

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**



**MONTAJE Y ESTUDIO DE UN
AMORTIGUADOR MAGNETO-
REOLÓGICO RD 1005.3 EN LA
SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO
AUTOMÓVIL**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

ÁREA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autor: David López Fernández

Tutora: Dra. D^a. M^a Jesús López Boada

“Tres facultades hay en el hombre: la razón que esclarece y domina; el coraje o ánimo que actúa, y los sentidos que obedecen”

Platón, 427-347 a. C.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar este proyecto a todas las personas que me han ayudado a llegar hasta aquí, en especial a mis padres, mi hermano y mi novia por su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros, por los buenos momentos vividos y los que nos quedan por disfrutar.

A María Jesús por su paciencia, dedicación y esfuerzo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

| | |
|------------------------------------|---|
| 1.1 INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO..... | 3 |
| 1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO..... | 4 |

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

| | |
|--|----|
| 2.1 INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| 2.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN..... | 9 |
| 2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE SUSPENSIÓN..... | 18 |
| 2.3.1 CLASIFICACIÓN EN CUANTO A ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN..... | 19 |
| 2.3.1.1 SUSPENSIONES RÍGIDAS..... | 19 |
| 2.3.1.2 SUSPENSIONES SEMIRRÍGIDAS..... | 20 |
| 2.3.1.3 SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE..... | 22 |
| 2.3.2 CLASIFICACIÓN EN CUANTO AL SISTEMA DE CONTROL..... | 29 |
| 2.3.2.1 SUSPENSIÓN PASIVA..... | 29 |
| 2.3.2.2 SUSPENSIÓN INTELIGENTE (ACTIVA)..... | 29 |
| 2.3.2.3 SUSPENSIÓN SEMIACTIVA..... | 30 |

CAPÍTULO 3. FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

| | |
|--|----|
| 3.1 INTORDUCCIÓN..... | 35 |
| 3.1.1 PROPIEDADES REOLÓGICAS..... | 36 |
| 3.1.2 LOS MATERIALES INTELIGENTES..... | 37 |
| 3.1.2.1 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROESTRICTIVOS..... | 38 |
| 3.1.2.2 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA..... | 38 |
| 3.1.2.3 MATERIALES FOTO Y CROMATIVOS..... | 39 |
| 3.1.2.4 FLUIDOS ELECTRO-REOLÓGICOS Y MAGNETO-REOLÓGICOS..... | 39 |
| 3.1.3 LOS MATERIALES INTELIGENTES EN LA ACTUALIDAD..... | 42 |
| 3.2 APLICACIONES ACTUALES DE LOS MATERIALES INTELIGENTES..... | 42 |
| 3.2.1 AMORTIGUACIÓN DE VIBRACIONES INDUSTRIALES..... | 43 |
| 3.2.2 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN EN ASIENTOS DE VEHÍCULOS PESADOS..... | 44 |
| 3.2.3 CONTROL DE VIBRACIÓN SÍSMICA EN ESTRUCTURAS..... | 44 |
| 3.2.4 FRENOS MAGNETO-REOLÓGICOS ROTATIVOS..... | 44 |
| 3.3 EL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO..... | 45 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA SUSPENSIÓN MAGNETO-REOLÓGICA | |
| 4.1 INTRODUCCIÓN..... | 49 |
| 4.2 INCORPORACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 EN UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL..... | 50 |
| 4.2.1 DISEÑO Y MONTAJE DE ELEMENTOS AUXILIARES | 51 |
| 4.2.1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CAD..... | 51 |
| 4.2.1.2 MONTAJE DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO..... | 52 |
| 4.3 INSTALACIÓN DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO EN LA SUSPENSIÓN DEL VEHÍCULO..... | 55 |
| 4.4 CALIBRACIÓN E INSTALACIÓN DE SENSORES DE DESPLAZAMIENTO..... | 60 |
| 4.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO UTILIZADOS..... | 60 |
| 4.4.2 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO..... | 62 |
| 4.4.3 COLOCACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO..... | 65 |
| CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW | |
| 5.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE LABVIEW..... | 68 |
| 5.2 HARDWARE EMPLEADO..... | 69 |
| 5.3 ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE SEÑAL EN LABVIEW..... | 72 |
| CAPÍTULO 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES | |
| 6.1 INTRODUCCIÓN..... | 78 |
| 6.2 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS..... | 78 |
| 6.3 ALIMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS INSTALADOS EN EL VEHÍCULO. | 80 |
| 6.4 ENSAYOS REALIZADOS..... | 81 |
| 6.5 CONEXIONADO ENTRE EQUIPOS..... | 83 |
| 6.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES..... | 86 |
| 6.6.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 20 km/h | 87 |
| 6.6.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 30 km/h | 94 |
| 6.6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 40 km/h | 101 |
| 6.6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ESCALÓN..... | 108 |
| 6.6.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE BADÉN | 115 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS | |
| 7.1 CONCLUSIONES..... | 123 |
| 7.2 FUTUROS DESARROLLOS..... | 125 |
| ANEXO A. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS | |
| A.1 INTRODUCCIÓN | 129 |
| A.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR RD-1000 DE LORD..... | 130 |
| A.3 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE NATIONAL INSTRUMENTS..... | 133 |
| A.3.1 NI PXI 1031DC..... | 133 |
| A.3.2 NI PXI 4472B..... | 134 |
| A.3.3 NI PXI 6230..... | 135 |
| ANEXO B. PLANOS | |
| B.1 INTRODUCCIÓN..... | 137 |
| B.2 PLANO DEL SOPORTE..... | 138 |
| B.3 PLANO DEL BULÓN..... | 139 |
| B.4 PLANO DEL MACHO ROSCADO..... | 140 |
| B. 5 PLANO DEL CASQUILLO..... | 141 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 142 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Peugeot 207 de tres puertas..... | 4 |
| Figura 2.1. Componentes de una ballesta..... | 9 |
| Figura 2.2. Principio de funcionamiento de las barras de torsión..... | 10 |
| Figura 2.3. Muelles helicoidales..... | 10 |
| Figura 2.4. Transmisión de fuerzas en muelles helicoidales..... | 11 |
| Figura 2.5. Tipos de muelles helicoidales..... | 11 |
| Figura 2.6. Diversas posiciones del muelle..... | 12 |
| Figura 2.7. Principio de funcionamiento de las barras estabilizadoras..... | 12 |
| Figura 2.8. Detalle de un <i>silentblock</i> | 13 |
| Figura 2.9. Vista en corte de una rótula..... | 13 |
| Figura 2.10. Detalle del montaje mangueta-buje..... | 14 |
| Figura 2.11. Vista detalle de un trapecio..... | 14 |
| Figura 2.12. Tope de suspensión..... | 14 |
| Figura 2.13. Esquema interno de un amortiguador hidráulico..... | 17 |
| Figura 2.14. Amortiguador de fricción..... | 18 |
| Figura 2.15. Componentes de un sistema de suspensión rígida..... | 19 |
| Figura 2.16. Sistema de suspensión rígida aplicada sobre un Ford Mustang..... | 20 |
| Figura 2.17. Esquema de una suspensión de <i>Dion</i> | 21 |
| Figura 2.18. Sistema de suspensión semirrígida de eje torsional..... | 22 |
| Figura 2.19. Componentes de una suspensión de eje oscilante..... | 23 |
| Figura 2.20. Detalle de un sistema de brazos arrastrados..... | 23 |
| Figura 2.21. Detalle de un sistema de brazos semi-arrastrados..... | 24 |
| Figura 2.22. Montajes de dos y cuatro barras de torsión..... | 24 |
| Figura 2.23. Suspensión McPherson..... | 25 |
| Figura 2.24. Despiece de una suspensión McPherson..... | 26 |
| Figura 2.25. Detalle de un sistema de suspensión de paralelogramo deformable..... | 27 |
| Figura 2.26. Detalle de un sistema de suspensión <i>multilink</i> | 28 |
| Figura 2.27. Detalle del sistema de Suspensión ABC del Mercedes SL..... | 31 |
| Figura 2.28. Sistema de suspensión con sistema <i>Airmatic</i> del Mercedes clase E..... | 32 |
| Figura 2.29. Sistema de suspensión con <i>Electronic Damping Control</i> de BMW..... | 33 |
| Figura 2.30. Amortiguadores controlados mediante fluidos magneto-reológicos..... | 33 |
| Figura 3.1 Gráfica esfuerzo-densidad de flujo magnético a velocidad de corte elevada..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.2. Viscosidad de fluidos magnéticos en función de la velocidad de corte..... | 37 |
| Figura 3.3. Evolución del efecto memoria..... | 38 |
| Figura 3.4. Campo de velocidades en un fluido magnético..... | 40 |
| Figura 3.5. Relación esfuerzo viscoso-velocidad de deformación..... | 41 |
| Figura 3.6. Amortiguador de vibraciones tipo <i>Rheonetic</i> | 43 |
| Figura 3.7. Esquema de un amortiguador magneto-reológico..... | 44 |
| Figura 3.8. Esquema de un freno magneto-reológico..... | 45 |
| Figura 3.9. Estructura de un amortiguador de Delphi..... | 46 |
| Figura 3.10. Audi R8. Incorpora <i>Magnetic Ride</i> | 47 |
| Figura 4.1. Amortiguador magneto-reológico RD 1005.3..... | 50 |
| Figura 4.2. Carcasa amortiguador Bilstein..... | 50 |
| Figura 4.3. Soporte fabricado para amortiguador magneto-reológico..... | 52 |
| Figura 4.4. Macho roscado fabricado para amortiguador magneto-reológico..... | 53 |
| Figura 4.5. Bulón fabricado para amortiguador magneto-reológico..... | 53 |
| Figura 4.6. Conjunto amortiguador – elemento de unión superior..... | 53 |
| Figura 4.7. Base del amortiguador BILSTEIN..... | 54 |
| Figura 4.8. Casquillo para evitar holguras..... | 54 |
| Figura 4.9. Montaje final del amortiguador magneto-reológico..... | 55 |
| Figura 4.10. Grupo amortiguador sin pinza de freno..... | 56 |
| Figura 4.11. Extracción completa del grupo amortiguador..... | 57 |
| Figura 4.12. Amortiguador BILSTEIN montado en el vehículo..... | 59 |
| Figura 4.13. Sensor de desplazamiento LVDT AML / IE..... | 60 |
| Figura 4.14. Plano de medidas..... | 61 |
| Figura 4.15. Linealidad sensor delantero derecho..... | 63 |
| Figura 4.16. Linealidad sensor delantero izquierdo..... | 64 |
| Figura 4.17. Colocación sensor rueda derecha..... | 65 |
| Figura 4.18. Colocación sensor rueda izquierda..... | 65 |
| Figura 4.19. Sujeción inferior sensor..... | 66 |
| Figura 4.20. Sujeción superior sensor..... | 66 |
| Figura 5.1. Ejemplo de informes interactivos..... | 69 |
| Figura 5.2. NI PXI 1031DC..... | 70 |
| Figura 5.3. Módulo NI PXI 6230..... | 70 |
| Figura 5.4. Módulo NI PXI 4472B..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.5. Espacio de LabVIEW SignalExpress 2009..... | 72 |
| Figura 5.6. Monitor/Record..... | 73 |
| Figura 5.7. Data View..... | 73 |
| Figura 5.8. Recuadro auxiliar de texto..... | 73 |
| Figura 5.9. Pestaña Add Step y submenú..... | 74 |
| Figura 5.10. Pestaña Run..... | 74 |
| Figura 5.11. Toma de datos en LabVIEW SignalExpress 2009..... | 75 |
| Figura 5.12. Almacenamiento de datos en LabVIEW SignalExpress 2009..... | 76 |
| Figura 6.1. Ubicación seleccionada para la PXI..... | 79 |
| Figura 6.2. Ubicación del regulador de corriente del amortiguador magneto-reológico..... | 79 |
| Figura 6.3. Ubicación de los periféricos..... | 80 |
| Figura 6.4. Conexiones realizadas al NI PXI 6230..... | 81 |
| Figura 6.5. Vehículo de pruebas sobre el adoquinado..... | 82 |
| Figura 6.6. Vehículo afrontando un badén..... | 82 |
| Figura 6.7. Vehículo afrontando el escalón..... | 83 |
| Figura 6.8. Conexionado entre equipos..... | 85 |
| Figura 6.9. Ruido recogido en la señal durante la realización del ensayo..... | 86 |
| Figura 6.10. Filtro escogido para eliminar el ruido en la señal de adoquinado a 20 km/h..... | 86 |
| Figura 6.11. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V... | 88 |
| Figura 6.12. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V..... | 88 |
| Figura 6.13. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2,5 V | 89 |
| Figura 6.14. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2,5 V..... | 89 |
| Figura 6.15. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V... | 90 |
| Figura 6.16. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V..... | 90 |
| Figura 6.17. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7,5 V | 91 |
| Figura 6.18. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7,5 V..... | 91 |
| Figura 6.19. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V | 92 |
| Figura 6.20. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V..... | 92 |
| Figura 6.21. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V... | 95 |
| Figura 6.22. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V..... | 95 |
| Figura 6.23. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 2,5 V | 96 |
| Figura 6.24. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V..... | 96 |
| Figura 6.25. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.26. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V..... | 97 |
| Figura 6.27. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7,5 V | 98 |
| Figura 6.28. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7,5 V..... | 98 |
| Figura 6.29. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V | 99 |
| Figura 6.30. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V..... | 99 |
| Figura 6.31. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0V... | 102 |
| Figura 6.32. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0 V..... | 102 |
| Figura 6.33. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2,5 V | 103 |
| Figura 6.34. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2,5 V..... | 103 |
| Figura 6.35. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V... | 104 |
| Figura 6.36. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V..... | 104 |
| Figura 6.37. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7,5 V | 105 |
| Figura 6.38. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7,5 V..... | 105 |
| Figura 6.39. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V | 106 |
| Figura 6.40. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V..... | 106 |
| Figura 6.41. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre escalón a 0V..... | 109 |
| Figura 6.42. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 0 V..... | 109 |
| Figura 6.43. Tensión frente al número, medidas de ensayo sobre escalón a 2,5 V..... | 110 |
| Figura 6.44. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 2,5 V..... | 110 |
| Figura 6.45. Tensión frente al número, medidas de ensayo sobre escalón a 5 V..... | 111 |
| Figura 6.46. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 5 V..... | 111 |
| Figura 6.47. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre escalón a 7,5 V..... | 112 |
| Figura 6.48. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 7,5 V..... | 112 |
| Figura 6.49. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre escalón a 10V..... | 113 |
| Figura 6.50. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 10 V..... | 113 |
| Figura 6.51. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 0V..... | 116 |
| Figura 6.52. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 0 V..... | 116 |
| Figura 6.53. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 2,5 V..... | 117 |
| Figura 6.54. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 2,5 V..... | 117 |
| Figura 6.55. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 5 V..... | 118 |
| Figura 6.56. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 5 V..... | 118 |
| Figura 6.57. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 7,5 V..... | 119 |
| Figura 6.58. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 7,5 V..... | 119 |
| Figura 6.59. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 10 V..... | 120 |

ÍNDICES

| | |
|---|-----|
| Figura 6.60. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 10 V..... | 120 |
| Figura A.1. Medidas del amortiguador magneto..... | 131 |
| Figura A.2. Gráfica Fuerza vs velocidad del amortiguador RD 1005..... | 132 |
| Figura B.1. Plano del soporte..... | 138 |
| Figura B.2. Plano del macho roscado..... | 139 |
| Figura B.3. Plano del bulón..... | 140 |
| Figura B.4. Plano del casquillo..... | 141 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 4.1. Relación de la longitud con la carrera del sensor de desplazamiento LVDT..... | 61 |
| Tabla 4.2. Relación Voltaje/desplazamiento de datos del sensor delantero derecho..... | 63 |
| Tabla 4.3. Relación Voltaje/desplazamiento de datos sensor delantero izquierdo..... | 64 |
| Tabla 6.1. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 20 km/h..... | 98 |
| Tabla 6.2. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 20 km/h..... | 98 |
| Tabla 6.3. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 30 km/h..... | 100 |
| Tabla 6.4. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 30 km/h..... | 100 |
| Tabla 6.5. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 40 km/h..... | 107 |
| Tabla 6.6. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 40 km/h..... | 107 |
| Tabla 6.7. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para escalón..... | 114 |
| Tabla 6.8. Datos RMS amortiguador convencional para escalón..... | 114 |
| Tabla 6.9. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para badén..... | 121 |
| Tabla 6.10. Datos RMS amortiguador convencional para badén..... | 121 |
| Tabla A.1. Características del amortiguador..... | 130 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Los primeros medios de transporte que aparecieron eran vehículos de tracción animal, los cuales consistían en grandes carruajes tirados, normalmente, por caballos o bueyes. Estos no disponían de ningún tipo de sistema que amortiguase las irregularidades del terreno, por lo que una de las preocupaciones de los fabricantes de carruajes fue tratar de hacer más cómodos los vehículos, adaptándolos a los tortuosos caminos empedrados por los que se circulaba en aquella época. Se hicieron varios intentos para reducir esas molestas vibraciones, acolchando los asientos o poniendo unos resortes en el pescante del cochero. Para empezar no estuvo mal, pero el problema aún no se resolvía hasta que alguien tuvo la idea de colgar la cabina del carruaje, con unas correas de cuero, desde unos soportes de metal que venían de los ejes de modo que aquella quedaba suspendida por cuatro soportes y cuatro correas.

El resultado fue que aunque los golpes del rodaje eran parcialmente absorbidos por tal sistema, resultó ser una verdadera coctelera pues se mecía y bamboleaba sin control, añadiendo al relativo confort las delicias del mareo que sufrían continuamente el conductor y los ocupantes. Sin embargo, en estricto sentido, podemos decir que ahí nació el concepto de suspensión: un medio elástico que además de sostener la carrocería asimilaba las irregularidades del terreno.

En la medida en que las suspensiones evolucionaron y fueron haciéndose más eficientes, las ruedas disminuyeron su tamaño (esto se entiende porque las ruedas de gran diámetro reducen el efecto de las irregularidades del camino mientras que las ruedas pequeñas las registran en mayor medida debido a que profundizan en los baches en mayor proporción).

Con el desarrollo del motor de combustión interna a finales del siglo XIX, las ruedas también evolucionaron, de las ruedas de radios se pasaron a las de metal estampado y al de aleación ligera; de la llanta de hierro a la de hule macizo, después al neumático de cuerdas o tiras diagonales y finalmente al radial.

Una suspensión actual de tipo convencional cuenta básicamente con dos elementos: un resorte (o muelle helicoidal) y un amortiguador. El resorte tiene como función principal absorber las irregularidades del terreno para que no se transmitan a la carrocería. El amortiguador a su vez, tiene la función de controlar las oscilaciones de la carrocería. Con esta combinación de elementos se logra una marcha cómoda, segura y estable, acorde con los requerimientos de los automóviles y las vías por las que se circula en la actualidad. Obviamente, los componentes mencionados no trabajan solos, pues se encuentran integrados en conjuntos mecánicos que funcionan como un equipo y que juntos constituyen el sistema denominado suspensión.

Hoy en día la ciencia avanza y los nuevos vehículos requieren sistemas de suspensión más sofisticados que hagan las delicias de sus propietarios. En este sentido, destacan las suspensiones reológicas, que se caracterizan por ser un campo novedoso y moderno, cuya inversión y evolución han experimentado un gran crecimiento en las últimas décadas. Por estos motivos, se ha desarrollado el presente proyecto fin de carrera que, mediante el diseño y fabricación de un prototipo de amortiguador magneto-reológico, pretende investigar las suspensiones semiactivas, ya que estas permiten una mejora de las prestaciones dinámicas del vehículo y un mayor confort para los pasajeros.

1.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El presente proyecto se centra en el estudio de un amortiguador de tipo magneto-reológico, en concreto el modelo RD 1005.3 fabricado por la empresa Lord, cuyas especificaciones se encuentran en el anexo A.1. Para poder llevar a cabo este estudio es necesario instalar este amortiguador en un vehículo convencional y ver así su comportamiento frente a la amortiguación de serie. En concreto se toma la base de un Peugeot 207, en el cual se procederá a retirar el amortiguador delantero derecho para sustituirlo por el de tipo magneto-reológico.

El estudio de este proyecto se realiza en colaboración con Diego Coronel Benavente, para el área de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

En la figura 1.1 se muestra un Peugeot 207 de tres puertas.



Figura 1.1. Peugeot 207 de tres puertas

Para poder extraer conclusiones sobre la realización de este proyecto es necesario tomar datos consecuentes de la realización de diversas pruebas para los sistemas de amortiguación convencional y magneto-reológico. Para ello, es necesaria la utilización de diferentes programas. Para el diseño de las piezas necesarias para poder montar el amortiguador magneto-reológico se ha empleado el Solid Edge V19 (herramienta de tipo CAD), para la adquisición de los datos el LabVIEW SignalExpress 2009 (soportado por los correspondientes equipos de National Instruments) y, finalmente, para el procesado de datos se ha utilizado el programa de análisis MATLAB 7.0.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto se encuentra estructurado de la siguiente manera:

En el segundo capítulo se describe la evolución que han tenido los diferentes sistemas de suspensión a lo largo de la historia, además de sus características, componentes y funciones.

El tercer capítulo versa sobre los fluidos magneto-reológicos y los materiales inteligentes, centrándose especialmente en los amortiguadores que portan en su seno fluidos magneto-reológicos, explicando sus actuales aplicaciones.

En el cuarto capítulo se encuentran las explicaciones correspondientes al proceso de adaptación de la suspensión magneto-reológica, centradas en aspectos tales como la calibración e instalación de los sensores extensiométricos y la instalación del propio amortiguador magneto-reológico.

En el capítulo quinto se realiza una breve introducción al sistema de software empleado, así como al hardware utilizado.

El capítulo sexto recoge los datos adquiridos durante los ensayos, así como su procesamiento. Se describe también el proceso de colocación y alimentación de los equipos empleados para la toma de medidas.

En el séptimo capítulo, se exponen las diferentes conclusiones obtenidas del procesamiento de los distintos datos obtenidos de la realización de los correspondientes ensayos.

En el capítulo octavo se proponen futuros desarrollos que pueden ser llevados a cabo tomando como base los distintos estudios realizados en este proyecto.

Finalmente, podemos encontrar los anexos, de especificaciones y planos, así como la biografía, en la cual se enumeran las diferentes consultas literarias necesarias para realizar este proyecto.

CAPÍTULO 2

EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la suspensión es evitar que las irregularidades del terreno lleguen a la carrocería del vehículo, o que lo hagan de la manera más amortiguada posible. Para ello se procede a colocar un medio elástico entre las ruedas y el bastidor, el cual se deformará a causa del peso propio del vehículo y de la inercia originada al elevarse o descender como consecuencia de las irregularidades del pavimento.

Se denomina sistema de suspensión, al conjunto de elementos elásticos y amortiguadores, que se colocan entre los elementos suspendidos y no suspendidos de un vehículo y que tienen, entre otros, los siguientes cometidos [1, 2, 5, 7]:

- Hacer más confortable el habitáculo del vehículo, reduciendo las acciones a las que este se encuentra sometido durante la conducción, entre las cuales se pueden destacar [6].

Empuje: son oscilaciones que se producen en torno al eje vertical al pasar por un terreno ondulado.

Cabeceo: son oscilaciones producidas a lo largo del eje transversal del vehículo, principalmente en las frenadas y aceleraciones bruscas.

Bamboleo o Balanceo: son oscilaciones producidas a entorno al eje transversal de vehículo al tomar curvas a alta velocidad.

- Proporcionar niveles adecuados de protección de las distintas piezas que componen el vehículo evitando vibraciones.
- Ser capaz de absorber las distintas irregularidades del pavimento de forma que nunca se pierda el contacto entre los neumáticos y el pavimento.

Del adecuado diseño del sistema de suspensión depende, en gran medida, la estabilidad del vehículo, ya que las fuerzas de interacción entre el pavimento y los neumáticos son las responsables del control directo sobre el vehículo. En el caso de que se pierda el control de estas fuerzas por falta de contacto entre el neumático y el pavimento, se disminuirá la capacidad de control sobre el vehículo y, por tanto, la seguridad de sus ocupantes.

Para evitar que aparezcan fenómenos como el descrito en el párrafo anterior, el sistema de suspensión debe presentar las características siguientes: correcto cálculo de sus parámetros de elasticidad para evitar que tengan lugar rebotes demasiado duros cuando se absorben las irregularidades del terreno, y determinar el coeficiente de amortiguación óptimo, de forma que no se produzcan oscilaciones elevadas cuando el sistema está en funcionamiento. La elasticidad de un sistema de suspensión depende principalmente del elemento elástico y del peso suspendido. Estos dos parámetros caracterizan la amplitud de las oscilaciones y su frecuencia, f , que tienen lugar en un vehículo.

Por otra parte, existen elementos del propio vehículo encargados de absorber las pequeñas irregularidades del terreno, como son los neumáticos y los asientos.

2.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Los elementos fundamentales de un sistema de suspensión son los siguientes [4, 6, 7]:

Ballestas (véase figura 2.1): las ballestas están constituidas por un conjunto de hojas o láminas de acero especial para muelles, unidas mediante unas abrazaderas (2) que permiten el deslizamiento entre las hojas cuando estas se deforman por el peso que soportan. La hoja superior (1), llamada hoja maestra, va curvada en sus extremos formando unos ojos en los que se montan unos casquillos de bronce (3) para su acoplamiento al soporte del bastidor por medio de unos pernos o bulones.

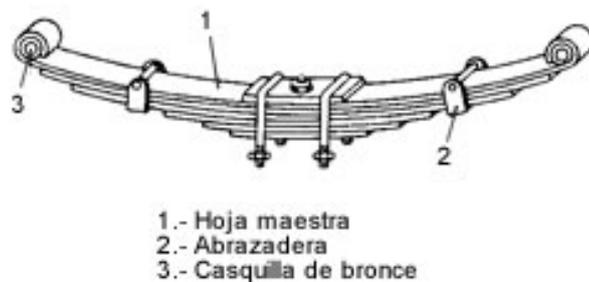


Figura 2.1. Componentes de una ballesta

El número de hojas y el espesor de las mismas está en función de la carga que han de soportar. Funcionan como los muelles de suspensión, haciendo de enlace entre el eje de las ruedas y el bastidor.

Barras de torsión (véase figura 2.2): este tipo de resorte utilizado en algunos turismos con suspensión independiente, está basado en el principio de que si a una varilla de acero elástico sujeta por uno de sus extremos, se le aplica por el otro un esfuerzo de torsión, esta varilla tenderá a retorcerse, volviendo a su forma primitiva por su elasticidad cuando cesa el esfuerzo de torsión.



Figura 2.2. Principio de funcionamiento de las barras de torsión

El montaje de estas barras sobre el vehículo se realiza fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería de forma que no pueda girar en su soporte, y en el otro extremo se coloca una palanca solidaria a la barra unida, en su extremo libre, al eje de la rueda. De esta manera, cuando esta suba o baje por efecto de las desigualdades del terreno, se produce en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda. Las barras de torsión se pueden disponer paralelamente al eje longitudinal del bastidor o transversalmente a lo largo del bastidor.

