre terreno adoquinado.....	91
Figura 6.3. Ensayo sobre escalón	91
Figura 6.4. Esquema de los ensayos realizados sobre escalón.....	92
Figura 6.5. Ensayo sobre badén.....	92
Figura 6.6. Esquema de los ensayos realizados sobre badén	93
Figura 7.1. <i>Power Spectral Density</i> de la señal original del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 0 V	96
Figura 7.2. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 0 V	97
Figura 7.3. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 1 V	98
Figura 7.4. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 2.5 V.....	98
Figura 7.5. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 5 V.....	99
Figura 7.6. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 0 V	100

Figura 7.7. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 1 V	100
Figura 7.8. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 2.5 V	101
Figura 7.9. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 5 V	101
Figura 7.10. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 0 V	102
Figura 7.11. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 1 V	103
Figura 7.12. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 2.5 V	103
Figura 7.13. Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 5 V	104
Figura 7.14. Estudio del ensayo sobre escalón a 0 V	105
Figura 7.15. Estudio del ensayo sobre escalón a 1 V	105
Figura 7.16. Estudio del ensayo sobre escalón a 2.5 V	106
Figura 7.17. Estudio del ensayo sobre escalón a 5 V	106
Figura 7.18. Estudio del ensayo sobre badén a 0 V.....	107
Figura 7.19. Estudio del ensayo sobre badén a 1 V.....	108
Figura 7.20. Estudio del ensayo sobre badén a 2.5 V.....	108
Figura 7.21. Estudio del ensayo sobre badén a 5 V.....	109
Figura A.1. Fuerza .vs. velocidad del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3....	117
Figura A.2. Vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3	118
Figura A.3. Curva facilitada por el fabricante del dispositivo controlador <i>kit-controller</i>	123

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1. Relación de la longitud con la carrera de desplazamiento de los sensores LVDT MTN/E	64
Tabla 4.2. Relación tensión .vs. desplazamiento de los datos obtenidos del sensor delantero derecho.....	67
Tabla 4.3. Relación tensión .vs. desplazamiento de los datos obtenidos del sensor delantero izquierdo	68
Tabla 4.4. Relación tensión .vs. intensidad del dispositivo controlador <i>kit-controller</i> ..	73
Tabla 7.1. Comparación de datos RMS para el terreno adoquinado a 20 km/h.....	99
Tabla 7.2. Comparación de datos RMS para el terreno adoquinado a 30 km/h.....	102
Tabla 7.3. Comparación de datos RMS para el terreno adoquinado a 40 km/h.....	104
Tabla 7.4. Comparación de datos RMS para escalón.....	107
Tabla 7.5. Comparación de datos RMS para badén	109
Tabla 7.6. Datos RMS correspondientes al amortiguador mangeto-reológico	109
Tabla A.1. Especificaciones técnicas del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3.....	116

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, una de las industrias más importantes de fabricación del mundo es la industria automovilística, siendo el vehículo automóvil un bien prácticamente indispensable para la sociedad en la que vivimos. Los distintos tipos de vehículos existentes se han desarrollado casi en su totalidad con el fin de transportar personas o cargas. Para evitar o minimizar las vibraciones y aceleraciones producidas por la interacción de estos vehículos con el entorno que les rodea, es indispensable que el transporte se realice en las mejores condiciones posibles tanto para los ocupantes y cargas como para el propio vehículo. El hecho de evitar o minimizar las vibraciones y

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

aceleraciones anteriormente indicadas produce un importante ahorro económico tanto en el mantenimiento del vehículo automóvil como en los embalajes especiales para proteger la carga transportada, además de provocar menor fatiga para los pasajeros, sean seres humanos o animales. Esta última consideración referente al confort toma especial importancia en el caso del conductor del vehículo automóvil, ya que, junto a la absorción de las irregularidades, adherencia, estabilidad y seguridad, es una de las principales misiones de un sistema de suspensión.

Mantener las mejores condiciones posibles durante el viaje es un objetivo encomendado al sistema de suspensión, que también debe cumplir otro requisito imprescindible: mantener el contacto entre los neumáticos del vehículo automóvil y el pavimento por el cual se circula. De esta función depende la posibilidad de controlar adecuadamente el vehículo automóvil. Por todo ello, el sistema de suspensión es de vital importancia en un vehículo automóvil.

Otro campo importante en el presente proyecto es el campo de la reología, y en especial el de los fluidos reológicos. Este tipo de fluidos son la base de las suspensiones reológicas, un campo novedoso en el que se han generado grandes inversiones en las últimas décadas. Este es el principal motivo por el que se ha desarrollado el presente proyecto, con el fin de estudiar el comportamiento dinámico de un vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basado en una amortiguación magneto-reológica. Todo ello permite una mejora considerable en las prestaciones dinámicas del vehículo automóvil así como un mayor confort y seguridad para los pasajeros que viajan en su interior.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Como se ha visto en el anterior apartado del presente proyecto, los sistemas de suspensión son indispensables para la seguridad vial. El sistema de suspensión de un vehículo automóvil, junto con el sistema de dirección y el sistema de frenos, tienen una característica que les diferencia de los demás sistemas: su rotura o funcionamiento

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

defectuoso hace peligrar de forma directa la seguridad de los pasajeros que viajan en su interior. Por ello, es indispensable mejorar los sistemas de suspensión existentes con el fin de absorber las irregularidades del terreno, aumentar la adherencia y estabilidad del vehículo automóvil y asegurar la seguridad y confort de los pasajeros que viajan en su interior.

El objetivo principal del presente proyecto es el estudio del comportamiento dinámico de un vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basado en una amortiguación magneto-reológica, en concreto el modelo RD-1005.3, fabricado y comercializado por la empresa alemana Lord. Las especificaciones de dicho amortiguador se encuentran en el Anexo A.2. El amortiguador objeto de estudio está instalado en la suspensión derecha del vehículo automóvil Peugeot 207, el cual se muestra en la figura 1.1, con el fin de valorar su comportamiento frente al de la amortiguación convencional de dicho vehículo. El estudio del presente proyecto se realiza para el área de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.



Figura 1.1: Peugeot 207

Es importante destacar que el amortiguador modelo RD 1005.3 empleado para la realización del presente proyecto es un amortiguador magneto-reológico que fue fabricado para la suspensión del asiento de un vehículo de gran tonelaje y que, por ello, ha sido adaptado para su instalación en el vehículo automóvil anteriormente comentado.

Con el fin de poder extraer conclusiones sobre la realización de este presente proyecto, se hace necesario tomar datos concluyentes de la realización de diversos

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

ensayos para los sistemas de amortiguación magneto-reológico y convencional. Para estudiar el comportamiento del vehículo automóvil ante distintos tipos de pavimentos, velocidades y tensiones suministradas al amortiguador magneto-reológico, es necesaria la utilización de diferentes programas. Para la adquisición, tratamiento y generación de los datos se ha empleado el software LabVIEW, en su versión 8.5, y para el procesado de datos se ha utilizado el programa de análisis MATLAB, en su versión 7.0.

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto consta de ocho capítulos siendo el capítulo uno la presente introducción.

En el capítulo 2, EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO, se describen tanto la evolución que ha sufrido el sistema de suspensión desde su creación como los diferentes elementos que lo componen. Por último, se hace una clasificación de los tipos de sistema de suspensión existentes, así como las características más importantes de cada uno de ellos.

En el capítulo 3, LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS, se realiza una introducción a los fluidos magneto-reológicos así como a los materiales inteligentes. Teniendo en cuenta que el presente proyecto se centra en los amortiguadores que portan fluidos magneto-reológicos en su interior, se explica sus aplicaciones actuales a la vez que se detallan sus ventajas e inconvenientes.

En el capítulo 4, EQUIPOS EMPLEADOS, se explican las principales características del software empleado para la captación, generación y tratamiento de datos así como las del hardware necesario para ello.

En el capítulo 5, INSTALACIÓN, ALIMENTACIÓN Y CONEXIONADO, se realiza una breve explicación de la colocación de los diferentes equipos dentro del

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto, así como la alimentación y conexionado de cada uno de ellos.

En el capítulo 6, DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS, se explican los ensayos realizados en el presente proyecto para la posterior adquisición y tratamiento de los datos obtenidos.

En el capítulo 7, RESULTADOS EXPERIMENTALES, se adjuntan los datos adquiridos en los ensayos realizados en el presente proyecto, así como su posterior procesamiento.

En el capítulo 8, CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS, se realiza una breve conclusión de los datos y resultados obtenidos en el presente proyecto, al igual que se exponen los futuros desarrollos propuestos.

En el anexo A, ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS, se adjuntan las especificaciones tanto del amortiguador magneto-reológico empleado como de los elementos utilizados para la adquisición de datos.

CAPÍTULO 2

EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHICULO

2.1 FUNCIONES DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

Se llama “sistema de suspensión” al sistema mecánico que soporta la masa suspendida de un vehículo, aislando a esta de las vibraciones procedentes del pavimento. Por tanto, “absorber” las rugosidades del terreno sobre el que es desplazado el vehículo es la principal función del sistema de suspensión, manteniendo las cuatro ruedas en permanente contacto con el pavimento, asegurando un buen nivel de seguridad y de bienestar a los ocupantes del vehículo y resguardando el resto de elementos del vehículo y las cargas que este transporta. En general, se debe mantener un

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

cierto grado de confort ante las irregularidades del asfalto pero también contener los movimientos oscilatorios de la carrocería, manteniendo así la estabilidad [1, 2, 3].

La correcta absorción de las reacciones que provocan las vibraciones del pavimento se consigue mediante la acción combinada entre los neumáticos, la elasticidad de los asientos y el sistema de suspensión, como se puede observar en la figura 2.1 [4].



Figura 2.1: Esquema de la amortiguación de un vehículo automóvil

Para resumir las funciones del sistema de suspensión de un vehículo, se considera este como un conjunto de elementos elásticos capaces de proporcionar [2, 3, 5]:

1. Protección a los elementos del vehículo, independientemente de las condiciones de utilización de este y del estado del pavimento.
2. Estabilidad del vehículo, independientemente del radio de viraje, de los desniveles de la ruta, de los obstáculos, etc.
3. Confort a los pasajeros del vehículo y protección de las cargas o mercancías transportadas por este, reduciendo al máximo posible todos los movimientos de la masa suspendida, ya sean angulares, longitudinales, transversales o verticales.

Otras funciones secundarias del sistema de suspensión del vehículo son [4]:

- Transmitir fuerzas de aceleración y de frenado entre el bastidor y los ejes del vehículo.
- Aguantar la carga del vehículo.

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

- Resistir los pares de frenado y de tracción.
- Resistir los efectos negativos en las curvas.
- Mantener el ángulo de dirección en todo el recorrido.
- Asegurar el constante paralelismo entre la perpendicularidad del bastidor y los ejes.

Para comprender el funcionamiento del sistema de suspensión de un vehículo se debe descomponer el peso de este en dos partes: “masa suspendida” y “masa no suspendida” [1].

Se llama “masa suspendida” a la masa que agrupa todos los elementos del vehículo cuyo peso lo soporta el chasis o bastidor. La “masa no suspendida” es la que incluye aquellos elementos que quedan por debajo de la masa suspendida. Una masa no suspendida de valor elevado tiene una muy mala influencia sobre el comportamiento direccional del vehículo, es preferible el aumento de la masa suspendida antes que la no suspendida. Enlazar los elementos anteriormente nombrados es el objeto del sistema de suspensión.

Se clasifica, por tanto, los distintos pesos del sistema de suspensión como [5]:

1. Masas suspendidas: Carga, carrocería, chasis, grupo motor, pasajeros, etc.
2. Masas no suspendidas: Trenes rodantes (ejes, ruedas, etc.). Si se tiene en cuenta la acción elástica de los neumáticos del vehículo, se llaman también “masas semisuspendidas”.
3. Órganos de enlace: Dirección, parte de la transmisión, suspensión, etc. Por una parte enlazado al chasis o a lo que haga sus veces y por otra a los trenes rodantes.

2.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Para una mejor comprensión de los elementos básicos del sistema de suspensión de un vehículo, se dividirán estos en cuatro grandes grupos [3, 6]:

- Elementos elásticos: formado por muelles helicoidales, ballestas, barras de torsión, etc.
- Elementos de amortiguación.
- Elementos constructivos: donde destacan los *silentblocks*, brazos o rótulas.
- Elementos de mejora del comportamiento de la suspensión: como son las barras estabilizadoras, los tirantes de reacción, etc.

2.2.1 ELEMENTOS ELÁSTICOS

Los elementos elásticos son los encargados de absorber o almacenar la energía. Sus principales funciones son mejorar el confort con el fin de impedir que las irregularidades del terreno sean transmitidas a la carrocería, permitir el desplazamiento relativo entre el bastidor y las ruedas y soportar el peso del vehículo [4, 6]:

2.2.1.1 BALLESTAS

Las ballestas están formadas por una serie de láminas de acero con altas propiedades resistentes y elásticas. Su estructura queda representada en la figura 2.2 [1, 3, 4, 6].

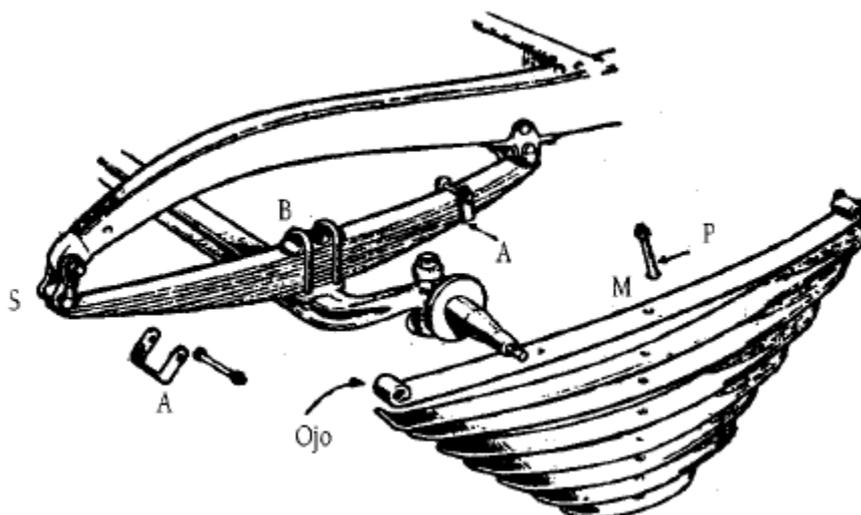


Figura 2.2: Estructura de las ballestas del sistema de suspensión

La ballesta tiende a colocarse recta debido a la absorción de las oscilaciones provocadas por las irregularidades del terreno. La “hoja maestra” es la primera lámina de acero de la estructura y por tanto, por la disposición que se observa en la figura 2.2 es también la de mayor longitud. Esta lámina termina en dos curvaturas formando lo que se llama el “ojo”, a través del cual se articula el larguero por la mediación de los casquillos. La segunda hoja en ocasiones tiene la misma longitud que la anterior, pero el resto de ellas van disminuyendo sus longitudes y aumentando su forma curvada. Como se puede observar en la figura 2.2, las hojas quedan apretadas unas con otras a partir del perno capuchino (P), para asegurar la alineación de estas, evitando abrirse en forma de abanico, y ayudándose con las abrazaderas (A). La fijación de las ballestas al eje se realiza por medio de las bridas (B), sujetas con tuercas y en un pequeño ensanchamiento denominado “patín”. Aunque se rompa alguna lámina, la ballesta posee la capacidad de mantener su correcto funcionamiento.

Las ballestas del eje delantero suelen ser más duras (menos flexibles) que las ballestas del eje trasero, ya que deben evitar el cabeceo durante la marcha. Así, absorben bruscamente los esfuerzos y son más propensas a la rotura de sus hojas. Por todo ello, es indispensable un correcto engrase de las hojas de las ballestas del sistema de suspensión.

2.2.1.2 MUELLES HELICOIDALES

En los vehículos automóviles modernos, los muelles helicoidales son los que sustituyen a las ballestas, debido a que son más efectivos y tienen menor tamaño. Así, las ventajas que presentan en las suspensiones independientes son: escaso mantenimiento, poco peso y resistencia a la corrosión. Como se puede observar en la figura 2.3, los muelles helicoidales (R) son colocados de forma vertical entre los largueros del bastidor. Las bielas de empuje (B) fijan el eje trasero respecto al bastidor mediante un travesaño (T). Por otro lado, los amortiguadores (A) y la barra de torsión (E) sirven para mejorar el comportamiento de los muelles helicoidales [1, 4, 6].

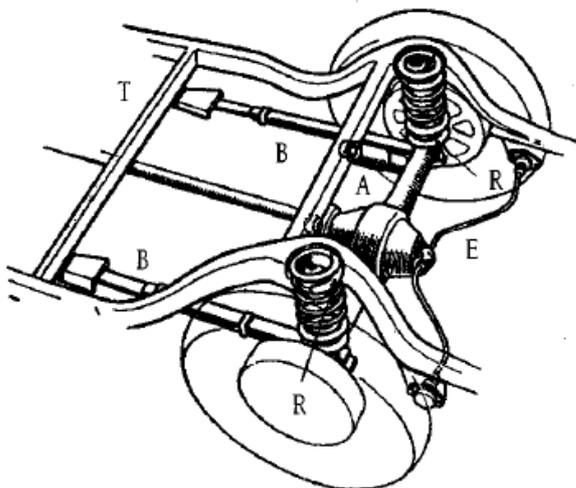


Figura 2.3: Disposición de los muelles helicoidales

El diámetro de los muelles helicoidales varía según sea el esfuerzo que deba ser soportado. Por otro lado, su elasticidad es función de varios factores: diámetro del muelle, diámetro de la espira, propiedades del material y número de espiras. El par de espiras de los extremos facilitan el montaje.

2.2.1.3 BARRAS DE TORSIÓN

Las barras de torsión se basan en el principio de que si una varilla de acero elástico, sujeta por uno de sus extremos, se ve sometida a un esfuerzo de torsión en el otro extremo, esta varilla tiende a retorcerse, volviendo a su forma primitiva por su

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

elasticidad al cesar dicho esfuerzo de torsión. La figura 2.4 muestra el esquema de una barra de torsión [1, 4].



Figura 2.4: Esquema de una barra de torsión

El montaje de este tipo de barras sobre el vehículo se realiza fijando uno de sus extremos a la carrocería o al chasis, para que no pueda girar en su soporte, y en el otro se coloca una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda (ver figura 2.6). La palanca sube o baja por efecto de las irregularidades del terreno, produciendo en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda.

Como se observa en la figura 2.5, las barras de torsión se pueden disponer paralelamente al eje longitudinal del bastidor (montaje longitudinal) o también transversalmente a lo largo del bastidor (montaje transversal).

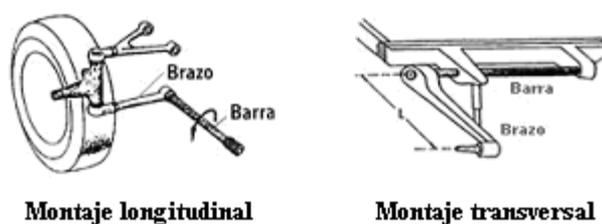


Figura 2.5: Disposición y montaje de las barras de torsión

A mayor longitud de dicha barra de torsión, mayor giro podrá soportar, pero hay que evitar la deformación permanente que se produciría en ella si el esfuerzo a soportar fuese superior al límite de elasticidad que presenta el material [1, 4].

2.2.2 ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN

Los elementos de amortiguación soportan la disminución de la amplitud y el número de oscilaciones de los elementos elásticos, son mucho más delicados que estos y van posicionados en las proximidades de las ruedas del vehículo [1, 2, 3, 4].

Partiendo del paso de una rueda sobre un obstáculo, ya se ha explicado que los elementos elásticos son comprimidos para evitar que el bastidor se levante excesivamente, pero al recobrar su posición inicial, se “dispara” por la energía que se ha almacenado durante la flexión. Son ese excesivo rebote y las posteriores oscilaciones provocadas por el intento del muelle de volver a su posición de equilibrio los que sacuden la carrocería y disminuyen el confort en el interior del vehículo.

Aquí es cuando tiene lugar la actuación de los amortiguadores, ya que frenan prácticamente en su totalidad el movimiento de separación de los elementos elásticos. Si frena en un único sentido se denomina de “simple efecto” y si lo realiza en ambos sentidos, de “doble efecto”. El amortiguador de “doble efecto” es necesario para evitar el excesivo riesgo de rotura que se produce cuando la rueda se desequilibra al sobrepasar el obstáculo, ya que cae encima de la carrocería y aplasta los elementos elásticos.

Los amortiguadores se pueden clasificar en dos grandes grupos: los amortiguadores de fricción y los amortiguadores telescópicos.

2.2.2.1 AMORTIGUADORES DE FRICCIÓN

Los amortiguadores de fricción tienen ya muy poco uso, están formados por dos brazos que se sujetan al bastidor (ver figura 2.6) y al eje o a la rueda, respectivamente [1].

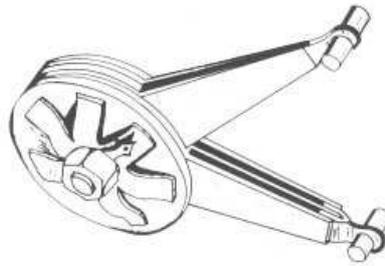


Figura 2.6: Amortiguadores de fricción

Cada brazo posee láminas de acero alrededor de un eje común y los discos de fricción están intercalados entre las láminas. Al actuar los elementos elásticos, los brazos del amortiguador se van abriendo o cerrando como una tijera y los discos frenan las oscilaciones producidas. Una vez reglados los amortiguadores sólo se tocan para ajustarlos cada cierto tiempo.

En resumen, los amortiguadores de fricción basan su funcionamiento en la pérdida de calor producida por rozamiento de los discos de fricción. Las oscilaciones del elemento elástico hacen que pueda existir un frotamiento entre los discos y que así se produzca el frenado.

Los inconvenientes que presentan frente a los amortiguadores telescópicos que se presentarán a continuación son: alto desgaste, cambio necesario periódicamente y que la fuerza amortiguadora no aumenta con la velocidad.

2.2.2.2 AMORTIGUADORES TELESCÓPICOS

Los amortiguadores telescópicos son los más utilizados en la industria y poseen la característica de que en ellos la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad. Su funcionamiento se basa en que en su interior un pistón trabaja dentro de un cilindro sumergido en aceite. Sobre el pistón se encuentran una serie de orificios y válvulas precomprimidas para permitir el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un determinado valor. Los orificios fijos representan el paso permanente y restringen el flujo del caudal. Por otro lado, las válvulas representan el paso de apertura por presión y, para que estas se abran, es necesario ejercer sobre ellas

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

una determinada presión. Dentro de los amortiguadores telescópicos se pueden encontrar los amortiguadores monotubo y bitubo [1, 2, 4, 6].

Los amortiguadores telescópicos deben ser reglados debido a los incrementos de temperatura que se producen en ellos y que varían la viscosidad del líquido que utilizan, provocando que al arrancar el vehículo, como se encuentra a menor temperatura, el líquido está denso y fluye con dificultad, la suspensión en ese momento es dura. Por el contrario, al llevar mucho tiempo circulando, se calienta y se hace más fluido, ablandando la suspensión. Esto se soluciona con un termostato que, dilatándose o no con el calor, abre o cierra el orificio de paso. En las figuras 2.7 y 2.8 se pueden observar los dos tipos de flujo de aceite anteriormente comentados.

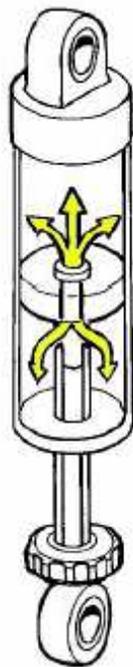


Figura 2.7: Flujo de aceite a través del peso permanente

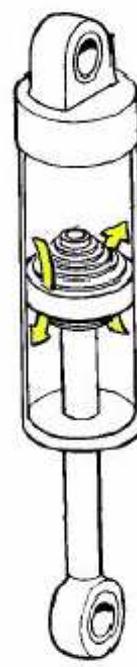


Figura 2.8: Flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión

En un pavimento poco uniforme y en circulaciones con altas velocidades se requieren suspensiones duras. Existen también sistemas reguladores de amortiguadores que, mediante tele-reglajes, dan la posibilidad al conductor de regular la suspensión. El tele-reglaje consiste en el aumento de la presión del líquido que actúa sobre los discos explicados con anterioridad, apretándolos más entre ellos para endurecer la suspensión. También se puede utilizar un mando mecánico con una aguja girando, dejando más o

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

menos paso al líquido. En terrenos muy difíciles es adecuado utilizar amortiguadores de gas ya que el líquido se calienta formando burbujas que empeoran el funcionamiento. [1, 2, 4, 6].

A continuación se detallarán dos tipos de amortiguadores telescópicos, los amortiguadores bitubo y los monotubo.

2.2.2.2.1 AMORTIGUADORES BITUBO

Dentro de ellos se distingue entre los presurizados, con gas y aceite, y los no presurizados, que solamente contienen aceite. Están formados por dos cámaras, la de interior y la de reserva (véase figura 2.9), y además también poseen válvulas tanto en la base del amortiguador, llamada válvula de pie, como en el pistón [1, 2, 4, 6].

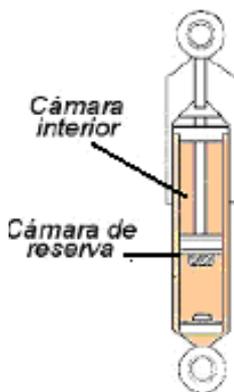


Figura 2.9: Esquema simplificado de un amortiguador bitubo

Como se puede observar en la figura 2.10, los amortiguadores bitubo presentan dos tubos concéntricos (B) y (C) a través de los que pasa el vástago (H) unido al bastidor por el anillo (D). El vástago tiene su fin en un pistón (J) con orificios calibrados dentro del tubo (B) finalizando en la tapa (M) con los mismos agujeros y permitiendo el paso (A) entre (B) y (C). Cabe destacar que el amortiguador se une por (N) al eje o la rueda

A partir de las cámaras formadas (G), (K) y (L), se produce la amortiguación de la compresión de los muelles de la suspensión. Esto se consigue con el paso del líquido por los orificios (J) y (M), frenando así el movimiento.

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

Las ventajas que presentan los amortiguadores bitubo respecto a los amortiguadores monotubos son: el gas no queda estancado, menores costes, mayores tolerancias de fabricación, menos espacio y sistema de válvulas menos complejo.

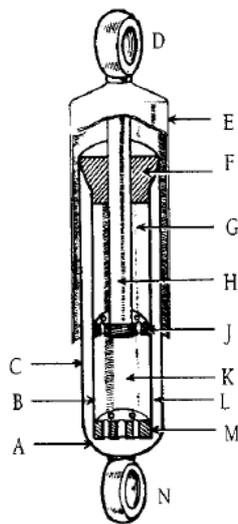


Figura 2.10: Estructura de un amortiguador bitubo

2.2.2.2 AMORTIGUADORES MONOTUBO

Se utilizan sobre todo en vehículos de alta gama o de competición. Como se puede observar en la figura 2.11, poseen dos cámaras separadas por un pistón flotante que contienen gas a presión y aceite, respectivamente. La acción de ambos fluidos permite el amortiguamiento correcto [1, 2, 4, 6].