Muelles helicoidales: estos elementos mecánicos se utilizan modernamente en casi todos los turismos en sustitución de las ballestas, pues tienen la ventaja de conseguir una elasticidad blanda debido al gran recorrido del resorte sin apenas ocupar espacio ni sumar peso (véase figura 2.3).



Figura 2.3. Muelles helicoidales

Consisten en un arrollamiento helicoidal de acero elástico formado con hilo de diámetro variable (de 10 a 15 mm); dicho diámetro varía en función de la carga que tienen que soportar. Las últimas espiras son planas para facilitar el asiento del muelle sobre sus bases de apoyo.

Como puede observarse en la figura 2.4, los muelles helicoidales no pueden transmitir esfuerzos laterales, y requieren, por tanto, en su montaje bielas de empuje

lateral y transversal para la absorción de las reacciones de la rueda. Estas bielas trabajan a torsión, retorciéndose proporcionalmente al esfuerzo que tienen que soportar, acortando su longitud y volviendo a su posición de reposo cuando cesa el efecto que produce la deformación.

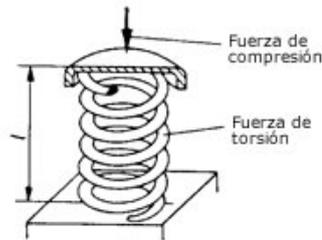


Figura 2.4. Transmisión de fuerzas en muelles helicoidales

La flexibilidad de los muelles está en función del número de espiras, del diámetro del resorte, del paso entre espiras, del espesor o diámetro del hilo, y de las características del material. Tal y como se observa en la figura 2.5, se pueden conseguir muelles con una flexibilidad progresiva, utilizando diferentes diámetros de enrollado por medio de muelles helicoidales cónicos, por medio de muelles con paso entre espiras variable o disponiendo de muelles adicionales.



Figura 2.5. Tipos de muelles helicoidales

En efecto, cuando el vehículo circule en vacío, sólo trabaja el muelle principal (véase figura 2.6) y cuando la carga es capaz de comprimir el muelle hasta hacer tope con el auxiliar se tiene un doble resorte, que, trabajando conjuntamente, soporta la carga sin aumentar la deformación, dando mayor rigidez al conjunto. Las espiras de un muelle helicoidal no deben, en su función elástica, hacer contacto entre sus espiras; es decir, que la deformación tiene que ser menor que el paso del muelle por el número de espiras. De ocurrir lo contrario, cesa el efecto del muelle y entonces las sacudidas por la marcha del vehículo se transmiten de forma directa al chasis.

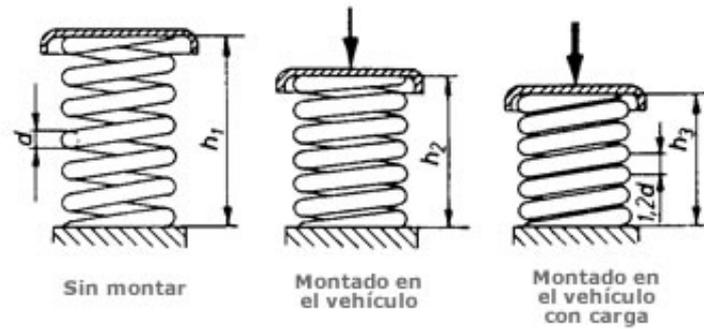


Figura 2.6. Diversas posiciones del muelle

Barras estabilizadoras: cuando un vehículo toma una curva, por la acción de la fuerza centrífuga se carga el peso del coche sobre las ruedas exteriores, con lo cual la carrocería tiende a inclinarse hacia ese lado con peligro de vuelco. Para evitar este fenómeno se montan sobre los ejes delantero y trasero las barras estabilizadoras, las cuales consisten en una barra de acero elástico cuyos extremos se fijan a los soportes de suspensión de las ruedas; de esta forma, al tomar una curva, como una de las ruedas tiende a bajar y la otra a subir, se crea un par de torsión en la barra que absorbe el esfuerzo, e impide, por tanto, que la carrocería se incline, manteniéndola de este modo estable como se puede observar en la figura 2.7.

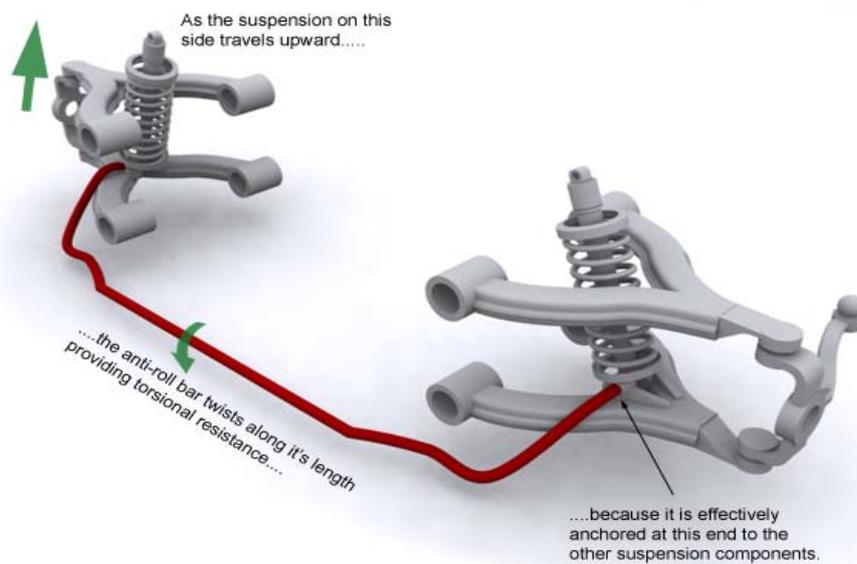


Figura 2.7. Principio de funcionamiento de las barras estabilizadoras

Silentblocks y cojinetes elásticos (véase figura 2.8): se trata de aislantes de caucho que se colocan para amortiguar las reacciones en los apoyos de la suspensión, amortiguando de esta forma, los posibles golpes entre los elementos que se encuentren en movimiento. Suelen montarse a presión o mediante uniones roscadas.



Figura 2.8. Detalle de un *silentblock*

Rótulas (véase figura 2.9): son elementos de fijación entre la suspensión y la dirección, que permiten el giro y el pivotamiento de la misma manteniendo la geometría de las ruedas. Su fijación suele realizarse mediante tornillos.



Figura 2.9. Vista en corte de una rótula

Mangueta y buje: la mangueta es una pieza cuya misión es la de unir el buje de la rueda (en cuyo interior se encuentran alojados los rodamientos que permiten el giro de la rueda), y esta a su vez, a los distintos elementos de la suspensión, trapecios, amortiguadores, etc. Se diseña teniendo en cuenta las características geométricas del vehículo. En la figura 2.10 se puede observar un pequeño esquema de montaje de estos dispositivos.

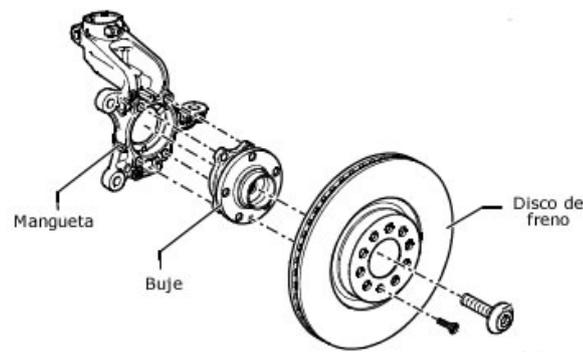


Figura 2.10. Detalle del montaje mangueta-buje

Trapecios o brazos de suspensión, (ver figura 2.11): son unos brazos de acero que soportan al vehículo a través de la suspensión, uniendo la mangueta y su correspondiente buje mediante *silentblocks* y elementos de guiado, soportando así los esfuerzos generados por el vehículo durante su funcionamiento.



Figura 2.11. Vista detalle de un trapecio

Tirantes de suspensión: se trata de brazos de acero, transversales o longitudinales, que se sitúan entre la mangueta y el trapecio y sirven como elemento de sujeción y de guiado. Por su colocación absorben los desplazamientos y los esfuerzos de los elementos de la suspensión a través de los *silentblocks* o cojinetes elásticos.

Topes de suspensión, (ver figura 2.12): como su propio nombre indica, estos elementos sirven de tope para el conjunto de la suspensión, de tal forma que si se da una compresión excesiva, esta no se para.



Figura 2.12. Tope de suspensión

Amortiguadores: son los elementos encargados de absorber las vibraciones producidas por los elementos elásticos (muelles, ballestas, etc). De esta manera, cuando el vehículo atraviesa un bache, el muelle se comprime o se estira, recogiendo la energía mecánica producida por el choque que, debido a su elasticidad, se devuelve a la carrocería en forma de rebote o vibración. Este rebote en forma de vibración es el que tiene que frenar el amortiguador, recogiendo la compresión y luego frenando la reacción del muelle (motivo por el que se conocen como “de doble efecto”). Los amortiguadores pueden ser fijos y/o regulables en dureza. Existen diversos tipos de amortiguadores, como los de fricción, aunque en la práctica los más utilizados son los hidráulicos.

Amortiguadores hidráulicos convencionales: son aquellos en los que la fuerza de amortiguación, para controlar los movimientos de las masas suspendidas y no suspendidas, se obtiene forzando el paso de un fluido a través de unos pasos calibrados de apertura diferenciada, con el fin de obtener la flexibilidad necesaria para el control del vehículo en diferentes estados.

Son los más usuales, de tarados preestablecidos (se montan habitualmente como equipo de origen). Son baratos pero su duración es limitada y presentan pérdidas de eficacia con trabajo excesivo, debido al aumento de temperatura. No se suelen utilizar en conducción deportiva ni en competición.

Estos amortiguadores de tipo telescópico y de funcionamiento hidráulico están constituidos (figura 2.13) por un cilindro (A) dentro del cual puede deslizarse el émbolo (B) unido al vástago (C), que termina en el anillo soporte (D), unido al bastidor. Rodeando el cilindro (A) va otro concéntrico, (F), y los dos terminan sellados en la parte superior por la empaquetadura (E), por la que pasa el vástago (C), al que también se une la campana (G), que preserva de polvo al amortiguador. El cilindro (F) termina en el anillo (H), que se une al eje de la rueda y se comunica con el cilindro (A) por medio del orificio (I). El cilindro (A) queda dividido en dos cámaras por el pistón (B); éstas se comunican por los orificios calibrados (J y K), este último tapado por la válvula de bola (L). Así constituido el amortiguador, quedan formadas las cámaras (1, 2 y 3), que están llenas de aceite. Cuando la rueda sube con relación al chasis, lo hace con ella

el anillo (H) y, a la vez que él, los cilindros (A y F), con lo cual, el líquido contenido en la cámara (2) va siendo comprimido, pasando a través de los orificios (J y K) a la cámara (1), en la que va quedando espacio vacío debido al movimiento ascendente de los cilindros (A y F). Otra parte del líquido pasa de (2) a la cámara de compensación (3), a través del orificio (I). Este paso forzado del líquido de una cámara a las otras, frena el movimiento ascendente de los cilindros (A y F), lo que supone una amortiguación de la suspensión.

Cuando la rueda ha pasado el obstáculo que la hizo levantarse, se produce el disparo de la ballesta o el muelle, por lo que (H) baja con la rueda y con él los cilindros (A y F). Entonces el líquido de la cámara (1) va siendo comprimido por el pistón y pasa a la cámara (2) a través de (J) (por K no puede hacerlo por impedírsele la válvula antirretorno (L), lo que constituye un freno de la expansión de la ballesta o el muelle. El espacio que va quedando vacío en la cámara (2) a medida que bajan los cilindros (A y F), se va llenando de aceite que llega de la cámara (1) y, si no es suficiente, del que llega de la cámara de compensación (3) a través de (I). Por tanto, en este amortiguador vemos que la acción de frenado es mayor en la expansión que en la compresión del muelle o ballesta, permitiéndose así que la rueda pueda subir con relativa facilidad y que actúe en ese momento el muelle o la ballesta; pero impidiendo seguidamente el rebote de ellos, que supondría un mayor número de oscilaciones hasta quedar la suspensión en posición de equilibrio. Según el calibre del orificio (J), se obtiene mayor o menor acción de frenado en los dos sentidos; y según el calibre del orificio (K), se obtiene mayor o menor frenado cuando sube la rueda. En el momento que lo hace, el aceite contenido en la cámara inferior (2) no puede pasar en su totalidad a la superior (1), puesto que ésta es más reducida, debido a la presencia del vástago (C) del pistón; por ello se dispone la cámara de compensación (3), para que el líquido sobrante de la cámara inferior (2) pueda pasar a ella. Todo lo contrario ocurre cuando la rueda baja: entonces el líquido que pasa de la cámara superior (1) a la inferior (2) no es suficiente para llenarla y por ello le entra líquido de la cámara de compensación (3).

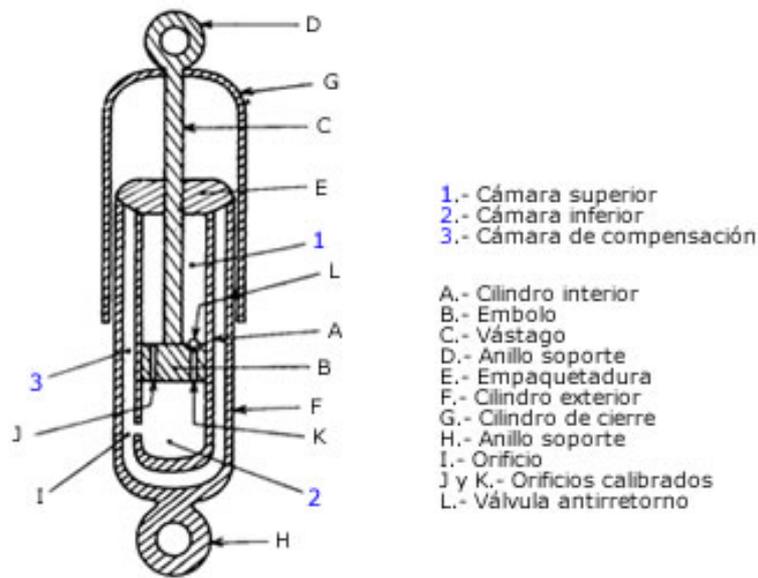


Figura 2.13. Esquema interno de un amortiguador hidráulico

Amortiguadores hidráulicos presurizados: sus ventajas respecto de los no presurizados son las siguientes:

- Respuesta de la válvula más sensible para pequeñas amplitudes.
- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación en condiciones extremas (grandes baches).
- Reducción de ruido hidráulico.
- Siguen operativos aunque pierdan el gas.

Amortiguadores a gas: estos amortiguadores trabajan bajo el mismo principio que los hidráulicos, pero conteniendo en su interior nitrógeno a alta presión (25 bar). Cuando el aceite al desplazarse el vástago comprime dicho gas, sufre una variación de volumen que le permite dar una respuesta inmediata y de funcionamiento muy silencioso.

Amortiguadores de fricción: (véase figura 2.14) los amortiguadores de fricción se utilizan menos en la actualidad ya que basan su funcionamiento en la disipación de la

energía en calor que se produce con el rozamiento de discos de fricción. Están compuestos por dos brazos formados por dos o más discos de acero que se reúnen alternados en un eje común. Uno de los brazos se enlaza a la rueda y el otro al bastidor, de manera que con las oscilaciones del elemento elástico se produzca el frotamiento entre los discos que genera la acción de frenado.

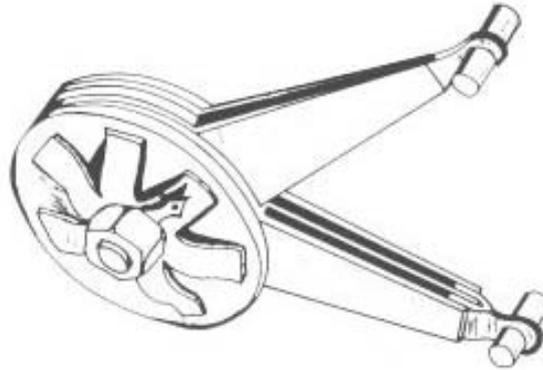


Figura 2.14. Amortiguador de fricción

2.3 TIPOS DE SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

Existen varios sistemas de suspensión, según el tipo de elementos empleados y la forma en que se disponen los mismos, pero todos ellos están basados en el mismo principio de funcionamiento. Constan así, de un sistema elástico, amortiguación y barra estabilizadora independientes para cada uno de los ejes del vehículo. En la actualidad se pueden encontrar distintas disposiciones de suspensión, cuya elección depende directamente del tipo de comportamiento que se busca en el vehículo.

Las suspensiones se pueden clasificar en dos grandes grupos:

1. Clasificación en cuanto a los elementos de suspensión:
 - Suspensiones rígidas.
 - Suspensiones semirrígidas.
 - Suspensiones independientes.
2. Clasificación en cuanto al sistema de control:
 - Suspensión pasiva.
 - Suspensión inteligente.

A continuación se procede a hacer una descripción de cada uno de los diferentes tipos de suspensión mencionados anteriormente:

2.3.1 CLASIFICACIÓN EN CUANTO A ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN

2.3.1.1 SUSPENSIONES RÍGIDAS

En las suspensiones rígidas las ruedas están unidas mediante un eje rígido. Presentan el inconveniente de que las vibraciones producidas por las irregularidades del terreno, se transmiten de un lado al otro del eje. Por otra parte, el peso de las masas no suspendidas aumenta de manera considerable debido al peso del eje rígido y al peso del grupo cónico diferencial en los vehículos de tracción trasera [2].

Las principales ventajas que presentan este tipo de suspensión son: su sencillez de diseño (lo cual abarata los costes) y que no se producen variaciones significativas en los parámetros de la rueda. La principal aplicación de este modelo se realiza sobre todo en vehículos de tipo industrial, como son autobuses, camiones, etc.

Como se puede observar en la figura 2.15 en este modelo, el eje está constituido por una caja que contiene el mecanismo diferencial (1) y por los tubos (3) que contienen los palieres. El eje rígido en este caso se apoya contra el bastidor mediante ballestas (2) que hacen de elemento elástico transmitiendo las oscilaciones. Completan el conjunto los amortiguadores (4). La figura 2.16 muestra un modelizado de este tipo de suspensión.

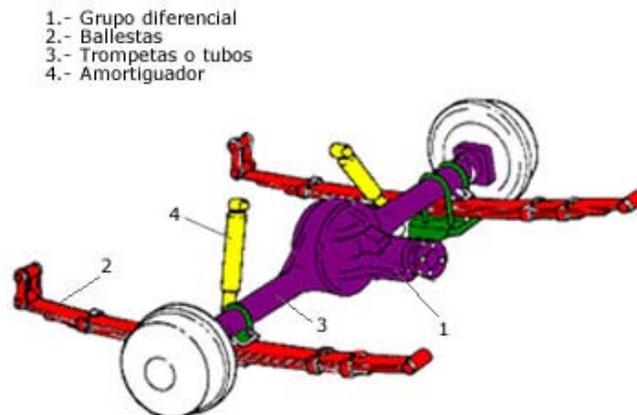


Figura 2.15. Componentes de un sistema de suspensión rígida



Figura 2.16. Sistema de suspensión rígida aplicada sobre un Ford Mustang

2.3.1.2 SUSPENSIONES SEMIRRÍGIDAS

Las suspensiones semirrígidas un sistema de suspensión similar al anterior pero con la particularidad de que en este caso se transmiten las oscilaciones de forma parcial, no obstante aunque la suspensión no es rígida total tampoco es independiente del todo ya que la función motriz se separa de la función de suspensión y de guiado, pero no es soportado por la suspensión.

En la figura 2.17 se muestra una suspensión de este tipo. Se trata de una suspensión con eje *De Dion*. En ella las ruedas van unidas mediante soportes articulados (1) al grupo diferencial (2), que en la suspensión con eje *De Dion* es parte de la masa suspendida, es decir, va anclado al bastidor del automóvil. Bajo este aspecto se transmite el giro a las ruedas a través de dos semiejes (palieres) como en las suspensiones independientes. A su vez, ambas ruedas están unidas entre si mediante una travesa o tubo *De Dion* (3) que las ancla de forma rígida permitiendo a la suspensión deslizamientos longitudinales. Este sistema tiene la ventaja, frente al eje rígido, de que se disminuye la masa no suspendida debido al poco peso de la travesa del eje *De Dion* y al anclaje del grupo diferencial al bastidor y mantiene los parámetros de la rueda prácticamente constantes como los ejes rígidos gracias al anclaje rígido de la travesa.

La suspensión posee además elementos elásticos de tipo muelle helicoidal (4) y suele ir acompañada de brazos longitudinales que limitan los desplazamientos en una dirección.

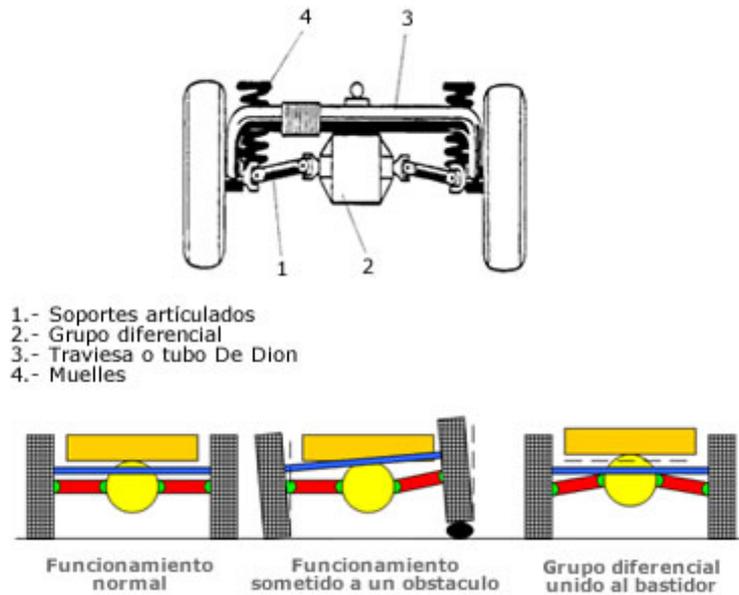


Figura 2.17. Esquema de una suspensión de *Dion*

Otro tipo de suspensión semirrígida es la de eje torsional (véase figura 2.18), comúnmente empleada en vehículos que tienen tracción delantera. Estas son atravesadas por un tubo que une las dos ruedas y que tiene forma de “U”, por lo que es capaz de deformarse un cierto ángulo cuando una de las ruedas atraviesa un obstáculo, para después volver a su posición inicial. Esta configuración sencilla se ha convertido en una de las más empleadas en los vehículos de gama media-baja.

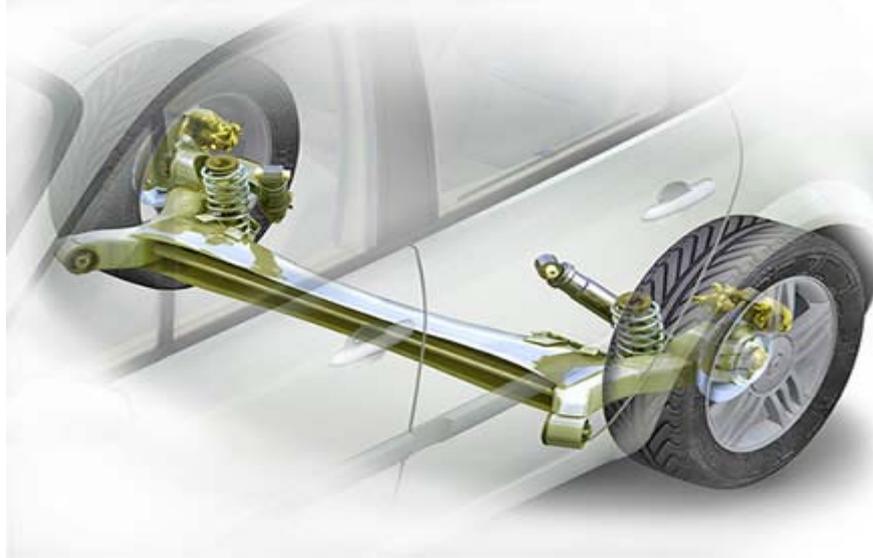


Figura 2.18. Sistema de suspensión semirígida de eje torsional

2.3.1.3 SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE

Este tipo de suspensión se viene utilizando cada vez en mayor medida debido a que optimiza los parámetros de estabilidad y confort al reducir de forma independiente las oscilaciones generadas por el terreno sin transmitir las de una rueda a otra del mismo eje. Como ventaja añadida, se puede destacar que posee un menor peso no suspendido por lo que las acciones transmitidas al chasis son de menor magnitud. No obstante, para cargas elevadas esta suspensión puede presentar problemas, por ello, en la actualidad este tipo de suspensión sólo se emplea en las ruedas directrices [7].

El abanico de suspensiones independientes es muy amplio, debido a sus numerosas variantes. Los principales tipos a destacar son:

- Suspensión de eje oscilante (véase figura 2.19): la peculiaridad de este sistema de suspensión es que el elemento de rodadura (1) y el semieje (2) son solidarios de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación (3) próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión no se puede usar como eje directriz puesto que en el movimiento oscilatorio de los semiejes se altera notablemente la caída de las ruedas en las curvas. Completan el sistema de suspensión dos conjuntos muelle-amortiguador telescópico (4).

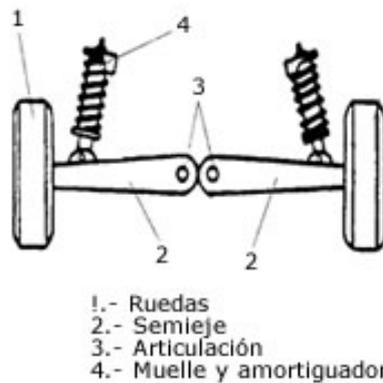


Figura 2.19. Componentes de una suspensión de eje oscilante

- Suspensión de brazos tirados: posee dos elementos de soporte conocidos como “brazos” en disposición longitudinal, que a su vez están unidos por un extremo al bastidor y por el otro a la mangueta de la rueda (en el caso de que el eje sea de tracción, el grupo diferencial va anclado al bastidor).

En la figura 2.20, los brazos longitudinales pivotan sobre un eje de giro perpendicular al plano longitudinal del vehículo, por lo que apenas se producen variaciones de vía, avance o caída de la rueda.

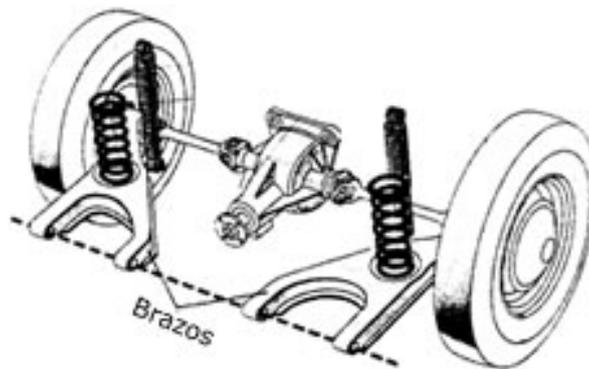


Figura 2.20. Detalle de un sistema de brazos arrastrados

Por otra parte, se puede observar en la figura 2.21, como los brazos pivotan sobre ejes que tienen componentes longitudinales, esto es, sobre ejes oblicuos al plano longitudinal del vehículo. Esta variante se conoce como de brazos semi-arrastrados y posee la ventaja de que no precisa estabilizadores longitudinales debido a la propia

componente longitudinal que tiene el brazo, por lo que aquí las variaciones de vía y de caída dependen principalmente de la posición e inclinación de los brazos longitudinales, dotando así de mayor estabilidad al vehículo.

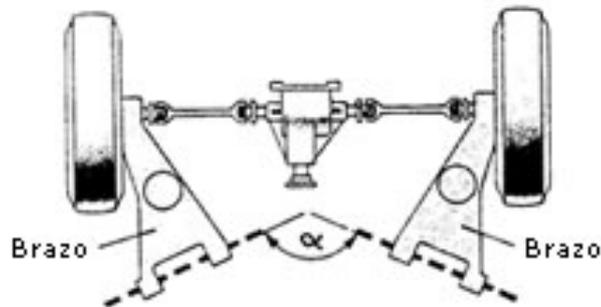


Figura 2.21. Detalle de un sistema de brazos semi-arrastrados

Finalmente, existe otra variante de este sistema de suspensión conocida como de brazos tirados con barras de torsión, en la cual las barras se montan de manera transversal a la carrocería. Como mínimo se necesitan dos, pudiendo llegarse a montar cuatro en vehículos de mayor envergadura. Se puede observar esta última variante en la figura 2.22.

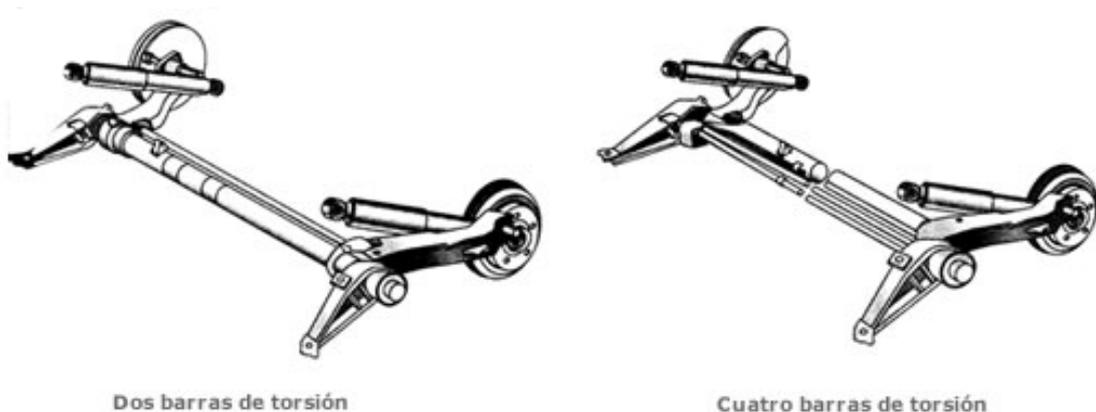


Figura 2.22. Montajes de dos y cuatro barras de torsión

- Suspensión McPherson (véase figura 2.23): este tipo de suspensión debe su nombre al ingeniero de Ford que la desarrolló, Earle S. McPherson. Se trata de uno de los sistemas más empleados en el tren delantero, pudiéndose montar igualmente en trenes traseros, que ha tenido gran éxito en el mercado debido a su sencillez de

fabricación y mantenimiento así como por el reducido espacio que ocupa una vez montado.

En esta suspensión resulta imprescindible que la carrocería sea más resistente en los puntos dónde se fijan los amortiguadores y los muelles, para poder así absorber los esfuerzos transmitidos por la suspensión.



Figura 2.23. Suspensión McPherson

La figura 2.24 muestra un modelo detallado de una suspensión McPherson con brazo inferior y barra estabilizadora.

La mangueta (1) de la rueda va unida al cubo (2) permitiendo el giro de este mediante un rodamiento (3). A su vez, la mangueta va unida al bastidor a través de dos elementos característicos de toda suspensión McPherson. El brazo inferior (4) va unido a la mangueta (1) mediante una unión elástica (A) (rótula) y al bastidor mediante un casquillo (B). El amortiguador (5) va anclado de forma fija a la parte superior de la mangueta (1) y el muelle (6) es concéntrico al amortiguador y está sujeto mediante dos copelas superior (C) e inferior (D). El amortiguador se une al bastidor por su parte superior mediante un cojinete de agujas (7) y una placa de fijación (8). En las ruedas delanteras se hace necesaria la existencia de este cojinete axial ya que el amortiguador al ser solidario a la mangueta gira con esta al actuar la dirección.

La suspensión tipo McPherson forma un mecanismo de tipo triángulo articulado formado por el brazo inferior (4), el conjunto muelle-amortiguador y el propio chasis. El lado del triángulo que corresponde al muelle-amortiguador es de compresión libre por lo que sólo tiene un único grado de libertad: la tracción o compresión de los elementos elásticos y amortiguador. Al transmitirse a través del muelle-amortiguador todos los esfuerzos al chasis, es necesario un dimensionado más rígido de la carrocería en la zona de apoyo de la placa de fijación (8).

Como elementos complementarios a esta suspensión, se encuentran la barra estabilizadora (9) unida al brazo inferior (4) mediante una bieleta (10) y al bastidor mediante un casquillo (E) y, en este caso, un tirante de avance (11).

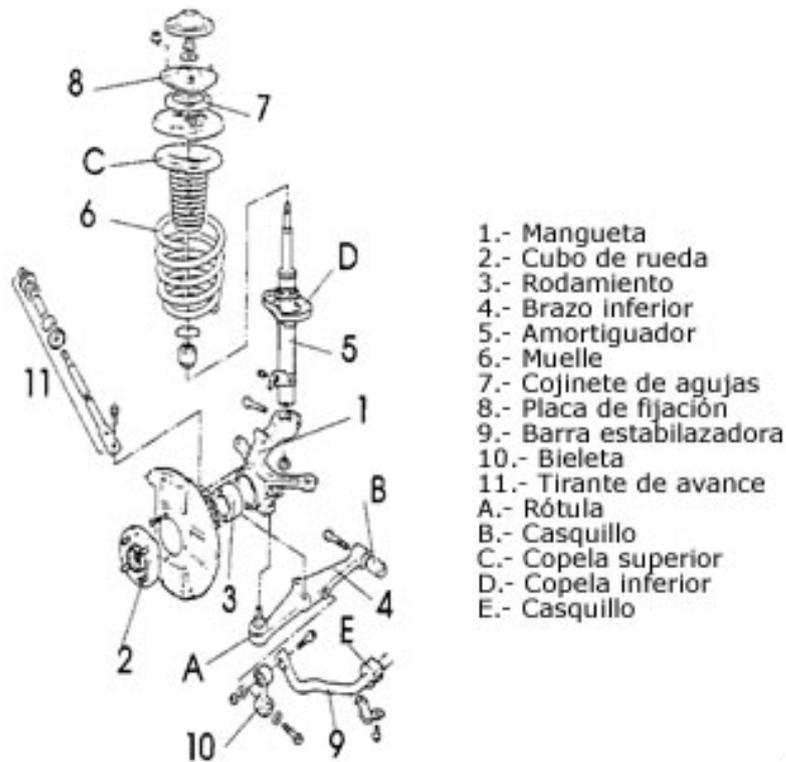


Figura 2.24. Despiece de una suspensión McPherson

- Suspensión de paralelogramo deformable, (véase figura 2.25): se trata de un sistema de suspensión en el que los elementos de unión entre la rueda y la carrocería son elementos transversales colocados en distintos planos. Su nombre se debe a los primeros sistemas desarrollados con este tipo de tecnología, los cuales montaban dos elementos

superpuestos paralelos que, junto con la rueda y la carrocería forman, de manera aproximada, la figura de un paralelogramo.

Estos paralelogramos deformables pueden llegar a estar formados hasta por cinco elementos, no todos ellos transversales (también los hay oblicuos).

La evolución de estos sistemas de suspensión de paralelogramo deformable ha llegado hasta las actuales suspensiones llamadas multibrazo o *multilink*.



Figura 2.25. Detalle de un sistema de suspensión de paralelogramo deformable

- Suspensión multibrazo (*multilink*), (véase figura 2.26): basan su funcionamiento en el mismo concepto que las suspensiones de paralelogramo deformable, es decir, el paralelogramo está formado por dos brazos transversales que son: la mangueta y el propio bastidor. La diferencia reside en que los elementos guía de la suspensión multibrazo pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma, lo cual les permite modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda, como la caída o la convergencia para mejorar la estabilidad del automóvil ante cualquier situación. Esto permite modificar de forma independiente, las dinámicas longitudinal y transversal, alcanzando elevados niveles de confort.

Las suspensiones multibrazo se pueden clasificar en:

- Suspensiones multibrazo con elementos de guía transversales u oblicuos con funcionamiento similar al de las suspensiones de paralelogramo deformable.
- Suspensiones multibrazo que además disponen de brazos de guía longitudinal con un funcionamiento que recuerda a los sistemas de suspensión de ruedas tiradas por brazos longitudinales.



Figura 2.26. Detalle de un sistema de de suspensión *multilink*

2.3.2 CLASIFICACIÓN EN CUANTO AL SISTEMA DE CONTROL

Actualmente, la clasificación según el sistema de control engloba tres grandes grupos: suspensión pasiva, suspensión activa y suspensión semiactiva.

2.3.2.1 SUSPENSIÓN PASIVA

En cuanto al sistema de control, los sistemas de suspensión compuestos por los elementos descritos en los apartados anteriores se conocen como sistemas pasivos. Hoy en día su uso está muy generalizado debido a que su coste resulta mucho más reducido al compararlo con otros sistemas más sofisticados, no obstante, presentan una difícil adecuación entre los parámetros de confort y de seguridad. Esto se debe a que a mayores niveles de confort, el sistema deberá aumentar su flexibilidad para poder de esta manera absorber más eficientemente las sollicitaciones del terreno, lo cual repercute negativamente en la estabilidad del vehículo ya que, cuanto más blanda sea la suspensión, mayor será el balanceo y el desplazamiento de la masa suspendida [3].

Se puede concluir que, cuando se necesite la máxima seguridad en el vehículo, se deberán instalar suspensiones rígidas para que las ruedas no pierdan contacto con el firme, pero en detrimento del confort de sus ocupantes.

2.3.2.2 SUSPENSIÓN INTELIGENTE (ACTIVA)

Cuando se busca una mayor exigencia al sistema de suspensión, teniendo en cuenta factores como el estado de la calzada, velocidad, comportamiento en la conducción, etc. Es necesario de un sistema de suspensión regulable que actúe sobre cada rueda de manera rápida y constante. Para conseguir este objetivo se necesita de un sistema de control bastante complejo, componiéndose de una serie de sensores y actuadores que necesitan de un canal externo de energía.

Dentro de las suspensiones inteligentes, se pueden encontrar modelos activos o semiactivos. En cualquier caso, ambos modelos tienen un lazo cerrado de

retroalimentación. La diferencia reside en que, en las activas no se emplean elementos propios de las suspensiones pasivas, mientras que en las semiactivas se pueden encontrar combinaciones de elementos elásticos y amortiguadores con distintos tipos de actuadores electrónicos, cuyo objetivo es ir modificando la respuesta del sistema de suspensión a las distintas sollicitaciones del terreno.

Para valorar la calidad de estos tipos de suspensión basta con observar el tiempo de respuesta, ya que, cuanto menor sea este, mayor será la capacidad de reacción de la suspensión. Este tiempo de respuesta vendrá determinado por el ancho de banda del sistema, por tanto, si el ancho de banda abarca un rango de frecuencias de hasta 3 ó 5 Hz, el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia, mientras que si el rango abarca frecuencias más elevadas, hasta 10 ó 12 Hz, se denomina de alta frecuencia. El sistema de suspensión pasiva funciona tanto para un rango alto de frecuencias como para uno bajo. La suspensión activa puede controlar también ambos rangos, pero el sistema para altos rangos no se comercializa en los vehículos de serie, debido al gran coste de implantación y a que el consumo de energía es demasiado elevado.

2.3.2.3 SUSPENSIÓN SEMIACTIVA

Actualmente existen diversos sistemas de suspensión semiactiva, los cuales reciben sus nombres en función de las distintas marcas que los comercializan. No obstante, en el siguiente apartado se va a proceder a hacer una clasificación generalizada atendiendo a dos tipos fundamentales: el sistema de suspensión con control de posición mediante actuadores y la suspensión adaptativa [5].

- Sistema de suspensión con control mediante actuadores: este tipo de sistemas proporcionan un continuo de seguimiento del coche cuando este se inclina debido a deceleraciones o aceleraciones, así como cuando se inclina al trazar una trayectoria curva. De esta manera se pueden corregir los problemas relacionados con el posicionamiento del vehículo para evitar que se pierda el control sobre el mismo. Normalmente constan de tres componentes principales, que son: los sensores del vehículo, un microprocesador y un complejo sistema de servomecanismos hidráulicos. El servomecanismo hidráulico es un mecanismo dotado de retroalimentación automática que, mediante el sistema hidráulico, permite corregir el funcionamiento del vehículo en

las situaciones descritas en el párrafo anterior. El microprocesador a su vez, recupera la información proporcionada por los sensores determinando de esta manera si el coche se encuentra en una posición de funcionamiento correcta, enviando de esta manera la información oportuna a los servomecanismos hidráulicos. Generalmente son necesarios varios conjuntos de sensores. Un sensor de nivel situado en cada rueda para medir de manera óptima las variaciones del peso del vehículo, cinco sensores para medir las variaciones en la aceleración y deceleración del vehículo y, finalmente, cuatro sensores hidráulicos para medir las variaciones de presión hidráulicas registradas durante el frenado. El sistema electrónico se encarga de monitorizar las fuerzas de balanceo y cabeceo, recibiendo la información de los sensores que miden 100 veces por segundo el movimiento y aceleraciones de la carrocería, el sistema electrónico realiza el cálculo de las fuerzas de compensación a aplicar por los cilindros hidráulicos.

Este tipo de sistemas actúan en bajas frecuencias (de hasta aproximadamente 5 Hz), para oscilaciones de mayor frecuencia actúan los elementos pasivos (muelles helicoidales y amortiguadores con ajuste uniforme de rigidez). Por lo tanto, los vehículos que montan este sistema de suspensión no necesitan barras estabilizadoras.

Un ejemplo claro es el *Active Body Control* (ABC) de Mercedes-Benz. Se trata de uno de los sistemas semiactivos de suspensión y amortiguación más sofisticados que existen en la actualidad aplicados en turismos comerciales, puede observarse su disposición en la figura 2.27.

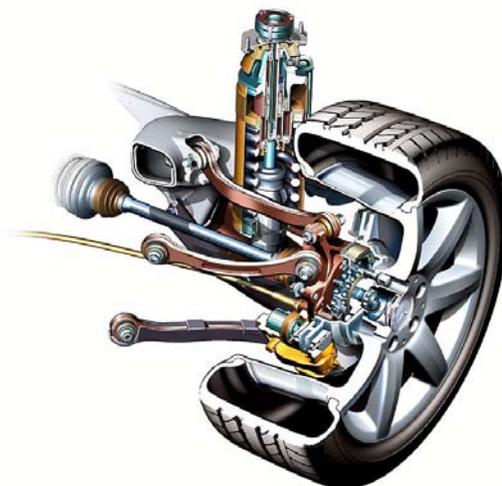


Figura 2.27. Detalle del sistema de Suspensión ABC del Mercedes SL

- Sistemas de suspensión adaptativa: son aquellos en los que se puede modificar la constante de rigidez del muelle o del amortiguador, en función de distintos parámetros, mediante actuadores (generalmente de baja potencia) [5]. En la actualidad existen diversas marcas que incorporan en sus vehículos suspensiones adaptativas con pequeños matices distintivos del propio fabricante. Entre ellos podemos destacar: Mercedes Benz, Volvo y BMW, los cuales se proceden a explicar brevemente a continuación:

Airmatic dual Control de Mercedes Benz (véase figura 2.28). En realidad se trata de una evolución de la suspensión neumática adaptativa que ya montaba la propia marca en sus modelos de la clase S. En ella se actúa sobre la rigidez de la amortiguación y de los muelles en vez de sólo en la de la amortiguación.



Figura 2.28. Sistema de suspensión con sistema *Airmatic* del Mercedes clase E

Continuously Controlled Chassis Concept by Volvo. De la misma manera que los clase E de Mercedes-Benz, los Volvo de la clase S60 incorporan un sistema de amortiguación controlado electrónicamente mediante tecnología Öhlins.

Electronic Damping Control, de BMW (véase figura 2.29). Este sistema varía la flexibilidad de los amortiguadores de forma continua, lo que permite lograr un mayor equilibrio entre comodidad y confort.



Figura 2.29. Sistema de suspensión con *Electronic Damping Control* de BMW

Por otra parte cabe destacar dentro de este sistema de suspensión la creciente incorporación de elementos controlados mediante materiales con “efecto memoria”. Cobran especial importancia los fluidos magneto-reológicos, que pueden modificar su viscosidad ante la presencia de distintos campos magnéticos. Normalmente están formados por microesferas de acero de diversos tamaños mezcladas en el seno de un fluido compuesto a base de hidrocarburos sintéticos. Este tipo de suspensión se verá de forma más detallada en el siguiente capítulo. La figura 2.30 muestra una vista en corte de este tipo de suspensiones.



Figura 2.30. Amortiguadores controlados mediante fluidos magneto-reológicos

CAPÍTULO 3

FLUIDOS MAGNETO- REOLÓGICOS

3.1 INTRODUCCIÓN

La reología es la ciencia que se encarga del estudio de la deformación de los materiales que se encuentran sometidos a sollicitaciones externas y que, por su parte, no obedecen las leyes de viscosidad de Newton y de Hooke. Por tanto, se puede definir un fluido reológico como aquel cuyas propiedades pueden variar ante un estímulo externo, el cual, a su vez, suele ser un campo eléctrico o magnético. Este comportamiento se debe a que en su seno (generalmente aceites de silicona o minerales) se encuentran alojadas partículas en suspensión que reaccionan ante la presencia de los citados campos [9, 10].

En el contexto histórico se empieza a hablar de reología a partir de la segunda mitad del siglo XVII, época en la cual se dan a conocer los conceptos de fluidos viscosos ideales y del sólido elástico. De esta manera, en 1687 Newton definió el líquido viscoso que posteriormente fue denominado como fluido newtoniano, en el cual la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor sin dar lugar a la recuperación parcial de la forma originaria del mismo.

Por otra parte, en 1678 Hooke enunció la ley que relaciona el esfuerzo cortante con el módulo de rigidez y la deformación propia del material. Esta ley establece que al aplicar una carga sobre un cuerpo sólido, este se deformará siempre y cuando no se supere el límite de elasticidad, y que esta deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado. A partir de este momento se comenzó a estudiar la “elasticidad de los materiales”, que actualmente se define como la propiedad de los mismos que les hace recuperar su forma y tamaño original cuando cesan los esfuerzos que sobre ellos actúan.

Hasta hace aproximadamente tres siglos, los estudios relacionados con el campo de la reología tenían sus bases fundamentadas en las leyes de Newton y de Hooke. No obstante este fundamento se desestimó a partir del siglo XIX cuando la comunidad científica comenzó a poner en duda la validez universal de estas dos leyes. De esta manera, la reología moderna estudia el comportamiento de compuestos complejos que presentan propiedades viscoelásticas y fue acuñada como tal en 1929 por Eugene Cook

Bingham, para definir la rama de la física que tiene por objeto el estudio de la deformación y/o flujo de la materia.

3.1.1 PROPIEDADES REOLÓGICAS

Las propiedades reológicas de los fluidos dependen de la concentración y de la densidad de las partículas, de su distribución y tamaño, de las propiedades del fluido portador, de la presencia de aditivos adicionales, de la intensidad del campo aplicado y de la temperatura de trabajo. Las relaciones que guían la interdependencia de estos factores son altamente complejas a la par que importantes, ya que de ellas depende la optimización del desarrollo de estos fluidos para aplicaciones importantes. De esta manera, en la figura 3.1 se muestra el esfuerzo de corte en un fluido en función de la densidad de flujo magnético a una velocidad de corte elevada (el orden ascendente de los registros corresponde a un incremento en la fracción de volumen de hierro) [9].

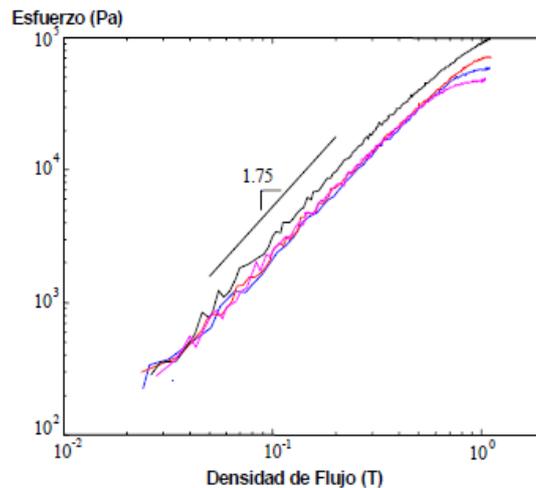


Figura 3.1 Gráfica esfuerzo-densidad de flujo magnético a velocidad de corte elevada

Es importante destacar que la viscosidad del fluido en ausencia de un campo magnético es más significativa la aportación del aceite portador, de los agentes de suspensión y de la carga de partículas.

La figura 3.2 muestra la viscosidad de cuatro fluidos magneto-reológicos en función del esfuerzo de corte al que se encuentran sometidos. Puede observarse que dicha viscosidad no es proporcional a la carga de metal presente.

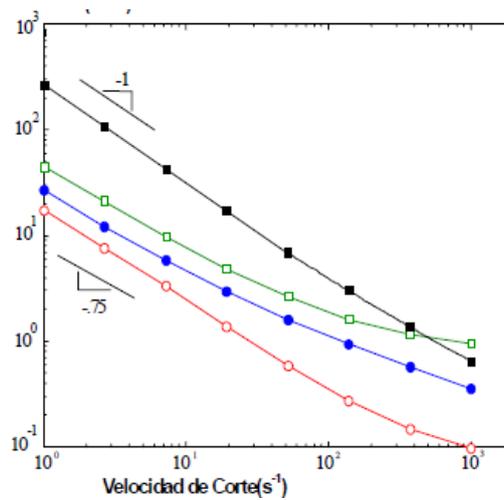


Figura 3.2. Viscosidad de fluidos magnéticos en función de la velocidad de corte

3.1.2 LOS MATERIALES INTELIGENTES

El término material inteligente hace referencia todos aquellos materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas cuando se les aplica un estímulo. Para poder clasificarlos como tal es necesario que cumplan, entre otros, los siguientes requisitos [11, 12, 13]:

- Presentar sensores de reconocimiento y de medida de la intensidad del estímulo proporcionado.
- Poseer actuadores intrínsecos o embebidos que respondan ante el estímulo.
- Ser capaces de controlar y seleccionar el tipo de respuesta.
- Rapidez de reacción ante los estímulos.
- Capacidad de regresión al estado original nada más cese el estímulo.

A continuación se procede a hacer una breve descripción de los materiales inteligentes más utilizados en la industria.

3.1.2.1 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y ELECTROESTRICTIVOS

Son aquellos materiales capaces de adquirir un campo eléctrico cuando se les somete a esfuerzos mecánicos. Este efecto aparece como consecuencia del esfuerzo producido monotómicamente que tiende a crecer a medida que se aplica el campo eléctrico. Esta capacidad es de gran utilidad cuando se quiere proveer al interface entre controles eléctricos y sistemas mecánicos de una rápida respuesta. No obstante, también se produce el efecto contrario ya que estos materiales tienden a deformarse cuando se les aplica un determinado voltaje (conocido como efecto de electrostricción).

Por otra parte, los materiales magnetostrictivos pueden responder a campos magnéticos de la misma manera que los piezoeléctricos los hacen ante campos eléctricos.

3.1.2.2 MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

Los materiales con memoria de forma se pueden clasificar en cuatro clases diferentes según sea su naturaleza o la del estímulo externo al que responden. Los principales tipos son: aleaciones con memoria de forma (*Shape Memory Alloys, SMAs*), cerámicas con memoria de forma (*Shape Memory Ceramics, SMCs*), polímeros con memoria de forma (*Shape Memory Polymers, SMPs*) y aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma (*Ferromagnetic Shape Memory Alloys, FSMAs*).

La figura 3.3 muestra el proceso de evolución de uno de estos materiales desde que se le aplica el estímulo, hasta que este cesa.

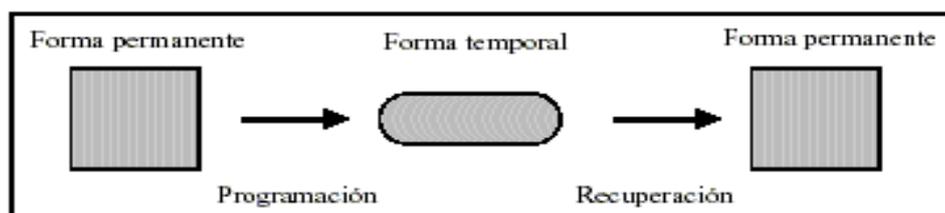


Figura 3.3 Evolución del efecto memoria.

3.1.2.3 MATERIALES FOTO Y CROMATIVOS

Se conocen como materiales fotoactivos a aquellos en los que se producen cambios cuando incide sobre ellos la luz, o por otra parte, a aquellos que son capaces de emitir luz como consecuencia de algún fenómeno externo. Dentro de este tipo de materiales se pueden destacar los siguientes:

- *Materiales fluorescentes*. Producen luz visible al recibir radiación UV.
- *Materiales fosforescentes*. Emiten luz visible en la oscuridad una vez que cesa la excitación.
- *Materiales electroluminiscentes*. Capaces de emitir luz de diferentes colores cuando son estimulados mediante corriente eléctrica.

Por otra parte, se conocen los materiales cromoactivos como aquellos en los que tienen lugar cambios de color como consecuencia de excitaciones de diversa índole, como pueden ser corrientes eléctricas, radiaciones UV o cambios bruscos de temperatura.

3.1.2.4 FLUIDOS ELECTRO-REOLÓGICOS Y MAGNETO-REOLÓGICOS

Los fluidos electro-reológicos y los magneto-reológicos se basan en los mismos principios, variando únicamente los estímulos ante los que responden [14, 15, 16].

Los fluidos electro-reológicos son aquellos que cambian sus propiedades ante la presencia de algún campo eléctrico y los magneto-reológicos lo hacen ante campos magnéticos. Esta peculiaridad se debe a la formación de estructuras dentro del fluido como consecuencia de los estímulos aplicados. Los fluidos magneto-reológicos son suspensiones acuosas de microesferas super-paramagnéticas que contienen gránulos de magnetita dispersos en una matriz polimérica. Las partículas no tienen remanencia ni histéresis magnética y normalmente se suele añadir un surfactante para estabilizar las suspensiones. Bajo la acción de un campo magnético constante las partículas adquieren un momento dipolar que genera una interacción dipolar entre las partículas, la cual

produce la agregación de las partículas en forma de collares de cuentas alineados con el campo magnético. La formación de estos agregados cambia drásticamente las propiedades mecánicas y ópticas.

En la actualidad, se pueden encontrar dos grandes tipos de estos fluidos, unos formados por partículas dispersas y otro por fluidos homogéneos.