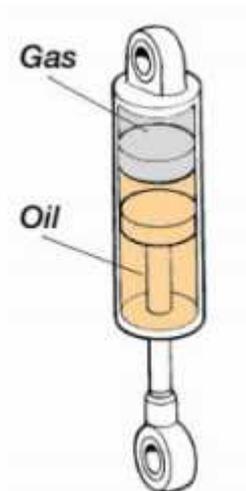


Figura 2.11: Esquema simplificado de un amortiguador monotubo

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

Las ventajas que presentan los amortiguadores monotubo frente a los amortiguadores bitubo son: mejor refrigeración, reducción de las presiones por su mayor diámetro y la no restricción de la posición de montaje del pistón separador.

2.2.3 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Los elementos constructivos más importantes son los denominados casquillos o *silentblocks*, elementos de goma vulcanizada utilizados para unir las suspensiones al chasis para que ninguna pieza móvil metálica se encuentre en contacto. Los casquillos deben conseguir un buen aislamiento y permitir que las suspensiones trabajen adecuadamente. Sus ventajas son el buen mantenimiento y una buena amortiguación propia. Por otro lado, como inconvenientes presentan su sensibilidad a la temperatura, a los productos químicos, al aceite y a las inclemencias del tiempo. En la figura 2.12 se puede observar un ejemplo de casquillo en un sistema de suspensión delantera [4, 6].

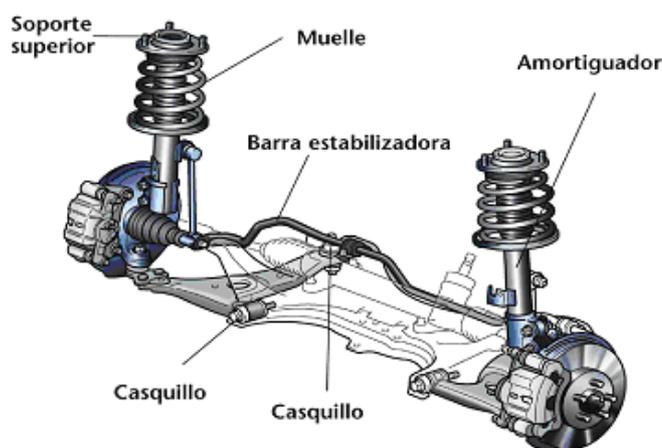


Figura 2.12: Ejemplo de casquillo en una suspensión delantera

2.2.4 ELEMENTOS DE MEJORA

2.2.4.1 BARRAS ESTABILIZADORAS

Las barras estabilizadoras se pueden encontrar tanto en el eje delantero de vehículo, como en el trasero, como en ambos, y su objetivo es la contención del balanceo de la

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

carrocería de dicho vehículo debido a la fuerza centrífuga existente al tomar una curva [1, 4, 6].

Las barras estabilizadoras están compuestas por una barra de acero elástico apoyada por sus extremos en los manguitos tubulares de los largueros del bastidor. Las bielas, fijadas en los extremos, se articulan sobre los ejes de las ruedas del vehículo.

La estabilización de la carrocería se produce cuando la barra es retorcida por las bielas, estando estas girando en sentido opuesto y conteniendo la inclinación que se produce mediante su esfuerzo de torsión.

Se les llama “barras antibalanceo” porque pueden evitar las oscilaciones laterales cuando se circula en línea recta. Se debe destacar que las bielas pueden suprimirse si se da a la barra una forma de U como se observa en la figura 2.13 [1, 4, 6].

Si se coloca longitudinalmente, su función es regular los desplazamientos entre las masas suspendida y no suspendida ante los esfuerzos que puedan presentar.



Figura 2.13: Barra estabilizadora en forma de U

2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Existen diversas formas de clasificar los distintos sistemas de suspensión: según la geometría de los elementos de suspensión, según el sistema de control que los rige, o según los elementos amortiguadores que lo componen. Como las dos primeras clasificaciones son las más completas, serán las que se desarrollarán a continuación [3].

2.3.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN LA GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN

La clasificación de los sistemas de suspensión a partir de la geometría de los elementos se centrará en tres grupos. El primero de ellos recoge los sistemas de suspensión rígidos, el segundo los semirígidos y el tercero las independientes. A continuación se detallarán cada uno de ellos [1, 2, 3, 4].

2.3.1.1 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN RÍGIDOS

Los sistemas de suspensión rígidos se caracterizan en que la unión de las ruedas se lleva a cabo mediante un eje rígido. En la figura 2.14 se puede observar la estructura que presentan y los elementos de los que está formado [1, 2, 3, 4].

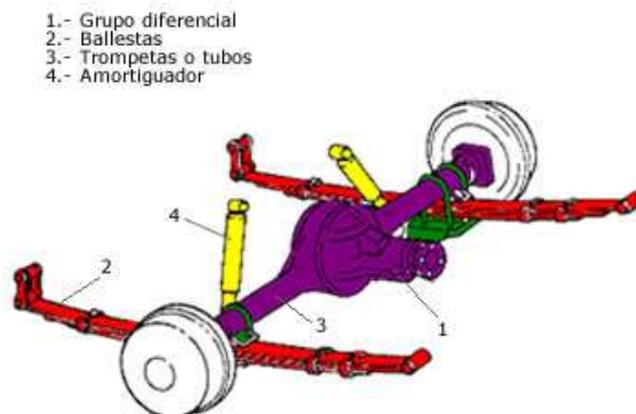


Figura 2.14: Componentes de un sistema de suspensión rígido

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

El diseño de este tipo de sistema de suspensión es relativamente sencillo por lo que reduce significativamente los costes y además, los ángulos de avance y caída no varían de forma ostensible. Por el contrario, las suspensiones rígidas presentan los problemas de transmitir las vibraciones originadas por las irregularidades del pavimento de una rueda a otra y de aumentar el peso de las masas no suspendidas por los pesos del grupo cónico diferencial en los vehículos de tracción trasera y el propio eje rígido; disminuyendo el confort y la seguridad de los pasajeros. Los sistemas de suspensión rígidos son utilizados en vehículos industriales tales como los camiones, vehículos 4x4, autobuses, etc.

2.3.1.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN SEMIRÍGIDOS

Los sistemas de suspensión semirígidos se encuentran a medio camino entre los sistemas de suspensión rígidos y los independientes, ya que, aunque las ruedas siguen estando unidas mediante un eje rígido de forma similar a los sistemas de suspensión rígidos, las oscilaciones producidas por las irregularidades del pavimento son transmitidas parcialmente [1, 2, 3, 4].

Existen dos tipos de sistemas de suspensión semirígidos:

- Suspensión con “eje torsional”

El sistema de suspensión semirígido con “eje torsional” permite una cierta deformación angular cuando la rueda supera un obstáculo y permitiendo volver posteriormente a su estado inicial.

Este tipo de suspensiones se presentan sobretudo en las suspensiones traseras en vehículos con tracción delantera y, en particular, en vehículos de baja o media gama. El tubo anteriormente nombrado está unido a dos brazos longitudinales que van a las propias ruedas. En la figura 2.15 se puede observar la vista trasera de este tipo de suspensión un vehículo.



Figura 2.15: Vista trasera de una suspensión semirígida de eje torsional en un vehículo

- Suspensión con “eje de Dion”

Las ruedas se unen a partir de soportes articulados al grupo diferencial y el denominado “eje de Dion” es anclado al bastidor puesto que forma parte de la masa suspendida. Así, el giro de las ruedas puede ser transmitido por los dos semiejes o palieres, como también ocurre en el tipo de suspensiones independientes. El anclaje de las ruedas se produce rígidamente por el tubo de Dion, este las une permitiendo de forma limitada unos deslizamientos longitudinales a partir de unos brazos longitudinales, es decir, estos brazos limitan los desplazamientos en una cierta dirección. La ventaja frente al tipo de suspensión rígida son: menor masa no suspendida por el poco peso del tubo del eje de Dion y buen mantenimiento de los parámetros de la rueda gracias a este. En la figura 2.16 se puede observar la estructura de las suspensiones semirígidas de eje de Dion.

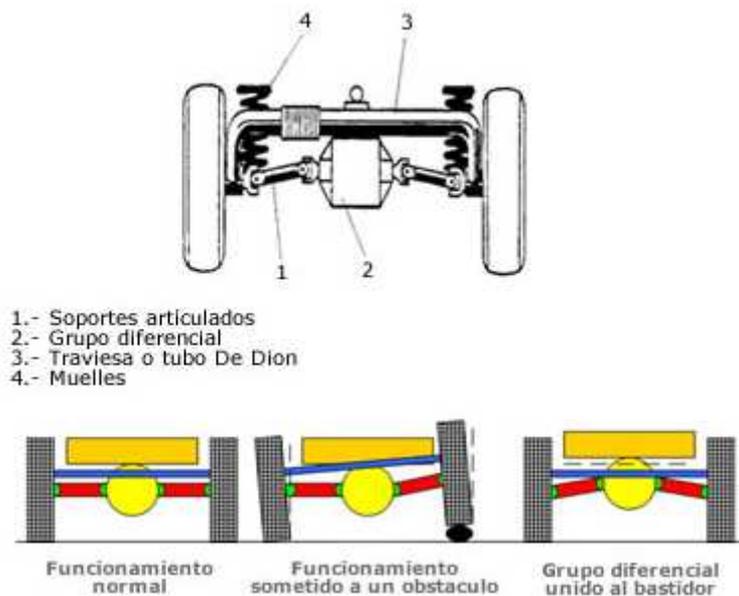


Figura 2.16: Estructura de una suspensión semirígida de eje de Dion

2.3.1.3 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN INDEPENDIENTES

En los sistemas de suspensión independientes las ruedas constan de una suspensión totalmente independiente para cada una de ellas, por tanto, las oscilaciones por las irregularidades del pavimento también se transmiten de forma independiente a cada una, mejorando así el confort y la estabilidad [1, 2, 3, 4].

La masa no suspendida es menor y por ello el chasis recibe menos esfuerzos a soportar, pero puede ser peligroso si el vehículo lleva grandes cargas. Es un tipo de suspensión muy usada en las ruedas directrices, por ello, se deben tener mínimos incrementos de caída de rueda y ancho de estas para obtener una segura dirección, por lo que hay que prestar mucha atención al diseño de este tipo de suspensiones.

Como desventajas añadidas a las ya comentadas, hay que destacar el alto grado de complejidad del conjunto y el gran coste que suponen.

A continuación, se explicarán los tipos de suspensiones independientes más importantes:

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

- Suspensión de brazos arrastrados o tirados

Consta de dos brazos, que sirven de soporte, colocados longitudinalmente expuestos y unidos por un extremo a la mangueta de la rueda y por el otro al bastidor del vehículo [1, 2, 3, 4].

Como se puede observar en la figura 2.17, los ya comentados brazos longitudinales provocan mínimas variaciones de avance, de caída y de vía de las ruedas, ya que pivotan sobre un eje de giro perpendicular al plano longitudinal del vehículo.



Figura 2.17: Esquema de una suspensión independiente de brazos arrastrados o tirados

También existe un sistema de suspensión de brazos semi-arrastrados, donde dichos brazos tienen componentes longitudinales y se pueden evitar los estabilizadores en esa dirección. Esta disposición da mayor estabilidad al vehículo puesto que permite variar en el transcurso de la marcha el avance y la caída de los muelles, ya que las variaciones de caída y de vía dependen directamente de la posición e inclinación de los brazos longitudinales.

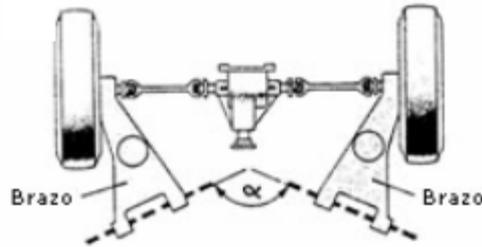


Figura 2.18: Esquema de una suspensión independiente de brazos semi-arrastrados o semi-tirados

En ocasiones se añaden barras de torsión a la suspensión de brazos arrastrados o tirados, montadas transversalmente al eje longitudinal del vehículo.

- Suspensión de eje oscilante

El elemento de rodadura que se observa en la figura 2.19 y el semieje se encuentran solidarios, lo que permite que el conjunto oscile gracias a una articulación en el plano medio longitudinal del vehículo. El problema que conlleva este tipo de suspensión es su inutilidad como eje directriz ya que se alteraría la caída de las ruedas en el movimiento de oscilación de los semiejes cuando el vehículo tomase las curvas [1, 2, 3, 4].

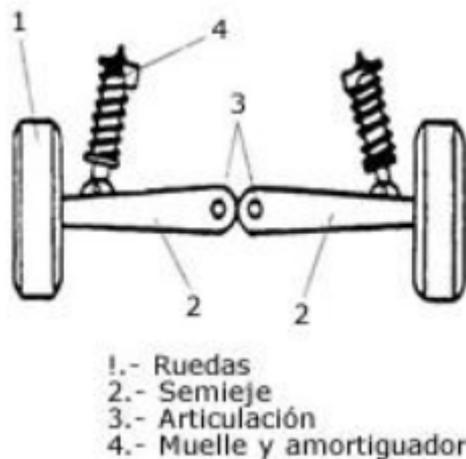


Figura 2.19: Estructura de una suspensión independiente de eje oscilante

Existe una variante que presenta una sola articulación, así, el pivote de giro está a mejor altura que en la otra opción anteriormente explicada. En este caso un palier se mueve por la articulación, permitiendo un desplazamiento axial en el árbol de

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

El sistema multibrazo permite por tanto modificar las dinámicas longitudinales y transversales para conseguir mayor confort y estabilidad direccional. Se clasifican según:

- Si tienen brazos de guía longitudinales parecidos a los sistemas de suspensión de ruedas tiradas por brazos longitudinales.
- Si tienen elementos de guía oblicuos o transversales parecidos a los sistemas de suspensión de paralelo deformable.

En las figuras 2.22 y 2.23 se pueden comparar las diferentes configuraciones que presentan los sistemas de suspensión multibrazo en el tren delantero respecto al tren trasero.

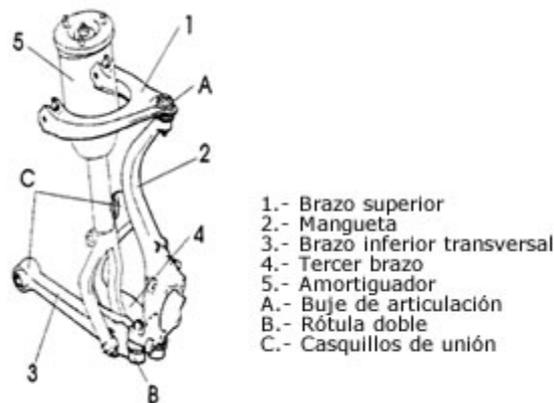


Figura 2.22: Estructura de una suspensión independiente multibrazo montada en el eje delantero

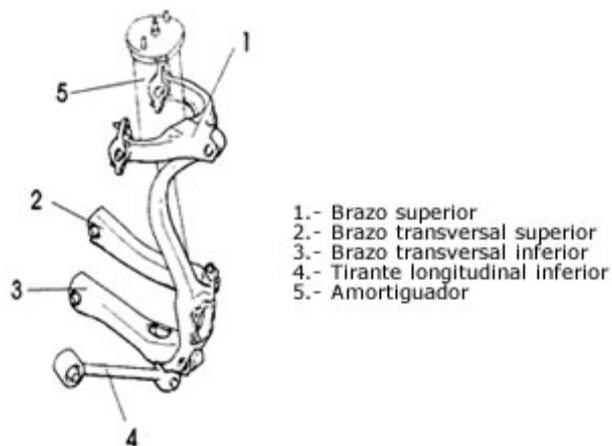


Figura 2.23: Estructura de una suspensión independiente multibrazo montada en el eje trasero

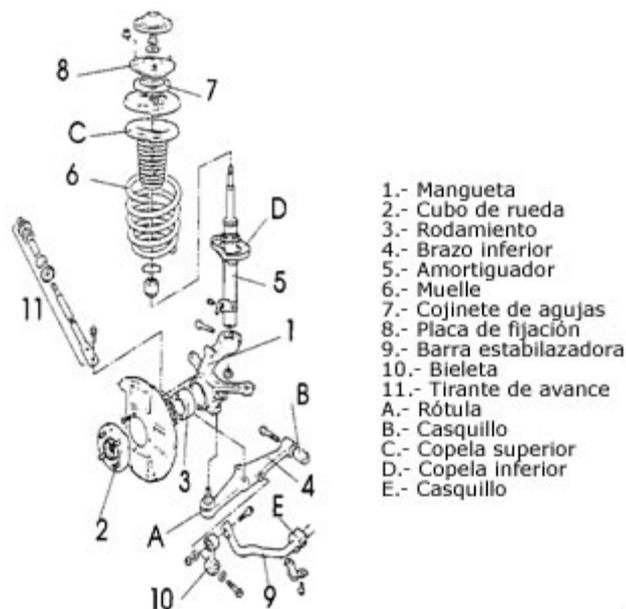


Figura 2.25: Estructura de una suspensión independiente McPherson con barra estabilizadora y brazo inferior

Las ventajas del sistema de suspensión McPherson son: facilidad de fabricación, bajo coste de producción, poco espacio, disminución el consumo de combustible, bajo mantenimiento, etc.

Como desventaja, los elementos de la carrocería deben soportar los grandes los esfuerzos transmitidos por este tipo de suspensión, por ello, deben ser materiales muy resistentes en las fijaciones de los muelles y amortiguadores [1, 2, 3, 4].

Los sistemas de “falsa McPherson” sustituyen el tirante inferior por un triángulo inferior, como se observa en la figura 2.26, utilizando el amortiguador como elemento de guía y manteniendo la estructura de un triángulo articulado. Presentan la ventaja de absorber los esfuerzos longitudinales con el propio anclaje del elemento sustitutivo del brazo inferior.

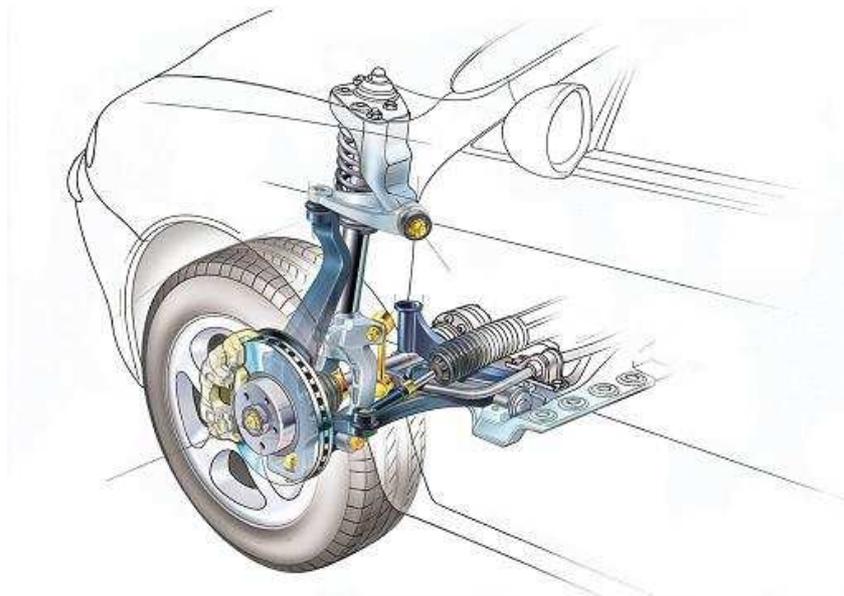


Figura 2.27: Esquema de una suspensión independiente multibrazo montada en el tren delantero

2.3.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL SISTEMA DE CONTROL DE LA SUSPENSIÓN

Actualmente, la clasificación de los sistemas de suspensión a partir del sistema de control que los rige engloba tres grandes grupos: sistema de suspensión pasiva, sistema de suspensión activa y sistema de suspensión semiactiva. A continuación se detallará cada uno de ellos [1, 2, 3, 4].

2.3.2.1 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN PASIVA

Los sistemas de suspensión pasiva están formados por elementos que no aportan energía al sistema, estos elementos son los elementos elásticos y los amortiguadores. Son los sistemas perfectos de cara a la comodidad de los pasajeros y tienen el menor coste de los tres tipos. Aún así, presentan una gran desventaja, aumentar el nivel de confort afecta negativamente a la estabilidad del vehículo, debido a que una suspensión blanda da lugar a mayor balanceo y la masa suspendida se desplaza más. Además, este tipo de suspensión no permite su regulación, por tanto, no se consigue un correcto funcionamiento en terrenos con distintas características a las que fue diseñado. Por

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

tanto, para asegurar la seguridad de estos será necesaria la instalación de suspensiones rígidas. Se utiliza sobretodo en vehículos de pequeño o medio tamaño. En la figura 2.28 puede observarse la estructura de este tipo de suspensión [1, 2, 3, 4].

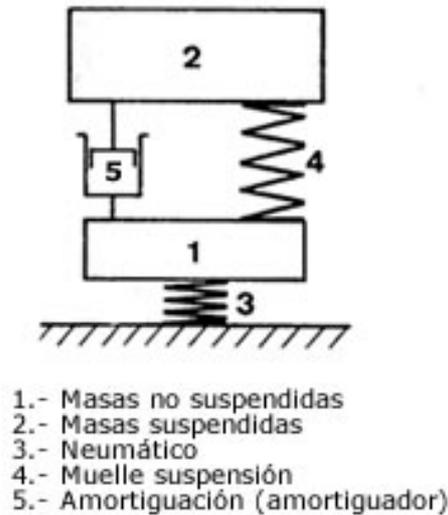


Figura 2.28: Estructura de una suspensión pasiva

2.3.2.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN ACTIVA

Los sistemas de suspensión activa logran mayor grado de exigencia de la suspensión, obteniendo así mayor confort y seguridad simultáneamente. El sistema debe ser regulable para así poder actuar sobre cada rueda de forma inmediata, también debe asegurar que los neumáticos estén siempre en contacto con el pavimento, eliminando los fenómenos de balanceo y cabeceo [1, 2, 3, 4].

Mediante un actuador este sistema puede adaptarse a las condiciones de pavimentos distintos al almacenar, disipar e introducir energía en el mismo, esto requiere de un ordenador para indicar la velocidad en la cual debe circular el vehículo mediante sensores instalados en este. Con todo ello, se consigue un control independiente de cada una de las ruedas del vehículo automóvil y así, mayor adherencia y seguridad, aunque también conllevan un alto coste. En la figura 2.29 puede observarse la estructura de este tipo de suspensión.

2.3.2.3 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

Los sistemas de suspensión semiactiva son los más utilizados actualmente, ya que permiten el control tanto de las bajas frecuencias de los elementos activos como de las altas frecuencias de los elementos pasivos. Tienen la capacidad de permitir la modificación del comportamiento de los elementos del propio sistema de suspensión. En la figura 2.31 puede observarse la estructura de este tipo de suspensión [1, 2, 3, 4].

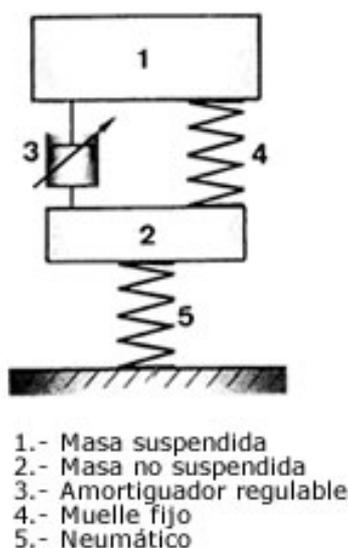


Figura 2.31: Estructura de una suspensión semiactiva

Gracias a la posibilidad de modificar la rigidez, las suspensiones semiactivas ofrecen la posibilidad de seleccionar la firmeza de la suspensión y ajustarla automáticamente según las condiciones del terreno por el que se circula, además de ajustar la marcha y optimizar el rendimiento en la conducción y en el confort.

A continuación, se explicarán brevemente varios sistemas de suspensión semiactiva que han desarrollado distintas marcas de vehículos [2, 3, 4]:

- El sistema *Airmatic Dual Control* de Mercedes-Benz (Figura 2.32), el cual actúa sobre la rigidez del amortiguador y de los elementos elásticos. En una conducción normal, los elementos elásticos funcionan con un valor máximo de volumen de aire, ofreciendo una amortiguación blanda. Cuando el sistema

CAPÍTULO 2: EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN EN UN VEHÍCULO

detecta grandes oscilaciones en el terreno, los elementos elásticos prescinden de aire para endurecerse y adaptarse a ellas.

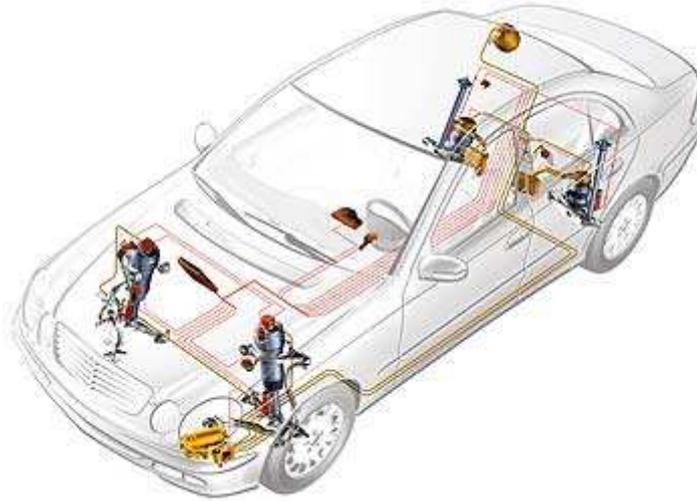


Figura 2.32: Sistema *Airmatic* del Mercedes clase E

- El sistema Four-C (*Continuously Controlled Chassis Concept*) de Volvo (Figura 2.33), es una amortiguación regulable electrónicamente mediante la tecnología Öhlins y que posee la capacidad de variar de forma muy rápida la dureza de cada uno de los amortiguadores.



Figura 2.33: Sistema *Tour-C* del Volvo S60 R

- El sistema *Electronic Camping Control* de BMW (Figura 2.34), el cual permite variar la flexibilidad de los amortiguadores de forma continua, logrando así mayor equilibrio entre comodidad y confort.



Figura 2.34: Sistema *Electronic Camping Control* de BMW

- El sistema CATS (*Computer Active Technology Suspensión*) de Jaguar, el cual posee la capacidad de ajustar automáticamente de la dureza de los amortiguadores mediante una regulación electrónica según una señal sensorial.