Los fluidos formados por partículas dispersas reaccionan debido a la agregación de las partículas en suspensión provocada por la polarización de los materiales. Por otra parte, los fluidos homogéneos permiten mayores miniaturizaciones ya que carecen de partículas, por lo que pueden llegar a ser de gran utilidad para aplicaciones de microtecnología.

Las partículas que componen los fluidos magneto-reológicos tienen unas dimensiones aproximadas de entre 0,05 y 8 μm . Estas estructuras restringen la movilidad del fluido, incrementando de esta manera la viscosidad y, en consecuencia, la resistencia en las aplicaciones de suspensiones. A mayor campo magnético, mayor será la energía mecánica necesaria para romper dichas microestructuras. En la figura 3.4 se puede observar el efecto que tiene la presencia de un campo magnético sobre el campo de velocidades en los fluidos magneto-reológicos. Cuando cesan dichos campos, los fluidos magneto-reológicos pueden considerarse como fluidos newtonianos.

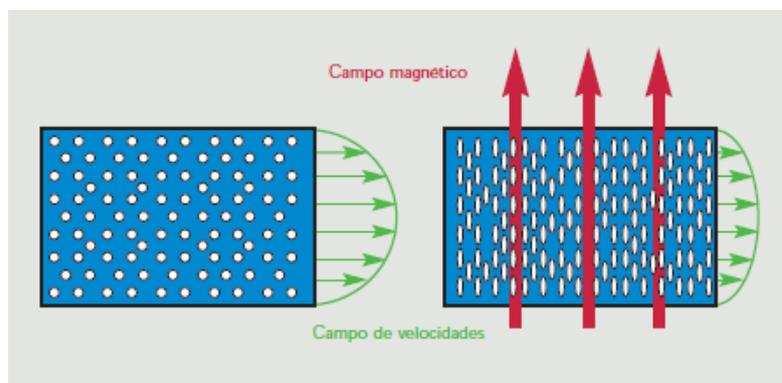


Figura 3.4 Campo de velocidades en un fluido magnético

Al aplicar un campo magnético en dirección perpendicular al flujo del fluido, se forman cadenas en dirección perpendicular al flujo y como consecuencia estas cadenas

se rompen por lo que deberán ser otra vez formadas. La formación de cadenas da como resultado la aparición de esfuerzos que se oponen al movimiento. Para producir el deslizamiento de las capas de fluido es necesario superar este esfuerzo (esfuerzo de fluencia). Ante esfuerzos inferiores al de fluencia, el fluido reológico responde como un sólido viscoelástico. Se puede concluir por tanto que, la ventaja que presentan estos fluidos frente a otros, es que para conseguir una velocidad de deformación determinada es necesario un esfuerzo viscoso superior al que correspondería en el caso de un fluido ordinario, y este esfuerzo se puede controlar mediante la intensidad del campo aplicado.

En la figura 3.5, se puede observar como el esfuerzo no viscoso no se debe a un aumento de la viscosidad, sino a que el esfuerzo de fluencia aumenta al aumentar la intensidad del campo exterior aplicado.

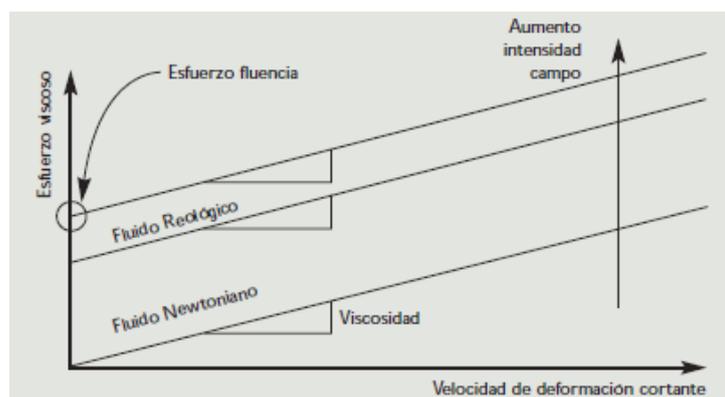


Figura 3.5 Relación esfuerzo viscoso-velocidad de deformación

Para diseñar un fluido magneto-reológico, se deben seleccionar previamente: el aceite base, la naturaleza del material en suspensión, los aditivos necesarios y verificar la estabilidad del fluido ante la agregación de partículas con el objetivo último de conseguir que el fluido presente respuesta eficiente ante el campo magnético.

3.1.3 MATERIALES INTELIGENTES EN LA ACTUALIDAD

Actualmente se pueden encontrar numerosas aplicaciones industriales de los distintos materiales descritos en el apartado anterior, de entre ellas se pueden destacar las siguientes:

- Control de calidad de los alimentos.
- Fabricación de pegamentos
- Sintetizado y fabricación de pinturas
- Elaboración de cosméticos y de productos para la higiene personal.
- Estudio y clasificación de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Caracterización de metales.

3.2 APLICACIONES ACTUALES DE LOS MATERIALES INTELIGENTES

Hoy en día, se pueden encontrar aplicaciones de los materiales inteligentes en numerosos campos y aplicaciones industriales. De entre estas numerosas aplicaciones, destaca su uso en elementos sensores o actuadores [9, 16, 17, 18].

Los sensores se fabrican con este tipo de materiales empleando como señal de entrada distintos campos mecánicos (dependiendo del material, así como de sus respuestas ante estímulos) y en base a ellos, los materiales corresponden con señales de salida que son fácilmente medibles y que, generalmente van ligados a campos eléctricos que generan una diferencia de potencial o campos que inducen corriente eléctrica. Por su parte los actuadores emplean como señales de entrada campos eléctricos, térmicos o magnéticos que mediante las propiedades del material activo son transformadas en una señal de salida mecánica como un campo de desplazamientos, deformaciones o esfuerzos, con la consiguiente generación de una fuerza que puede ser empleada en realizar un cierto trabajo.

De todos los materiales inteligentes, los más utilizados son los piezoeléctricos y magnetostrictivos ya que pueden operar como sensores o como actuadores. Por otra

parte, los fluidos reológicos se emplean en amortiguadores activos para vibraciones, tanto periódicas, como no periódicas, frenos, embragues, protección de estructuras, etc. Finalmente, es importante destacar creciente empleo de materiales de fibra óptica como sensores.

3.2.1 AMORTIGUACIÓN DE VIBRACIONES INDUSTRIALES

Dada la naturaleza de las vibraciones así como las molestias que pueden causar y los daños estructurales que pueden producir, resulta importante el empleo de dispositivos para evitar, en la medida de lo posible sus consecuencias.

Los amortiguadores de fluido viscoso aprovechan las propiedades del fluido para proveer una fuerza que contrarreste los efectos de la vibración.

La figura 3.6 muestra un amortiguador magneto-reológico utilizado en control activo de vibraciones en aplicaciones industriales.

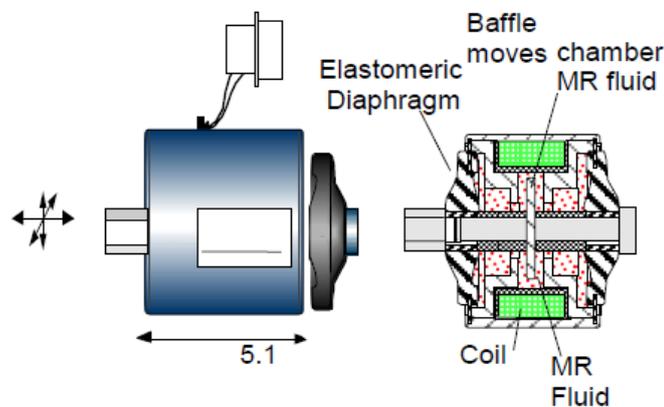


Figura 3.6 Amortiguador de vibraciones tipo *Rheonetic*

3.1.4 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN EN ASIENTOS DE VEHÍCULOS PESADOS

El empleo de estos sistemas de amortiguación en asientos de vehículos pesados permite un mayor control en tiempo real de la posición óptima para la conducción de este tipo de vehículos, para ello la unidad de control modifica la intensidad del campo

magnético en función del peso del conductor, de los niveles de choque y de las vibraciones debidas a las irregularidades del terreno. La figura 3.7 muestra el esquema básico de un un amortiguador magneto-reológico diseñado para emplearse en un sistema de suspensión semiactiva en vehículos de carga para travesías largas.

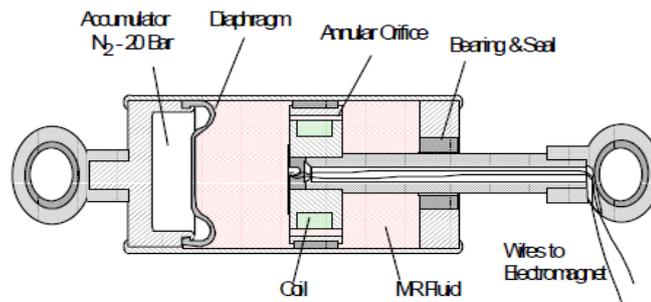


Figura 3.7 Esquema de un amortiguador magneto-reológico

3.2.3 CONTROL DE VIBRACIÓN SÍSMICA EN ESTRUCTURAS

En la actualidad los dispositivos de control de vibración son ampliamente empleados sobre todo en países de gran actividad sísmica. Se trata de elementos diseñados para la ingeniería civil con una fuerza máxima de amortiguamiento de 200.000 N.

3.2.4 FRENOS MAGNETO-REOLÓGICOS ROTATIVOS

Los frenos magneto-reológicos de tipo rotativo permiten un control continuo del par de torsión ya que cuando la corriente en las espiras es cero, no hay campo magnético y, por lo tanto, el par de torsión es mínimo a causa del cierre hermético y la viscosidad del fluido portador. Al crear un campo magnético, se produce en consecuencia un par de torsión donde el valor máximo depende de la limitación de la máxima corriente que pueda soportar el freno. Se trata de dispositivos de fácil manejo y de diseño simple.

En la figura 3.8 se puede observar un esquema simplificado de los distintos elementos que conforman un freno magneto-reológico.

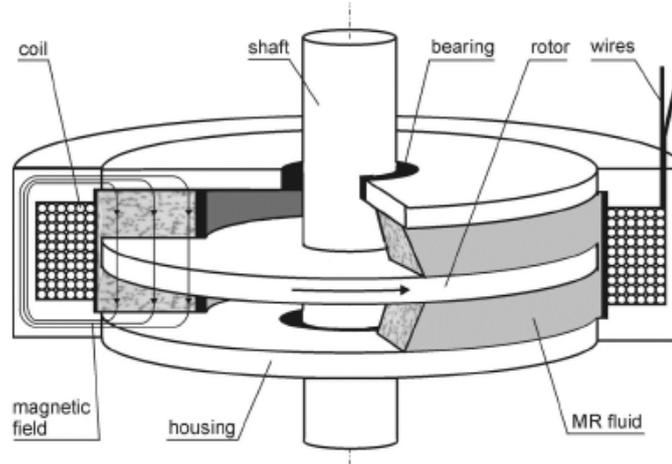


Figura 3.8 Esquema de un freno magneto-reológico

3.3 EL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

El fabricante de componentes para la automoción Delphi fue el primero en desarrollar un sistema de amortiguación basado en amortiguadores reológicos para un automóvil. Este sistema de suspensión fue presentado en sociedad en el salón de Fráncfort en 1999. El sistema desarrollado por Delphi consistía en una suspensión semiactiva con amortiguador de fluido magneto-reológico llamado “*Magnetic Ride*”. La diferencia respecto a otros sistemas de suspensión se encuentra en su interior, el líquido que circula dentro del vástago contiene aproximadamente un 40% de partículas metálicas en suspensión. El sistema Magnetic Ride, está compuesto por el fluido magnético-reológico (figura 3.9), bobinas electromagnéticas, sensores que detectan tanto el desplazamiento de la suspensión como la aceleración transversal y longitudinal y por una unidad de mando [13, 19, 20].

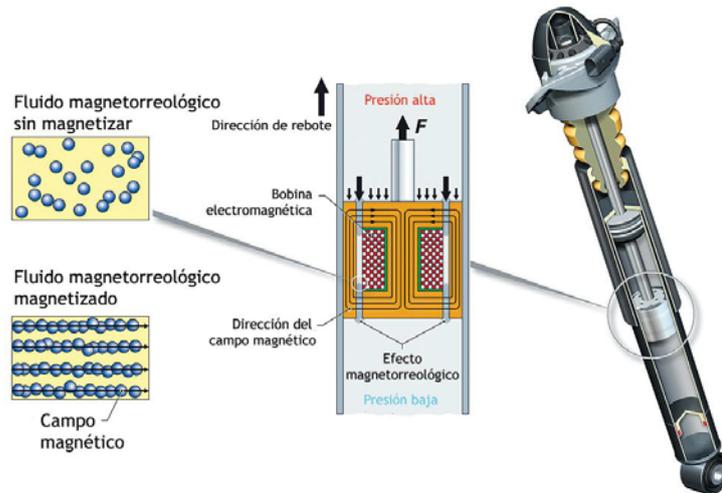


Figura 3.9 Estructura de un amortiguador de Delphi

La consistencia de la suspensión depende en gran medida de la intensidad del campo magnético que se aplique. El modo de funcionamiento del sistema Magnetic Ride, es de la siguiente manera: los sensores de desplazamiento de la amortiguación mandan señales a la unidad de mando la cual aplica una intensidad de corriente a cada amortiguador dependiendo de la señal que previamente ha recibido de la unidad de mando. Esta intensidad de corriente la recibe la bobina electromagnética del amortiguador, variando el campo magnético en relación con la intensidad recibida y por lo tanto variando la densidad y viscosidad del fluido MR.

Los valores de la consistencia del fluido MR y por lo tanto de la suspensión, dependiendo de la conducción, cambian unas 1000 veces por segundo, lo que hace ajustar inmediatamente la suspensión a las necesidades de la conducción.

No solamente se adapta a las necesidades de la conducción dependiendo del firme ya que su sensor de aceleración hace que se adapte a las aceleraciones, frenadas y a los movimientos oscilatorios de la carrocería.

En el caso de una frenada brusca eleva la dureza mediante el campo magnético, de la suspensión delantera aumentando así la estabilidad. En el caso de que se produzca una aceleración aumenta la dureza de la suspensión trasera del vehículo evitando el

hundimiento de esta parte y también evita el balanceo producido al pasar por una curva aumentando la dureza de los amortiguadores que van por el exterior de la curva. Actualmente, este tipo de suspensión la utilizan vehículos de altas prestaciones y de lujo, como ejemplos de estos vehículos utilizan esta suspensión podemos destacar: Chevrolet Corvette, Audi y R8 TT (se muestra en la figura 3.10), Cadillac Seville ó Ferrari 599 GTB y California.



Figura 3.10 Audi R8. Incorpora Magnetic Ride

Entre las ventajas de este sistema de amortiguación destacan que es diez veces más rápido que el amortiguador convencional, que los sensores pueden modificar la viscosidad del líquido hasta mil veces por segundo, que no requiere grandes mantenimientos, la posibilidad de control independiente en cada una de las cuatro ruedas del vehículo y su simplicidad mecánica al no disponer de válvulas ni de electroválvulas. En contrapartida se tiene el sobrecoste que implica la adquisición de una tecnología que aún no está totalmente implantada y desarrollada, el alto coste de los dispositivos electrónicos que la gobiernan y que es necesario un aporte energético (20 voltios) frente a los amortiguadores convencionales, que no necesitan una fuente externa para su funcionamiento.

CAPÍTULO 4

ADAPTACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO- REOLÓGICO RD 1005.3 A LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se describirá la adaptación de un amortiguador magneto-reológico, modelo RD-1005.3 comercializado por la empresa Lord, en la suspensión de un vehículo automóvil. A su vez, se detallarán los pasos del montaje del amortiguador, así como su instalación en el vehículo.

Para hacer posible la comparación entre el amortiguador de serie del vehículo y el amortiguador magneto-reológico, ha sido necesaria la toma de datos del comportamiento de ambos sistemas de suspensión ante diferentes perfiles de carretera. Para dicha toma de datos, se ha instalado un sensor extensiométrico en cada lado de la suspensión delantera del vehículo. Previamente, y como se describirá en el apartado 4.2, se ha realizado la calibración de dichos sensores.

Para la implementación del amortiguador magneto-reológico, se ha utilizado la base de un amortiguador deportivo, a la cual se le han realizado las modificaciones pertinentes. Posteriormente, se ha desmontado el amortiguador delantero derecho y se ha sustituido por el amortiguador magneto-reológico.

Por otra parte, se ha desarrollado un software para la toma de datos procedentes de los sensores extensiométricos. Se ha tomado como base de desarrollo el sistema *LabVIEW*. El citado software se ha instalado en un equipo portátil y se ha calibrado en el propio vehículo para la posterior toma de datos.

4.2 INCORPORACIÓN DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO RD-1005.3 EN UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

El amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 del que se dispone para realizar los ensayos ha sido fabricado por la empresa Lord, empleado en la suspensión de los asientos de vehículos de gran tonelaje. Por este motivo, sus dimensiones no son óptimas para acoplarlo en un sistema de suspensión vehicular, por lo que ha sido necesaria su adaptación al vehículo automóvil. La figura 4.1 muestra el amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 de Lord. Las especificaciones del amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 se encuentran en el Anexo A.1.



Figura 4.1. Amortiguador magneto-reológico RD 1005.3

Para montar el amortiguador magneto-reológico se ha tomado como base un amortiguador deportivo de la marca BILSTEIN, en concreto el modelo *sprint* de la gama B8. La figura 4.2 muestra un amortiguador BILSTEIN *sprint* B8 [24].



Figura 4.2. Carcasa amortiguador Bilstein

4.2.1 DISEÑO Y MONTAJE DE ELEMENTOS AUXILIARES

4.2.1.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS CAD

Para poder conseguir un diseño preciso sin necesidad de recurrir a los costosos prototipos, se utilizan los programas de diseño asistido por ordenador, *CAD* (acrónimo en inglés *Computer Aided Design*). Con esta herramienta se pretende obtener una modelización exacta del espacio disponible en la colocación del amortiguador, así como, el diseño y/o modificación de las piezas necesarias para adaptar el amortiguador magneto-reológico a las características del vehículo [26, 27, 28].

El diseño y la fabricación asistidos por ordenador (*CAD/CAM*) es una disciplina que estudia el uso de sistemas informáticos como herramienta de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de cualquier tipo de producto. Esta disciplina se ha convertido en un requisito indispensable para la industria actual que se enfrenta a la necesidad de mejorar la calidad, disminuir los costes y acortar los tiempos de diseño y producción.

Se entiende por sistema CAD, el uso de sistemas informáticos en la creación, modificación, análisis u optimización de un producto siendo la función principal en estas herramientas la definición de la geometría del diseño (pieza mecánica, arquitectura, circuito electrónico, etc.).

Las herramientas de CAD abarcan desde herramientas de modelado geométrico hasta aplicaciones a medida para el análisis u optimización de un producto específico. Entre estos dos extremos se encuentran herramientas de modelado y análisis de tolerancias, cálculo de propiedades físicas (masa, volumen, momentos, etc.), modelado y análisis de elementos finitos, ensamblado, etc.

El éxito en la utilización de sistemas *CAD* radica en la reducción de tiempo invertido en los ciclos de exploración, fundamentalmente, por el uso de sistemas gráficos interactivos, que permiten realizar las modificaciones en el modelo y observar inmediatamente los cambios producidos en el diseño.

El desarrollo de un sistema CAD se basa en la representación computacional del modelo. Esto permite realizar automáticamente el dibujo de detalle y la documentación

del diseño, y posibilita la utilización de métodos numéricos para realizar simulaciones sobre el modelo, como una alternativa a la construcción de prototipos.

4.2.1.2 MONTAJE DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

Para llevar a cabo el montaje del amortiguador magneto-reológico sobre la base del amortiguador BILSTEIN ha sido necesario diseñar y fabricar algunos elementos que permitan el ensamblaje entre ambos, ya que el amortiguador magneto-reológico del que se disponía presentaba holguras a la hora de asentarlos sobre el sistema monotubo, base del amortiguador BILSTEIN [8].

Por otra parte, la longitud total en extensión que presenta el amortiguador magneto-reológico es menor que la de la amortiguación de serie, en concreto son 100 mm. Por este motivo ha sido necesario fabricar un dispositivo que permitiese la unión y posterior regulado de la altura total del amortiguador respecto a la copela de la masa suspendida del vehículo. Este dispositivo está formado por tres piezas: un soporte con un agujero pasante y uno roscado, que servirá de nexo con el amortiguador magneto-reológico (figura 4.3); un macho roscado, que unirá la pieza anterior con la copela (figura 4.4); y un bulón, útil para unir el soporte anterior con el amortiguador (figura 4.5). Por último, la figura 4.6 se muestra la vista isométrica del conjunto montado sobre el amortiguador magneto-reológico.

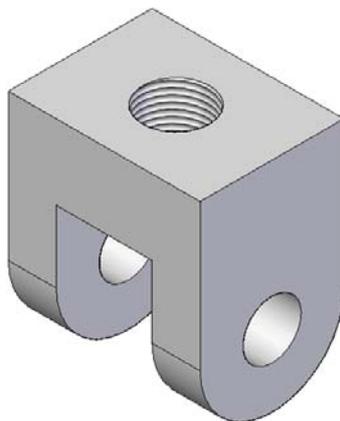


Figura 4.3. Soporte fabricado para amortiguador magneto-reológico

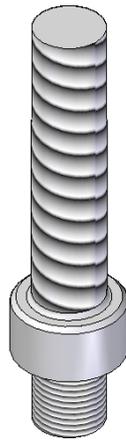


Figura 4.4. Macho roscado fabricado para amortiguador magneto-reológico

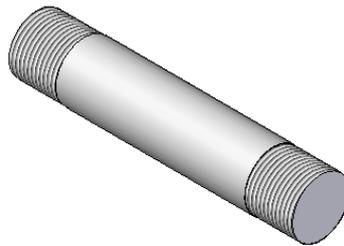


Figura 4.5. Bulón fabricado para amortiguador magneto-reológico

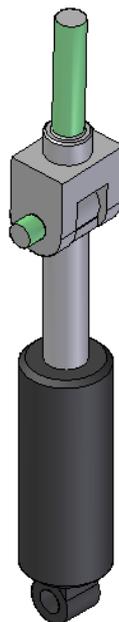


Figura 4.6. Conjunto amortiguador – elemento de unión superior

Para la incorporación del amortiguador magneto-reológico en la base del amortiguador deportivo, ha sido necesario realizar varias modificaciones a esta. Primeramente, se han realizado dos taladros diametralmente opuestos para acoplar el amortiguador mediante un bulón roscado pasante. En la figura 4.7 se muestra el diseño de la carcasa del amortiguador BILSTEIN con los taladros realizados.



Figura 4.7. Base del amortiguador BILSTEIN

Después, debido a las holguras existentes entre el amortiguador magneto-reológico y la carcasa del amortiguador deportivo, ha sido necesaria la fabricación de un casquillo que, siendo colocado entre la carcasa y el amortiguador, salve dichas irregularidades entre ambos. La figura 4.8 muestra una vista isométrica del casquillo diseñado.

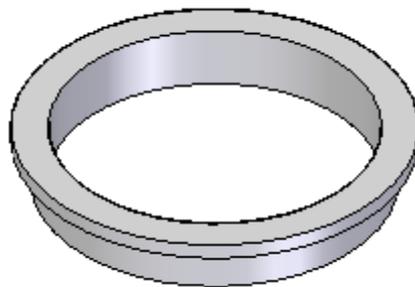


Figura 4.8. Casquillo fabricado para amortiguador magneto-reológico

Una vez realizados los agujeros en la carcasa y el casquillo, se ha procedido al montaje del amortiguador magneto-reológico en la base BILSTEIN. En la figura 4.9 se muestra la vista isométrica de dicho montaje, añadiendo además el muelle helicoidal.

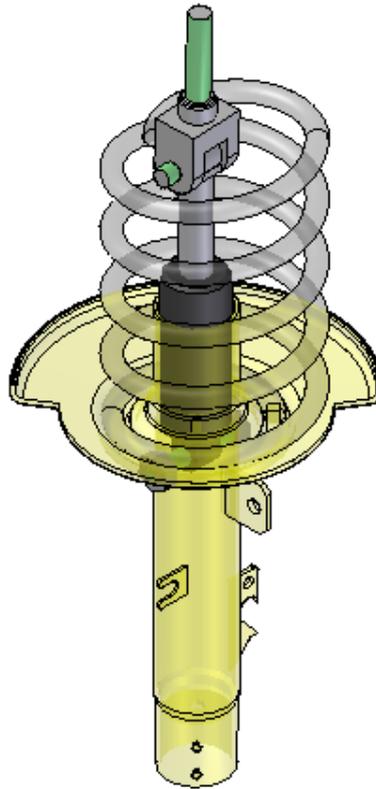


Figura 4.9. Montaje final del amortiguador magneto-reológico

Los planos de las piezas que han sido exclusivamente diseñadas y fabricadas para el montaje del amortiguador magneto-reológico se adjuntan en el Anexo B del presente proyecto.

4.3 INSTALACIÓN DEL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO EN LA SUSPENSIÓN DEL VEHÍCULO

Para poder realizar los ensayos pertinentes para la toma de datos del presente proyecto, es necesario instalar el amortiguador magneto-reológico en el vehículo de pruebas, proceso en el cual se siguieron los pasos siguientes [29]:

1. Se asegura la completa inmovilidad del vehículo para garantizar la seguridad de los operarios durante el proceso. Para ello, se ha verificado que estaba accionado el freno de estacionamiento del vehículo y se han dispuesto unas cuñas como calzos en las ruedas traseras.

2. Se retira la rueda del vehículo, aflojando los tornillos previamente a la elevación del vehículo para terminar de desenroscarlos cuando la rueda no toca el firme.

3. Se procede a retirar todo el cableado del sistema de frenos para poder trabajar con mayor comodidad y a desatornillar el tornillo que fija el amortiguador de serie a la copela prestando especial atención a la colocación del amortiguador respecto a esta para garantizar la correcta colocación del nuevo amortiguador y evitar así tener que repetir el proceso.

4. Es necesario soltar las sujeciones inferiores a la copela del amortiguador. Dado el escaso espacio de maniobra del que se dispone, puede resultar útil emplear llaves de tubo largo o bien extender de la que se dispone mediante tubos de mayor longitud que, aparte de permitir maniobrar desde mayor distancia, reduce la fuerza que es necesaria ejercer para desatornillar (en caso de que los tornillos se encuentren fuertemente apretados). La figura 4.10 muestra el conjunto amortiguador en el instante anterior de soltar las sujeciones inferiores a la copela.



Figura 4.10. Conjunto amortiguador sin pinza de freno

5. Se extrae el conjunto del amortiguador de su correspondiente abrazadera en el buje. Para ello ha sido necesario tirar hacia abajo del freno de disco, haciendo a su vez palanca en el propio eje del amortiguador. Para facilitar este paso, puede resultar recomendable ayudarse de algún tipo de lubricante específico para este tipo de tareas ya que contribuirá a reducir la fricción entre las piezas. En este paso, se ha prestado especial atención a no dejar caer el disco de freno cuando se consiga sacar el conjunto amortiguador, ya que podría golpearse contra el suelo y dañarse. Para evitarlo, resulta aconsejable disponer un soporte para el mismo.

6. Se ha separado el conjunto amortiguador-muelle de la copela, completando el proceso de extracción del conjunto amortiguador del vehículo (ver figura 4.11).



Figura 4.11. Extracción completa del conjunto amortiguador

7. Se extrae el capuchón de la parte superior del amortiguador, colocando a continuación los compresores de muelle, intentando que alberguen en su interior el mayor número de espirales posible, y se van apretando los dos a la vez hasta que el muelle quede suelto de la arandela superior y se pueda mover libremente. En este apartado, es importante colocar los compresores uno frente al otro y realizar la compresión con sumo cuidado, ya que un fallo podría causar daños y graves problemas.

8. Se quita la tuerca superior que mantiene unido todo el amortiguador. Para ello, es necesario sujetar con una llave de vaso la tuerca y mediante una llave de tipo Allen desenroscar girando en sentido contrario al habitual, ya que de otra manera se hace girar el vástago del amortiguador a la vez y no se puede desenroscar.

9. Tras quitar el tornillo superior ya se puede desmontar el conjunto del amortiguador y proceder a montar el de tipo magneto-reológico en el vehículo. Para ello, se toma el nuevo amortiguador verificando que corresponde al del lado en el cual se quiere montar comparando la posición de soporte para los distintos elementos de anclaje y se hace su montaje individual, empleando de nuevo los compresores del muelle y verificando al final que el muelle quede bien asentado en las muescas de los soportes superior e inferior dispuestos a tal efecto. Finalmente, se aprieta el tornillo superior con un par de 60 Nm aproximadamente.

10. Para iniciar el proceso de montaje del nuevo amortiguador en el vehículo, se colocan las tuercas de la copela apretándolas a mano de tal manera que el amortiguador se sujete sin caer.

11. Se sitúa el eje inferior del amortiguador en la abrazadera del buje, añadiendo fijatornillos en el tornillo de la abrazadera y se aprieta a mano de manera que quede sujeto provisionalmente.

12. Se gira el eje del amortiguador de manera que queden alineados la marca de este (verificando las indicaciones del mismo) y la abertura de la abrazadera donde va sujeto. Se recomienda a continuación un par de apriete para el tornillo de la abrazadera de 100 Nm.

13. Se colocan de nuevo los cables del sistema de freno (limpiando este último en caso de haberlo tocado con las manos o si está salpicado de alguno de los líquidos empleados en el proceso). En la figura 4.12 se muestra el conjunto del amortiguador magneto-reológico colocado en la suspensión delantera derecha.



Figura 4.12. Amortiguador magneto-reológico montado en la suspensión delantera derecha

14. Finalmente, se coloca la rueda apretando los tornillos a unos 110 Nm y se terminan de apretar los tornillos de la copela prestando atención al par de apriete correcto (30 Nm).

4.4 CALIBRACIÓN E INSTALACIÓN DE SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

4.4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO UTILIZADOS

Los sensores extensiométricos instalados en la suspensión delantera del vehículo, son utilizados para la medición del desplazamiento que experimenta cada amortiguador, tanto el convencional como el magneto-reológico. Dichos sensores corresponden al tipo MTN / E de la serie de transductores industriales de desplazamiento LVDT, los cuales presentan rangos de medición que pueden variar desde $\pm 0,5$ hasta ± 500 mm. Estos sensores están contruidos en acero inoxidable, lo cual les da de extraordinarias características específicas para las condiciones de trabajo más exigentes, incluso en ambientes húmedos o polvorientos. La figura 4.13 muestra el tipo de sensor utilizado para medir el desplazamiento de cada amortiguador [23].



Figura 4.13. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La gama de sensores de DC ofrecen señales de salida que varían de 0 a 10 V con un margen de error de $\pm 2,5$ V, así como un cable de salida a 20 mA.

Entre sus características mecánicas destacan la inclusión de núcleo de guiado para la varilla de extensión, la cual incorpora a su vez una rótula para garantizar los grados de libertad posibles. A su vez dispone de otra rótula en el extremo opuesto. En la figura 4.14 se puede observar el plano que describe el sensor.

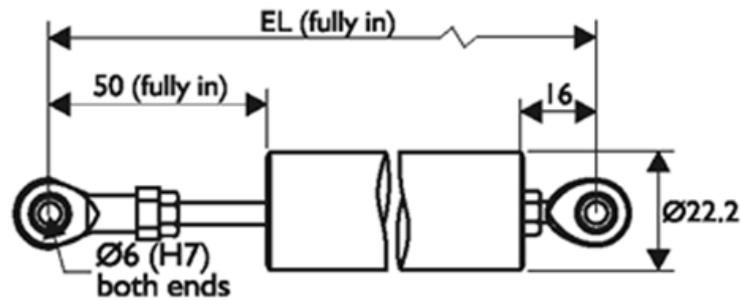


Figura 4.14. Sensor de desplazamiento LVDT MTN / E

La tabla 4.1 recoge los valores de longitud total a sus distintos intervalos de carrera.

Tabla 4.1. Relación de la longitud con la carrera del sensor de desplazamiento LVDT

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

4.4.2 CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

Antes de proceder a la instalación de los sensores de desplazamiento, es necesario realizar un estudio completo sobre la linealidad de respuesta que presentan estos sensores. Para ello, se han realizado medidas de su variación de voltaje entre 0 y 10 V. Dichas medidas se realizan a intervalos de 2 mm tanto en carrera de extensión como de compresión, obteniendo así un total de 10 medidas para cada intervalo.

Para realizar la respectiva calibración de los sensores, se ha determinado el comportamiento de ambos, que responde a la ecuación de una recta en la que las ordenadas son el voltaje (en V) y las abscisas al desplazamiento del sensor (en cm). A su vez, ha sido necesario determinar los errores que afectan a la pendiente (Δm) y a la ordenada en el origen (Δb). Dichos errores han sido calculados comparando, en primer lugar, el error accidental con el error de precisión y tomando el mayor de estos para calcular la desviación estándar (σ) (en la toma de datos del voltaje). Este valor introducido en las fórmulas (1) y (2), junto con los correspondientes sumatorios para los valores de la posición relativa del sensor, dan los errores de la pendiente y de la ordenada en el origen, respectivamente:

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

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

La tabla 4.2 contiene los datos de voltaje relativos al sensor de desplazamiento colocado en la suspensión delantera derecha. La figura 4.15 muestra la linealidad del sensor, la ecuación de la recta y su coeficiente de correlación.

Tabla 4.2. Relación Voltaje/desplazamiento de datos 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 |

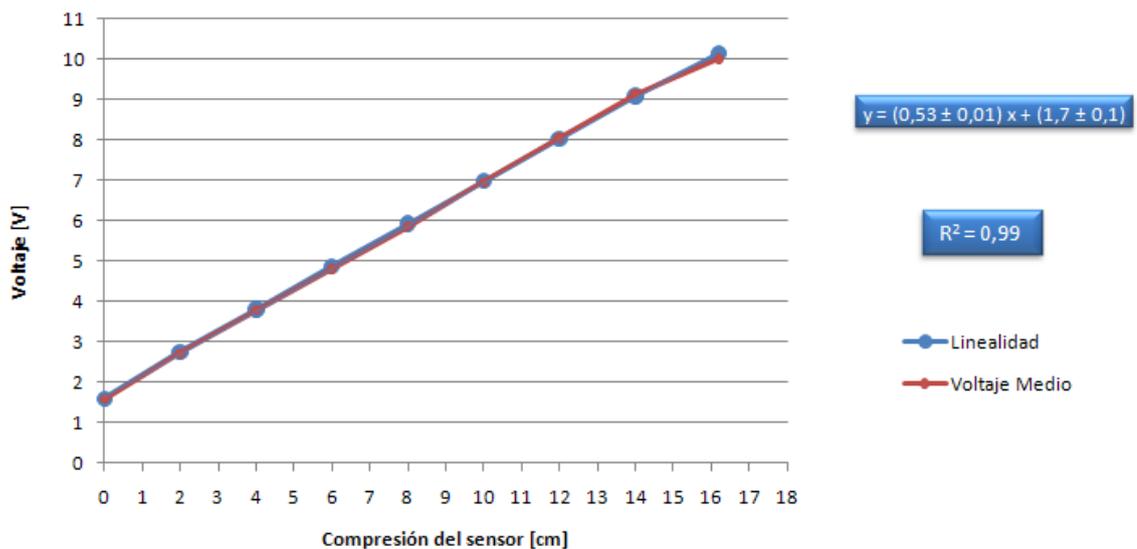


Figura 4.15. Linealidad sensor delantero derecho

De la misma manera, la tabla 4.3 contiene los datos de voltaje relativos al sensor colocado en la rueda delantera izquierda. A su vez, en la figura 4.16, quedan reflejados la linealidad, la ecuación y el coeficiente de correlación.

Tabla 4.3. Relación Voltaje/desplazamiento de datos 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 |

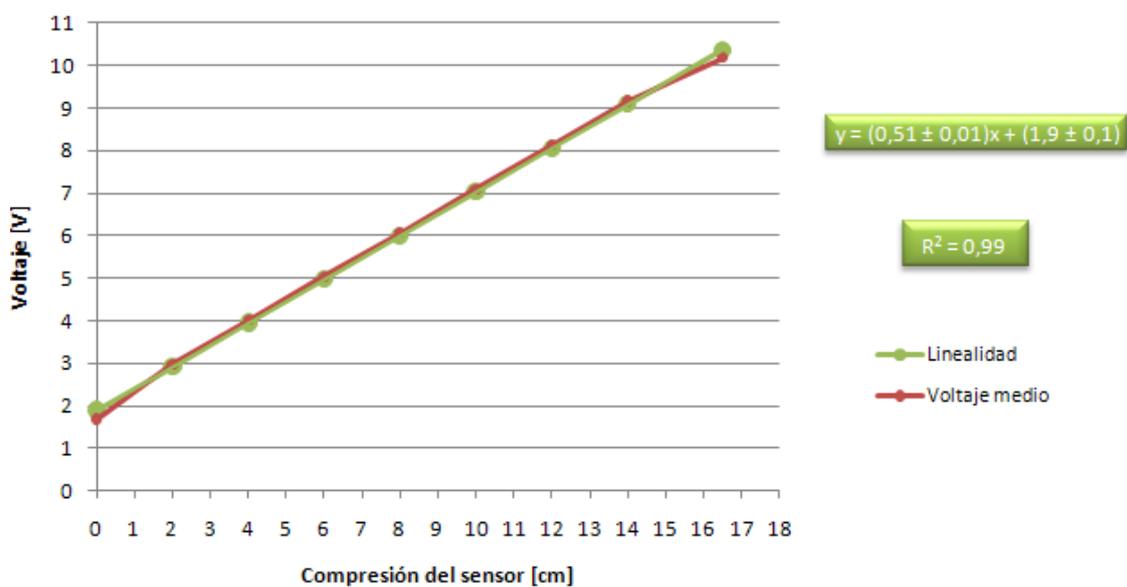


Figura 4.16. Linealidad sensor delantero izquierdo

4.4.3 COLOCACIÓN DE LOS SENSORES DE DESPLAZAMIENTO

El proceso de colocación de ambos sensores de desplazamiento es análogo, tanto en la suspensión derecha como en la izquierda, quedando dispuestos en las posiciones que se muestran en las figuras 4.17 y 4.18 respectivamente, debido a que las grandes dimensiones que los caracterizan no permitían instalarlos de otra manera. En primer lugar se ha procedido a quitar la rueda, así como el panelado circundante a la misma en todos los bajos del coche, con el objetivo de disponer de mejor visibilidad. Seguidamente, ha sido necesario realizar dos taladros del mismo diámetro, uno de ellos en la parte frontal del trapecio y otro en la chapa situada en la parte inferior de la copela.



Figura 4.17. Sensor de la suspensión derecha



Figura 4.18. Sensor de la suspensión izquierda

Dado el reducido espacio comprendido entre el chasis del vehículo y el latiguillo del freno, ha sido necesario realizar un roscado en el taladro del trapecio para sujetar el espárrago inferior.

Con el objetivo de garantizar el mayor grado de perpendicularidad posible, evitando así ángulos de caída innecesarios, se ha fabricado un tubo en el cual va alojado el espárrago anterior, que soporta el sensor, pasando por la rótula inferior de este (ver figura 4.19). A su vez, la sujeción superior se ha realizado eliminando las holguras mediante arandelas y con un sistema de tuerca y contratuerca (ver figura 4.20).

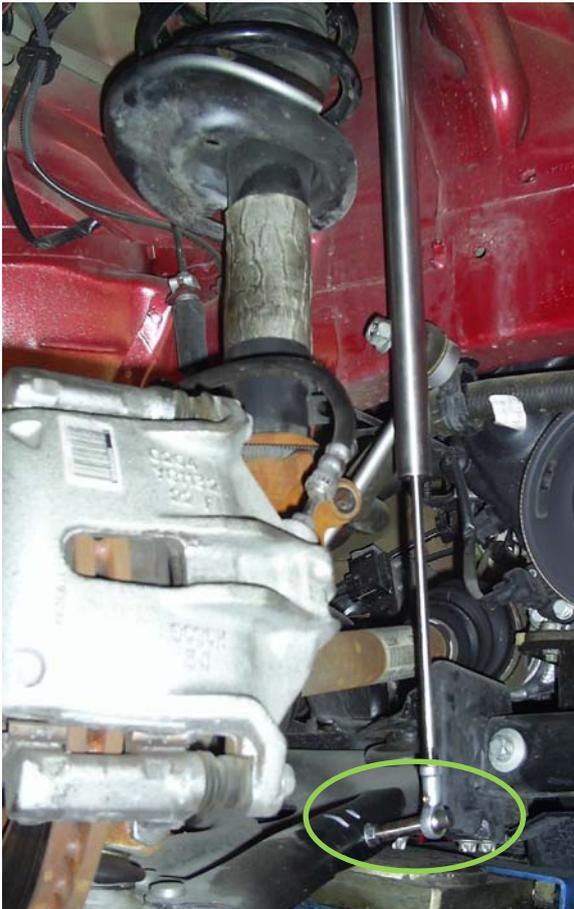


Figura 4.19. Sujeción inferior sensor



Figura 4.20. Sujeción superior sensor

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE LABVIEW

5.1 INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE LABVIEW

Una vez instalado el amortiguador magneto-reológico y los sensores, es necesario llevar a cabo una compilación y análisis de los datos recogidos por ambos sensores para poder así compararlos. El software que se instalará en los equipos para la toma de datos, será una aplicación del software LabVIEW proporcionado por National Instruments, conocida como LabVIEW SignalExpress. Esta aplicación posibilita el aprendizaje a través de prácticas experimentales en múltiples disciplinas (incluyendo entre ellas un amplio abanico de ingenierías), ya que permite a sus usuarios conectarse y medir desde miles de instrumentos sobre diferentes buses mediante el empleo de una única interfaz.

Este software está desarrollado sobre una plataforma completamente interactiva, por lo que los investigadores podrán analizar datos y hacer cambios aunque las aplicaciones se estén ejecutando en ese mismo instante. Además, permite aplicar diversos análisis al sistema de manera más rápida y efectiva, mientras se hacen ajustes de los datos que provienen de los sensores en tiempo real.

LabVIEW SignalExpress proporciona una interfaz sencilla, desde la cual se pueden crear multitud de informes interactivos, incluyendo entre estos textos, tablas y gráficas dinámicas que muestren los datos adquiridos o que se están procesando. Permite además, exportar los datos recogidos a paquetes de análisis que facilitan el tratamiento y estudio de los mismos.

En la figura 5.1 se puede observar un ejemplo de informes interactivos creados en LabVIEW SignalExpress.

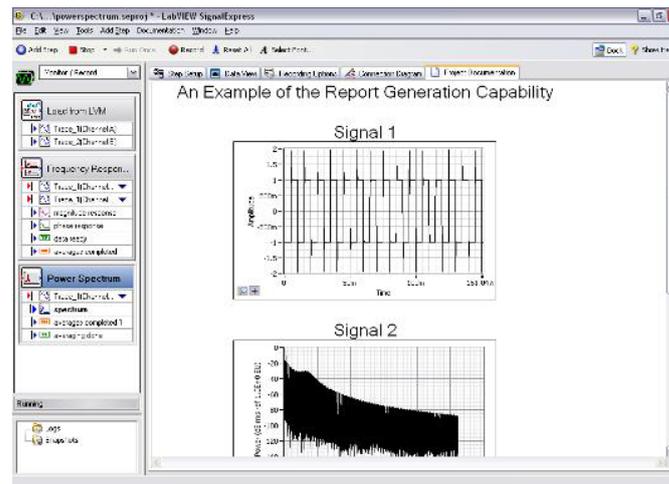


Figura 5.1. Ejemplo de informes interactivos

5.2 HARDWARE EMPLEADO

El equipo empleado en la parte práctica del presente proyecto fue suministrado por National Instruments. Está compuesto por un chasis en el cual va instalado todo el software necesario (permitiendo arranque desde Windows o directamente desde LabVIEW) y que permite la adaptación de distintos módulos extraíbles para la captura de datos y la alimentación de los equipos auxiliares necesarios. En concreto, el chasis adquirido es el NI PXI 1031DC (se puede observar en la figura 5.2), compuesto por cuatro *slots* y que permite ser alimentado de dos maneras distintas, una que va desde los 100 a los 120 V o de 200 a 240 V en corriente alterna (AC) y otra de 11 a 30 V en corriente continua (DC). Otra de las características que hacen de este chasis el apropiado para ser utilizado en el presente proyecto, es su pequeño tamaño, que permite transportarlo con facilidad e incluso adaptarlo en el interior del vehículo [28].

Las características técnicas del NI PXI 1031DC se adjuntan en el anexo A.3.1



Figura 5.2. NI PXI 1031DC

Para completar el equipo de hardware necesario para realizar el proyecto, se han adquirido dos módulos extraíbles, el NI PXI 6230 y el NI PXI 4472B. El primero es el encargado de suministrar alimentación a los sensores y al amortiguador magneto-reológico (para poder así modificar sus parámetros de dureza). Contiene seis entradas digitales, cuatro canales de salida digital y cuatro salidas analógicas de 16 bits de resolución hasta unos 500 KS/s. La alimentación de los sensores y del amortiguador será realizada a través de estas salidas analógicas. La figura 5.3 muestra el módulo NI PXI 6230.



Figura 5.3. Módulo NI PXI 6230

El módulo NI PXI 4472B está compuesto por ocho entradas analógicas muestreadas simultáneamente has 102.4 kS/s. Mediante este dispositivo se pueden sincronizar hasta 5000 canales, disponiendo además de un acoplamiento AC/DC con resolución de 24 bits que se puede configurar a través del software suministrado. La función principal de este módulo será captar las señales generadas en los sensores mientras se realizan las pruebas, guardándolas en la memoria del sistema PXI para su posterior tratamiento y análisis. En la figura 5.4 se puede observar el módulo NI PXI 4472B.



Figura 5.4. Módulo NI PXI 4472B

Las especificaciones técnicas, tanto del NI PXI 4472B como del NI PXI 6230 se adjuntan en los anexos A.3.2 y A.3.3.

5.3 ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE SEÑAL EN LABVIEW

Para aprender a utilizar el entorno de LabVIEW SignalExpress 2009, se va a exponer de manera detallada un ejemplo de adquisición de una señal para su posterior almacenamiento y tratamiento. Para comenzar, se puede visualizar en la figura 5.5 el espacio de trabajo de LabVIEW SignalExpress 2009. Se procederá a explicar el cuadro de *Monitor/Record*, así como las pestañas *Add Step*, *Run*, *Record* y *Data View* [29].

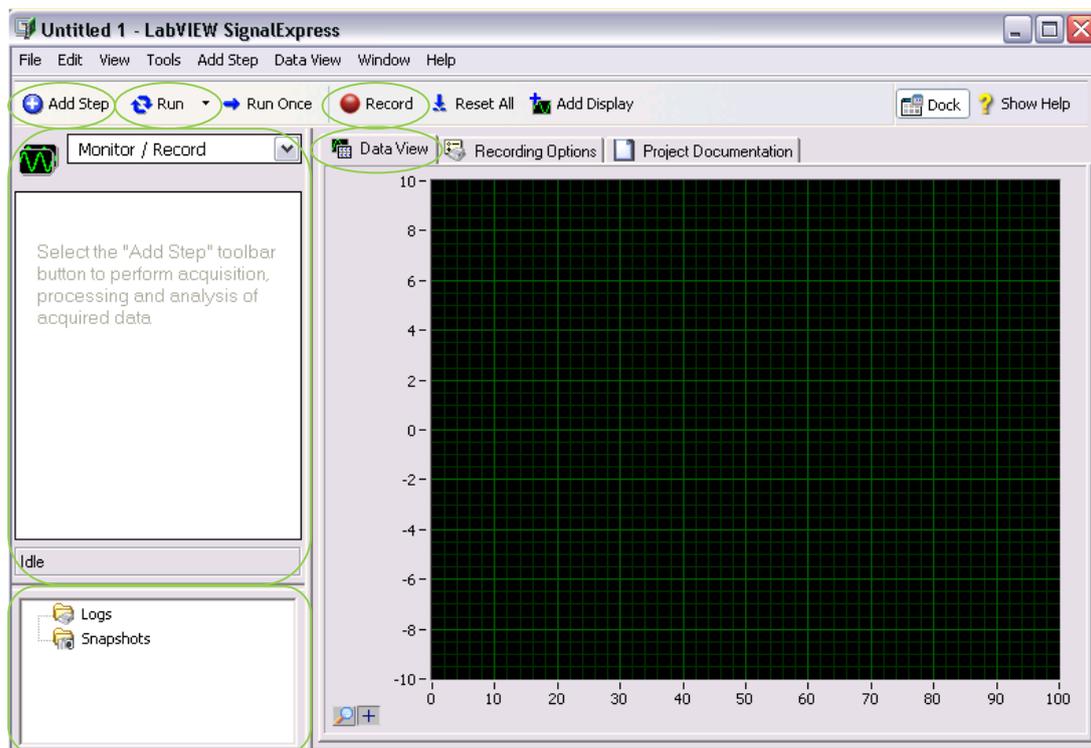


Figura 5.5. Espacio de LabVIEW SignalExpress 2009

La figura 5.6 muestra el cuadro de *Monitor/Record*, en el cual quedarán registrados todos los pasos realizados durante la sesión de trabajo y proporcionando un acceso rápido y dinámico a los datos adquiridos en el proceso.



Figura 5.6. Monitor/Record

En la pestaña *Data View*, el usuario puede visualizar y analizar todos los datos adquiridos hasta el momento. Se puede observar una ampliación de esta pestaña en la figura 5.7.



Figura 5.7. Data View

Por otra parte, en el cuadro situado en la parte inferior izquierda de la pantalla, es donde se almacenan todos los datos y se proporcionan, a su vez, los accesos directos a estos. Se puede observar una ampliación de este cuadro en la figura 5.8.



Figura 5.8. Recuadro auxiliar de texto

La pestaña *Add Step*, ofrece la posibilidad de desplegar un submenú (ver figura 5.9). Este submenú permite al usuario adquirir, generar, crear y guardar cualquier señal. También ofrece la posibilidad de procesar y analizar esta señal, distinguiendo entre señales de tipo analógico y de tipo digital.

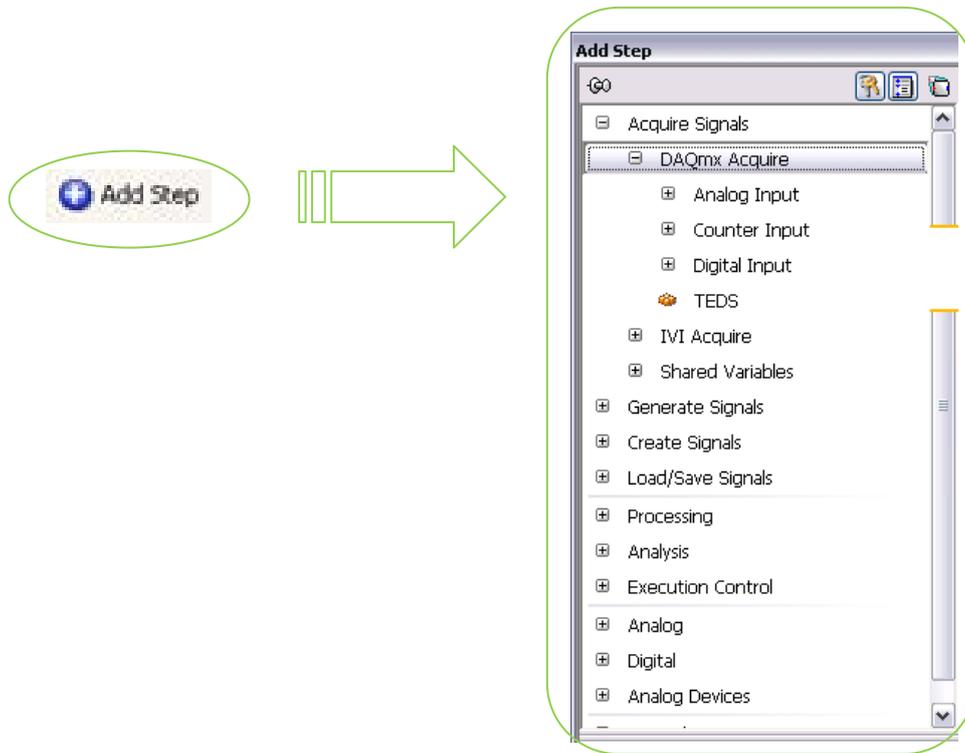


Figura 5.9. Pestaña Add Step y submenú

Por otra parte, a la derecha de la pestaña *Add Step* se puede ver la pestaña *Run* (figura 5.10). Su función consiste en dar comienzo a la grabación de la señal cuando el usuario lo requiera.



Figura 5.10. Pestaña Run

Observando el desplegable de la figura 5.9, se puede crear un campo de trabajo que permita la adquisición de una señal cualquiera (pulsando el botón *Run*). En el caso que ocupa este ejemplo, se trata de una aceleración. Ver la figura 5.11.