Los primeros amortiguadores semiactivos que se fabricaron basaban su funcionamiento en electroválvulas, pero surgió la necesidad de buscar alternativas puesto que tenían un alto tiempo de respuesta. El futuro de este tipo de sistemas está en los amortiguadores magneto-reológicos, como el que lleva instalado el vehículo automóvil del presente proyecto, ya que permiten variar la viscosidad en poco tiempo para cambiar así la dureza del propio amortiguador. En la figura 2.35 se muestra una vista en corte de este tipo de amortiguadores.



Figura 2.35: Vista en corte de un amortiguador magneto-reológico *Magnetic Ride* de Delphi

CAPÍTULO 3

LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

El término “reología” fue creado por los catedráticos Eugene Cook Bingham y Markus Reiner en el año 1929 y, se refiere a la ciencia que atiende al estudio de la deformación de los materiales, que no obedecen a las leyes de viscosidad de Newton y de Hooke, sometidos a sollicitaciones externas, normalmente un campo de tipo eléctrico o magnético. En la actualidad, la reología es un ámbito muy importante en las industrias de alimentación, lubricantes, pinturas o plásticas [8, 9, 10].

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

El origen de la reología se produce a mediados del siglo XVII cuando se dan a conocer las teorías acerca de los fluidos viscosos ideales y del sólido elástico, respectivamente. En el año 1687 Isaac Newton define el líquido viscoso, posteriormente denominado “fluido newtoniano”, explicando que la energía que se suministra a un sistema se disipa en forma de calor sin recuperar ni siquiera parcialmente la forma originaria del mismo.

Por otra parte, en el año 1678 Robert Hooke enuncia la Ley de Hooke, que relaciona el esfuerzo cortante con el módulo de rigidez y la deformación propia del material. Esta ley establece que, aplicando una carga sobre un cuerpo sólido, mientras no se supere el límite de elasticidad, dicho cuerpo sufrirá una deformación elástica que se mantendrá hasta el cese del esfuerzo aplicado. Esta ley será la base del estudio de la reología de las sustancias sólidas.

A partir de ese momento se comienza a estudiar la “elasticidad de los materiales” basándose en las dos teorías anteriormente definidas, hasta que en el siglo XIX los científicos comienzan a tener dudas acerca de su validez universal. Así, la reología moderna estudia el comportamiento de los compuestos complejos que presentan propiedades viscoelásticas, es decir, que presentan a la vez propiedades elásticas y viscosas.

3.1.1 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas dependen directamente de la concentración y la densidad de las partículas, de su distribución de forma y tamaño, de las propiedades del fluido portador, de la intensidad del campo aplicado, de la temperatura de trabajo y de la presencia de aditivos adicionales. Al optimizar el desarrollo de estos fluidos para aplicaciones particulares son esencialmente importantes las relaciones existentes entre estos factores [9, 10].

Definiendo la velocidad de corte como la relación entre la velocidad del fluido en relación a la distancia que recorre, en la figura 3.1 se puede observar la relación entre el esfuerzo de corte de un fluido con la densidad del flujo magnético a una alta velocidad

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

de corte de 26 s^{-1} . El esfuerzo de corte y la densidad de flujo aumentan al aumentar la concentración de volumen de hierro.

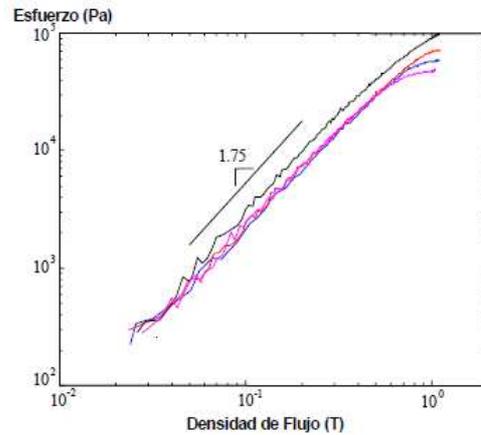


Figura 3.1: Esfuerzo de corte .vs. densidad de flujo magnético a alta velocidad de corte

Así, se muestra que la viscosidad del fluido sin la presencia de un campo magnético depende sobretodo de la aportación del aceite portador, de los agentes de suspensión y de la carga de las partículas.

En la figura 3.2 se representa la viscosidad de cuatro fluidos magneto-reológicos, de distintas concentraciones en volumen de hierro, frente a la velocidad de corte a la que están sometidos. De dicha figura se puede deducir que la viscosidad no es proporcional a la carga de metal, en este caso de hierro, que se encuentre presente.

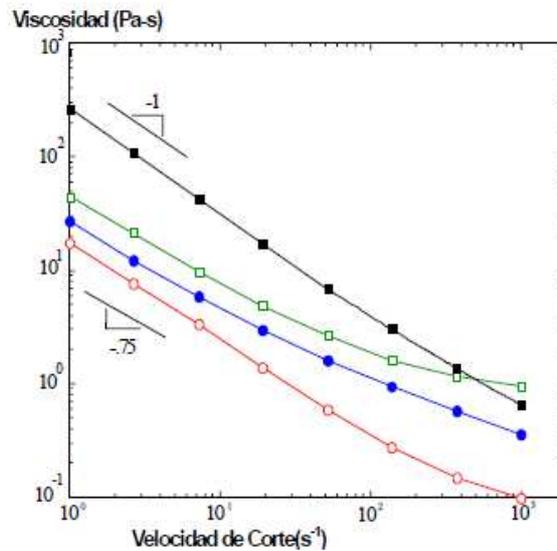


Figura 3.2: Esfuerzo de corte .vs. velocidad de corte

3.2 LOS MATERIALES INTELIGENTES

Los materiales inteligentes son aquellos que permiten cambiar sus propiedades físicas, como la rigidez, la forma, la viscosidad, el color, etc., cuando se le aplica un estímulo específico. Así, para que un material o estructura sea considerado como material inteligente debe cumplir los siguientes requisitos [11, 12]:

- Gran reacción ante estímulos.
- Poseer mecanismos para controlar y seleccionar el tipo de respuesta.
- Capacidad de regresión al estado original al cesar el estímulo.
- Poseer sensores de reconocimiento y de medida de la intensidad del estímulo, a la vez que actuadores intrínsecos o embebidos que responden ante dicho estímulo.

A continuación se describirán los materiales inteligentes más utilizados.

3.2.1 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROESTRICTIVOS

Los materiales piezoeléctricos y electrostrictivos adquieren un campo eléctrico al ser sometidos a sollicitaciones mecánicas, esto se produce por el esfuerzo producido átomo a átomo que crece al aplicarse dicho campo eléctrico. Por todo ello, estos materiales se caracterizan por tener un rápido tiempo de respuesta cuando se trata de atender a la relación entre los controles eléctricos y los sistemas mecánicos [11, 12].

Hay que destacar que al aplicarle una tensión a estos materiales, estos tienden a deformarse y producir el efecto contrario al anteriormente comentado. Se habla de materiales magnetostrictivos si se trata de responder a campos magnéticos de igual forma que los piezoeléctricos responden a campos eléctricos. Una de las diferencias a destacar entre ambos es que los piezoeléctricos poseen una dependencia lineal de la

permisividad sobre el campo eléctrico, mientras que la de los magnetostrictivos sobre el campo magnético es dependencia cuadrática.

3.2.2 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

Los materiales con memoria de forma poseen la capacidad de variar su forma ante una sollicitación externa como puede ser un campo eléctrico o magnético. En la figura 3.3 se puede observar el proceso evolutivo del efecto memoria en este tipo de materiales desde que la sollicitación externa es aplicada hasta que cesa [11, 12].

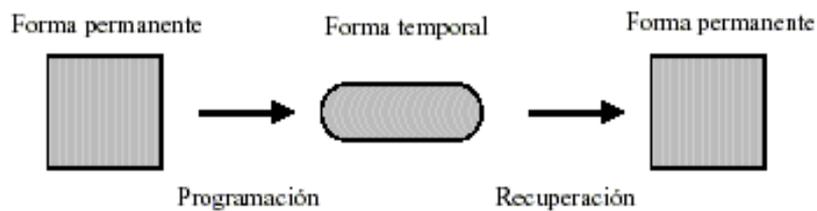


Figura 3.3: Proceso evolutivo del efecto memoria

A continuación se procede a clasificar los materiales con materia de forma según el material en sí, la naturaleza o la sollicitación externa a la que son sometidos.

Aleaciones: En las aleaciones, el proceso de memoria de forma se fundamenta en la transición que se da entre dos fases sólidas de temperaturas totalmente opuestas, por un lado la austenítica (alta temperatura) y por otro la martensítica (baja temperatura). En la figura 3.4 se puede observar el proceso evolutivo de la estructura cristalina de este tipo de materiales cuando cambia de fase [11, 12].

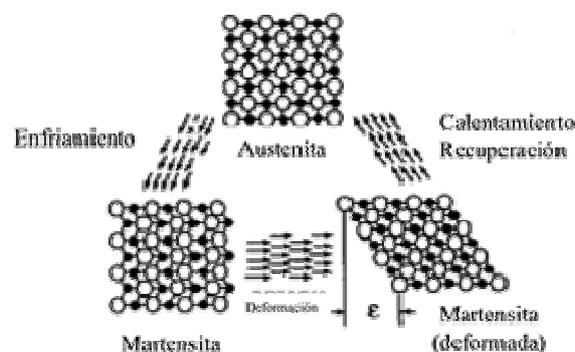


Figura 3.4: Proceso evolutivo de la estructura cristalina de las aleaciones durante el cambio de fase

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Si los materiales sufren el efecto de memoria de forma bajo la sollicitación externa de distintos campos magnéticos se denominan “aleaciones ferromagnéticas.

- **Cerámicos:** En los materiales cerámicos emplean arcillas y otros minerales, naturales o tratados químicamente, y atienden a la definición de materiales inorgánicos, no metálicos.
- **Polímeros:** Los polímeros se caracterizan porque el efecto de memoria de forma se da por la relación entre la estructura y la morfología del propio polímero con la tecnología de propagación de forma, es decir, se les prepara concienzadamente para que recuerde la forma a la que se va a modificar.

3.2.3 MATERIALES CROMOACTIVOS y FOTOACTIVOS

Los materiales cromoactivos sufren cambios de color al ser sometidos a sollicitaciones externas como son los cambios bruscos de temperatura, corrientes eléctricas o radiaciones ultravioletas [11, 12].

En los materiales fotoactivos, se producen diversos cambios cuando incide sobre ellos luz, además de ser capaces de emitirla como consecuencia de un fenómeno externo a ellos.

- **Electroluminiscentes:** Materiales organometálicos que pueden emitir luz de varias gamas de colores al ser estimulados por una corriente eléctrica.
- **Fluorescentes:** Materiales semiconductores que poseen la capacidad de emitir luz visible al ser estimulados por radiaciones ultravioletas.
- **Fosforescentes:** Materiales semiconductores que emiten luz visible en la oscuridad al eliminar la excitación a la que son sometidos, esto se produce ya que son capaces de absorber la energía.

3.2.4 FLUIDOS REOLÓGICOS

Los fluidos reológicos son aquellos cuyas propiedades se ven modificadas ante el estímulo de un campo eléctrico o magnético exterior, esto se debe a la formación de estructuras en el seno del fluido y en estos casos se consideran materiales activos. Los fluidos que modifican sus propiedades ante el estímulo de un campo eléctrico se denominan fluidos electro-reológicos, por el contrario, si lo hacen ante un campo magnético, se denominan fluidos magneto-reológicos [11, 13, 14, 15].

Los fluidos reológicos son líquidos inertes que contienen partículas de aceites de silicona o minerales en suspensión. Se consideran fluidos newtonianos si no se ven afectados por un campo exterior, en estos casos oponen un esfuerzo viscoso proporcional a la velocidad de deformación a la que son sometidos.

Al aplicarles un campo externo, las partículas en suspensión forman cadenas en la dirección del campo magnético para posteriormente romperse por el propio flujo. La continua rotura y formación de cadenas provoca la aparición de un esfuerzo en dirección opuesta al movimiento, denominado esfuerzo de fluencia, cuando este es superado tiene lugar el deslizamiento de las capas del fluido.

Respecto a los fluidos ordinarios, los fluidos reológicos tienen la ventaja de permitir controlar el esfuerzo viscoso en función de la intensidad del campo externo aplicado. Además, como puede observarse en la figura 3.5, para obtener una cierta velocidad de deformación, los fluidos reológicos necesitan un esfuerzo viscoso superior que los fluidos ordinarios.

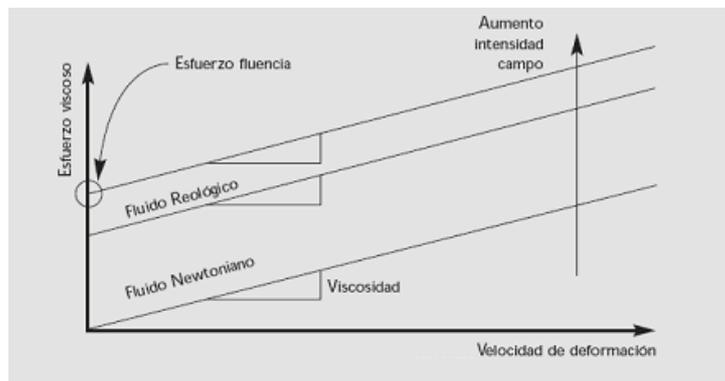


Figura 3.5: Esfuerzo viscoso .vs. velocidad de deformación

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

En la figura 3.5 se muestra que el esfuerzo viscoso es mayor al aumentar el esfuerzo de fluencia por la cada vez mayor presencia de un campo exterior, y no por el efecto de la propia viscosidad. A mayor valor de esfuerzo viscoso, los fluidos son más óptimos para ser utilizados como actuadores, en particular para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y el control activo de vibraciones. El inconveniente que presenta este tipo de fluidos es que se necesitan grandes valores de campo externo para conseguir un adecuado funcionamiento como actuadores.

3.2.4.1 FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Los fluidos magneto-reológicos se originan aproximadamente en el año 1947 cuando Jacob Rabino observó que aplicando un campo magnético cada vez mayor a una suspensión de limaduras de hierro en aceite, estas conseguían mayor alineación y conseguían la consistencia de un sólido en un tiempo reducido y sin verse afectadas por variaciones térmicas [11, 13, 14, 15].

Este tipo de fluidos se caracteriza por ser suspensiones acuosas de microesferas super-paramagnéticas con gránulos de magnetita dispersos en matriz polimérica. Además, sus partículas no tienen ni histéresis magnética ni remanencia por lo que es usual añadir un surfactante para reducir la tensión interfacial y, por tanto, conseguir mayor estabilidad en dichas suspensiones.

Al aplicarle un campo magnético externo sobre el fluido, las partículas adquieren un momento dipolar, generando una interacción dipolar entre las partículas. Así, considerando que la interacción magnética domina sobre la térmica, se produce una alineación de partículas en dirección al propio campo magnético aplicado. La formación de estas partículas hace variar de forma muy drástica las propiedades mecánicas y ópticas del fluido.

Dentro de este tipo de fluidos, se distinguen dos grandes grupos: los fluidos formados por partículas dispersas, que reaccionan por la anteriormente comentada agregación de las partículas en suspensión, a partir de la polarización de los materiales;

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

y los fluidos homogéneos, que carecen de partículas y pueden ser muy útiles en aplicaciones microtecnológicas.

La ventaja que poseen los fluidos magneto-reológicos frente a los ferrofluidos es que el tamaño de las partículas que los componen es muy pequeño, varía entre 0,05 y 8 μm , esto restringe la movilidad del fluido, aumenta la viscosidad y, por tanto, la resistencia de las suspensiones. Cuanto mayor sea el campo magnético externo aplicado, más energía mecánica se necesitará para romper dichas microestructuras.

En la figura 3.6 se puede observar el efecto que provoca un campo magnético externo sobre el campo de velocidades de un fluido magneto-reológico y que, al anularse la aplicación de dicho campo magnético, los fluidos magneto-reológicos pasan a comportarse como fluidos newtonianos.

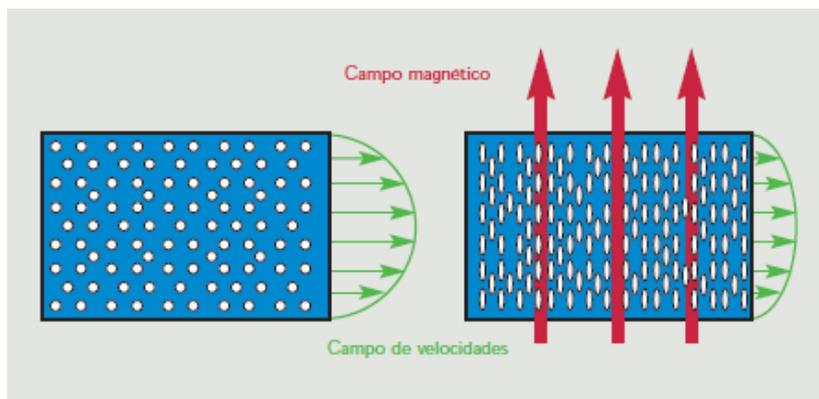


Figura 3.6: Campo de velocidades en un fluido magnético provocado por un campo externo

Para el adecuado diseño de los fluidos magneto-reológicos, con el fin de que respondan eficientemente ante un campo magnético externo, además de asegurar la estabilidad del fluido frente a la agregación y sedimentación de partículas, se debe atender principalmente a la selección correcta de [11, 13, 14, 15]:

- El aceite base
- La naturaleza del material en suspensión
- Los aditivos requeridos

3.2.5 APLICACIONES ACTUALES DE LOS MATERIALES INTELIGENTES

De las muchas aplicaciones industriales en las que se utilizan los materiales inteligentes, hay que destacar ante todo su uso en actuadores o sensores [9, 11, 14].

Para fabricar los sensores se usan como señal de entrada distintos tipos de campos mecánicos que varían en función del material y de su respuesta ante los estímulos externos a los que son sometidos. Según el fenómeno físico que experimentan los sensores, estos transforman los campos mecánicos en señales de salida fácilmente medibles y que, conllevan normalmente campos eléctricos que producen diferencias de potencial eléctrico o campos magnéticos que inducen corriente eléctrica.

Por su parte, los actuadores usan como señales de entrada campos eléctricos, térmicos o magnéticos que, según las propiedades del material activo, se transforman en señales de salida mecánica como pueden ser campos de deformaciones, esfuerzo o desplazamientos.

A continuación, se explicarán las aplicaciones que poseen los fluidos reológicos en particular, y que son: amortiguadores activos para vibraciones, tanto periódicas como no periódicas, frenos, embragues, protección de estructuras, suspensión de asientos para vehículos, prótesis médicas, etc.

3.2.5.1 AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS EN VEHÍCULOS

INDUSTRIALES

El uso de amortiguadores en vehículos industriales es importante por las vibraciones que se generan y que afectan a las personas cercanas al foco y por los daños estructurales que pueden producir. El empleo de amortiguadores de fluido viscoso aprovecha las propiedades del fluido para contrarrestar los efectos de las vibraciones mediante una fuerza que se opone a estas [9, 11, 14].

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

En la figura 3.7 se puede observar la estructura de un amortiguador magneto-reológico cuya misión es ser utilizado como control semiactivo de vibraciones en aplicaciones industriales.

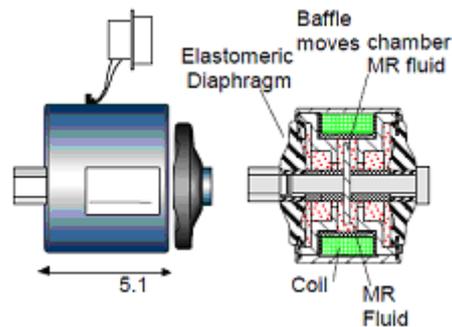


Figura 3.7: Estructura de un amortiguador de vibraciones en aplicaciones industriales tipo Rheonetic

Otra aplicación muy común que tienen los amortiguadores de vibraciones es la disminución de vibraciones de lavadoras, reduciendo el ruido producido por estas y aumentando su vida útil. En la figura 3.8 se muestra la disposición de los amortiguadores magneto-reológicos en una lavadora.

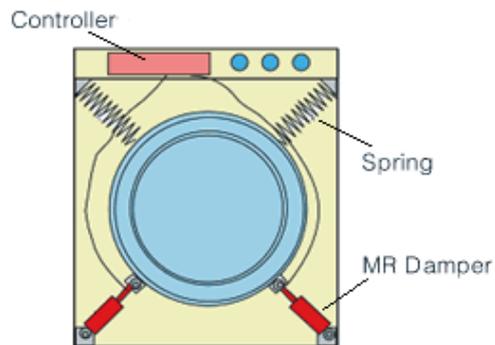


Figura 3.8: Disposición de los amortiguadores magneto-reológicos en una lavadora

3.2.5.2 CONTROL DE VIBRACIONES SÍSMICAS EN ESTRUCTURAS

Como se puede observar en la figura 3.9, también se han diseñado y construido amortiguadores magneto-reológicos de gran escala para aplicaciones en ingeniería civil, con una fuerza máxima de amortiguamiento de 200 KN [9, 11, 14].

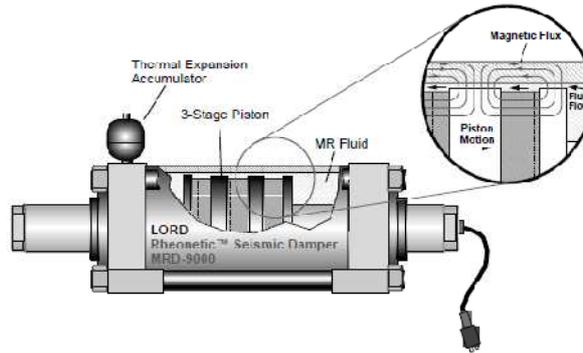


Figura 3.9: Amortiguador sísmico magneto-reológico tipo Rheonetic

El objetivo de este tipo de amortiguadores es proteger los edificios y estructuras de las vibraciones sísmicas a las que son expuestos. Estos amortiguadores amplían el control sobre los choques sísmicos iniciales, por su rápido tiempo de respuesta y su alto margen dinámico, y también el de las réplicas de estos, por su alta fuerza de disipación. En la figura 3.10 se observa la disposición de amortiguadores magneto-reológicos en un edificio.

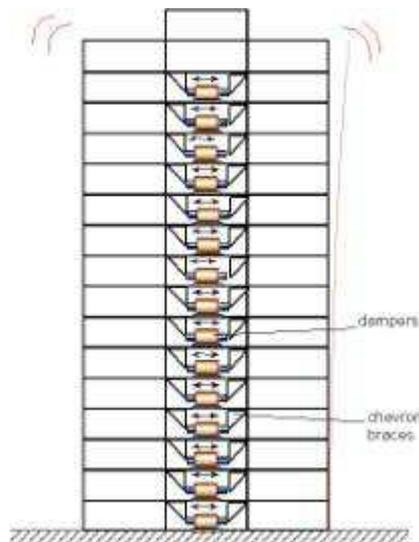


Figura 3.10: Disposición de los amortiguador magneto-reológicos en un edificio

Como se muestra en la figura 3.11, estos amortiguadores también se pueden emplear en los puentes suspendidos por cables, para soportar las tensiones producidas por el viento y la lluvia.

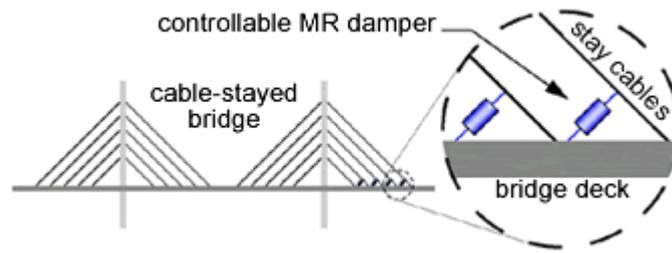


Figura 3.11: Disposición de los amortiguador magneto-reológicos en un puente suspendido por cables

3.2.5.3 FRENOS ROTATIVOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Los frenos rotativos magneto-reológicos permiten el continuo control del par torsor, ya que cuando la corriente que circula por las espiras es nula, no existe campo magnético y el par torsor que puede proporcionar el freno es mínimo a causa del cierre hermético y la viscosidad del fluido portador [9, 11, 14].

En el momento en que se crea un campo magnético, se produce un par torsor donde el valor máximo es función de la limitación de la máxima corriente que es capaz de aguantar el propio freno. La ventaja de este tipo de frenos es que su diseño es simple y su manejo fácil. En la figura 3.12 se puede observar un esquema de la estructura de un freno magneto-reológico.

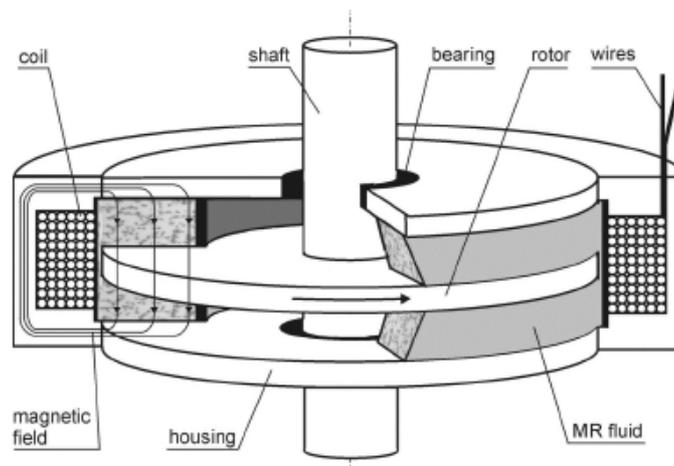


Figura 3.12: Estructura de un freno magneto-reológico

3.2.5.4 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN EN ASIENTOS PARA VEHÍCULOS DE TRABAJO PESADO

Su finalidad es controlar en tiempo real las vibraciones producidas en el vehículo pesado con el objetivo de lograr una posición óptima para la conducción. Esto se consigue con la utilización de una unidad de control que permite modificar la intensidad del campo magnético en función del peso del conductor, de los niveles de choque y de las vibraciones causadas por el pavimento por el que se circula. En la figura 3.13 se observa la estructura de un amortiguador magneto-reológico utilizado en el sistema de suspensión semiactiva en vehículo de carga para travesías largas [9, 11, 14].

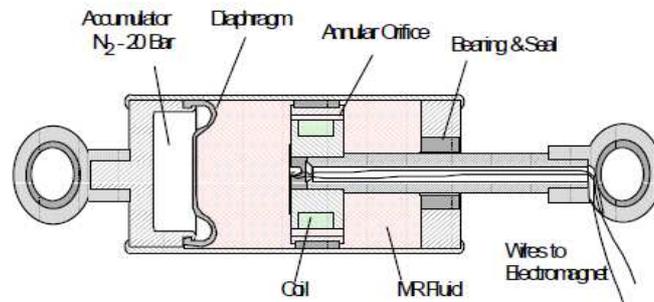


Figura 3.13: Estructura de un amortiguador magneto-reológico tipo Rheonetic diseñado para vehículos de trabajo pesado

3.3 EL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO EN LOS SISTEMAS DE SUSPENSIÓN DE LOS VEHÍCULOS

Los amortiguadores son muy importantes para el control de las vibraciones y, en especial, los de fluido viscoso se basan en las propiedades constantes de dicho fluido para contrarrestar los efectos de la vibración [11, 15, 16].