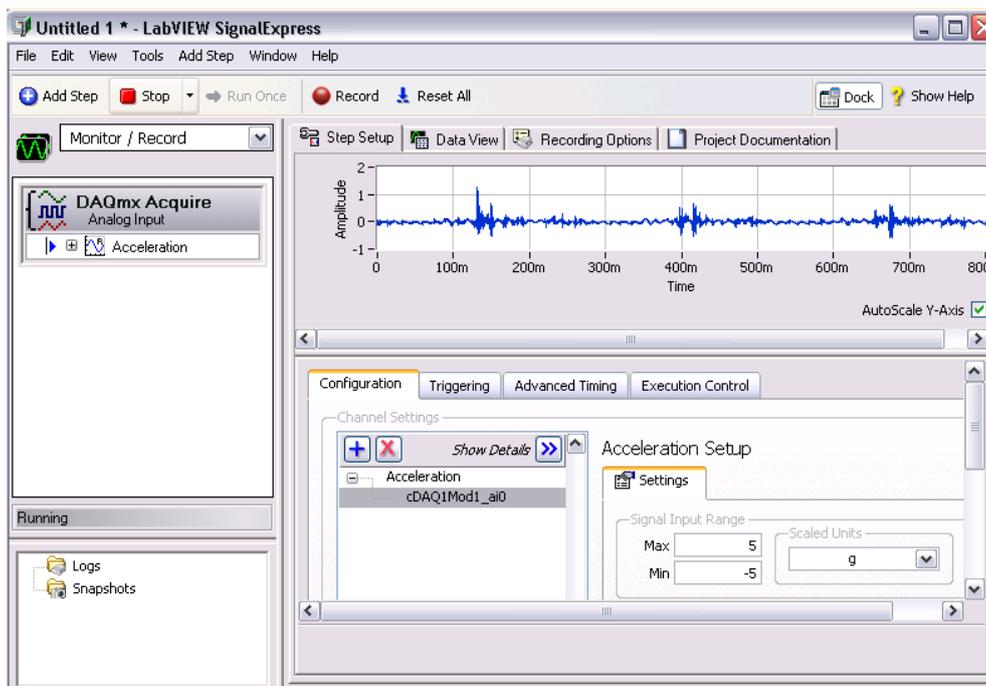


Figura 5.11. Toma de datos en LabVIEW SignalExpress 2009

Una vez pinchada la pestaña *Run* el programa comienza la recogida de datos. Para llevar toda esta información al campo de trabajo de LabVIEW SignalExpress 2009, hay que pinchar sobre la pestaña *Data View* y arrastrar el contenido de la misma hasta la pestaña *Monitor Record*, en concreto hasta el cuadro de medidas.

A continuación, aparecerá un espacio de trabajo como el que se puede observar en la figura 5.12, el cual muestra la información ya recogida, almacenada y visualizada en el campo de trabajo inicial.

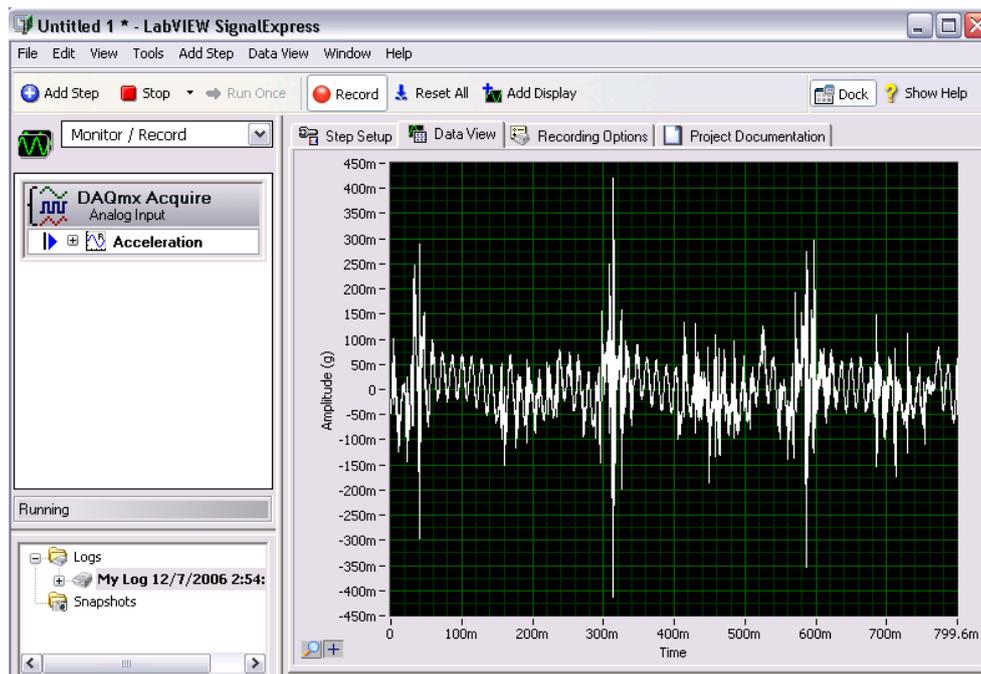


Figura 5.12. Almacenamiento de datos en LabVIEW SignalExpress 2009

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 INTRODUCCIÓN

Para poder recoger los datos necesarios para el estudio del comportamiento de un amortiguador magneto-reológico en la suspensión de un vehículo automóvil, ha sido necesario realizar la instalación y calibración de varios dispositivos y equipos, entre los cuales se pueden destacar:

- Sensores extensiométricos de tipo MTN/E de la serie de transductores industriales LVDT.
- Amortiguador magneto-reológico RD 1005-3 de la empresa Lord.
- Equipo PXI.
- Periféricos para el manejo de la PXI: pantalla, teclado, ratón y memorias tipo USB.

Como ya se comentó en el capítulo 3, el comportamiento de los fluidos reológicos varía en función del voltaje al que se encuentren sometidos, por ello, para poder caracterizar el comportamiento del amortiguador magneto-reológico es necesario realizar varias pruebas, con distintos tipos de obstáculos y a distintos niveles de voltaje (0, 2.5, 5, 7 y 10 V). Se han realizado tres tipos de pruebas: en suelo adoquinado, pasando un badén y en un pequeño escalón. Todas ellas se han realizado dentro del recinto perteneciente a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

6.2 INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS

Una vez instalados los sensores extensiométricos y el amortiguador magneto-reológico, es necesario instalar todos los equipos y periféricos de medida dentro del vehículo de manera que se puedan realizar pruebas dinámicas sin depender de la instalación eléctrica de la red.

La ubicación seleccionada para la PXI es el asiento delantero derecho. Esta disposición permite al conductor del vehículo verificar cómodamente todas las conexiones sin necesidad de bajarse del propio vehículo e incluso, encender o apagar el

equipo cuando sea necesario. En la figura 6.1 se puede observar la disposición de la PXI dentro del vehículo.



Figura 6.1. Ubicación seleccionada para la PXI

Por otra parte, el dispositivo regulador del voltaje que es suministrado al amortiguador magneto-reológico va situado en el exterior del coche, concretamente pegado mediante cinta adhesiva de doble cara en la luna delantera del vehículo. Esta disposición se seleccionó ya que la longitud de los cables de alimentación del amortiguador magneto-reológico no permitían instalarlo en el interior y, para poder comprobar más cómodamente mediante un polímetro si la tensión que se le suministra desde la PXI se encuentra dentro de los parámetros adecuados para cada ensayo. En la figura 6.2, puede observarse la ubicación de este dispositivo.

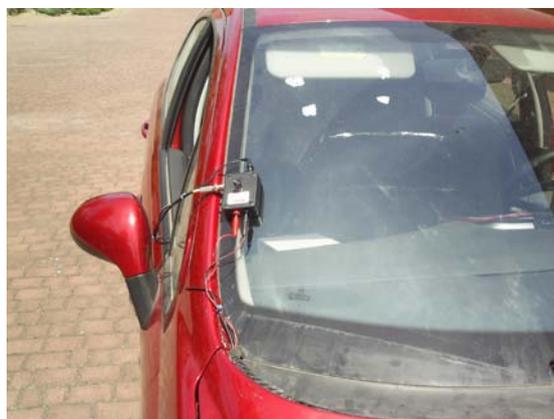


Figura 6.2. Ubicación del regulador de corriente del amortiguador magneto-reológico

Finalmente, los periféricos necesarios para la monitorización de los datos y el manejo de la PXI (teclado, ratón y pantalla) se instalaron en el asiento trasero. De esta manera, la persona encargada de manejar los equipos para el registro y grabado de los datos, dispone de un amplio espacio de maniobra para trabajar cómodamente. Si bien el ratón y el teclado no necesitan un sistema de soporte eficiente, para asegurar y sostener la pantalla fue necesario el empleo de bridas de gran tamaño, así como de una goma elástica con ganchos en sus extremos. En la figura 6.3, se puede observar la colocación de estos dispositivos.



Figura 6.3. Ubicación de los periféricos

6.3 ALIMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS INSTALADOS EN EL VEHÍCULO

Como ya se mencionó en el capítulo 5, la instalación de los equipos de medida requiere que la alimentación dependa exclusivamente de la suministrada por el propio vehículo para poder realizar pruebas en movimiento. Por otra parte, la alimentación de los equipos es diferente para cada uno de ellos. El equipo PXI está alimentado directamente por la batería del vehículo, ya que el 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 de National Instruments vía USB. En cuanto a los sensores, 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 el voltaje

del amortiguador. La cuarta y última salida quedará sin conectar. En la figura 6.4, se muestra el esquema de las conexiones realizadas al NI PXI 6230.

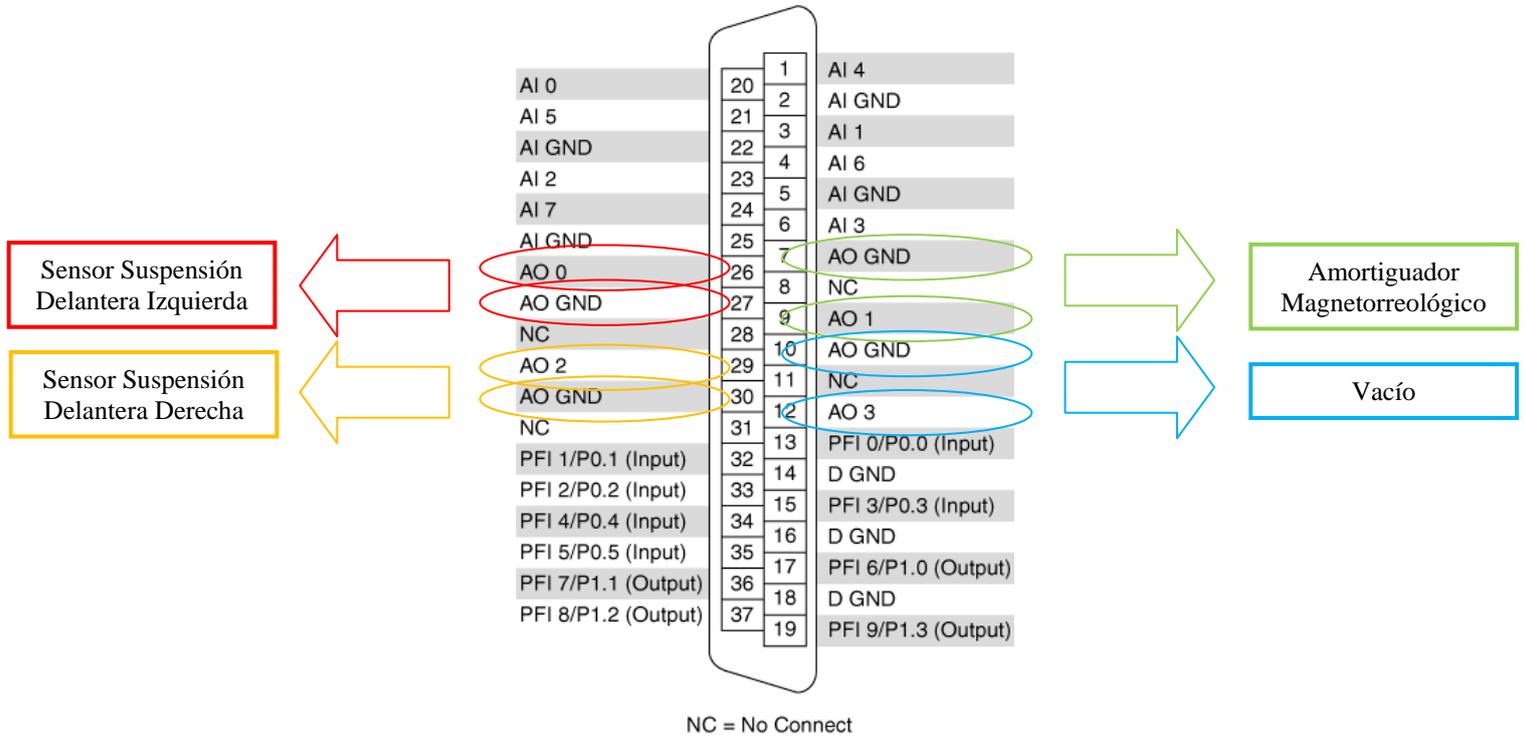


Figura 6.4. Conexiones realizadas al NI PXI 6230

Finalmente, el voltaje necesario 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 son 12 V.

6.4 ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos realizados para la toma de datos se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Ensayo realizado sobre adoquinado. Este ensayo consiste en hacer circular el vehículo a distintas velocidades (20, 30 y 40 km/h) y a distintos valores de voltaje (0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V) obteniendo medidas tanto en el trayecto de ida, como en el de vuelta hasta un total de 30. La variación en el voltaje implica una variación en el valor del coeficiente de amortiguamiento que presenta el amortiguador magneto-reológico, por

este motivo, se obtendrán distintos resultados al circular a la misma velocidad pero con distinto voltaje. En la figura 6.5 aparece el vehículo circulando sobre el adoquinado.



Figura 6.5. Vehículo de pruebas sobre el adoquinado

- Ensayo realizado sobre badén. En esta prueba, se hace pasar el vehículo a una velocidad constante de 20 km/h y distintos valores de voltaje (0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V) sobre dos badenes dispuestos sobre el pavimento adoquinado. Se obtienen un total de cinco medidas. En la figura 6.6 aparece el vehículo superando uno de los badenes.



Figura 6.6. Vehículo afrontando un badén

- Ensayo realizado sobre escalón. Esta prueba consiste en someter al vehículo a la bajada y subida de un pequeño escalón a velocidad constante de 20 km/h, con distintos valores de voltaje (0, 2.5, 5, 7.5 y 10 V) para alimentar el amortiguador magneto-reológico, obteniendo un total de 5 medidas. En la figura 6.7 el vehículo se encuentra en situación de subir el citado escalón.



Figura 6.7. Vehículo afrontando el escalón

6.5 CONEXIONADO ENTRE EQUIPOS

El conexionado llevado a cabo entre el amortiguador, los dos sensores de desplazamiento y los módulos PXI 6230 y PXI 4472B, sigue el esquema mostrado en la figura 6.8. Para poder regular el voltaje de entrada al amortiguador magneto-reológico digitalmente, se ha conectado su *Kit Controller* al PXI 6230.

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

Azul - 0 V

Rojo - Alimentación (0-10 V)

Verde – Señal

En el caso del sensor de desplazamiento 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 instalado en la suspensión

izquierda, fue necesario empalmar cable para poder guiar el cableado hasta el equipo controlador PXI. Por ello, el código de colores de los cables de señal correspondientes a este sensor es:

Marrón - 0 V

Amarillo – Alimentación (0-10 V)

Verde - Señal

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

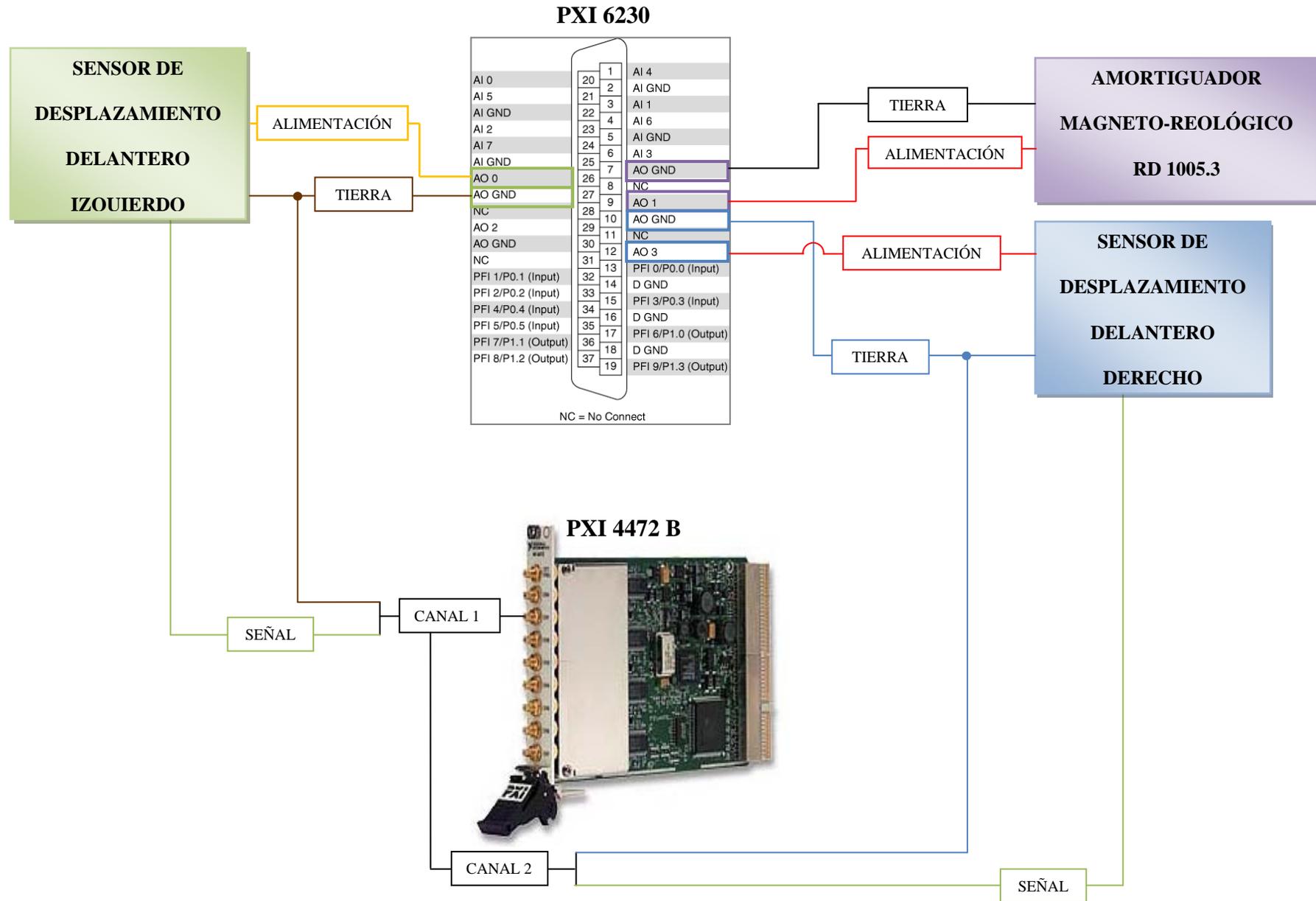


Figura 6.8. Conexión entre equipos

6.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se recogen los datos obtenidos de los ensayos descritos en el apartado 6.5. En primer lugar, se hace un estudio temporal de dichos datos a partir del cual se obtiene el *Root Mean Square* (RMS). A continuación, se procede a realizar un estudio en frecuencia para determinar el *Power Spectral density* (PSD).

Para cada ensayo se hace una distinción entre los resultados obtenidos para el amortiguador magneto-reológico y para el convencional, en la que quedan reflejados los valores de tensión obtenidos frente al número de medidas.

El ruido obtenido en la señal se caracteriza por encontrarse en rangos de frecuencias altas. Para cada ensayo se obtiene el mismo ruido, por este motivo se aplica siempre el mismo filtro. En la figura 6.9 se muestra un ejemplo del ruido que aparece en todas las medidas. Para eliminar este ruido se ha aplicado en todas las medidas un filtro de paso bajo del tipo *Butterflow* (figura 6.10).

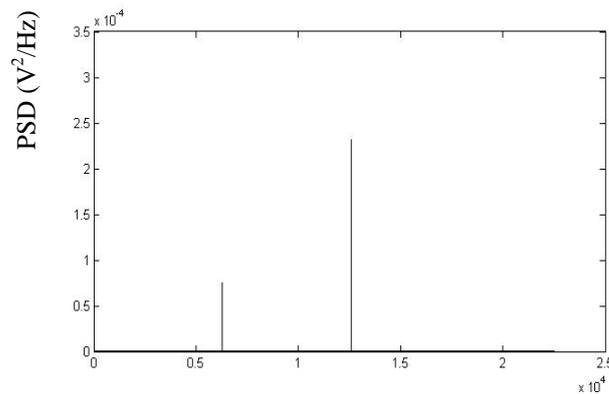


Figura 6.9. Ruido recogido en la señal durante la realización del ensayo

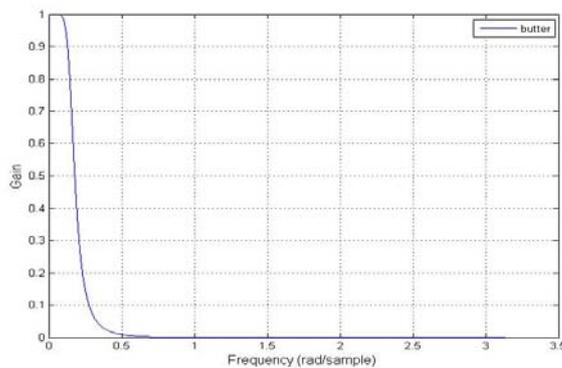


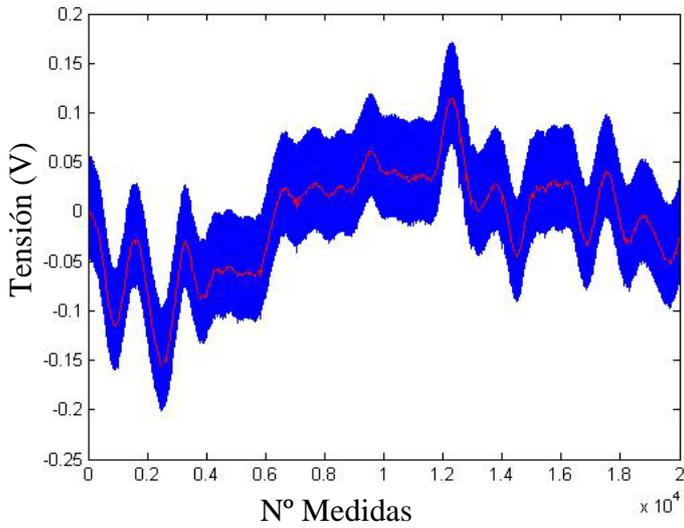
Figura 6.10. Filtro escogido para eliminar el ruido en la señal de adoquinado a 20 km/h

6.6.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 20 km/h

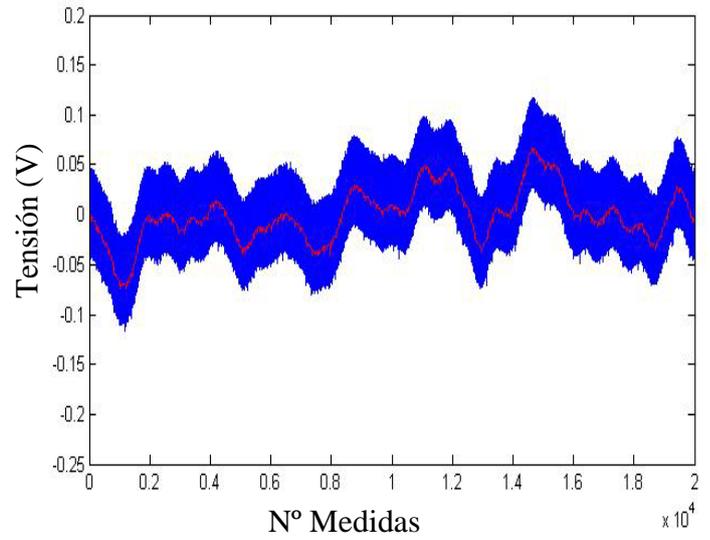
Las figuras 6.11, 6.13, 6.15, 6.17 y 6.19 muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.12, 6.14, 6.16, 6.18 y 6.20 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

• Alimentación del amortiguador: 0 V

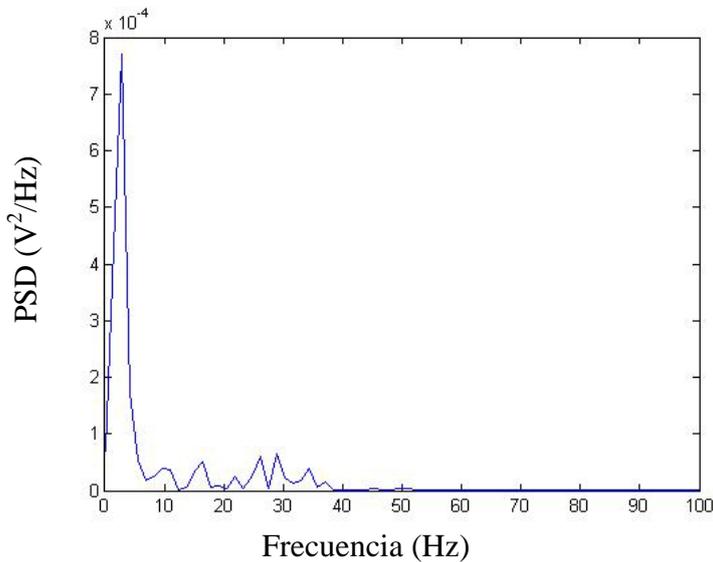


a) Amortiguador magneto-reológico

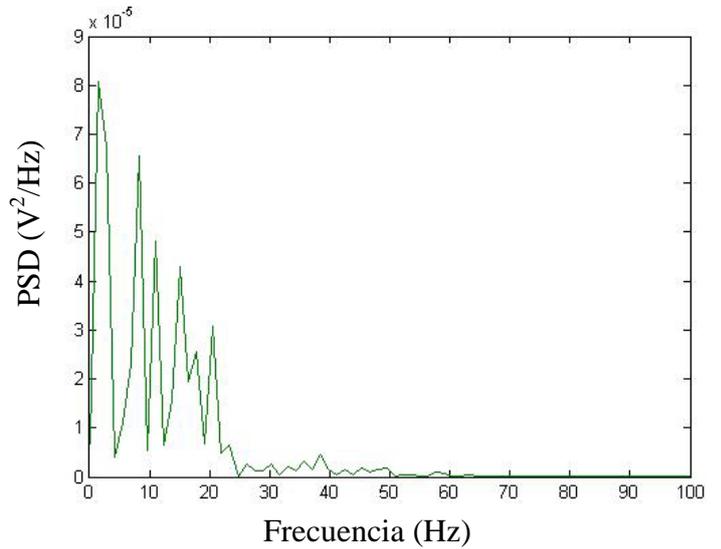


b) Amortiguador convencional

Figura 6.11. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.12. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 0 V