La desventaja que posee este tipo de amortiguadores es que el valor de la fuerza generada y el coeficiente de amortiguamiento también son constantes. Es por ello que surgen los amortiguadores magneto-reológicos, dispositivos que usan fluidos magnéticos con la capacidad de variar sus propiedades ante un estímulo magnético, algo que es aprovechable para proveer una respuesta rápida a fin de controlar las vibraciones.

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

En el año 1999, el fabricante de componentes para la automoción Delphi fue el primero en desarrollar y presentar en el salón de Francfort un sistema de amortiguación con amortiguadores magneto-reológicos como base.

Este sistema constaba de una suspensión semiactiva con un amortiguador de fluido magneto-reológico denominado “Magnetic Ride”, y se diferencia respecto a otros sistemas por poseer en su interior, exactamente dentro del vástago, un líquido con un 40% de partículas metálicas en suspensión. Además del ya comentado fluido magneto-reológico, el sistema también contiene bobinas electromagnéticas y sensores. En la figura 3.14 se puede observar la estructura del amortiguador “Magnetic Ride” desarrollado por Delphi.

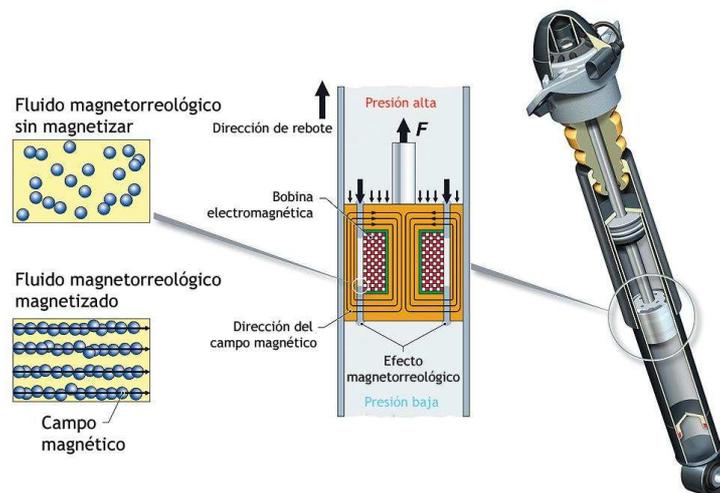


Figura 3.14: Estructura de un amortiguador *Magnetic Ride* de Delphi

En el momento en el que se aplica una pequeña corriente electromagnética, las partículas se ven afectadas y son orientadas en una disposición similar, convirtiendo el líquido en una sustancia fibrosa y con un nivel de viscosidad mucho más elevado. Esto permite ajustar la dureza del mecanismo cuando el conductor satisfaga o por las exigencias de la carretera [11, 15, 16].

En la figura 3.15 se puede observar la estructura y funcionamiento de un amortiguador magneto-reológico, así como el comportamiento del fluido que circula en su interior.

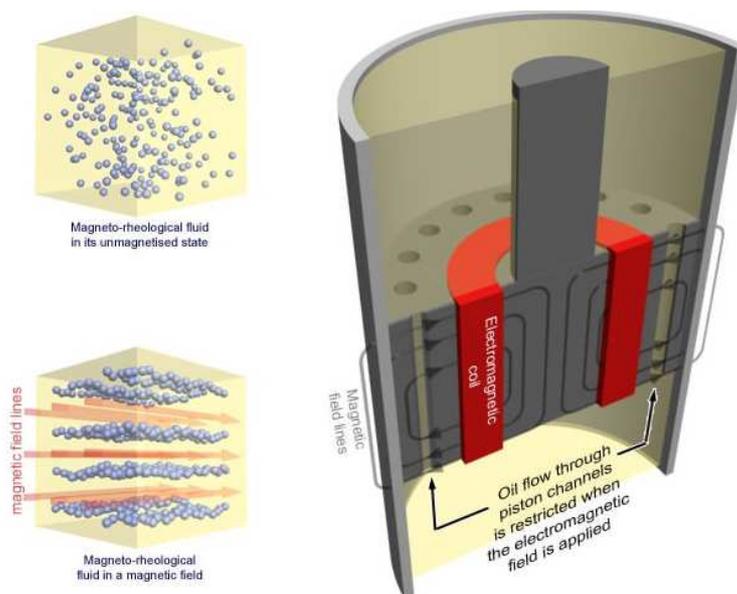


Figura 3.15: Estructura de un amortiguador magneto-reológico y comportamiento del fluido que circula por su interior

La consistencia de la suspensión depende sobretodo de la intensidad del campo magnético aplicado. Para comprender el funcionamiento del sistema Magnetic Ride, primero hay que destacar que son los sensores de desplazamiento de la amortiguación los que envían señales a la unidad de mando. Esta unidad de mando aplica una intensidad de corriente a cada amortiguador en función de la señal que antes ha recibido de la propia unidad de mando. En función de la intensidad de corriente, que es recibida por la bobina electromagnética del amortiguador, se obtienen distintas variaciones del campo magnético, de la densidad y de la consistencia del fluido magneto-reológico [11, 15, 16].

Existe la necesidad de ajustar en tiempo real la suspensión a las necesidades de la conducción, es decir, lo más inmediatamente posible, debido a que los valores del fluido magneto-reológico, y por tanto los de la suspensión, varían 1000 veces por segundo, dado que lo hacen los valores de la consistencia del fluido magneto-reológico.

La ventaja de este sistema de suspensión es que no sólo se adapta a las necesidades de la conducción en función del pavimento, sino que el sensor de aceleración del que está provisto también se adapta a las aceleraciones y frenadas del propio vehículo y a los movimientos oscilatorios de su carrocería.

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

Si el vehículo sufre una frenada brusca, la suspensión delantera aumenta su estabilidad al elevarse su dureza por el campo magnético. Si lo que sufre el vehículo es una fuerte aceleración, se aumenta la suspensión trasera para evitar su hundimiento. Otra posibilidad que acepta este sistema de suspensión es aumentar la dureza de los amortiguadores más próximos al exterior de una curva para evitar el balanceo producido al tomar esta.

Existe la posibilidad de eliminar las válvulas de los amortiguadores hidráulicos, para así silenciar los ruidos provocados por estas.

En la actualidad, este tipo de suspensiones se utilizan en vehículos de alta gama y de altas prestaciones, como pueden ser: Audi R8 (que se puede observar en la figura 3.16), Audi TT, Cadillac Seville, Chevrolet Corvette, Ferrari 599 GTB y Ferrari California.



Figura 3.16: Montaje del sistema *Magnetic Ride* de Delphi en un Audi R8

3.3.1 VENTAJAS DE LOS AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS

Las ventajas principales que presentan los amortiguadores magneto-reológicos son las siguientes [16]:

- El tiempo de reacción que poseen es de hasta diez veces más rápido que los amortiguadores basados en electroválvulas, es decir, los amortiguadores convencionales.
- Los sensores tienen la capacidad de modificar la fluidez o viscosidad del líquido hasta 1000 veces por segundo, permitiendo la posibilidad de regular instantáneamente el comportamiento del amortiguador magneto-reológico.
- Permiten el control dinámico de todo el automóvil, incluso de forma independientemente en cada una de las ruedas.
- Posee una baja necesidad de aporte energético, aproximadamente 20 W por cada uno de los amortiguadores.
- No requieren mantenimiento dado que poseen una alta fiabilidad.
- Mayor simplicidad mecánica ya que no precisan de válvulas ni de electroválvulas.

3.3.2 INCONVENIENTES DE LOS AMORTIGUADORES MAGNETO-REOLÓGICOS

Los inconvenientes principales que presentan los amortiguadores magneto-reológicos son las siguientes [16]:

CAPÍTULO 3: LOS FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

- Tienen un sobrecoste añadido ya que la instalación y uso de estos amortiguadores magneto-reológicos suponen la adquisición de una tecnología prácticamente sin implantar y sin desarrollar por completo.
- La adquisición e instalación de los dispositivos electrónicos necesarios para su funcionamiento suponen también otro alto sobrecoste añadido. Por ello, se puede deducir que la optimización de los amortiguadores magneto-reológicos suponen un coste elevado.
- Necesitan un aporte energético algo mayor que los amortiguadores convencionales, ya que estos no requieren una fuente externa para su funcionamiento

En la figura 3.17 se puede observar la disposición de los elementos o dispositivos electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento de los amortiguadores magneto-reológicos instalados en un Audi R8.

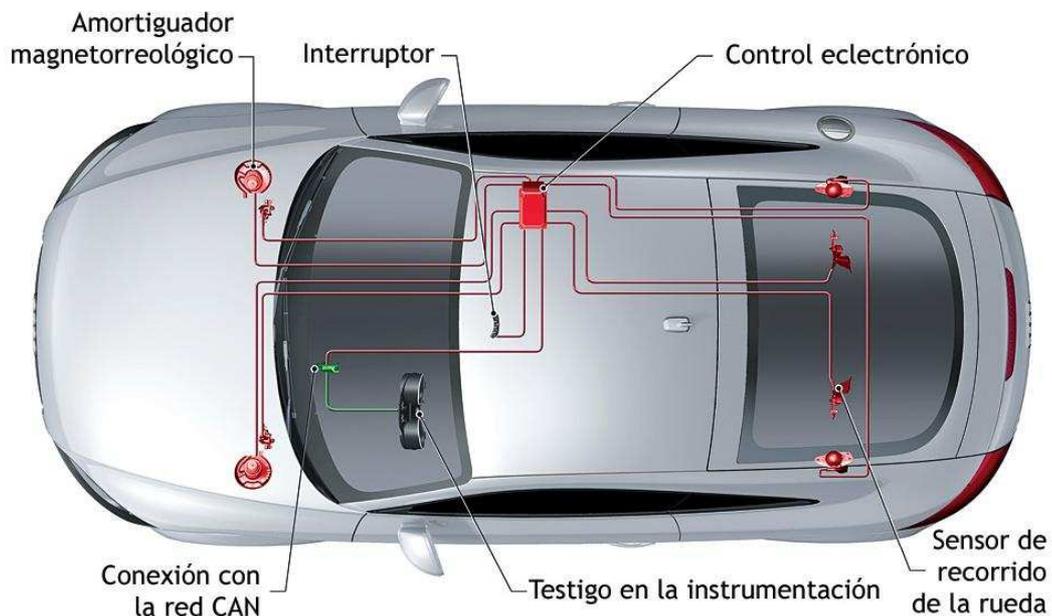


Figura 3.17: Disposición de los dispositivos electrónicos en un Audi R8 con amortiguadores magneto-reológicos instalados

CAPÍTULO 4

EQUIPOS EMPLEADOS

4.1 HARDWARE

En este apartado se detallarán las partes del hardware utilizado en el presente proyecto. En primer lugar se explicará el hardware que ha sido necesario adquirir de la empresa multinacional National Instruments, es decir, el PC de control, compuesto por el chasis y los dos módulos necesarios. A continuación, se detallarán los sensores empleados en el presente proyecto, es decir, los sensores de desplazamiento junto a su calibración. Por último, será necesario explicar el amortiguador magneto-reológico que ha sido instalado en el vehículo automóvil.

4.1.1 PC DE CONTROL

El PC de control es el primer elemento del hardware necesario para el presente proyecto que se describirá. Es el equipamiento físico utilizado para dar soporte al software suministrado por la empresa National Instruments. El equipo empleado en la parte práctica del presente proyecto está formado en primer lugar, por un chasis, cuyo modelo es el NI PXI 1031DC, el cual se explicará a continuación. Los módulos adquiridos para la realización del presente proyecto, y que también se detallarán, han sido los modelos NI PXI 6230 y NI PXI 4472B, y sus objetivos son la adquisición y generación de las señales así como el tratamiento de los datos recogidos [19].

4.1.1.1 CHASIS NI PXI 1031DC

En el chasis modelo NI PXI 1031DC, que se muestra en la figura 4.1, va instalado todo el software necesario, permitiendo arrancar desde el sistema operativo Windows o directamente desde el propio LabVIEW. Este chasis permite también adaptar varios módulos extraíbles para capturar señales, procesar datos y alimentar los equipos auxiliares que sean necesarios. Está compuesto por cuatro *slots* y permite ser alimentado en forma de corriente alterna (AC), de 100 a 120 V o de 200 a 240 V, o en forma de corriente continua (DC), de 11 a 30 V. Además, este es el chasis idóneo para la realización del presente proyecto dado su pequeño tamaño, ya que permite transportarlo con facilidad a distancia e incluso adaptarlo en el interior del vehículo de una forma relativamente cómoda. Las características técnicas del chasis NI PXI 1031DC se adjuntan en el anexo A 4.1 [19].



Figura 4.1: Chasis modelo NI PXI 1031DC

4.1.1.2 MÓDULO NI PXI 6230

El módulo NI PXI 6230, que se muestra en la figura 4.2, es el responsable de alimentar a los sensores de desplazamiento y también al amortiguador magneto-reológico, a partir del suministro de tensión, para que este pueda variar sus propiedades según el tipo de ensayo que se realice en cada momento. El módulo NI PXI 6230 posee seis entradas digitales, cuatro canales de salida digital y otros cuatro de salida analógica de 16 bits de resolución hasta 500 kS/s aproximadamente. Las características o especificaciones técnicas se adjuntan en el anexo A 4.2 del módulo NI PXI 6230[19].



Figura 4.2: Módulo modelo NI PXI 6230

4.1.1.3 MÓDULO NI PXI 4472B

El módulo NI PXI 4472B, que se muestra en la figura 4.3, tiene la función en el presente proyecto de captar las señales generadas en los sensores de desplazamiento mientras se están realizando los ensayos pertinentes, para así guardarlas en su memoria PXI con el fin de tratarlas y analizarlas posteriormente. El módulo NI PXI 4472B está compuesto por ocho entradas analógicas optimizadas hasta una vibración de 102.4 kS/s y contempla la posibilidad de sincronizar hasta 5000 canales en un mismo sistema PXI, disponiendo además de un acoplamiento, tanto de corriente alterna como de corriente continua, configurable por software con una resolución de 24 bits. Las características o especificaciones técnicas del módulo NI PXI 4472B se adjuntan en el anexo A 4.3 [19].



Figura 4.3: Módulo modelo NI PXI 4472B

4.1.2 SENSORES DE DESPLAZAMIENTO UTILIZADOS

En este apartado primeramente se describirán los sensores de desplazamiento utilizados en el presente proyecto y, a continuación se describirá la calibración que se ha realizado en ellos mismos.

4.1.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

Los sensores extensiométricos que se han instalado en la suspensión delantera del vehículo del presente proyecto, tienen como objetivo el medir el desplazamiento que experimenta cada amortiguador, tanto el amortiguador convencional como el amortiguador magneto-reológico, el cual se detallará en el siguiente apartado. Los sensores de desplazamiento instalados corresponden al tipo MTN / E de la serie de transductores industriales de desplazamientos LVDT. El tipo de sensores de desplazamiento LVDT MTN / E presentan rangos de medición en un intervalo entre $\pm 0,05$ y 500 mm. y están contruidos de acero inoxidable, por lo que poseen magníficas características específicas para las condiciones de trabajo más exigentes, incluso en ambientes difíciles como puedan ser ambientes húmedos o polvorientos. En la figura 4.4 se muestra el tipo de sensor de desplazamiento LVDT MTN / E [20].



Figura 4.4: Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La gama de sensores de corriente continua ofrecen señales de salida que varían en un intervalo entre 0 y 10 V, con un margen de error de $\pm 2,5$ V, así como un cable de salida que permite una intensidad de corriente de 20 mA.

Por otro lado, entre las características mecánicas de los sensores de desplazamiento LVDT MTN / E, cabe destacar que estos poseen un núcleo de guiado para la varilla de extensión. Dicha varilla de extensión incorpora a su vez una rótula en cada uno de sus extremos con el fin de garantizar la mayor cantidad de grados de libertad posibles. En la figura 4.5 se puede observar el plano que describe el sensor.

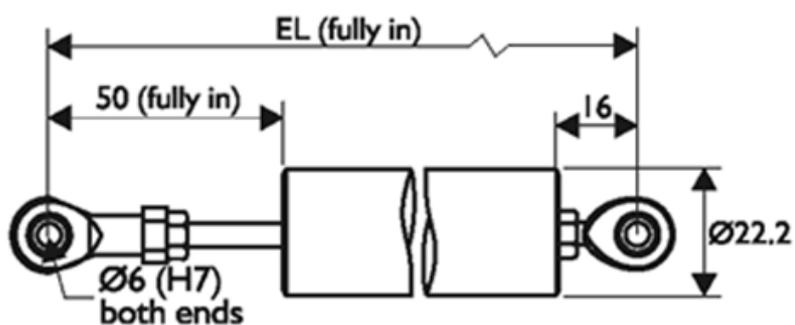


Figura 4.5: Plano de un sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

En la tabla 4.1 se recogen los valores de longitud total respecto a sus distintos intervalos de carrera, ambos medidos en milímetros, con el fin de observar el comportamiento de la salida de corriente continua.

Tabla 4.1: Relación de la longitud con la carrera de desplazamiento de los sensores LVDT MTN / E

Versiones Salidas DC	Versiones Salidas DC
Carrera [mm]	Longitud [mm]
±0.5	196
±2.5	206
±5	231
±10	246
±12.5	276
±15	291
±25	351
±50	436
±75	506
±100	566
±125	616
±150	676
±175	731

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

± 200	816
± 250	926
± 300	1036
± 400	1266
± 500	1526

4.1.2.2 UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

El proceso de colocación de ambos sensores de desplazamiento es análogo, tanto para el sensor de desplazamiento colocado en la suspensión derecha, y que mide el recorrido del amortiguador magneto-reológico, como para el sensor de desplazamiento colocado en la suspensión izquierda, que mide el recorrido del amortiguador convencional. En las figuras 4.6 y 4.7 se observa la ubicación de los sensores de desplazamiento. Cabe destacar que las grandes dimensiones que caracterizan a dichos sensores de desplazamiento evitan otro tipo de instalación.



Figura 4.6: Ubicación del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión izquierda



Figura 4.7: Ubicación del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión derecha

4.1.2.3 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

Es necesario realizar un estudio sobre la linealidad de respuesta que presentan los sensores de desplazamiento que se instalan en el vehículo automóvil del presente proyecto, para ello se procederá a la calibración de cada uno de ellos. El proceso de calibración de los sensores de desplazamiento consiste en realizar medidas de desplazamiento para unas determinadas tensiones de alimentación. Hay que tener en cuenta que las tensiones varían entre 0 y 10 V, y que las medidas se han tomado en intervalos de 2 mm., valor escogido tanto para la medición en la carrera de extensión así como en la de compresión. En total se han obtenido diez medidas para cada intervalo.

El comportamiento de los dos sensores de desplazamiento responden a la ecuación de una recta en la que las abscisas corresponden al desplazamiento del sensor, en centímetros, y las ordenadas a la tensión, en voltios. Para una completa calibración de dichos sensores es necesario hallar los errores que afectan a la pendiente de la recta, Δm , y a la ordenada en el origen, Δb . Estos errores han sido calculados considerando el error accidental y el error de precisión, con el fin de tomar el mayor de ellos para calcular la desviación estándar de la muestra de datos de tensión, llamada σ . Las ecuaciones 4.1 y 4.2 corresponden a los errores asociados a la pendiente y a la ordenada en el origen, respectivamente:

$$\Delta m = \sqrt{\frac{n\sigma^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (1)$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (2)$$

En la tabla 4.2 se muestran los datos de tensión relativos al sensor de desplazamiento colocado en la suspensión delantera derecha.

Tabla 4.2: Relación tensión .vs. desplazamiento de los datos obtenidos del sensor delantero derecho

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,2	8	7	6	4,8	3,9	2,6	1,5
2ª Medida	10	9,1	8,1	7	5,9	4,8	3,8	2,8	1,6
3ª Medida	10	9,2	8	7	5,9	4,9	3,9	2,7	1,5
4ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,9	4,8	3,7	2,8	1,6
5ª Medida	10	9,2	8,1	6,9	5,6	4,8	3,7	2,7	1,6
6ª Medida	10	9,1	8	7	5,9	4,8	3,7	2,7	1,5
7ª Medida	10	9,1	8,1	6,9	5,8	4,8	3,8	2,7	1,7
8ª Medida	10	9,1	8	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,6
9ª Medida	10	9,1	8	6,9	5,8	4,8	3,7	2,8	1,7
10ª Medida	10	9,2	8,1	7	5,9	4,8	3,9	2,7	1,6
Valor Medio	10	9,14	8,05	6,95	5,86	4,81	3,78	2,72	1,59

A partir de los datos de la tabla 4.2 se obtiene la figura 4.8, que muestra la linealidad del sensor de desplazamiento derecho junto a la ecuación de la recta y a su coeficiente de correlación.

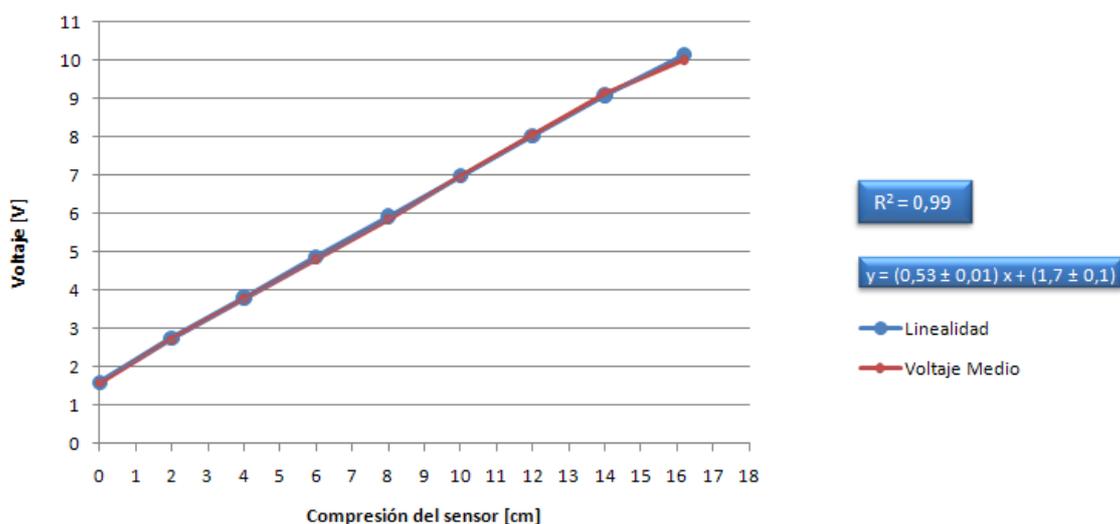


Figura 4.8: Linealidad del sensor de desplazamiento derecho

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

El estudio de la linealidad del sensor delantero izquierdo es similar. En la tabla 4.3 se muestran los datos de tensión relativos al sensor de desplazamiento colocado en la suspensión delantera izquierda.

Tabla 4.3: Relación tensión .vs. desplazamiento de los datos obtenidos del sensor delantero izquierdo

Posición (cm) Tensión (V)	0	2	4	6	8	10	12	14	16,5
1ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
2ª Medida	10	9,3	8,3	7,1	6,1	5	3,9	3	1,6
3ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,2	5,1	4	3	1,6
4ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	3,9	3	1,6
5ª Medida	10	9,3	8,2	7,3	6,1	5	3,9	2,9	1,5
6ª Medida	10	9,3	8,1	7,3	6,1	5	4	2,9	1,5
7ª Medida	10	9,3	8,3	7,2	6,1	5,2	4,1	3	1,6
8ª Medida	10	9,4	8,3	7,1	6,1	5	4	2,9	1,6
9ª Medida	10	9,3	8,2	7,2	6,1	5	4	2,9	1,6
10ª Medida	10	9,2	8,2	7,2	6,1	5,2	3,9	3	1,6
Valor Medio	10	9,29	8,2	7,2	6,11	5,05	3,97	2,95	1,58

A partir de los datos de la tabla 4.3 se obtiene la figura 4.9, que muestra la linealidad del sensor de desplazamiento izquierdo junto a la ecuación de la recta y a su coeficiente de correlación.

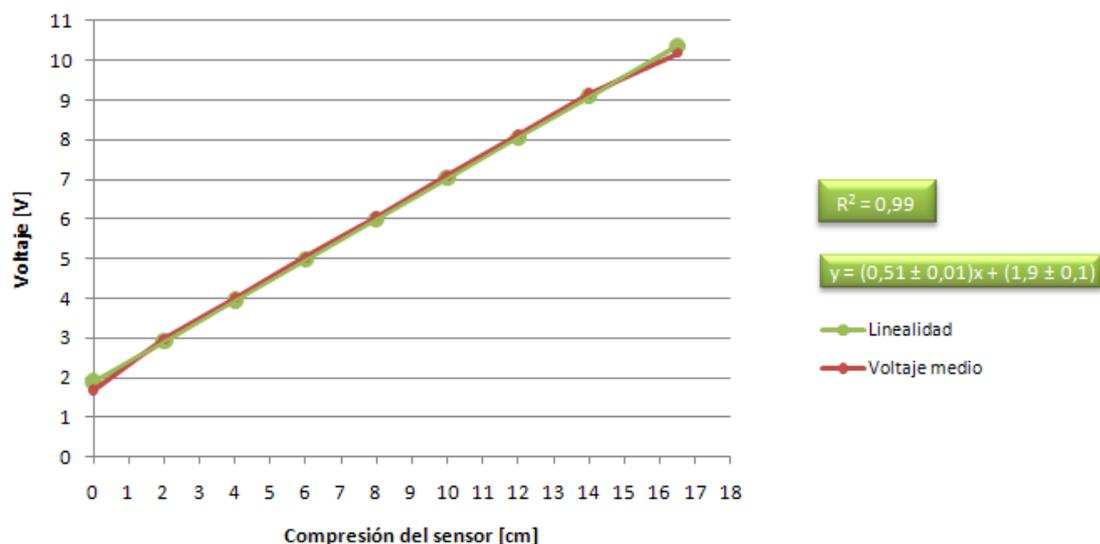


Figura 4.9: Linealidad del sensor de desplazamiento izquierdo

4.1.3 AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

El amortiguador magneto-reológico RD 1005.3, comercializado por la empresa Lord, es el amortiguador elegido para realizar el presente proyecto. Para hacer posible la comparación entre el amortiguador convencional del vehículo automóvil y el amortiguador magneto-reológico, ha sido necesaria la toma de datos del comportamiento de ambos sistemas de suspensión ante diferentes perfiles de carretera. Cabe destacar que este amortiguador se emplea comúnmente en la suspensión de los asientos de vehículo de gran tonelaje, por lo que fue necesaria su adaptación al vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto. En la figura 4.10 se muestra el amortiguador magneto-reológico RD 1005.3. Las características o especificaciones técnicas del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 se adjuntan en el anexo A 4.2 [19].