• Alimentación del amortiguador: 2,5 V

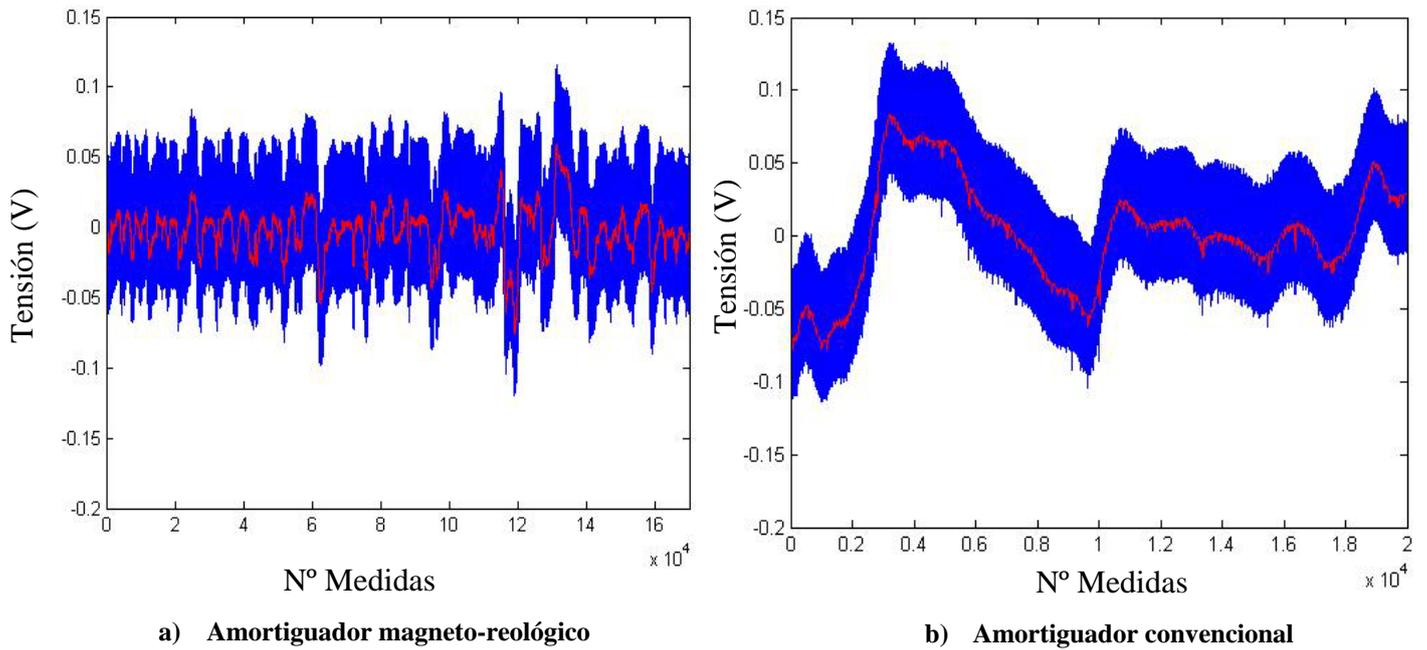


Figura 6.13. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2,5 V

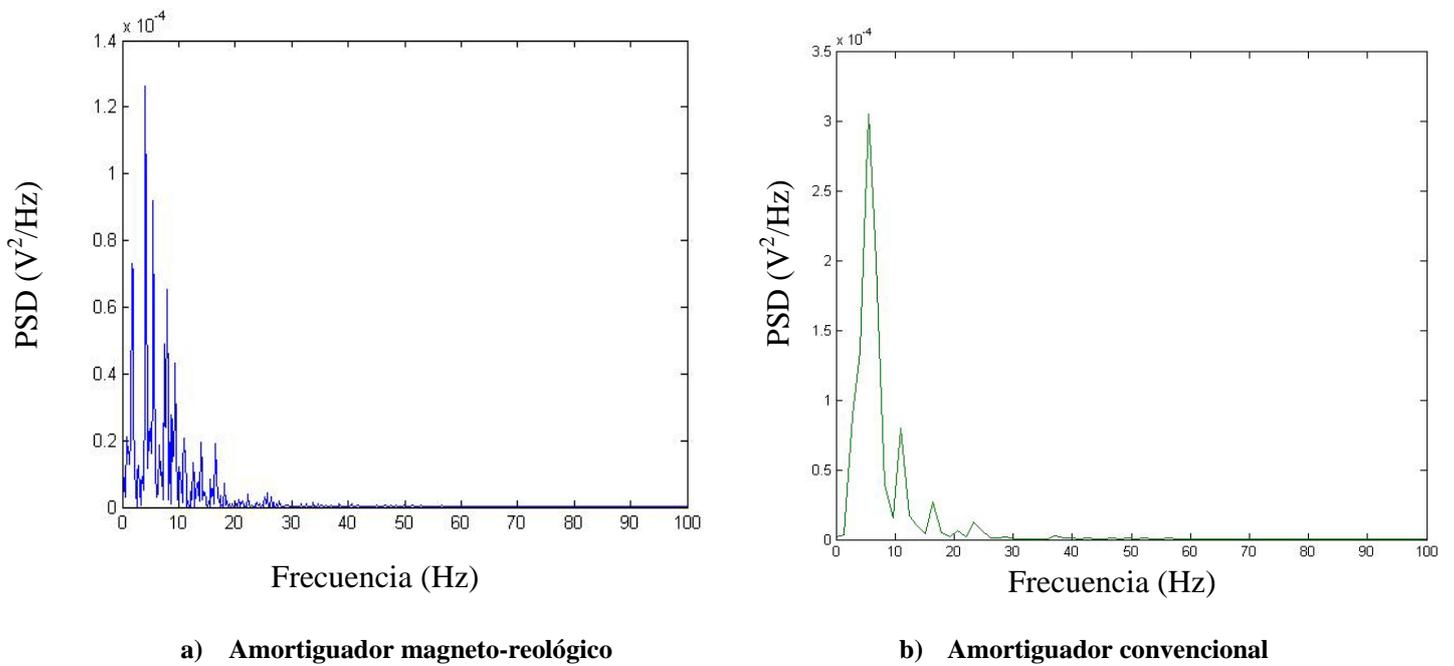
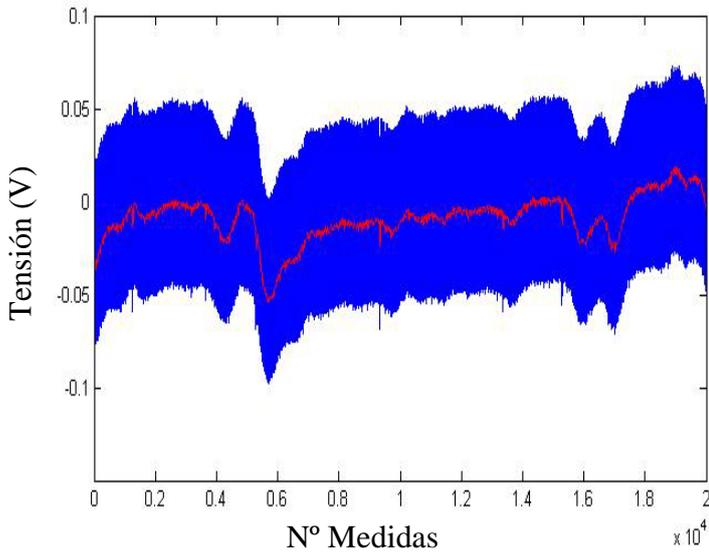
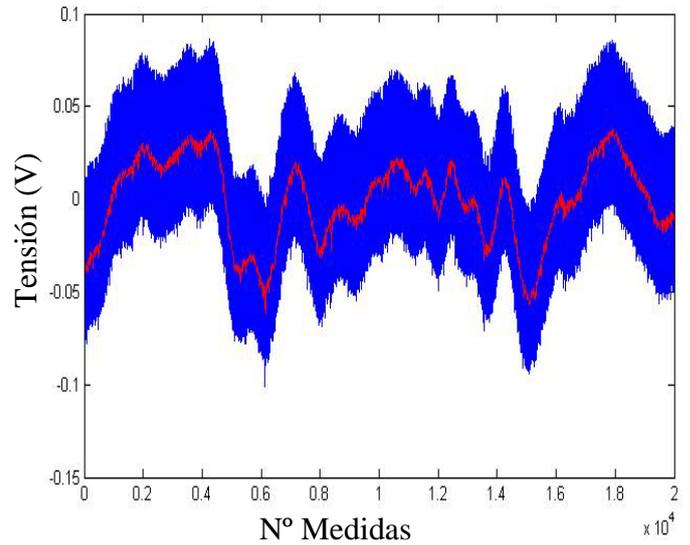


Figura 6.14. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 2,5 V

• Alimentación del amortiguador: 5V

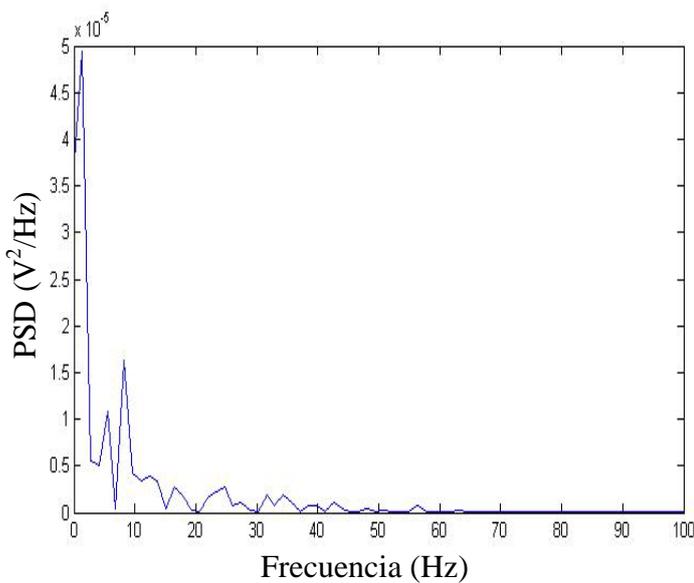


a) Amortiguador magneto-reológico

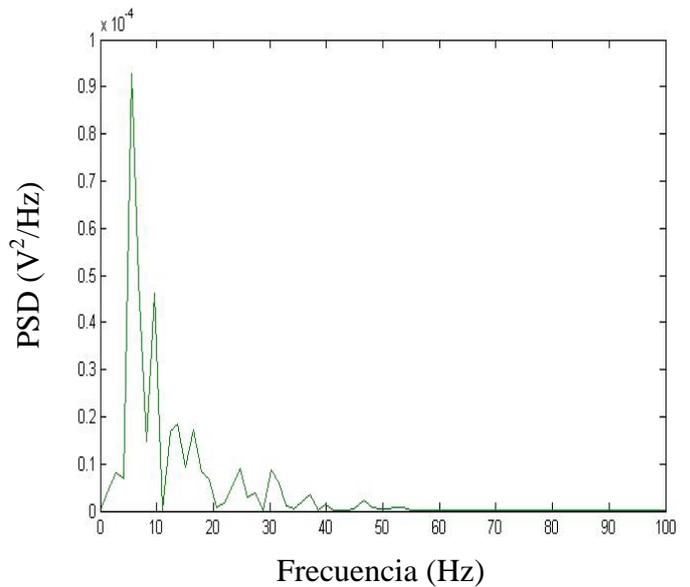


b) Amortiguador convencional

Figura 6.15. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V



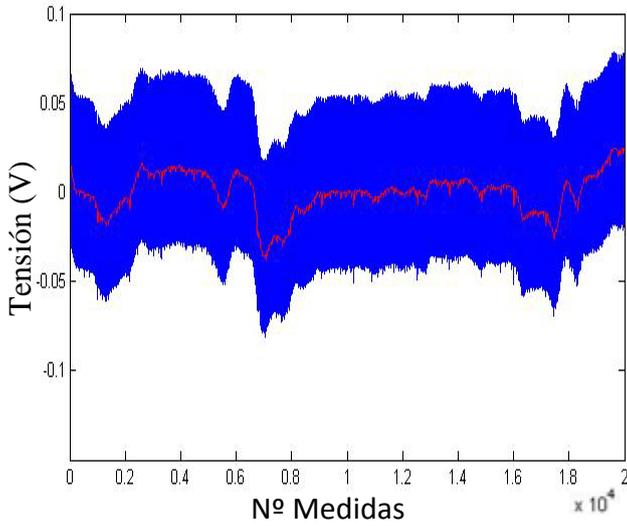
a) Amortiguador magneto-reológico



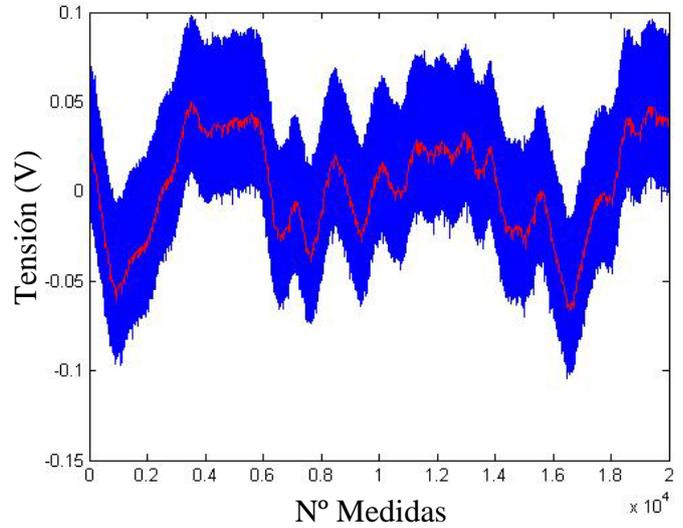
b) Amortiguador convencional

Figura 6.16. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 5 V

• Alimentación del amortiguador: 7,5 V

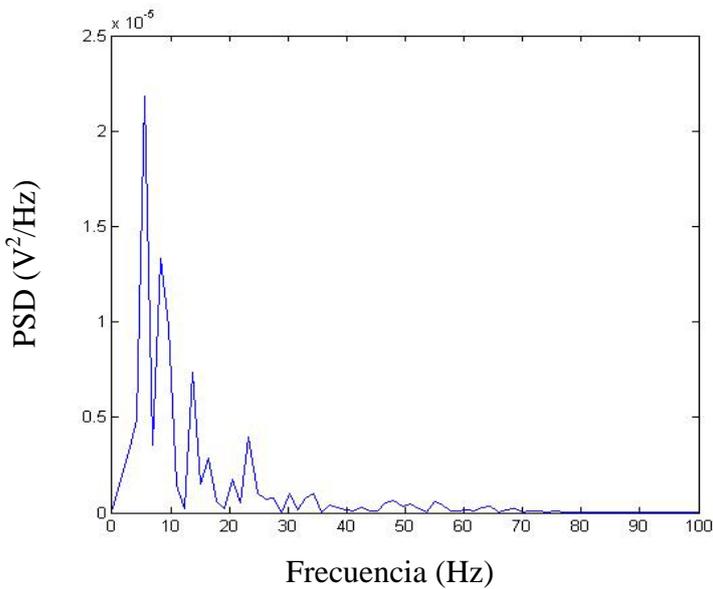


a) Amortiguador magneto-reológico

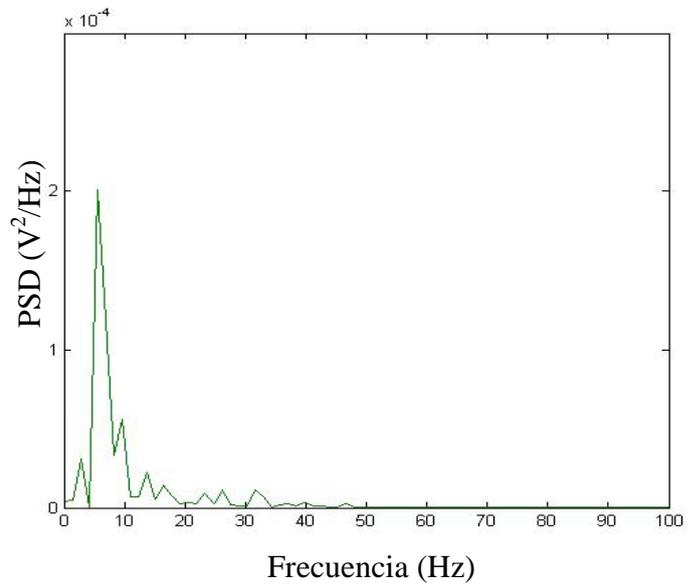


b) Amortiguador convencional

Figura 6.17. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7,5 V



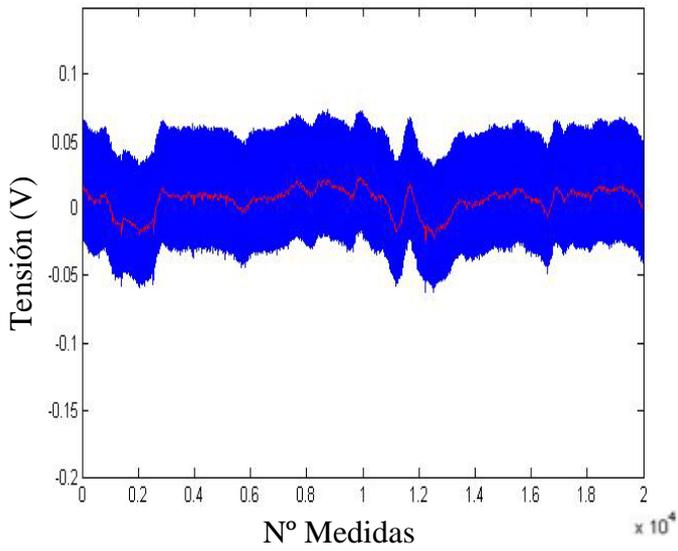
a) Amortiguador magneto-reológico



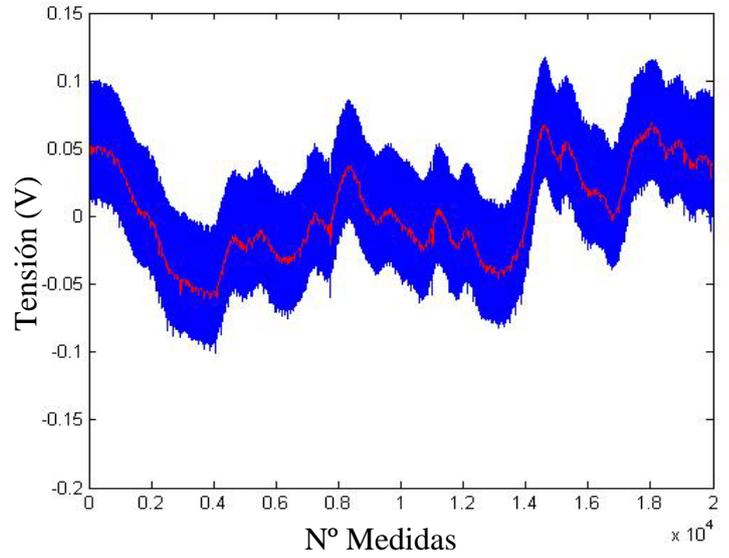
b) Amortiguador convencional

Figura 6.18. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 7,5 V

• Alimentación del amortiguador: 10 V

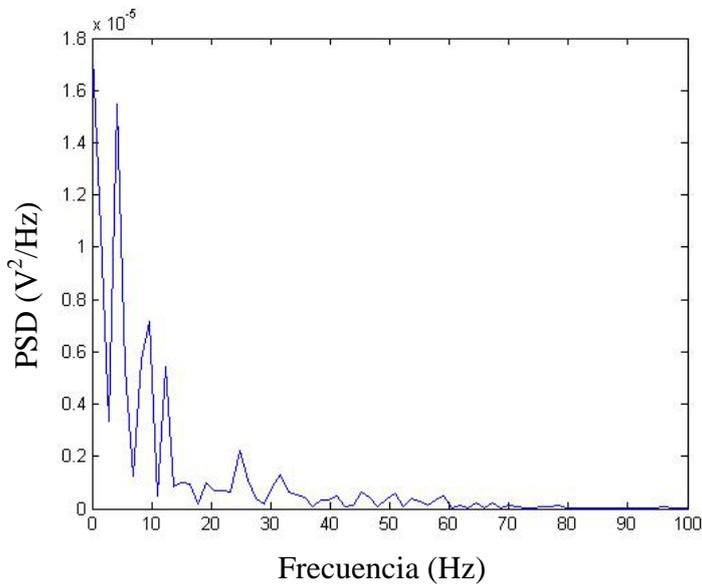


a) Amortiguador magneto-reológico

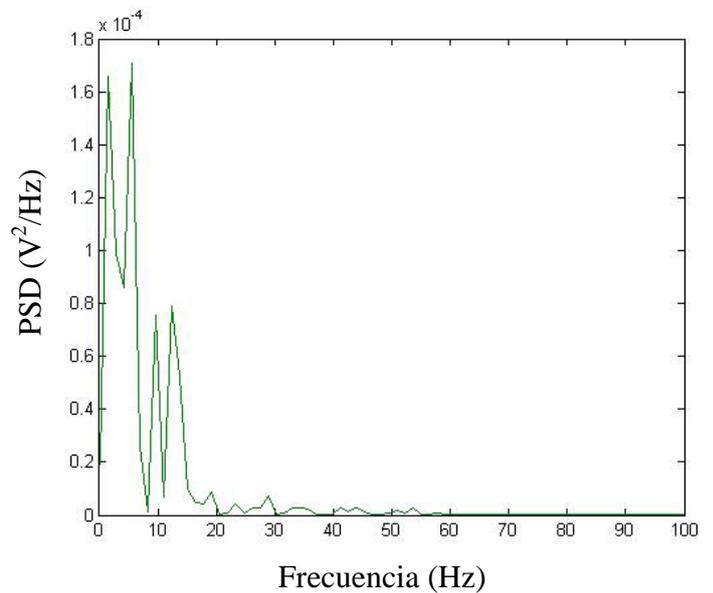


b) Amortiguador convencional

Figura 6.19. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.20. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.1 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.1. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 20 km/h

| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ADOQUINADO 20 km/h | 0.0256 | 0.0171 | 0.0152 | 0.0113 | 0.0114 |

La tabla 6.2 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.2. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 20 km/h

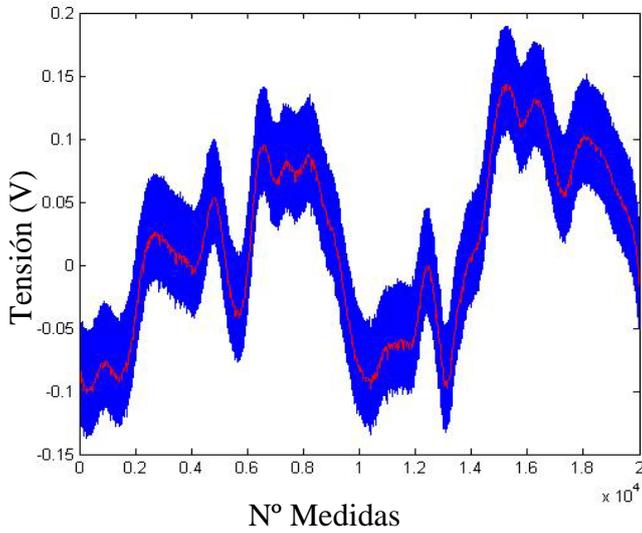
| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ADOQUINADO 20 km/h | 0.0262 | 0.0370 | 0.0222 | 0.0284 | 0.0341 |

6.6.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 30 km/h

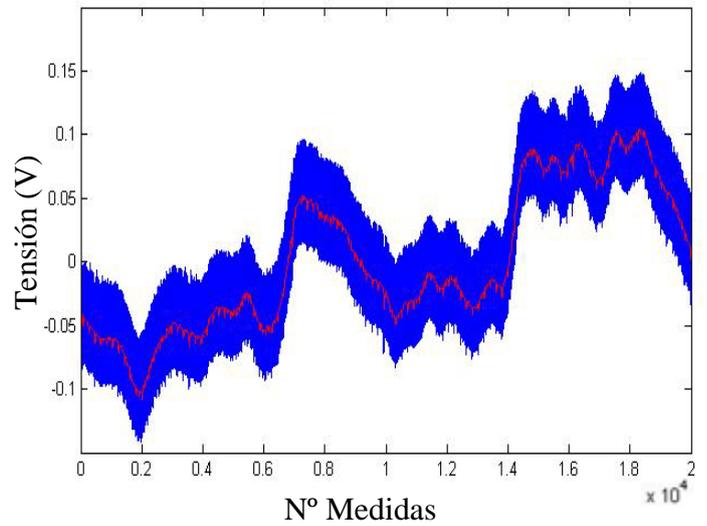
Las figuras 6.21, 6.23, 6.25, 6.27 y 6.29 muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.22, 6.24, 6.26, 6.28 y 6.30 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