Figura 4.10: Amortiguador magneto-reológico RD 1005.3

4.1.4 DISPOSITIVO CONTROLADOR *KIT-CONTROLLER*

En este apartado, primeramente, se describirá el dispositivo controlador *kit-controller* utilizado en el presente proyecto y, a continuación, la calibración que se ha realizado en el mismo. Las características o especificaciones técnicas del dispositivo controlador *kit-controller* se adjuntan en el anexo A 4.4.

4.1.4.1 DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO CONTROLADOR

El dispositivo controlador utilizado en el presente proyecto es el modelo *Lord Wonder Box device controller kit*. Este producto sirve de soporte para los dispositivos

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

de fluido magneto-reológico. Por tanto, el *kit-controller* incluye el dispositivo controlador con una capacidad suficiente para suministrar 12 V en corriente continua.

El dispositivo controlador denominado *kit-controller* proporciona un circuito cerrado con el fin de controlar la corriente para compensar el cambio de cargas eléctricas hasta los límites de la capacidad que él mismo puede suministrar. A la vez, el *kit-controller* puede utilizarse como un interfaz para PLC y el control de dispositivos para fluidos magneto-reológicos.

En caso de que fuera necesario realizar un control manual de este dispositivo controlador, se proporciona un potenciómetro para controlar la corriente solicitada por el dispositivo ajeno al sistema. La figura 4.11 muestra el dispositivo controlador *kit-controller* utilizado en el presente proyecto, indicando las partes del mismo, las cuales se explicarán a continuación.



Figura 4.11: Dispositivo controlador *kit-controller*

Con el fin de realizar correctamente las operaciones con el dispositivo controlador *kit-controller*, es necesario conectar cada cable de dicho dispositivo al amortiguador magneto-reológico. Cuando se tienen todas las conexiones correctamente realizadas, el *led* de color rojo debe permanecer encendido. Esto indica que el dispositivo controlador

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

kit-controller está en correctas condiciones para ser utilizado y desempeñar las funciones que se requieran de él.

Para realizar el correcto control de la tensión externa procedente de otra fuente, se debe mantener el potenciómetro a cero, es decir, totalmente girado en el sentido de las agujas del reloj. En este momento, se puede conectar una señal de tensión con un valor que oscila entre 0 y 5 V al terminal BNC del dispositivo controlador *kit-controller*, la cual permite controlar la salida de corriente. El control de la señal de entrada puede ajustarse mediante una frecuencia equivalente a 1 KHz. La corriente de salida es proporcional a la señal de entrada de la tensión. Esta corriente de salida será nula cuando el control de la tensión de entrada que se conecta al BNC tenga un valor comprendido entre 0.4 y 0.8 V.

Tanto para el control manual como para el control mediante el suministro de la tensión externa, la corriente que llega al dispositivo se puede resetear a partir del botón representado en la figura 4.11 con la letra E.

4.1.4.2 UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO CONTROLADOR

Por otro lado, el dispositivo controlador *kit-controller*, el cual suministra el valor de tensión al amortiguador magneto-reológico, se ha fijado en el lateral derecho de la luna delantera del vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto. Se seleccionó esta ubicación debido a que la longitud de los cables de alimentación del amortiguador magneto-reológico no permitían instalarlo en el interior del propio vehículo automóvil y, para poder comprobar mediante un polímetro de forma más cómoda si la tensión que se suministraba desde el equipo controlador PXI se encontraba dentro de los parámetros adecuados para cada ensayo. En la figura 4.12 se puede observar la ubicación del dispositivo controlador *kit-controller* en el vehículo automóvil.

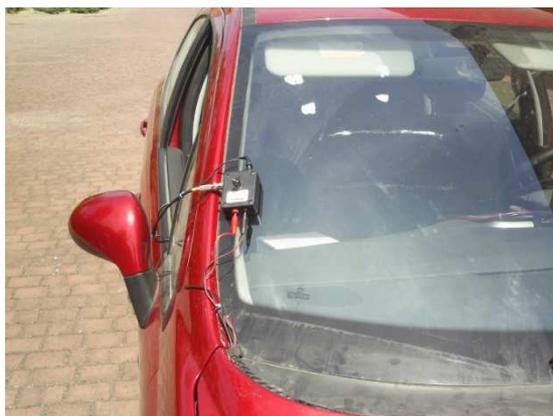


Figura 4.12: Ubicación del controlador de corriente del amortiguador magneto-reológico, *Kit Controller*

4.1.4.3 CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO CONTROLADOR

Como ocurriera con los sensores de desplazamiento utilizados en el presente proyecto, es necesario también realizar un estudio sobre la linealidad de respuesta que presenta el dispositivo controlador *kit-controller* que se instala en el vehículo automóvil, para ello se procederá a su calibración. Otro motivo por el cual es crítica la calibración de este dispositivo controlador es el comprobar que la curva proporcionada por el fabricante es adecuada para ser correctamente utilizada en el presente proyecto, evaluando los valores de tensión que el fabricante considera críticos a través de sus propios estudios.

El proceso de calibración del dispositivo controlador *kit-controller* consiste primeramente en la construcción de un pequeño circuito eléctrico que mide la caída de tensión en el mismo. Este pequeño circuito está formado por una resistencia y una fuente de alimentación que permite conocer la caída de tensión del mismo. Una vez conocido este valor de tensión, se aplica la ley de Ohm, ya que se conoce la resistencia del dispositivo controlador *kit-controller* dado que la facilita el propio fabricante. Así, para cada valor de tensión, la única incógnita existente es la intensidad en cada uno de los casos.

Con el fin de asegurar la repetitividad y fiabilidad de los resultados así como la obtención del mínimo valor de incertidumbre, el proceso de medición de los valores se

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

realizará en tres ocasiones. Así, se analizará si será posible la utilización de la recta de calibración del dispositivo controlador *kit-controller* proporcionada por el fabricante. El comportamiento del dispositivo controlador *kit-controller* responde a la ecuación de una recta en la que las abscisas son los valores de tensión correspondientes, en voltios, y las ordenadas son los valores de intensidad, en miliamperios. Para una completa calibración de dicho dispositivo controlador *kit-controller* es necesario hallar los errores que afectan a la pendiente de la recta, llamada Δm , y a la ordenada en el origen, llamada Δb . Estos errores han sido calculados considerando el error accidental y el error de precisión, con el fin de tomar el mayor de ellos para calcular la desviación estándar de la muestra de datos de tensión, llamada σ . Las ecuaciones 4.3 y 4.4 corresponden a los errores asociados a la pendiente y a la ordenada en el origen, respectivamente:

$$\Delta m = \sqrt{\frac{n\sigma^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (1)$$

$$\Delta b = \sqrt{\frac{\sigma^2 \sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (2)$$

En la tabla 4.4 se muestran los datos obtenidos relativos al dispositivo controlador *kit-controller* colocado en el vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto.

Tabla 4.4: Relación tensión .vs. intensidad del dispositivo controlador *kit-controller*

Tensión [V]	Intensidad [mA]
0	0
0,25	0
0,5	0
0,75	248,333
1	524,166
1,25	821,667
1,5	1132,5
1,75	1431,667
2	1730,833

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

2,25	2037,5
2,5	2350,833
2,75	2685,833
3	3016,667
3,25	3380,333
3,5	3748,333
3,75	4101,667
4	4486,667
4,3	4937,5
4,6	5410,833
5	6144,167

A partir de los datos de la tabla 4.3 se obtiene la figura 4.13, que muestra la linealidad del dispositivo controlador *kit-controller*, junto a la ecuación de la recta y a su coeficiente de correlación.

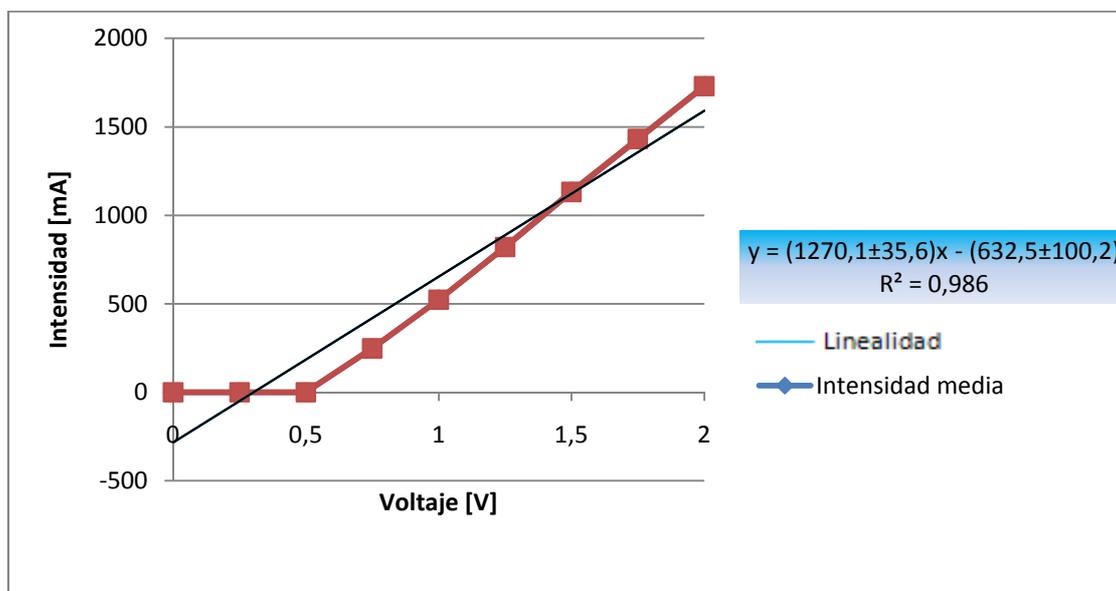


Figura 4.13: Linealidad del dispositivo controlador *kit-controller*

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

De este estudio de calibración del dispositivo controlador *kit-controller* utilizado en el presente proyecto, utilizado para regular la tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico, se puede concluir que para su correcto funcionamiento, se debe alimentar con un voltaje que no supere los 2 V, dado que hasta estos valores de tensión los datos obtenidos se ajustan a la recta. Sin embargo, a partir de esa tensión de alimentación, se obtienen valores atípicos en cada una de las tres tomas de datos.

4.2 SOFTWARE

En el apartado de software se comentará cómo se ha realizado la implementación del software LabVIEW, suministrado por la empresa multinacional National Instruments, destacando en ella la adquisición, generación, tratamiento y almacenamiento de las señales.

4.2.1 INTRODUCCIÓN

Los datos recogidos por los sensores de desplazamiento deben ser tratados por un software específico con el fin de poder estudiarlos correctamente. Para llevar a cabo dicho tratamiento, es necesario compilar y analizar los datos. La aplicación del software LabVIEW proporcionada por la empresa multinacional National Instruments, llamado LabVIEW, en su versión 8.5, será el software instalado en los equipos utilizados en el presente proyecto con el fin de tratar los datos anteriormente comentados. Esta aplicación permite emplear una única interfaz para la medición y el estudio de miles de instrumentos a partir de distintos buses. Así, a través del aprendizaje a partir de prácticas experimentales, se pueden abordar temas relacionados con múltiples disciplinas.

4.2.2 ENTORNO DEL PROGRAMA

El software LabVIEW está desarrollado en una plataforma cien por cien interactiva, esto permite a los investigadores poder analizar y cambiar los datos aunque las

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

aplicaciones se desarrollen en ese mismo instante. Además, se pueden aplicar al sistema más análisis de forma rápida y efectiva, a la vez que se realizan los ajustes pertinentes de los datos que proceden de los sensores en tiempo real.

LabVIEW, en su versión 8.5, proporciona una sencilla interfaz desde la cual se pueden crear multitud de informes interactivos, desde gráficas dinámicas, tablas y textos, con el fin de mostrar y valorar los datos adquiridos o que se encuentren en proceso. Este software permite además exportar los datos recogidos a paquetes de análisis para poder tratarlos y estudiarlos de forma más eficiente.

En resumen, se ha elegido el software LabVIEW, en su versión 8.5, para trabajar en el presente proyecto ya que, además de cumplir con las necesidades exigidas en el mismo, proporciona la capacidad de adquirir y guardar datos procedentes de un sensor externo y permite profundizar en la investigación gracias a sus extensas bases. También posee capacidades que enriquecen la enseñanza, aprendizaje y desarrollo de la propia investigación, además de proporcionar una interfaz sencilla, intuitiva e interactiva, haciendo más sencillo su aprendizaje y uso respecto a otras herramientas académicas con un entorno más complejo.

Para la creación de informes interactivos por medio del software LabVIEW, en su versión 8.5, hay que tener en cuenta que su interfaz se puede separar en ventanas de estudio, que son las que el propio software aporta a la hora de crear dicho informe interactivo desde cero. La primera ventana de estudio, el diagrama de bloques (*block diagram*) sirve para desarrollar en ella la programación correspondiente al informe que se quiera realizar. La segunda ventana de estudio, el panel frontal (*frontal panel*) sirve para presentar de forma más dinámica todas las gráficas, tablas y elementos de tratamiento de datos. El diagrama de bloques y el panel frontal están conectados a través de los terminales (elementos que sirven como entradas o salidas de los datos) [17, 18].

En las figuras 4.14 y 4.15 se pueden observar las ventanas de estudio o de trabajo correspondientes a un ejemplo de informe interactivo creado en el software LabVIEW, en su versión 8.5.

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

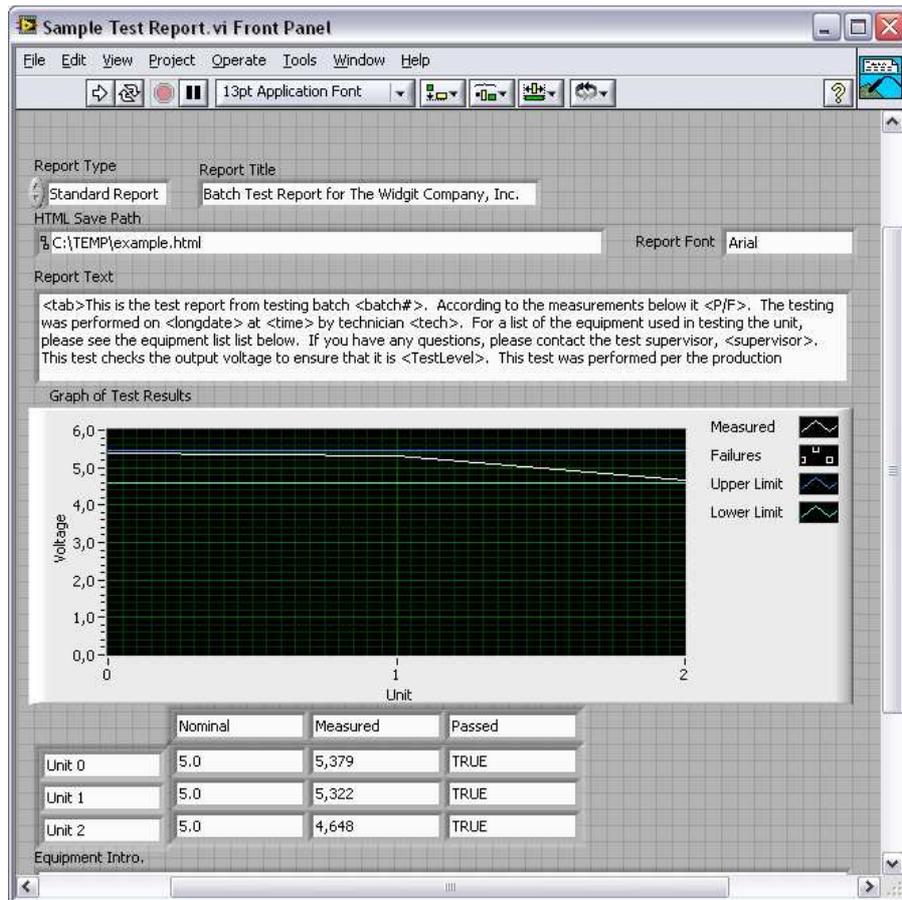


Figura 4.14: Ejemplo de informe interactivo (Ventana *front panel*)

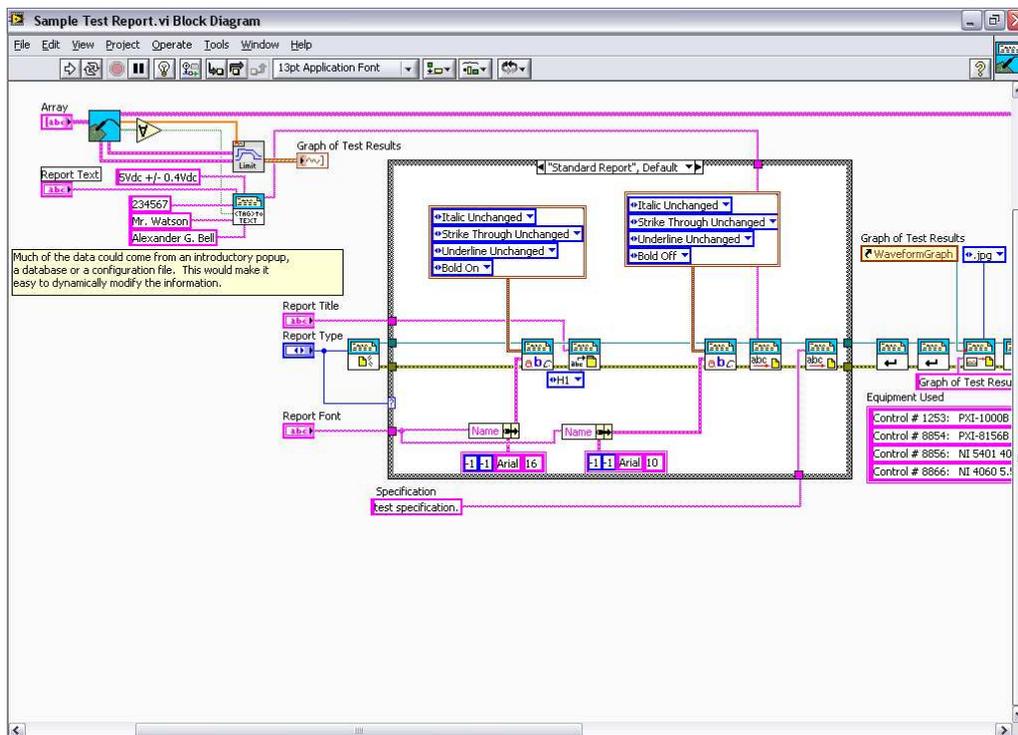


Figura 4.15: Ejemplo de informe interactivo (Ventana *block diagram*)

4.2.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW

4.2.3.1 ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES DE ENTRADA EN EL SOFTWARE LABVIEW

Con el fin de facilitar la programación mediante el software LabVIEW, en su versión 8.5, se dispone del asistente DAQ Assistant (*Data Acquisition with NI myDAQ*), el cual puede encontrarse en la paleta de funciones del diagrama de bloques, como se muestra en la figura 4.16.



Figura 4.16: Localización del asistente DAQ Assistant (*Data Acquisition with NI myDAQ*)

Una vez inicializado el asistente DAQ Assistant, este permite seleccionar el tipo de señal, ya sea analógica o digital, así como la tarjeta que se usará y el canal que se desea conectar en ella. En la figura 4.17 se muestra el menú en el cual se selecciona el tipo de señal que se desea y en la figura 4.18 se muestra el menú en el cual se selecciona la tarjeta y el canal correspondiente.

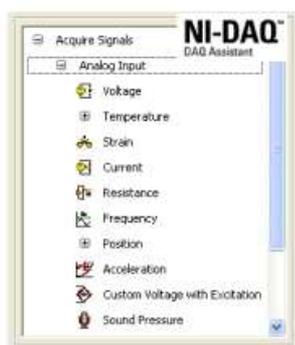


Figura 4.17: Menú de selección del tipo de señal



Figura 4.18: Menú de selección de la tarjeta y el canal

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

A continuación, el siguiente paso en la implementación del software con el fin de adquirir y tratar la señales de entrada en el software LabVIEW es seleccionar el número de medidas que se quiere realizar y la frecuencia de dicha toma de medidas que se quiere obtener de los amortiguadores del vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto, a partir de los sensores de desplazamientos instalados en el mismo. La figura 4.19 muestra el cuadro donde se realizan los ajustes anteriormente comentados y la figura 4.20 muestra a su vez la recta de calibración que nos permite realizar la conversión de tensión a desplazamiento.

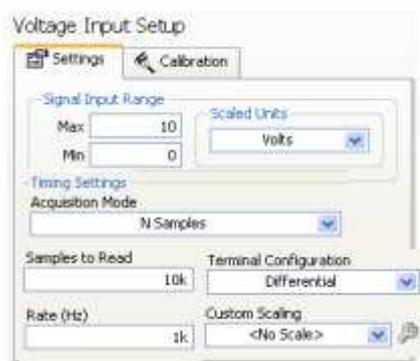


Figura 4.19: Cuadro de ajustes del DAQ Assistant

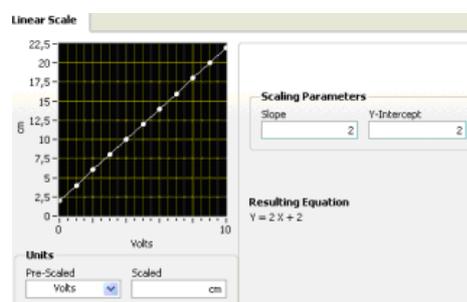


Figura 4.20: Recta de conversión de tensión a desplazamiento

Con estos ajustes queda perfectamente definido el DAQ Assistant que permite acoplar diferentes indicadores, tanto numéricos como gráficos, que facilitarán la visualización de la curva trazada en la realización de los ensayos así como los datos tabulados que se podrán convertir fácilmente a distintos formatos, con el fin de tratarlos adecuadamente. En el presente proyecto dichos datos se han convertido a la base de datos de Microsoft Excel. Con el fin de compactar la información comentada anteriormente, en la figura 4.21 se muestra el conjunto de conexiones en el diagrama de bloques (*Block diagram*) del software LabVIEW, en su versión 8.5.

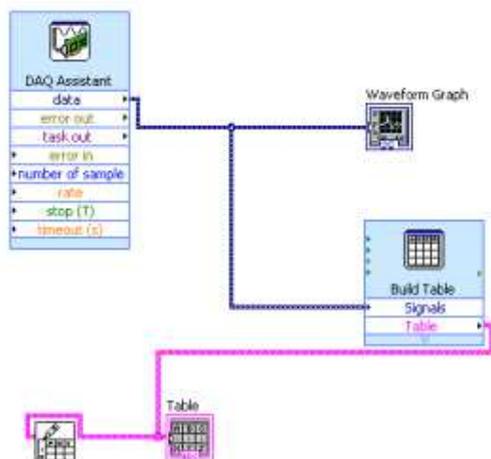


Figura 4.21: Definición gráfica de la adquisición de datos en el diagrama de bloques (*Block diagram*) del software LabVIEW

Todo el proceso comentado hasta ahora en este apartado de implementación del software LabVIEW permite la adquisición de señales analógicas, lo cual constituye una parte importante con el fin de realizar la toma de datos sobre los amortiguadores instalados en el vehículo automóvil del presente proyecto para proceder a su posterior tratamiento.

4.2.3.2 GENERACIÓN DE LAS SEÑALES DE ENTRADA EN EL SOFTWARE LABVIEW

Para suministrar la tensión adecuada al amortiguador magneto-reológico, es necesario programar un código en el software LabVIEW que permita indicar el valor de tensión que se quiere enviar. Por tanto, se requiere la generación de señal en forma de tensión a partir del código que se muestra en la figura 4.22.

CAPÍTULO 4: EQUIPOS EMPLEADOS

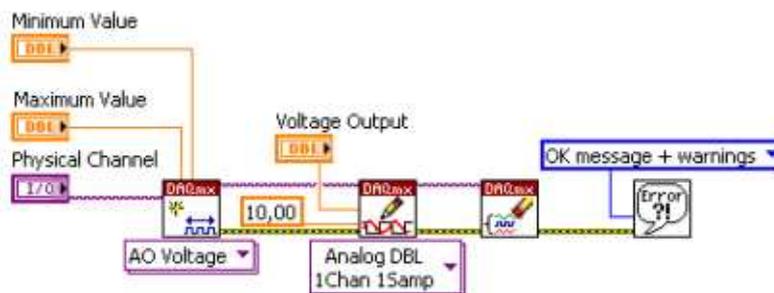


Figura 4.22: Definición gráfica de la generación de señal en el diagrama de bloques (*Block diagram*) en el software LabVIEW

Como se puede observar en la figura 4.22, este código consiste en definir unos valores máximos y mínimos en un mismo canal del software LabVIEW. A continuación, se define la señal de tensión analógica como señal de salida. La conexión adecuada de todos estos elementos permite acudir al panel de control (*Control panel*) para proceder a la elección del canal de salida que se requiera así como a la definición de la tensión de alimentación oportuna. En la figura 4.23 se muestra la definición gráfica de la generación de señal en el panel de control (*Control Panel*) en el software LabVIEW.

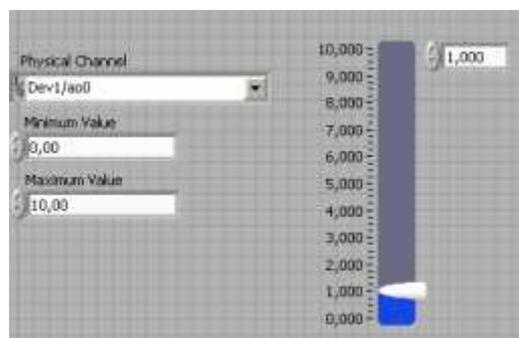


Figura 4.23: Definición gráfica de la generación de señal en el panel de control (*Control panel*) en el software LabVIEW

Con todo este proceso ya se ha completado la implementación del software LabVIEW en el presente proyecto. El siguiente paso consiste en instalar, conectar y alimentar todos los equipos comentados anteriormente, todo ello quedará definido en el próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

INSTALACIÓN, ALIMENTACIÓN Y CONEXIONADO

5.1 INTRODUCCIÓN

Como se explicó en el capítulo 4, para la correcta realización de las medidas que exige el presente proyecto ha sido necesaria la instalación de los equipos que se citan a continuación:

- Amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 fabricado por la empresa Lord

- Sensores de desplazamiento extensiométricos LVDT de tipo MTN / E de la serie de transductores industriales.
- Equipo controlador PXI suministrado por la empresa National Instruments
- Periféricos para el manejo del equipo controlador PXI: Pantalla de ordenador, teclado y ratón para visualizar y analizar los datos obtenidos en las mediciones.

El estudio del comportamiento de un vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basado en un amortiguador magneto-reológico modelo RD-1005.3 precisa de varios ensayos con diferentes obstáculos y perfiles de terreno a distintos niveles de tensión del amortiguador. Esto es debido, como se comentó en el capítulo 3, a que el comportamiento de los fluidos reológicos varía en función de la tensión a la que se encuentren alimentados. Estos niveles de tensión se realizarán entre 0 y 5 V.

Los ensayos se han realizado dentro del campus de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, variando entre terreno adoquinado, escalón y badén. Cada ensayo se ha realizado bajo cuatro niveles diferentes de tensión de alimentación del amortiguador: 0, 1, 2.5 y 5 V. Para el ensayo en terreno adoquinado, también se ha variado el nivel de velocidad del vehículo automóvil empleado en el presente proyecto, realizando las medidas a 20, 30 y 40 km/h.

5.2 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS

Para poder realizar las pruebas dinámicas sin depender de la instalación eléctrica de la red, es necesario instalar todos los equipos y periféricos de medida empleados dentro del vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto.

La ubicación elegida para el equipo controlador PXI es el asiento delantero derecho. Esta disposición permite al conductor del vehículo automóvil verificar de forma cómoda y eficaz las conexiones sin necesidad de bajarse del propio vehículo e

CAPITULO 5: INSTALACIÓN, ALIMENTACIÓN Y CONEXIONADO

incluso, encender o apagar el equipo cuando sea necesario. En la figura 5.1 se puede observar la disposición del equipo controlador PXI dentro del vehículo automóvil empleado en el presente proyecto.



Figura 5.1: Ubicación del equipo controlador PXI

Finalmente, los periféricos necesarios para la monitorización pertinente de los datos y el manejo del equipo controlador PXI, es decir, el teclado, la pantalla y el ratón, se instalaron en el asiento central trasero. De esta forma, las personas encargadas de manejar los equipos para la generación, registro y grabado de los datos disponen de un amplio espacio de maniobra con el fin de trabajar cómodamente. Además, debido a la gran longitud de los diferentes cables de alimentación y conexionado del equipo controlador PXI, estos permitían fácilmente esta ubicación. En la figura 5.2 se muestra la colocación de estos dispositivos periféricos en el momento de la realización de los ensayos dinámicos.



Figura 5.2 Ubicación de los dispositivos periféricos: pantalla, teclado y ratón

5.3 ALIMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS INSTALADOS EN EL VEHÍCULO AUTOMÓVIL

La instalación de los equipos de medida empleados en el presente proyecto requiere que la alimentación dependa exclusivamente de la suministrada por el propio vehículo automóvil con el fin de poder realizar las pruebas en movimiento. La alimentación de los equipos citados anteriormente es diferente para cada uno de ellos. El equipo controlador PXI está alimentado directamente por la batería del propio vehículo automóvil, ya que este equipo necesita una corriente que se encuentre entre 11 y 30 V, y esta facilita 12 V. El teclado y el ratón a su vez, están conectados al chasis del equipo de National Instruments vía USB. En cuanto a los sensores de desplazamiento, estos están alimentados por el módulo NI PXI 6230, gracias a las 4 salidas analógicas de las que se dispone. La tercera salida del NI PXI 6230 será utilizada para proporcionar de una manera concreta y correctamente calculada la tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico. La cuarta y última salida quedarán vacías. En la figura 5.3 se muestra el esquema de las conexiones realizadas en el módulo NI PXI 6230.

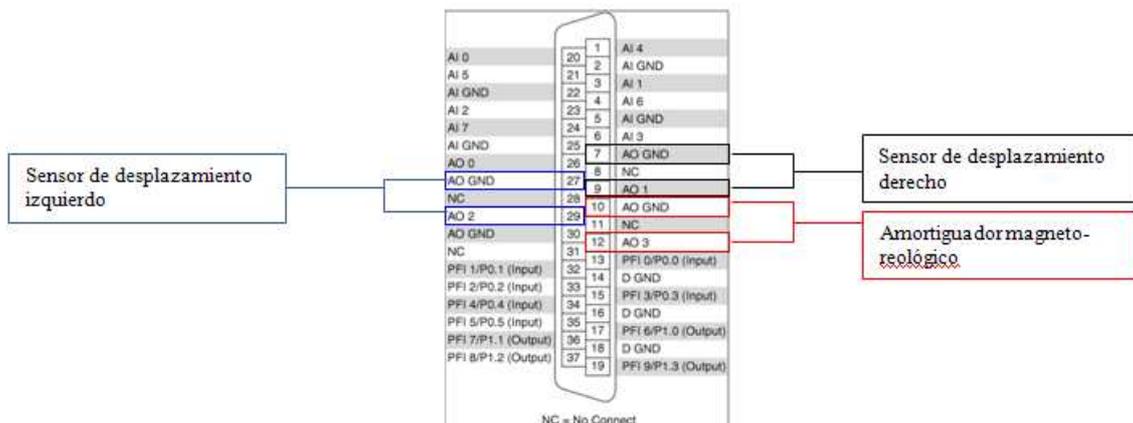


Figura 5.3 Esquema de las conexiones realizadas en el módulo PXI 6230

Finalmente, la tensión necesaria para alimentar el amortiguador magneto-reológico se toma directamente del conector del mechero mediante un adaptador. La pantalla necesita 220 V, por lo que se conecta directamente a la batería del coche mediante un transformador de señal, ya que la salida de la batería, como se comentó anteriormente, son 12 V.

5.4 CONEXIONADO ENTRE EQUIPOS

El conexionado llevado a cabo entre el amortiguador, los dos sensores de desplazamiento extensiométricos y los módulos PXI 6230 y PXI 4472B, sigue el esquema mostrado en la figura 5.4. Para poder regular digitalmente la tensión de alimentación al amortiguador magneto-reológico, se ha conectado el dispositivo controlador *Kit Controller* al módulo PXI 6230.

Los sensores de desplazamiento extensiométricos empleados disponen de tres cables: uno de color azul, otro de color rojo y otro de color verde. Sus especificaciones son:

Azul: Tensión de 0 V.

Rojo: Alimentación entre 0 y 10 V.

Verde: Señal.

En el caso del sensor de desplazamiento extensiométrico instalado para medir la suspensión delantera derecha, el cableado cumple con el código de colores indicado anteriormente, sin embargo, para el caso del sensor de desplazamiento extensiométrico instalado en la suspensión izquierda, fue necesario empalmar cable para poder guiar dicho cableado hasta el equipo controlador PXI. Por ello, el código de colores de los cables de señal correspondientes a este sensor de desplazamiento extensiométrico es:

Marrón: Tensión de 0 V.

Amarillo: Alimentación entre 0 y 10 V.

Verde: Señal

Debido a que los sensores de desplazamiento extensiométricos únicamente cuentan con un cable a una tierra de 0 V, ha sido necesario realizar un puentado mediante clemas para poder llevar la misma tierra a la señal y a la alimentación.

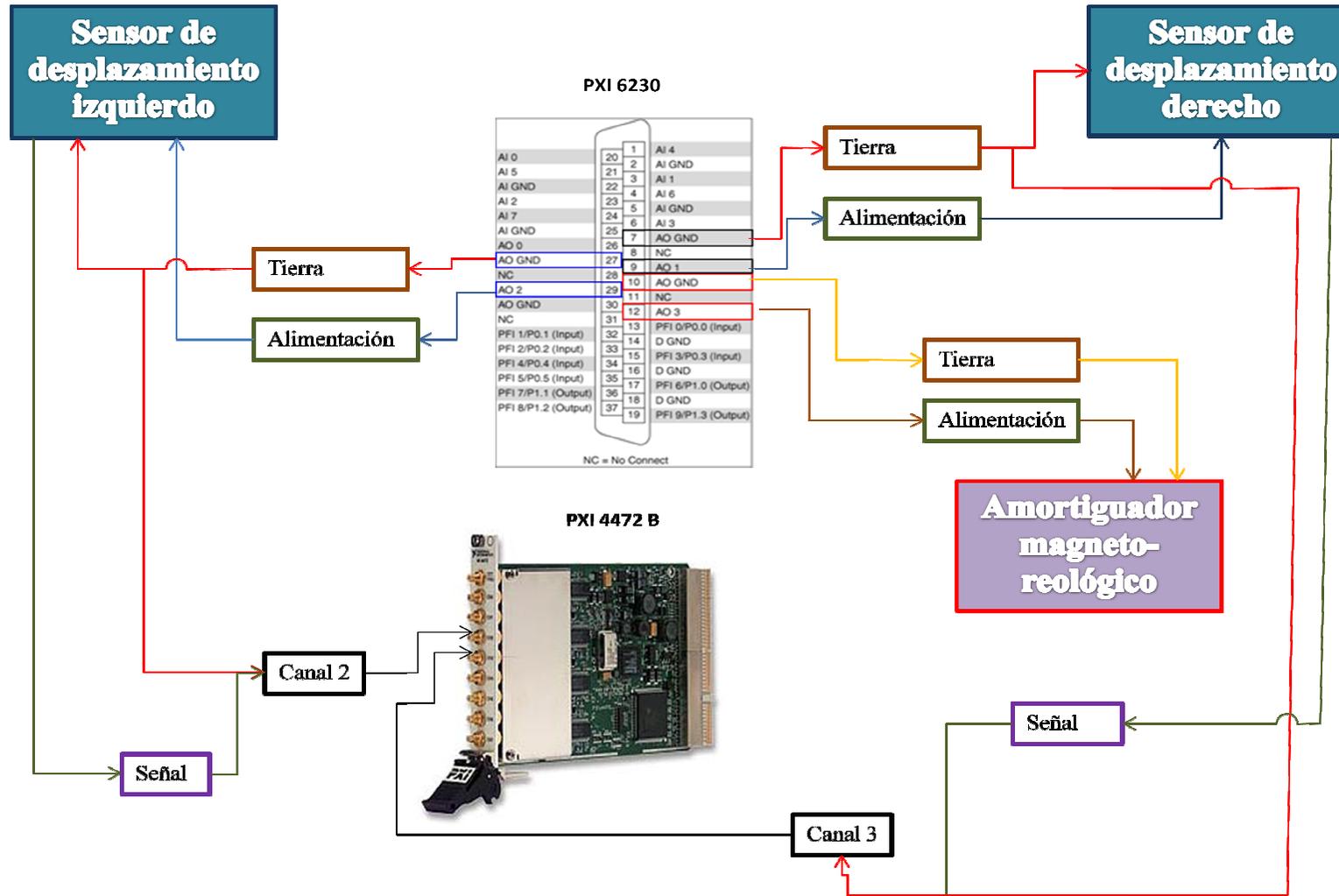


Figura 5.4 Esquema de las conexiones realizadas

CAPÍTULO 6

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los diferentes ensayos a los que se va a someter al vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basada en amortiguadores magneto-reológicos. A continuación, se describe cada uno de ellos.

6.2 ENSAYOS REALIZADOS SOBRE TERRENO ADOQUINADO

Para cada ensayo realizado sobre terreno adoquinado se ha recorrido una distancia aproximada de 100 metros, a una velocidad determinada y con una tensión aplicada directamente al amortiguador magneto-reológico a través del software LabVIEW, en su versión 8.5. En la figura 6.1 se muestran dos imágenes representativas de los ensayos realizados en terreno adoquinado así como el tramo recorrido en cada uno de ellos.



Figura 6.1 Ensayo sobre terreno adoquinado

Las velocidades escogidas para la realización de cada uno de los ensayos sobre terreno adoquinado del presente proyecto han sido 20, 30 y 40 km/h. Para cada valor de la velocidad escogida, se ha variado la tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico en cuatro ocasiones, tomando los valores de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente. La figura 6.2 muestra el esquema representativo sobre la distribución para los distintos ensayos realizados en terreno adoquinado. Cada ensayo se ha realizado 2 veces, una vez en el viaje de ida y otra en el viaje de vuelta del recorrido escogido.

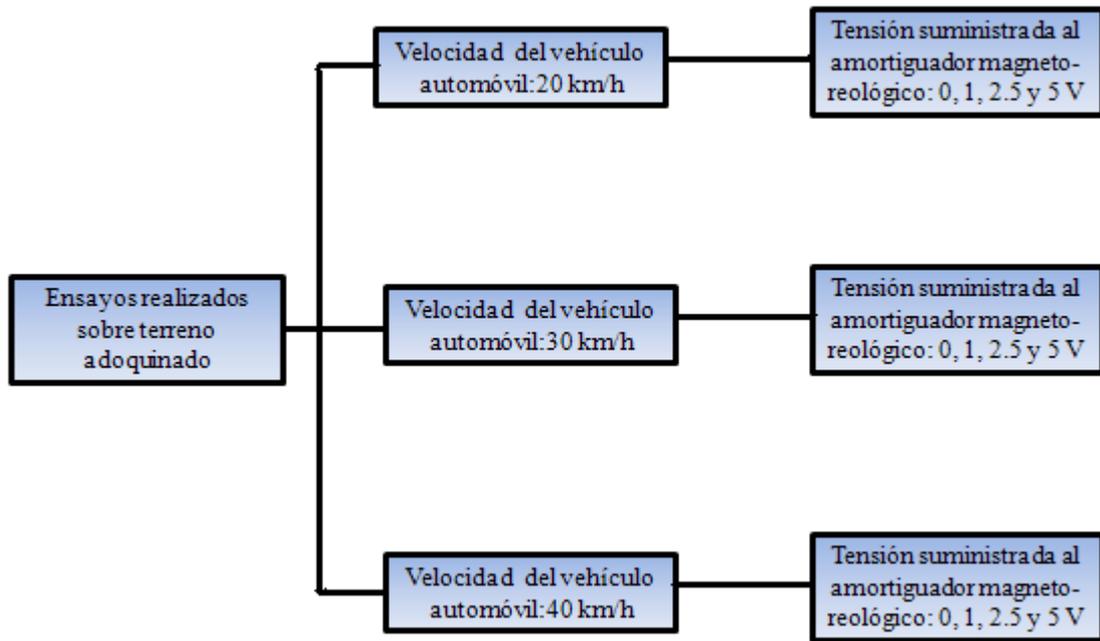


Figura 6.2 Esquema de los ensayos realizados sobre terreno adoquinado

6.3 ENSAYOS REALIZADOS SOBRE ESCALÓN

El siguiente ensayo realizado en el presente proyecto es el ensayo sobre escalón. En esta prueba, se hace circular al vehículo a velocidad constante de 20 km/h con el fin de superar el escalón que se muestra en la figura 6.3. Respecto a la variación de tensión del amortiguador magneto-reológico, los valores de tensión suministrados a este han sido de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente.



Figura 6.3 Ensayo sobre escalón

CAPÍTULO 6: DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

La figura 6.4 muestra un esquema representativo sobre la distribución para los distintos ensayos realizados sobre escalón.

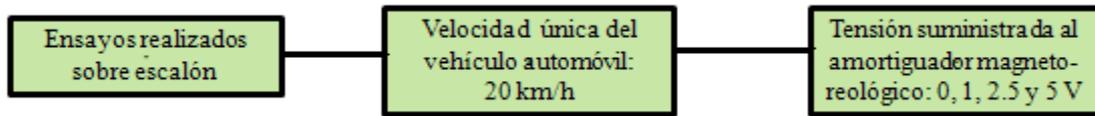


Figura 6.4 Esquema de los ensayos realizados sobre escalón

6.4 ENSAYOS REALIZADOS SOBRE BADÉN

La última toma de datos del estudio objeto del presente proyecto se centra en los ensayos realizados sobre badén, el cual consiste en hacer circular el vehículo automóvil con el fin de superar dos badenes separados entre sí una distancia aproximada de 15 metros. En la figura 6.5 se muestra una imagen representativa de los ensayos realizados sobre badén.



Figura 6.5 Ensayo sobre badén

En cada ensayo realizado sobre badén se ha hecho circular al vehículo automóvil a una velocidad constante de 20 km/h. Esta velocidad ha sido escogida debido a que es la velocidad a la que se circula realmente a la hora de superar un badén de características similares. La tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico ha sido variada en los distintos ensayos realizados, tomando valores de 0, 1, 2.5 y 5 V, respectivamente. También cabe destacar que la realización de los ensayos sobre badén se ha realizado en último lugar dado que es el ensayo más agresivo para el amortiguador. La figura 6.6

CAPÍTULO 6: DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

muestra el esquema representativo sobre la distribución para los distintos ensayos realizados sobre badén.

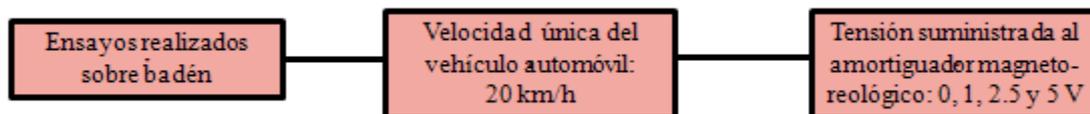


Figura 6.6 Esquema de los ensayos realizados sobre badén

CAPÍTULO 7

RESULTADOS EXPERIMENTALES

7.1 TRATAMIENTO DEL RUIDO DE LA SEÑAL

En este capítulo se recogen los datos obtenidos de los ensayos descritos en el capítulo 6. En primer lugar, se realiza un estudio temporal de la señal obtenida de los sensores de desplazamiento extensiométricos, para lo cual es necesario calcular el *Root Mean Square* (RMS). A continuación, se procede a realizar un estudio en frecuencia, siendo necesario calcular el *Power Spectral Density* (PSD) procedente de los sensores de desplazamiento. El *Power Spectral Density* (PSD) se utiliza para realizar un estudio en frecuencia, el cual generalmente se ve afectado por la generación de ruido a altas frecuencias, con el fin de decidir si es necesario el uso de un filtro de paso alto, un filtro de paso bajo o si no se requiere el uso de ningún tipo de filtro.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con motivo de valorar si es razonable filtrar las señales obtenidas para cada uno de los ensayos realizados para eliminar el ruido existente en ellas, se procede a tratar la señal obtenida del sensor de desplazamiento extensiométrico situado del lado del amortiguador magneto-reológico para el ensayo realizado en el badén a la velocidad constante de 20 km/h con una tensión suministrada de 0 V. Si los resultados arrojados son aceptables, se procederá al tratamiento de las señales de todos los ensayos realizados con el fin de eliminar el ruido que contiene la señal de cada uno de ellos.

La figura 7.1 muestra que el estudio en frecuencia realizado no se encuentra afectado por la generación de ruido. Esto se demuestra empleando un filtro de paso bajo de tipo *Butterworth*, con una frecuencia de corte de 10^2 rad/s. Este tipo de filtro de paso bajo muestra dos ondas superpuestas, por una lado la señal original procedente del sensor de desplazamiento extensiométrico situado del lado del amortiguador magneto-reológico y por otro la señal filtrada por el tipo de filtro de paso bajo escogido.

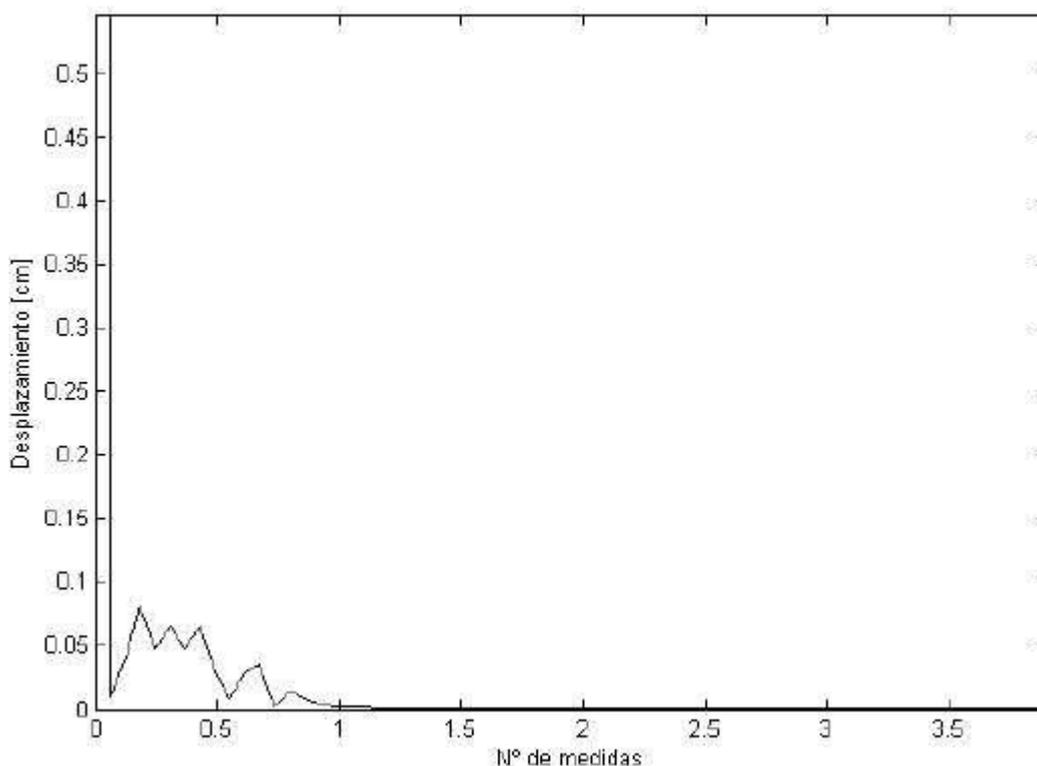


Figura 7.1 Power Spectral Density de la señal original del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 0 V

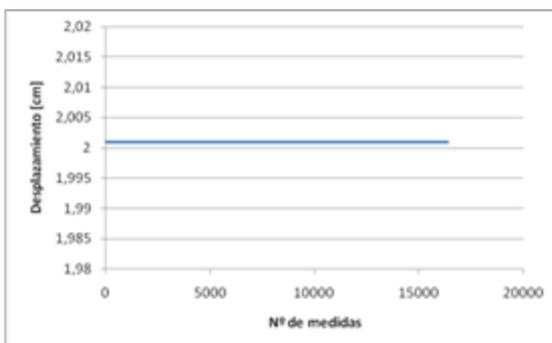
7.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO

ADOQUINADO A 20 km/h

A continuación, se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0, 1, 2.5, 3.5 y 5 V, respectivamente.

En la figura 7.2 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

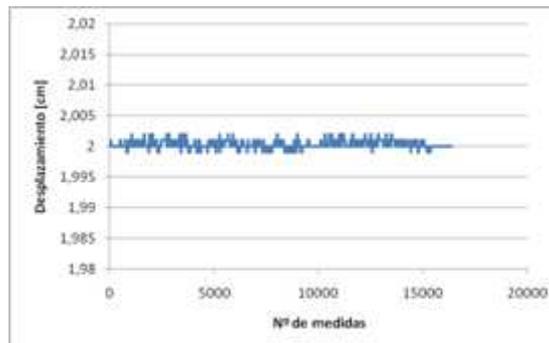
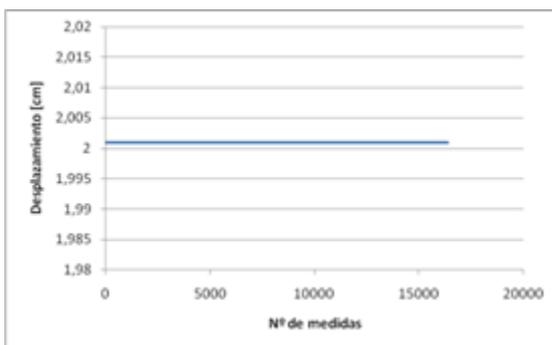


Figura 7.2 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 0 V

En la figura 7.3 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 1 V.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

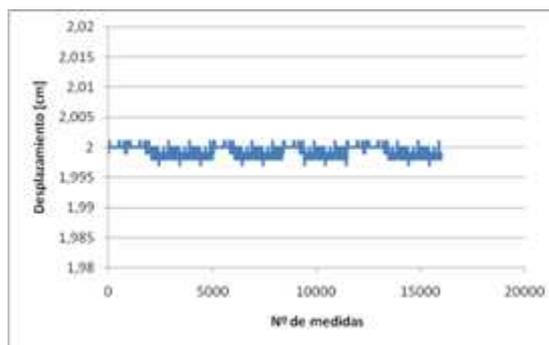
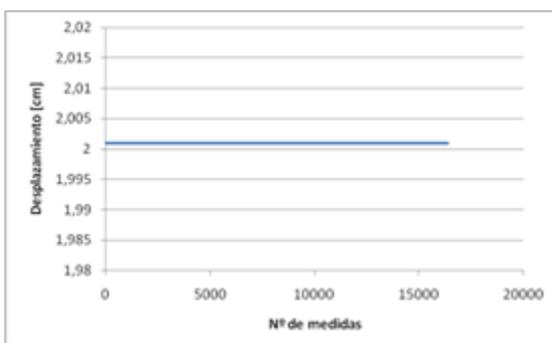


Figura 7.3 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 1 V

En la figura 7.4 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

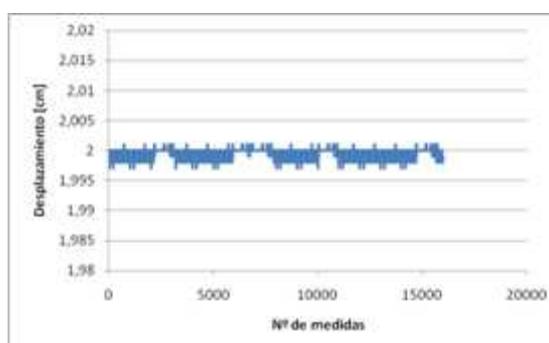


Figura 7.4 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 2.5 V

En la figura 7.5 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL

AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

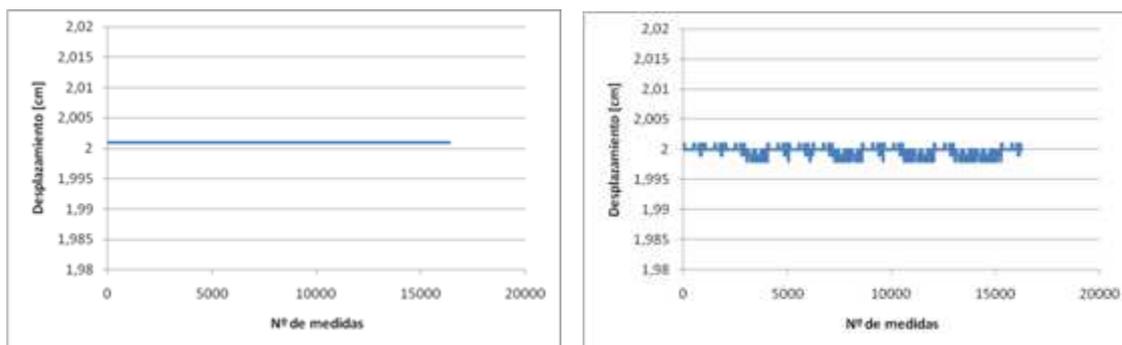


Figura 7.5 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 20 km/h y 5 V

7.2.1 COMPARACIÓN DEL VALOR ROOT MEAN SQUARE (RMS)

La tabla 7.1 muestra la comparación del valor Root Mean Square (RMS) correspondientes al amortiguador magneto-reológico y al amortiguador convencional, para cada valor de tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico en el ensayo sobre terreno adoquinado para la velocidad constante de 20 km/h.

Tabla 7.1: Comparación de datos RMS para terreno adoquinado a 20 km/h

Amortiguador	0 V	1 V	2.5 V	5 V
magneto-reológico	2,00027411	1,99938487	1,99928275	1,99959269
convencional	2,001	2,001	2,001	2,001

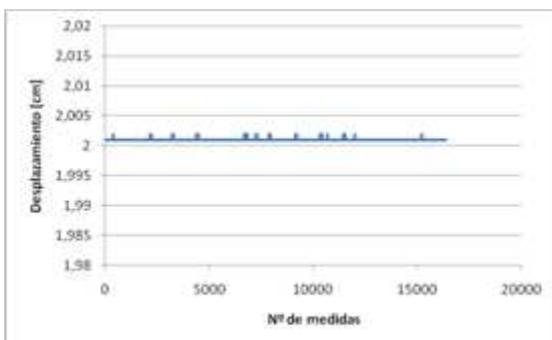
7.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO A 30 km/h

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 30 km/h. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0, 1, 2.5, 3.5 y 5 V, respectivamente.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 7.6 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 30 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

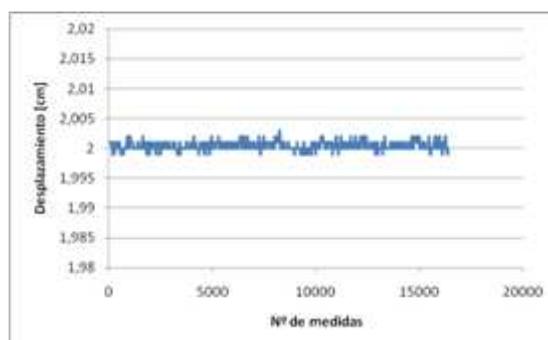
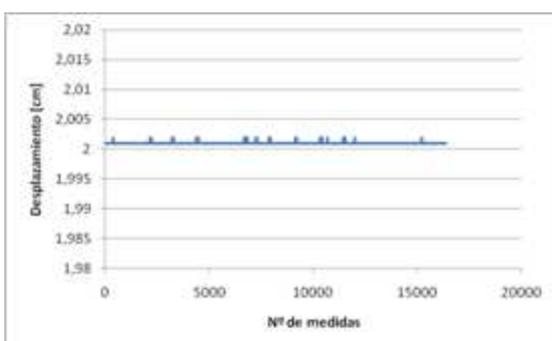


Figura 7.6 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 0 V

En la figura 7.7 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 30 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 1V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

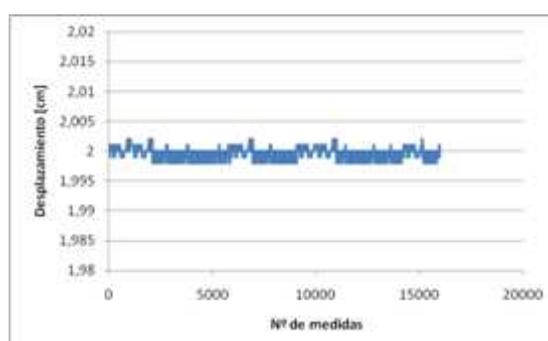


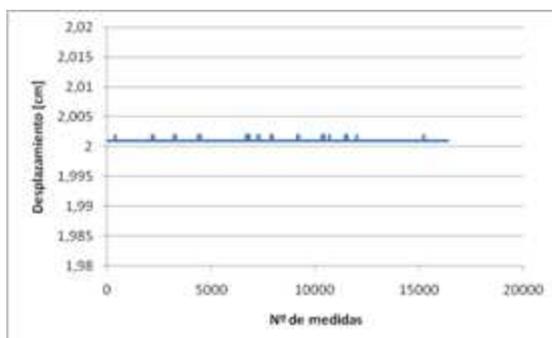
Figura 7.7 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 1 V

En la figura 7.8 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 30 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

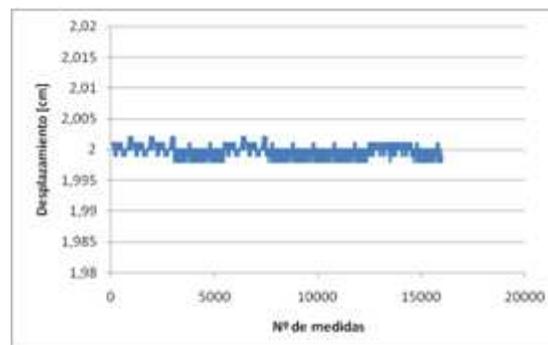
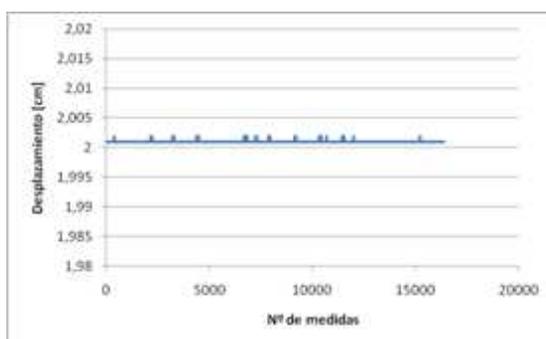


Figura 7.8 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 2.5 V

En la figura 7.9 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 30 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

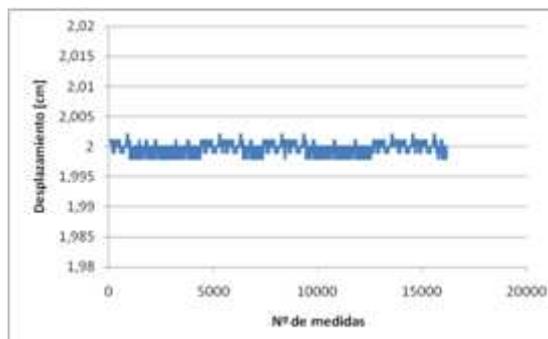


Figura 7.9 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 30 km/h y 5 V

7.3.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.2 muestra la comparación del valor Root Mean Square (RMS) correspondientes al amortiguador magneto-reológico y al amortiguador convencional,

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

para cada valor de tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico en el ensayo sobre terreno adoquinado para la velocidad constante de 30 km/h.

Tabla 7.2: Comparación de datos RMS para terreno adoquinado a 30 km/h

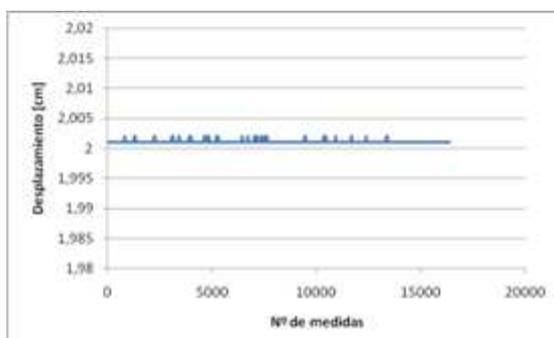
Amortiguador	0 V	1 V	2.5 V	5 V
magneto-reológico	2,00032776	1,99942846	1,999507	1,99954853
convencional	2,001012207	2,001012207	2,001012207	2,001012207

7.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE TERRENO ADOQUINADO A 40 km/h

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 40 km/h. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0, 1, 2.5, 3.5 y 5 V, respectivamente.

En la figura 7.10 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 40 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

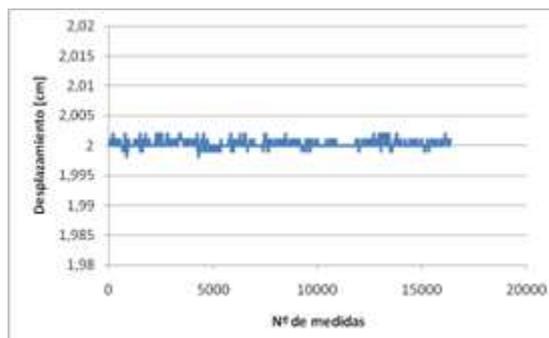
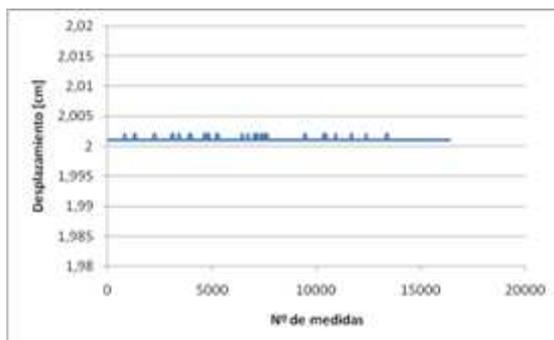


Figura 7.10 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 0 V

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 7.11 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 40 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

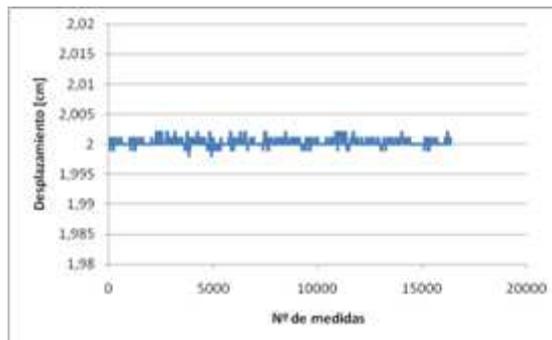
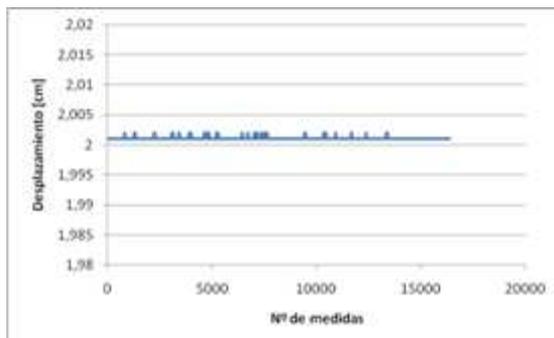


Figura 7.11 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 1 V

En la figura 7.12 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 40 km/h, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

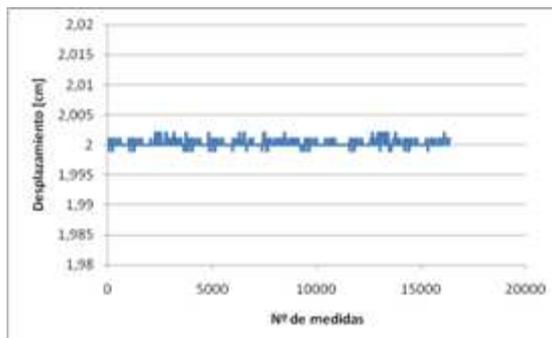


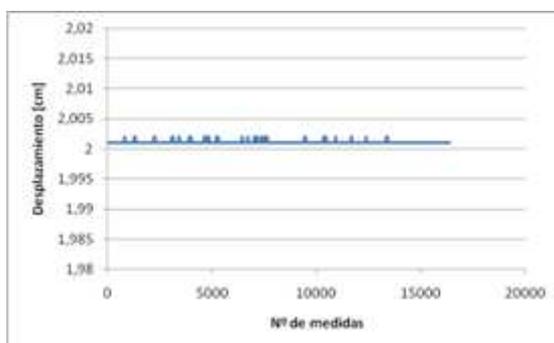
Figura 7.12 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 2.5 V

En la figura 7.13 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 40 km/h, la gráfica de la izquierda

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

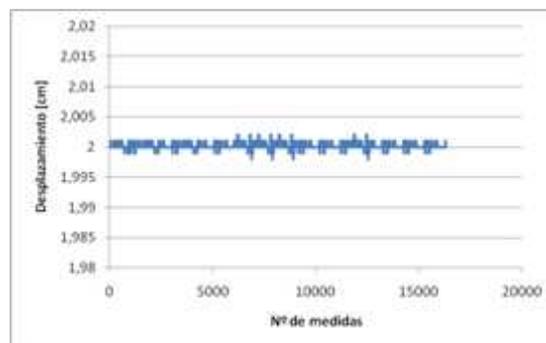


Figura 7.13 Estudio del ensayo sobre terreno adoquinado a 40 km/h y 5 V

7.4.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.3 muestra la comparación del valor Root Mean Square (RMS) correspondientes al amortiguador magneto-reológico y al amortiguador convencional, para cada valor de tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico en el ensayo sobre terreno adoquinado para la velocidad constante de 40 km/h.

Tabla 7.3: Comparación de datos RMS para terreno adoquinado a 40 km/h

Amortiguador	0 V	1 V	2.5 V	5 V
magneto-reológico	2,00029126	2,00027045	1,999	2,00022688
convencional	2,00133569	2,00133569	2,00133569	2,00133569

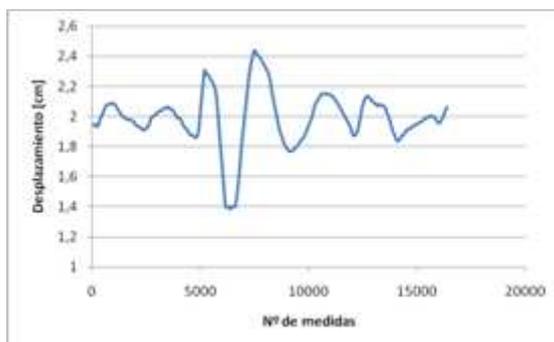
7.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ESCALÓN

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0, 1, 2.5, 3.5 y 5 V, respectivamente.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 7.14 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre escalón, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

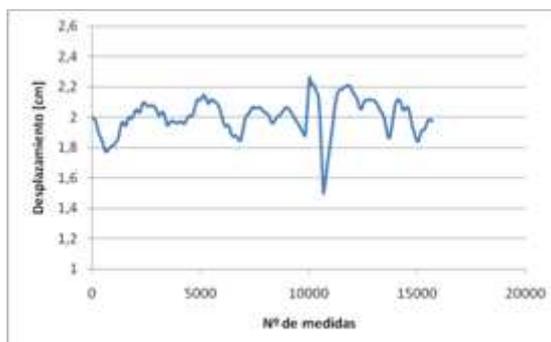
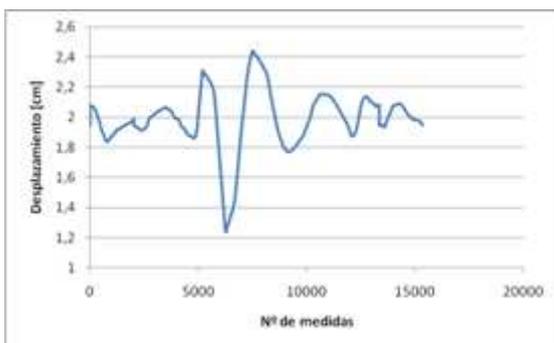


Figura 7.14 Estudio del ensayo sobre escalón a 0 V

En la figura 7.15 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre escalón, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

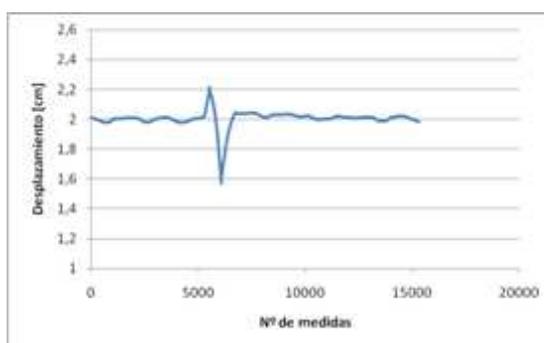


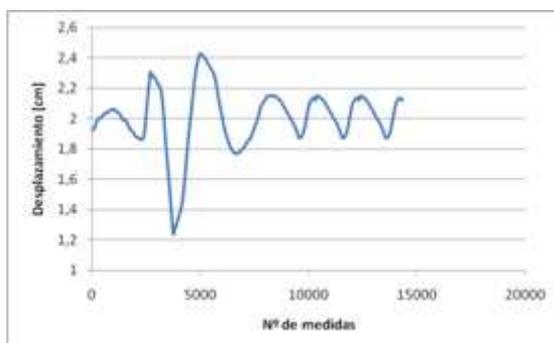
Figura 7.15 Estudio del ensayo sobre escalón a 1 V

En la figura 7.16 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre escalón, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 2 V.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

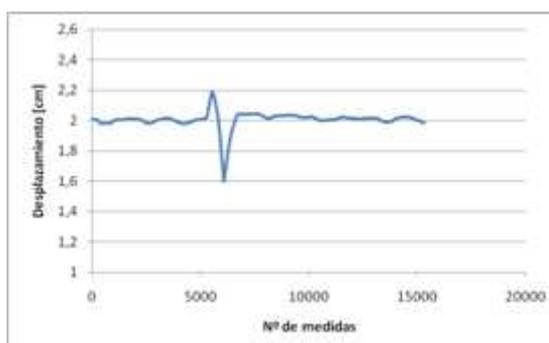
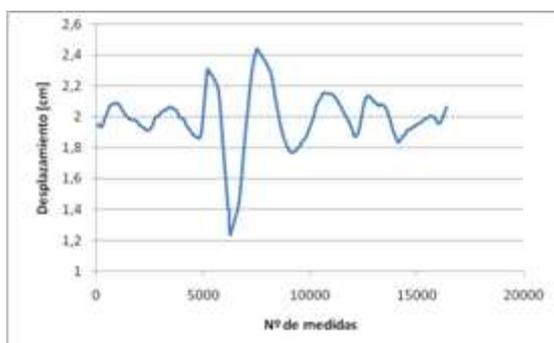


Figura 7.16 Estudio del ensayo sobre escalón a 2.5 V

En la figura 7.17 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre escalón, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

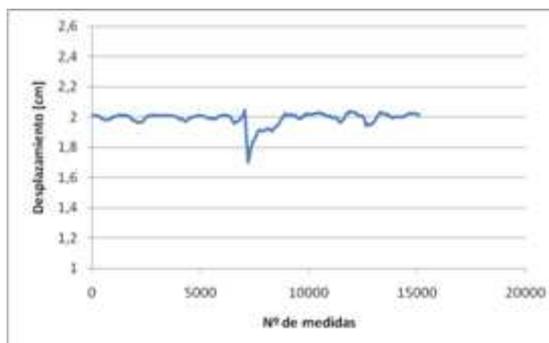


Figura 7.17 Estudio del ensayo sobre escalón a 5 V

7.5.1 COMPARACIÓN DEL VALOR *ROOT MEAN SQUARE* (RMS)

La tabla 7.4 muestra la comparación del valor Root Mean Square (RMS) correspondientes al amortiguador magneto-reológico y al amortiguador convencional,

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

para cada valor de tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico en el ensayo sobre escalón.

Tabla 7.4: Comparación de datos RMS para escalón

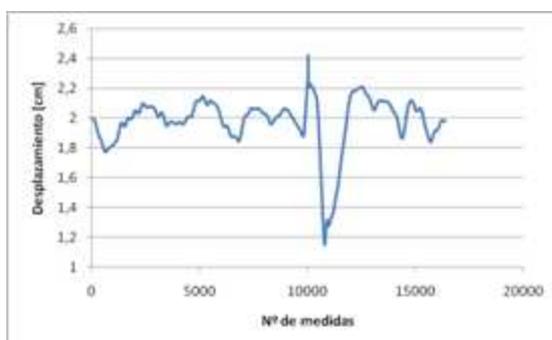
Amortiguador	0 V	1 V	2.5 V	5 V
magneto-reológico	2,005094698	2,00543285	2,004876289	1,991782101
convencional	1,989462891	1,986793832	2,002233092	1,987386047

7.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE BADÉN

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre terreno adoquinado a la velocidad constante de 20 km/h. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0, 1, 2.5, 3.5 y 5 V, respectivamente.

En la figura 7.18 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre badén, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 0 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

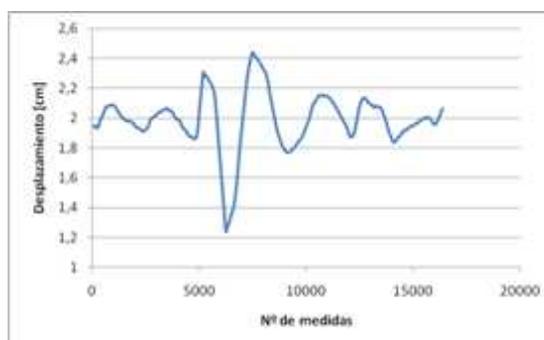


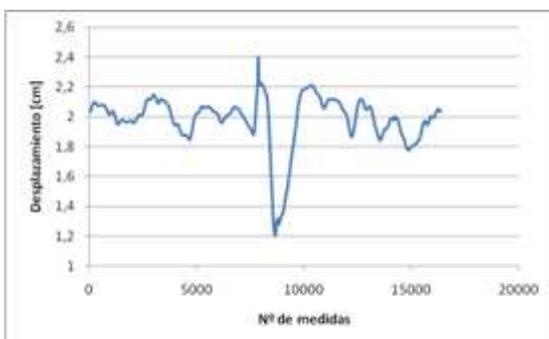
Figura 7.18 Estudio del ensayo sobre badén a 0 V

En la figura 7.19 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre badén, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de

CAPÍTULO 7: RESULTADOS EXPERIMENTALES

la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 1 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

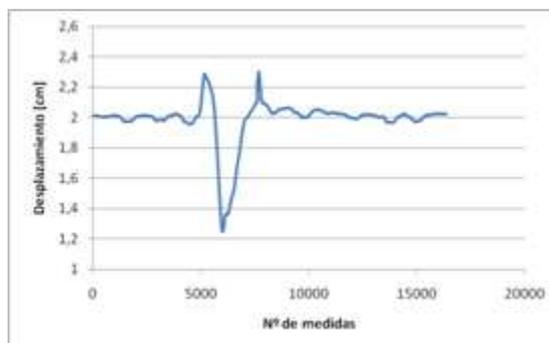
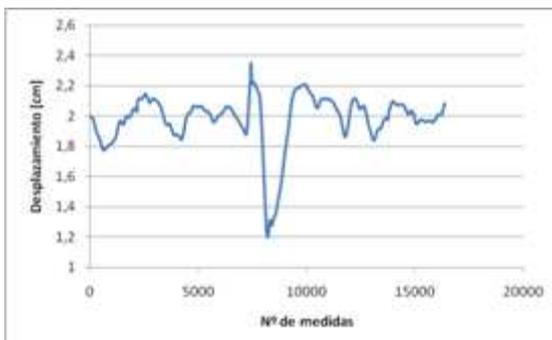


Figura 7.19 Estudio del ensayo sobre badén a 1 V

En la figura 7.20 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre badén, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 2.5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL



AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

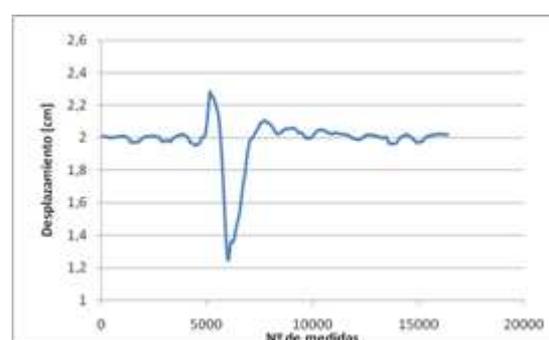


Figura 7.20 Estudio del ensayo sobre badén a 2.5 V

En la figura 7.21 se muestran los resultados experimentales obtenidos en el ensayo sobre badén, la gráfica de la izquierda corresponde al amortiguador convencional y la de la derecha al amortiguador magneto-reológico. Al amortiguador magneto-reológico se le ha suministrado una tensión de 5 V.

AMORTIGUADOR CONVENCIONAL

AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

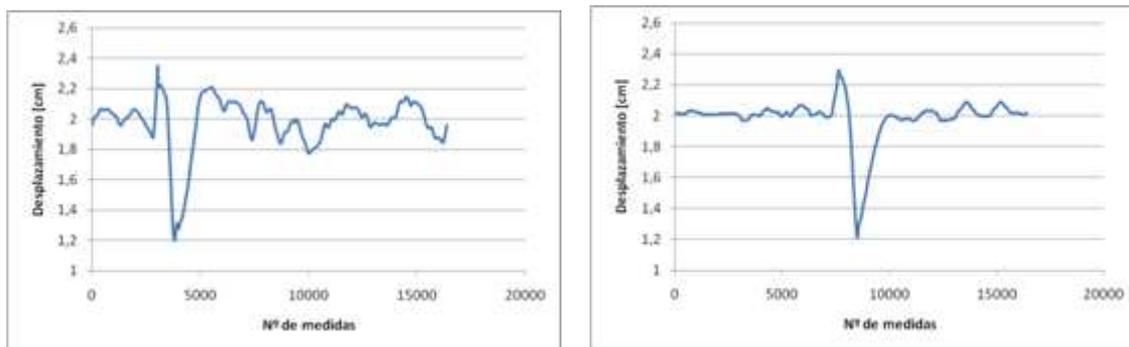


Figura 7.21 Estudio del ensayo sobre badén a 5 V

7.6.1 COMPARACIÓN DEL VALOR ROOT MEAN SQUARE (RMS)

La tabla 7.5 muestra la comparación del valor Root Mean Square (RMS) correspondientes al amortiguador magneto-reológico y al amortiguador convencional, para cada valor de tensión suministrada al amortiguador magneto-reológico en el ensayo sobre badén.

Tabla 7.5: Comparación de datos RMS para badén

Amortiguador	0 V	1 V	2.5 V	5 V
magneto-reológico	1,941945313	1,98549847	2,00994922	2,01689063
convencional	1,97334375	1,97697107	1,97691461	1,97688512

La tabla 7.6 muestra los valores Root Mean Square (RMS) correspondientes al amortiguador magneto-reológico para cada valor de tensión suministrada a este en cada uno de los ensayos realizados en el presente proyecto.

Tabla 7.6: Datos RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico

RMS	0v	1v	2,5v	5v
Adoquinado 20 km/h	2,00027411	1,99938487	1,99928275	1,99919269
Adoquinado 30 km/h	2,00032776	1,99952846	1,999507	1,99949853
Adoquinado 40 km/h	2,00029126	2,00027045	2,00022688	1,999
Escalón	2,005094698	2,00493285	2,004876289	1,991782101
Badén	1,941945313	1,98549847	2,00994922	2,01689063

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

8.1 CONCLUSIONES

El objetivo principal del presente proyecto es el estudio del comportamiento de un vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basado en un amortiguador magneto-reológico modelo RD-1005.3, fabricado y comercializado por la empresa alemana Lord.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Con el fin de analizar el comportamiento de un vehículo automóvil equipado con un sistema de suspensión semiactiva basado en un amortiguador magneto-reológico modelo RD-1005.3, se realizan diferentes ensayos sobre distintos terrenos, como son: terreno adoquinado, escalón y badén. A lo largo de los ensayos se ha ido variando la tensión del amortiguador, tomando valores de 0, 1, 2,5 y 5 V, respectivamente. Debido a la variación de tensión de alimentación ha sido posible conocer el distinto comportamiento que adopta el amortiguador frente a las distintas situaciones comentadas anteriormente. A su vez, se ha variado la velocidad del vehículo automóvil en los ensayos referentes al terreno adoquinado, tomando valores de 20, 30 y 40 km/h, respectivamente. En los ensayos referentes a escalón y badén es necesario mantener constante la velocidad de circulación del vehículo automóvil sobre el que se está haciendo los ensayos. Esta velocidad de circulación se debería mantener en torno a los 20 km/h, pero como presenta mucha dificultad conseguir una velocidad de circulación constante, por ello se varía entre 15 y 20 km/h. Con lo cual, con esta variación de tensiones y velocidades ha sido posible estudiar el comportamiento del amortiguador.

Teniendo en cuenta que el amortiguador magneto-reológico objeto de estudio fue fabricado para la suspensión de asientos de vehículos de gran tonelaje, puede darse el caso que algunas medidas no sean estrictamente correctas, dado que la carrera del vástago tiene muy poco recorrido y puede llegar al tope, muestreando unos datos que no son del todo exactos.

Atendiendo a los datos del valor RMS del amortiguador magneto-reológicos, obtenidos en el apartado 7.2, se puede observar que, según aumenta la tensión de alimentación de este, es decir, a medida que aumenta su dureza, los valores del RMS correspondientes a dicho amortiguador magneto-reológico disminuyen, lo cual significa que el desplazamiento experimentado también disminuye. Por otro lado, a medida que se aumenta la velocidad del vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto en un mismo terreno, los valores obtenidos del RMS correspondientes al amortiguador magneto-reológico también aumentan, es decir, dicho amortiguador experimenta un mayor desplazamiento.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Por otro lado, en los valores de RMS de los ensayos referentes a badén, se obtiene el mismo comportamiento que sobre terreno adoquinado, es decir, a medida que se aumenta la tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico, los valores correspondientes al RMS disminuyen.

En cuando a los datos del amortiguador convencional, obtenidos de igual manera en el apartado 7.2 del presente proyecto, se puede observar que son independientes de la variación de la tensión del amortiguador magneto-reológico, ya que su comportamiento se mantiene constante a lo largo de los ensayos realizados. Hay que destacar que lo que sí puede influir es el comportamiento de uno de los lados del vehículo automóvil en el otro lado como consecuencia del movimiento de balanceo. En este caso, al obtener los mismos valores en el amortiguador convencional, se puede deducir que prácticamente no influye este movimiento, todo ello justificable debido a las bajas velocidades y a los pequeños obstáculos a los que se ha visto sometido el vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto. Gracias a esta conclusión, se puede afirmar que la toma de datos es correcta.

Hay que destacar que entre los datos obtenidos de los valores RMS se observan datos atípicos, reflejados sobre el ensayo referente al badén, en el cual, los valores (RMS) van aumentando progresivamente al aumentar la tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico, cuando debería disminuir de forma progresiva. Así, para una tensión de alimentación de 5 V, el dato del valor RMS es mayor, y no menor, que en las tensiones de alimentación inferiores. Esto puede haber sido causado por disminuir la velocidad del vehículo automóvil en el ensayo del mismo. Este error es normal debido a que el vehículo automóvil empleado en el presente proyecto no dispone de control automático de velocidad y sería prácticamente imposible rebasar un obstáculo como los que se han considerado sin variar la velocidad.

8.2 FUTUROS DESARROLLOS

Las diversas aplicaciones y propiedades de los fluidos reológicos adquieren una gran importancia dentro de la industria y especialmente dentro de la automoción gracias al fuerte desarrollo que están experimentando dichos fluidos.

El presente proyecto se ha centrado en estudiar el comportamiento de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión delantera de un vehículo automóvil. Los futuros estudios que se pueden emprender a partir de este proyecto son:

- Realizar un estudio adaptando el amortiguador magneto-reológico en la suspensión trasera del vehículo automóvil en lugar de realizarlo en la suspensión delantera.
- A su vez, realizar un estudio adaptando este tipo de amortiguadores simultáneamente a la suspensión trasera y delantera.
- Un estudio más avanzado del presente proyecto, realizando ensayos sobre otro tipo de terrenos o a mayores velocidades sobre carreteras.
- Realizar un estudio más exhaustivo instalando en el vehículo automóvil un amortiguador magneto-reológico fabricado especialmente para este y no utilizando el del asiento de un vehículo de gran tonelaje, como ha sido el caso en el presente proyecto.

ANEXO A

ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

A.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se procede a detallar las especificaciones técnicas de cada uno de los equipos empleados en el desarrollo del presente proyecto. A continuación, se detallan las especificaciones del amortiguador magneto-reológico objeto de estudio, así como las características de los equipos PXI de National Instruments empleados para la adquisición y tratamiento de datos.

A.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL AMORTIGUADOR

MAGNETO-REOLÓGICO RD 1005.3

El amortiguador RD 1005.3 es un tipo de amortiguador con fluido magneto-reológico en su interior que ha sido fabricado por la empresa alemana Lord. En el interior del monotubo se le aplica al fluido un campo magnético que hace que varíe sus características. La capacidad de amortiguamiento del fluido incrementa con alta precisión y con un tiempo de respuesta de 25 ms. Gracias a su diseño de control simple y a su funcionamiento silencioso, este tipo de amortiguador es especialmente apropiado para aplicaciones de suspensiones. En la tabla A.1 se incluyen las especificaciones técnicas más importantes del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 fabricado por la empresa Lord y empleado para la realización del presente proyecto.

Tabla A.1: Especificaciones técnicas del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3

Longitud en compresión	6,1 pulgadas (155mm)
Longitud en extensión	8,2 pulgadas (255mm)
Diámetro del amortiguador	1,63 pulgadas (41,4mm)
Diámetro vástago Shaft	0,39 pulgadas (10mm)
Peso	1,8 libras (800g)
Para la instalación del Pin	0,47 pulgadas (12mm)
Características eléctricas	
Amperios de salida	Máximo 2 amperios
Voltaje de salida	12 V DC
Resistencia Temperatura ambiente	5 ohm
Resistencia (a 160°F 71° C)	7 ohm
Fuerza del amortiguador (<i>peak to peak</i>)	
2 pulgadas/segundos 1 amperio	>500 libras (2224 N)
8 pulgadas/segundo 0 amperio	<150 libras (667 N)
Características mecánicas	
Mínima Fuerza de tensión	1000 libras (4448 N)

ANEXO A: ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Máximo rango de operación Temperaturas límite de Almacenamiento	160°F (71° C) 212°F a -40°F (100 °C a 40° C)
Durabilidad	2 millones de ciclos @ +/- 0,5 pulgadas (+/-13mm), 2 hercios con salida de corriente variable entre 0 y 0,8 amperios.
Tiempo de respuesta	< 25 ms – tiempo para alcanzar el 90% del máximo niveles desde 0 a 1 amperio con pasos de @ 2 pulgadas/segundo (51 mm/s)
Conector amortiguador (2 pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-2023 Pins: Modelo 02-06-2103
Conector de unión (2pin)	Cuerpo: Modelo 03-06-1023 Pins: Modelo 02-06-1103

La figura A.1 es una gráfica en la que se muestra Fuerza (N) frente a Velocidad (m/s) del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3.

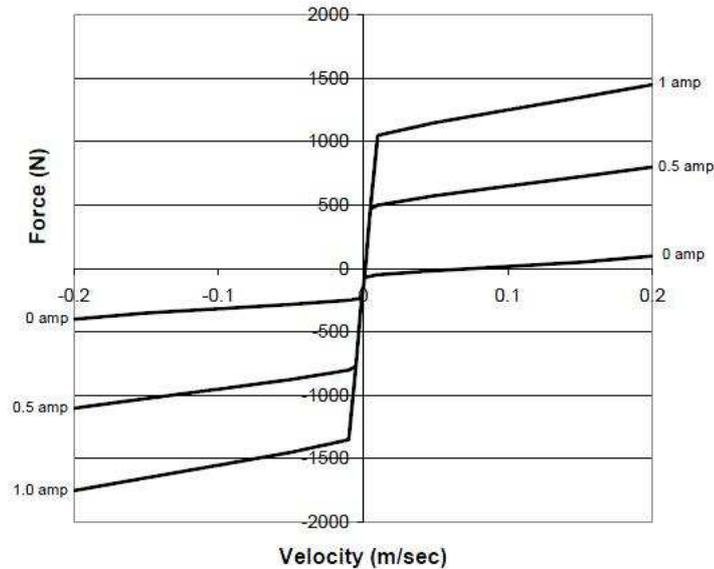


Figura A.1: Fuerza .vs. velocidad del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3

ANEXO A: ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

La figura A.2 muestra las vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico objeto de estudio en el presente proyecto.

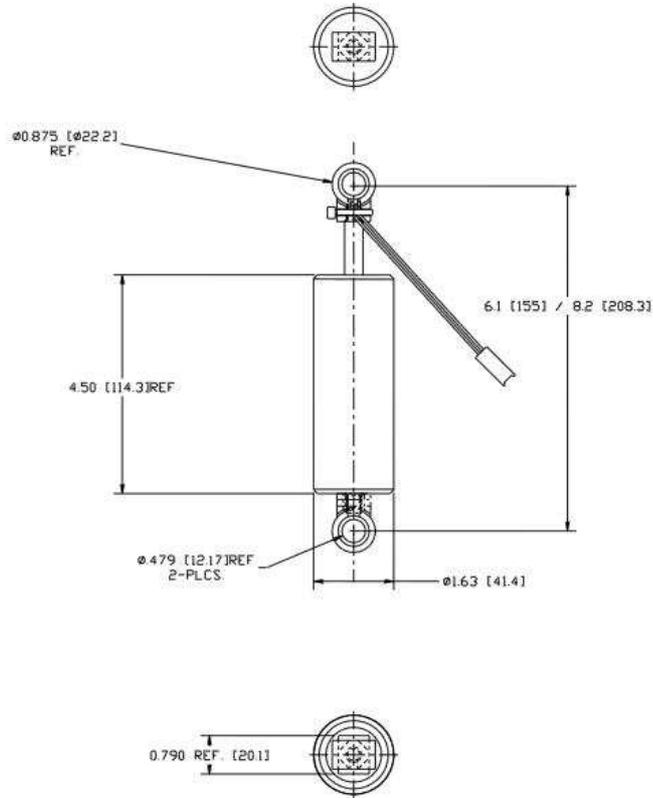


Figura A.2: Vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3

A.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS NATIONAL INSTRUMENTS

A continuación se detallan las especificaciones de los equipos de National Instruments. Como se comentó en el capítulo 4, el equipo NI PXI 1031 DC consiste en un chasis portátil con cuatro ranuras y los módulos NI PXI 6230 y NI PXI 4472 B son tarjetas de adquisición de datos.

A.3.1 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 1031 DC

Electrical

AC Input

Input voltage range	100 to 120 VAC/200 to 240 VAC
Operating voltage range	90 to 132 VAC/180 to 264 VAC
Input frequency	50/60 Hz
Operating frequency range	47 to 63 Hz
Input current rating	4 to 2 A
Overcurrent protection	6.3 A fuse in power supply (no user-serviceable components inside)
Efficiency	65% minimum

DC Input

Input voltage range	11 to 30 VDC
Input current rating	30 A maximum
Efficiency	65% typical

DC Output

DC Current Capacity (I_{max}, 0 to 50° C)

Voltage (V)	Current (A)
+3.3	12
+5	17
+12	2
-12	0.8

Notes

- ¹For AC-powered applications and DC applications above 12.3 V input, the combined loading must not exceed 145.6 W.
- ²For AC/DC applications, the combined loading on the +5 and +3.3VDC must not exceed 112 W.
- ³For DC-powered applications, at 11 VDC input the combined loading on +5, +3.3, +12, and -12VDC must not exceed 137 W. At 12.3 VDC or higher input, the combined loading must not exceed 145.6 W.
- ⁴For DC applications, the output power is derated 5 W/°C above 45 °C.
- ⁵National Instruments does not guarantee measurement accuracy for brief periods when switching between AC and DC input.

Chassis Cooling

Per-slot cooling capacity	25 W
Fan	86 cfm

Acoustic Emissions

Sound pressure level (at operator's position) (tested in accordance with ISO 7779)	
Auto Fan (at 25 °C ambient)	45.5 dBA
High Fan	49.4 dBA

Sound Power

(tested in accordance with ISO 7779)	
Auto Fan (at 25 °C ambient)	54.3 dBA
High Fan	58.2 dBA

Environmental

Operating location	Indoors
Altitude	2,000 m
Installation category	II
Pollution degree	2

Operating Environment

Operating temperature	0 to 50 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity	10 to 90% (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

ANEXO A: ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS

Storage Environment

Ambient temperature.....	-20 to 70 °C (tested in accordance with IEC-60068-2-1 and IEC-60068-2-2)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Shock and Vibration

Operational shock.....	30 g peak, half-sine, 11 ms pulse (tested in accordance with IEC-60068-2-27; test profile developed in accordance with MIL-PRF-28800F)
Relative humidity.....	5 to 95%, noncondensing (tested in accordance with IEC-60068-2-56)

Random Vibration

Operating.....	5 to 500 Hz, 0.3 G_{RMS}
Nonoperating.....	5 to 500 Hz, 2.4 G_{RMS} (tested in accordance with IEC-60068-2-64; nonoperating profile exceeds the requirements of MIL-PRF-28800F, Class 3)

Mechanical

Overall dimensions (standard chassis)

Height.....	177 mm (6.97 in.)
Width.....	257.1 mm (10.12 in.)
Depth.....	212.8 mm (8.38 in.)
Weight.....	5.0 kg (11.0 lb)

A.3.2 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 4472 B

Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Channel Characteristics

Number of channels	
NI 4472 Series	8, simultaneously sampled
NI 4474 Series	4, simultaneously sampled
Input configuration	Unbalanced differential
Resolution	24 bits, nominal
Type of ADC	Delta-sigma
Oversampling, for sample rate (f_s):	
1.0 kS/s $\leq f_s \leq$ 51.2 kS/s	128 f_s
51.2 kS/s $< f_s \leq$ 102.4 kS/s	64 f_s
Sample rates (f_s)	1.0 to 102.4 kS/s in 190.7 μ S/s increments for $f_s >$ 51.2 kS/s or 95.36 μ S/s increments for $f_s \leq$ 51.2 kS/s
Frequency accuracy	\pm 25 ppm
Input signal range	\pm 10 V peak
FIFO buffer size	1,024 samples
Data transfers	DMA

Transfer Characteristics

Offset (residual DC)	\pm 3 mV, max
Gain (amplitude accuracy)	\pm 0.1 dB, max, $f_{in} =$ 1 kHz

Amplifier Characteristics

Input impedance (ground referenced)	
Positive input	1 M Ω in parallel with 60 pF
Negative input (shield)	50 Ω in parallel with 0.02 μ F
Flatness (relative to 1 kHz)	\pm 0.1 dB, DC to 0.4535 f_s , max, DC-coupled
-3 dB bandwidth	0.4863 f_s
Input coupling	AC or DC, software-selectable
AC -3 dB cutoff frequency	
NI 4472, NI 4474	3.4 Hz
NI 4472B	0.5 Hz
Overvoltage protection	
Positive input	\pm 42.4 V
Positive inputs protected	CH<0..7>
Negative input (shield)	Not protected, rated at \pm 2.5 V
Common-mode rejection ratio (CMRR)	
$f_{in} <$ 1 kHz	$>$ 60 dB, minimum

Dynamic Characteristics

Alias-free bandwidth (passband)	DC (0 Hz) to 0.4535 f_s
Stop band	0.5465 f_s
Alias rejection	110 dB
Spurious-free dynamic range	130 dB, 1.0 kS/s $\leq f_s \leq$ 51.2 kS/s

118 dB, 51.2 kS/s $< f_s \leq$ 102.4 kS/s THD, $f_{in} =$ 1 kHz	
0 dBFS input	$<$ -90 dB
20 dBFS input	$<$ -100 dB
60 dBFS input	$<$ -60 dB
IMD	$<$ -100 dB (CCF 14 kHz + 15 kHz)
Crosstalk ¹ (channel separation), $f_{in} =$ 0 to 51.2 kHz	
Between channels 0 and 1, 2 and 3, 4 and 5, or 6 and 7	
Shorted input	$<$ -90 dB
1 k Ω load	$<$ -80 dB
Other channel combinations	
Shorted input	$<$ -100 dB
1 k Ω load	$<$ -90 dB
Phase linearity	$<$ \pm 0.5 deg
Interchannel phase mismatch	$<$ f_{in} (in kHz) \times 0.018 deg + 0.082 deg
Interchannel gain mismatch	\pm 0.1 dB
Filter delay through ADC	38.8 sample periods

Onboard Calibration Reference

DC level	5.000 V \pm 2.5 mV
Temperature coefficient	\pm 5 ppm/ $^{\circ}$ C maximum
Long-term stability	\pm 20 ppm/ \sqrt{t} , 1,000 h

Signal Conditioning

Constant current source (software-controlled)	
Current	4 mA, \pm 5%
Compliance	24 V
Output impedance	$>$ 250 k Ω at 1 kHz
Current noise	$<$ 500 pA/ \sqrt{Hz}

Triggers

Analog Trigger

Source	CH<0..7>
Level	-10 to +10 V, full scale, programmable
Slope	Positive or negative (software-selectable)
Resolution	24 bits, nominal
Hysteresis	Programmable

Digital Trigger

Compatibility	5 V TTL/CMOS
Response	Rising or falling edge
Pulse width	10 ns, minimum
Bus Interface	
Type	Master, slave

Power Requirements

+3.3 VDC	
PXI	400 mA, maximum
+5 VDC	
PCI	2.6 A, maximum
PXI	2.2 A, maximum
+12 VDC	120 mA, maximum
-12 VDC	120 mA, maximum

A.3.2 ESPECIFICACIONES DE NI PXI 6230

Specifications listed below are typical at 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input	
Number of channels	4 differential or 8 single ended
Channel type	Voltage input
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the AI Absolute Accuracy Table
Sampling rate	
Maximum	250 KS/s
Minimum	0 S/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC
Input range	± 10 V, ± 5 V, ± 1 V, ± 0.2 V
Maximum working voltage for analog inputs	Refer to the Maximum Working Voltage section
CMRR (DC to 60 Hz)	95 dB (with respect to AI GND)
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 G Ω in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 G Ω in parallel with 100 pF
Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	± 100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-90 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	700 kHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
Overvoltage protection (AI $<0..7>$ with respect to AI GND)	
Device on	± 25 V for up to two AI pins
Device off	± 15 V for up to two AI pins
Input current during overvoltage condition	± 20 mA max/AI pin
Settling Time for Multichannel Measurements	
Accuracy, full scale step, all ranges	
± 90 ppm of step (± 6 LSB)	4 μ s convert interval
± 30 ppm of step (± 2 LSB)	5 μ s convert interval
± 15 ppm of step (± 1 LSB)	7 μ s convert interval

A.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DISPOSITIVO

CONTROLADOR *KIT-CONTROLLER*

A continuación se detallan las especificaciones del dispositivo controlador *kit-controller*. Como se comentó en el capítulo 4, el dispositivo controlador *kit-controller* es el encargado de suministrar la tensión al amortiguador magneto-reológico instalado en el vehículo automóvil utilizado en el presente proyecto.

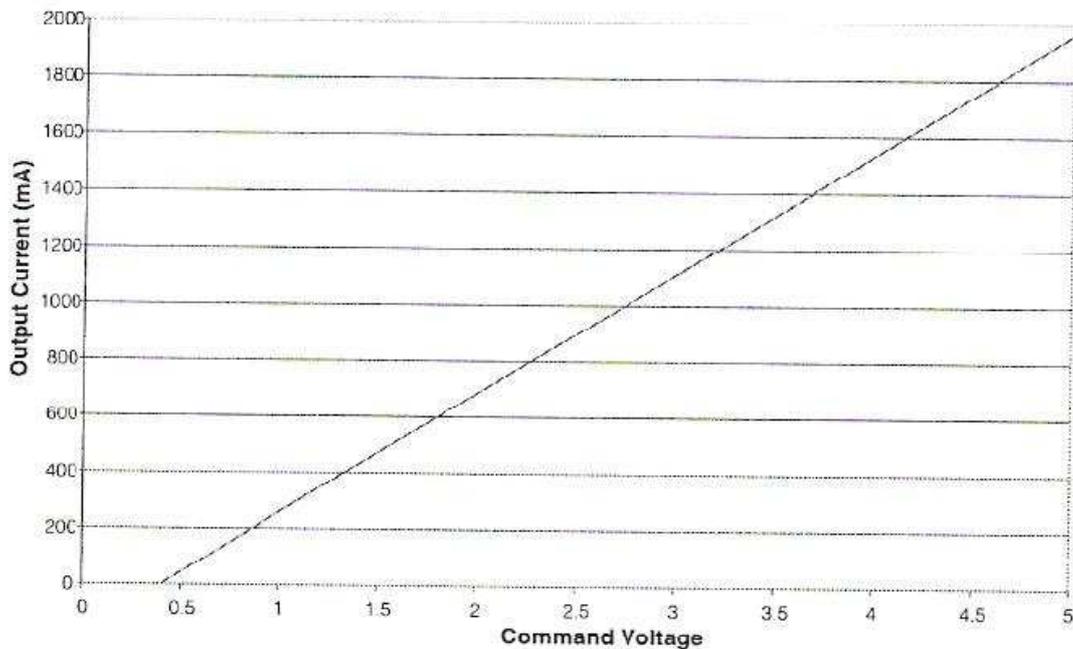
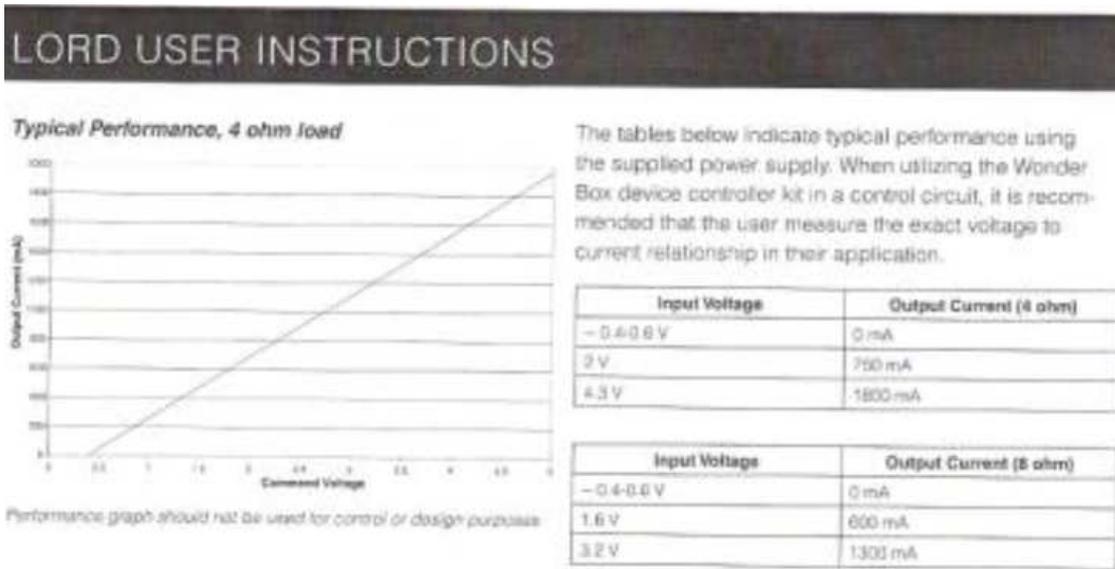


Figura A.3: Curva facilitada por el fabricante del dispositivo controlador *kit-controller*

REFERENCIAS

REFERENCIAS

[1] **ARIAS PAZ, M. (2004).**- *Manual de automóviles*. Edición 55. Editorial Dossat. Madrid (España).

[2] **APARICIO IZQUIERDO, F., VERA ÁLVAREZ, C., DÍAZ LÓPEZ, V. (1995).**- *Teoría de los vehículos automóviles*. Sección de Publicaciones de la Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid (España).

[3] **CHARLOTEAUX, M. (1979).**- *Suspensión y Dirección*. Serie Técnica del Automóvil. Marcombo. Barcelona (España).

[4] **Información general de la suspensión (2010).**-

http://www.mecanica virtual.org/indice_cursos.html#suspension

[5] **CROUSE, W. (1985).**- *El libro del automóvil*. Editorial McGraw-Hill. Barcelona (España).

[6] **Sistemas de suspensión. Elementos del automóvil (2010).**- Cesmivap. Enlace web:

<http://www.mapfre.com/ccm/content/documentos/cesvimap/ficheros/CFElemAmoviblesExtracto.pdf>

[7] **GIL, C., MIRANDA, M., NOGUE, F., (2000).**- *Suspensiones inteligentes*. Universidad de Navarra. Navarra (España).

REFERENCIAS

- [8] **Prof. Dr. BREGNI, C., (2010).**- *Reología*. Departamento de Tecnología Farmacéutica. Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires (Argentina).
- [9] **CUPICH RODRIGUEZ, M., ELIOZANO GARZA, F. J., (1998).**- *Amortiguadores magneto-reológicos*. México.
- [10] **PEREZ BELLO, M. A., (2008).**- *Circuito de fluidos, suspensión y dirección*. Editorial Paraninfo. Madrid (España).
- [11] **LOPEZ GARCIA, O., CARNICERO LOPEZ, A., RUIZ PABLOS, R., (2003).**- *Materiales inteligentes I/II*. 1ª parte: Introducción a los materiales del siglo XXI. Anales de mecánica y electricidad. España.
- [12] **MATELLANES, L., CUEVAS, J. M., CLEMENTE, R., ALLUE, S., (2003).**- *Materiales y estructuras inteligentes*. Centro Tecnológico Gaike. Vizcaya (España).
- [13] **DOMINGUEZ-GARCÍA, P., PASTOR, J. M., MELLE, S., RUBIO, M. A., (2008).**- *Microestructura de una suspensión magneto-reológica depositada*. Laboratorio de Sistemas Complejos. Departamento de Física Fundamental. Facultad de Ciencias UNED. Salamanca (España).
- [14] **IGLESIAS, G., (2004).**- *Estabilidad de suspensiones magnéticas concentradas*. Grupo de Física de Interfases y Sistemas Coloidales. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada. Granada (España).

REFERENCIAS

[15] **Autocity. MagneRide de Delphi., (2009).**- Enlace web:

<http://www.autocity.com/documentos-tecnicos/index.html?codigoDoc=210>

[16] **Fundación de EROSKI., (2006).**- Versión online de las revista CONSUMER EROSKI. Tipos de amortiguador. Enlace web:

http://www.consumer.es/web/es/motor/mantenimiento_automovil/2006/12/18/158250.php

[17] **LAJARA VIZCAINO, J. R., PELEGRI SEBASTIÁ, J. (2007).**- *LabVIEW: Entorno gráfico de programación.* Editorial Alfaomega-Marcombo. Barcelona (España).

[18] **LÁJARO, A. M., DEL RÍO FERNÁNDEZ, J. (2004).**- *Programación gráfica para el control de la instrumentacións.* Editorial Paraninfo. Madrid (España).

[19] **Página web oficial de National Instruments. 2010.**- Enlace web:

<http://www.ni.com>

[20] **Información sobre amortiguadores BILSTEIN., (2010).**- *Applied Measurments LTD. Transducer Specialist.* Enlace web:

<http://www.appmeas.co.uk/aml-ie-industrial-lvdt-displacement-sensor.html>