• Alimentación del amortiguador: 0 V

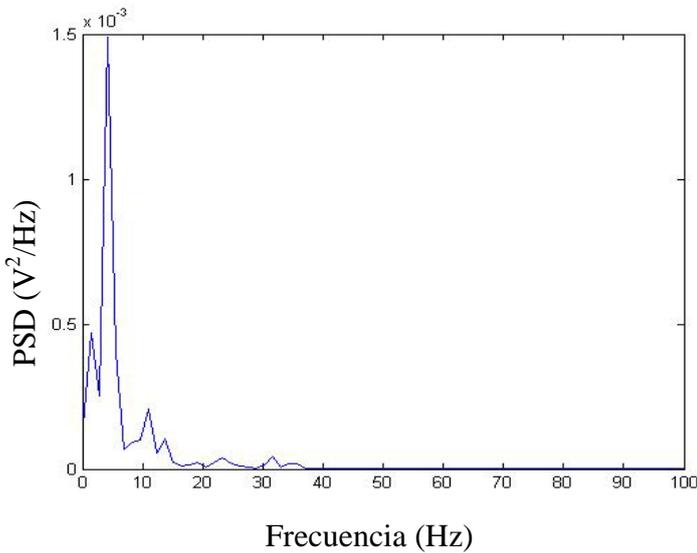


a) Amortiguador magneto-reológico

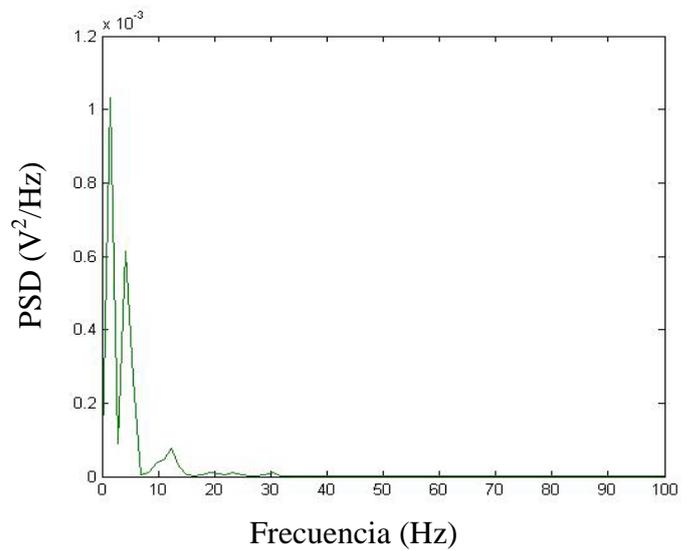


b) Amortiguador convencional

Figura 6.21. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V



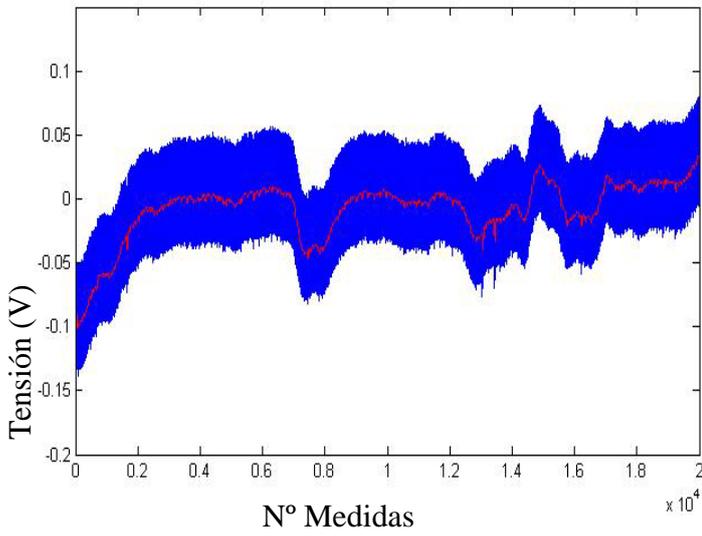
a) Amortiguador magneto-reológico



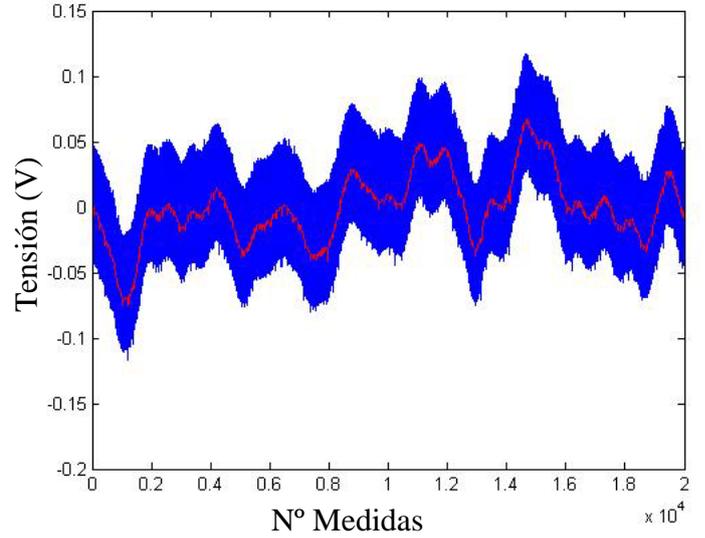
b) Amortiguador convencional

Figura 6.22. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 0 V

• Alimentación del amortiguador: 2,5 V

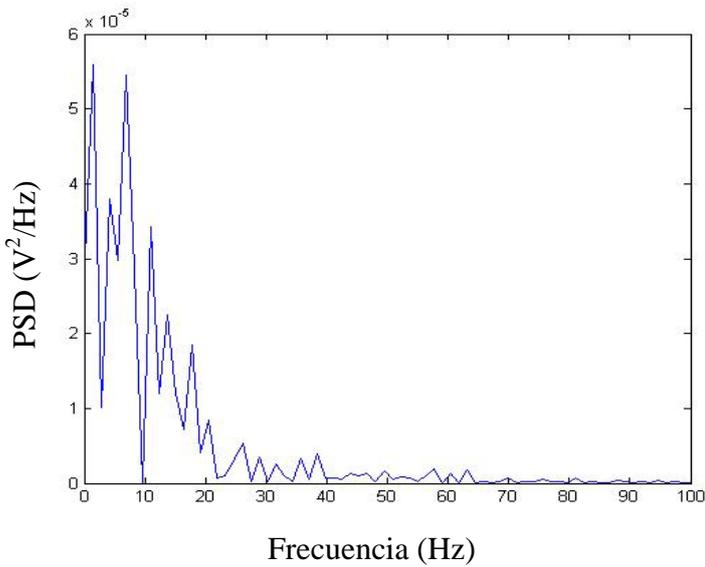


a) Amortiguador magneto-reológico

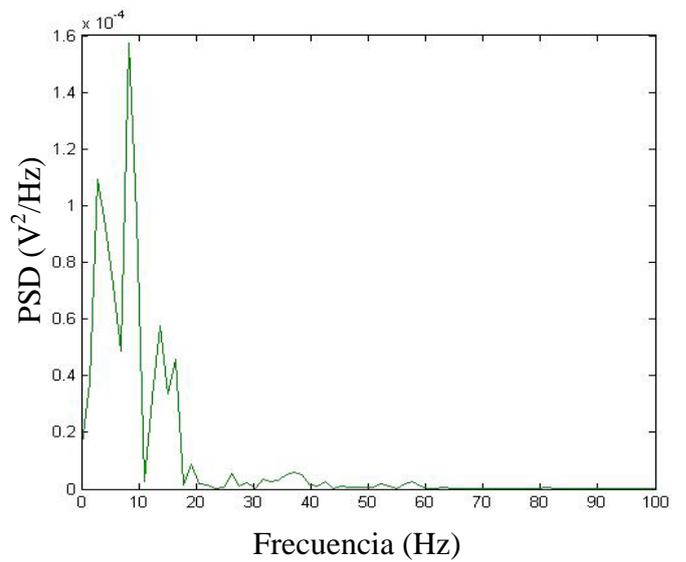


b) Amortiguador convencional

Figura 6.23. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 2,5 V



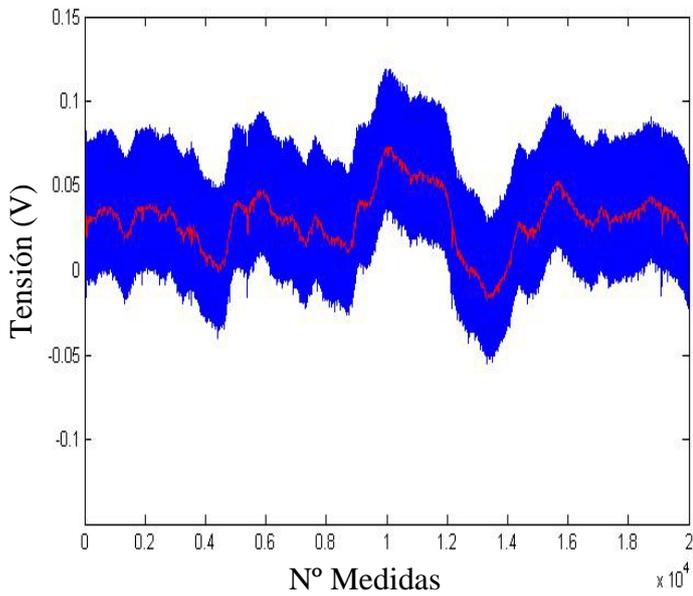
a) Amortiguador magneto-reológico



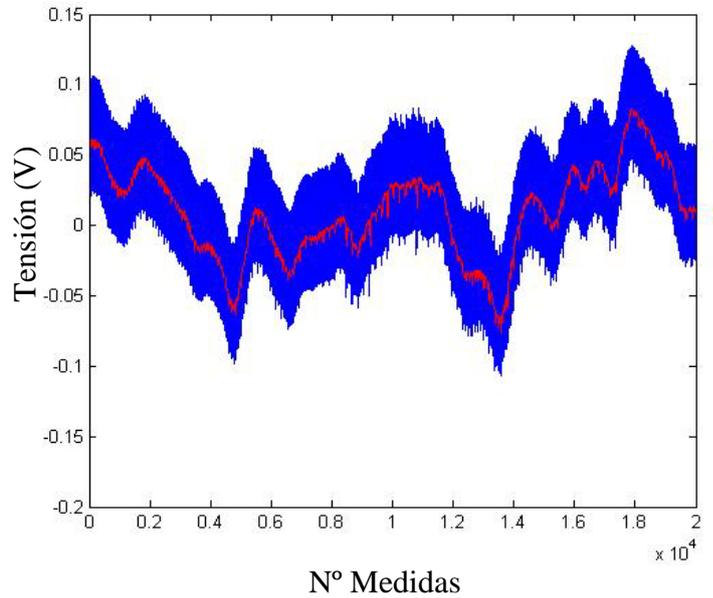
b) Amortiguador convencional

Figura 6.24. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 20 km/h y 10 V

• Alimentación del amortiguador: 5 V

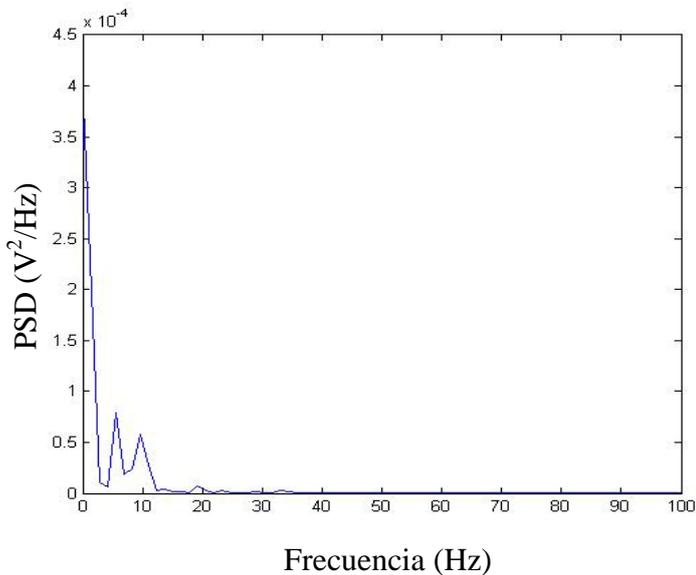


a) Amortiguador magneto-reológico

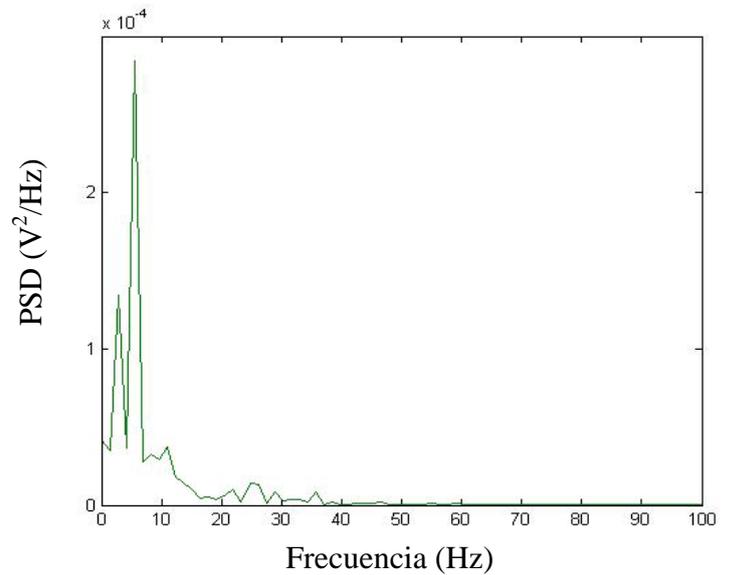


b) Amortiguador convencional

Figura 6.25. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.26. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7,5 V

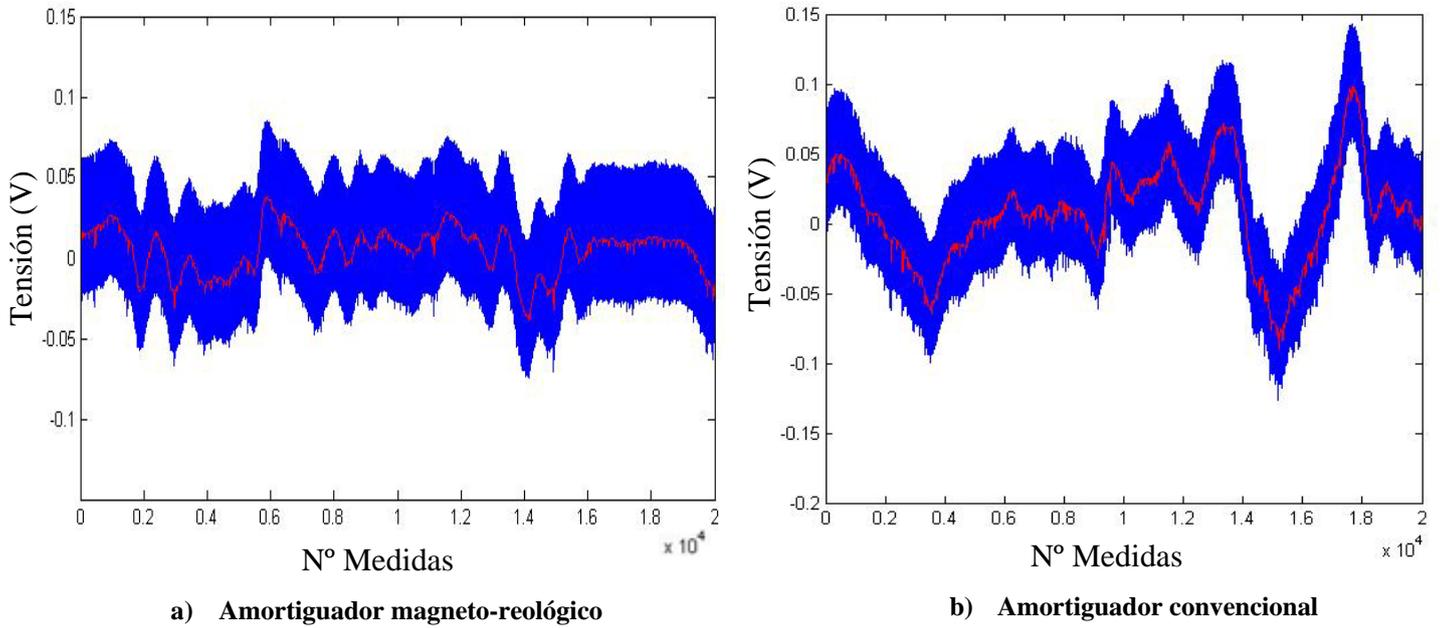


Figura 6.27. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7,5 V

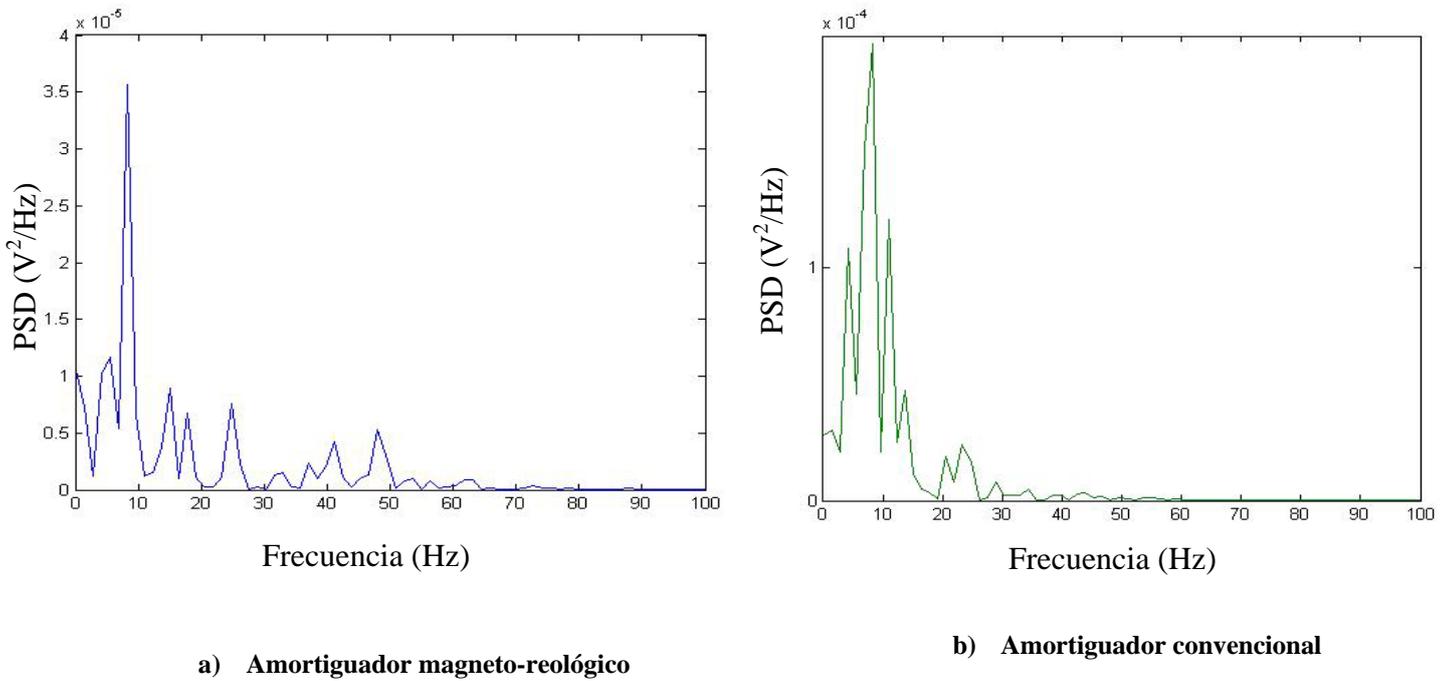
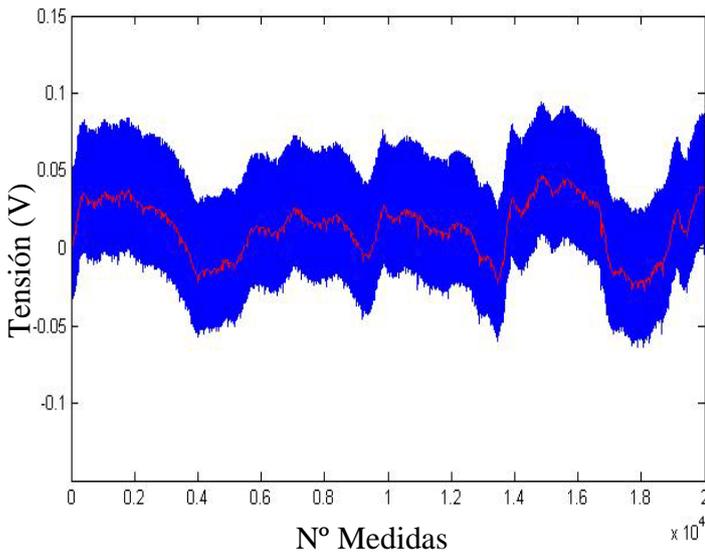
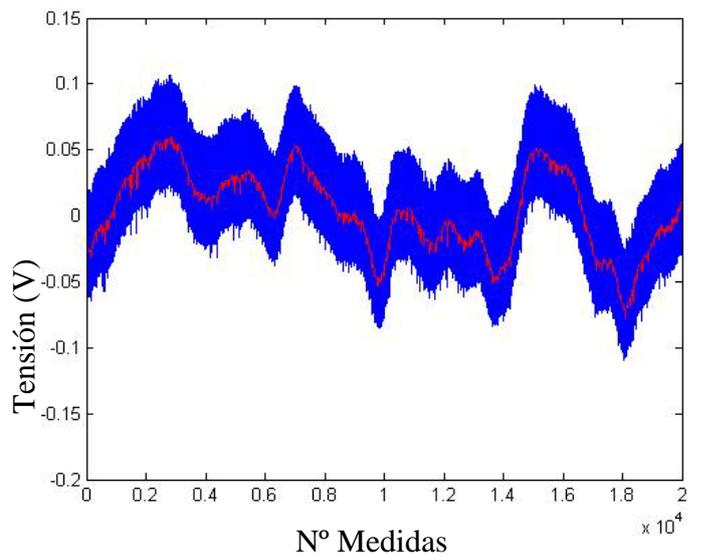


Figura 6.28. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 7,5 V

• Alimentación del amortiguador: 10 V

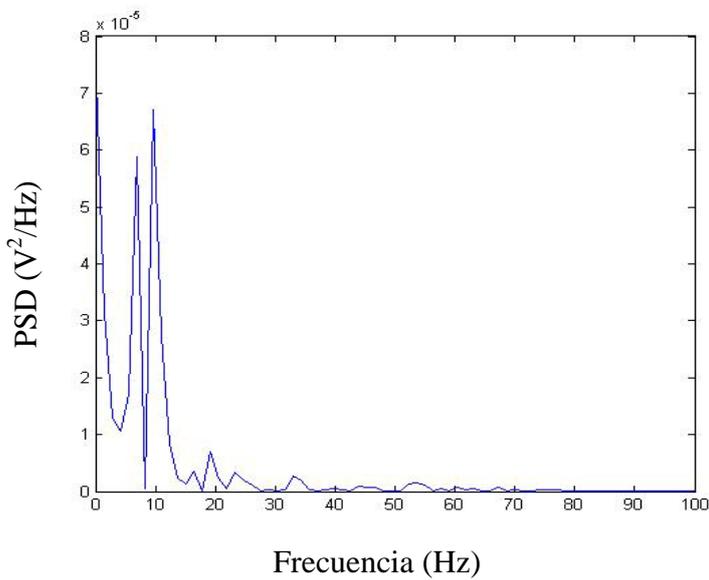


a) Amortiguador magneto-reológico

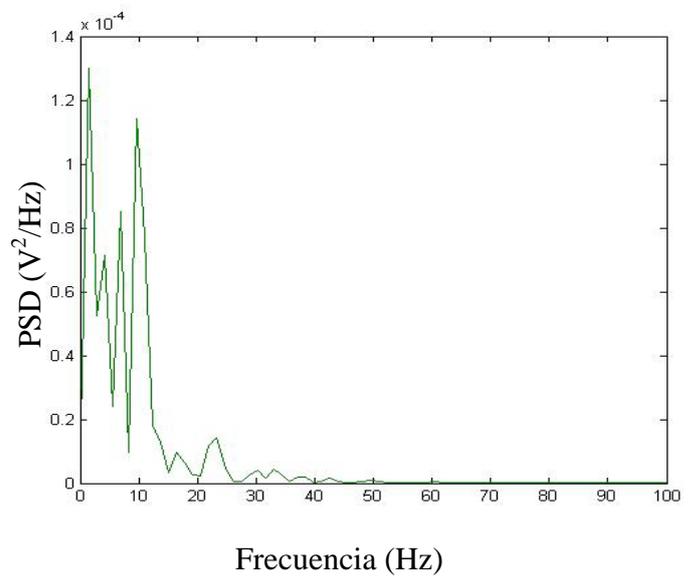


b) Amortiguador convencional

Figura 6.29. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V



b) Amortiguador magneto-reológico



c) Amortiguador convencional

Figura 6.30. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 30 km/h y 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.3 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.3. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 30 km/h

| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ADOQUINADO 30 km/h | 0.0410 | 0.0345 | 0.0240 | 0.0221 | 0.0148 |

La tabla 6.4 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.4. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 30 km/h

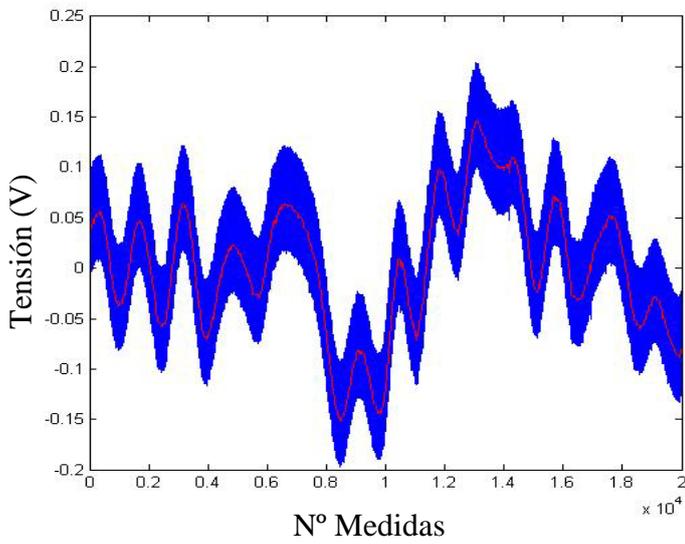
| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ADOQUINADO 30 km/h | 0.0363 | 0.0346 | 0.0333 | 0.0359 | 0.0308 |

6.6.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ADOQUINADO A 40 km/h

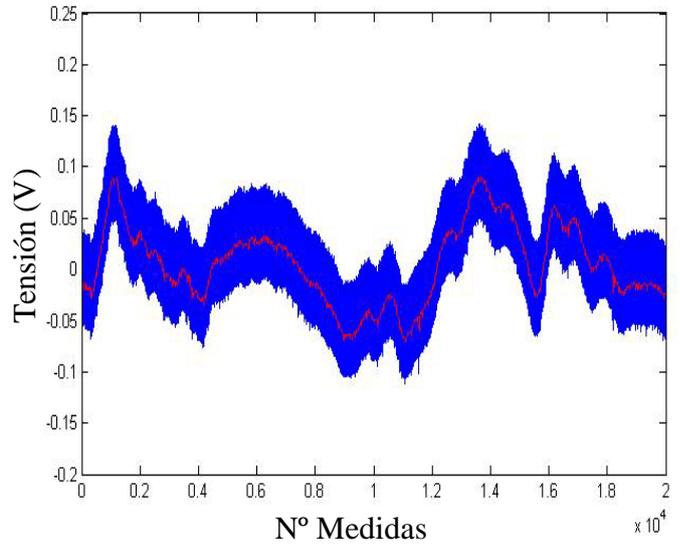
Las figuras 6.31, 6.33, 6.35, 6.37 y 6.39, muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.32, 6.34, 6.36, 6.38 y 6.40, corresponden a los valores PSD obtenidos. El apartado (a) corresponde al amortiguador magneto-reológico (color azul), mientras que el (b) muestra los valores obtenidos para el amortiguador convencional (color verde).

• Alimentación del amortiguador 0 V

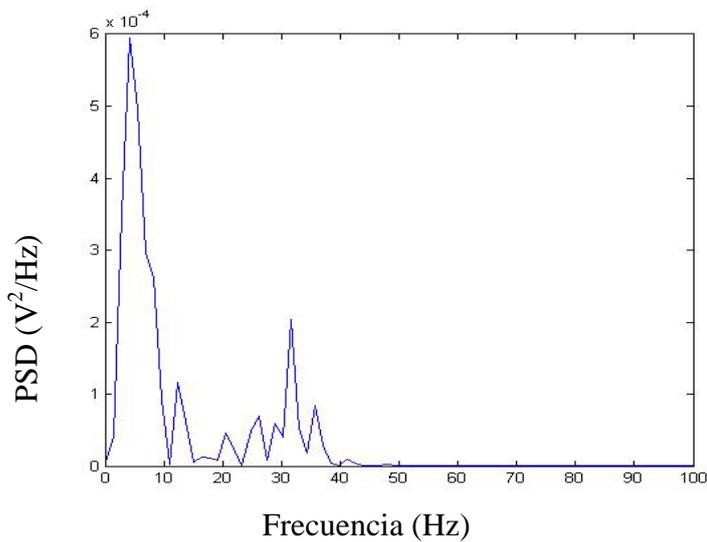


a) Amortiguador magneto-reológico

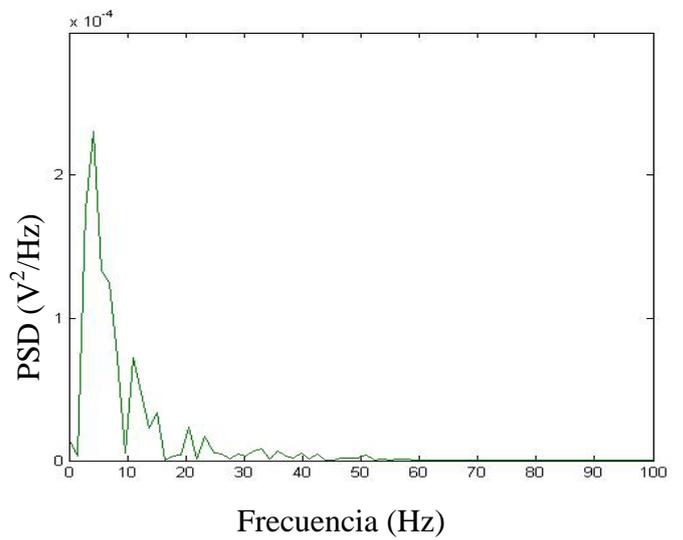


b) Amortiguador convencional

Figura 6.31. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0V



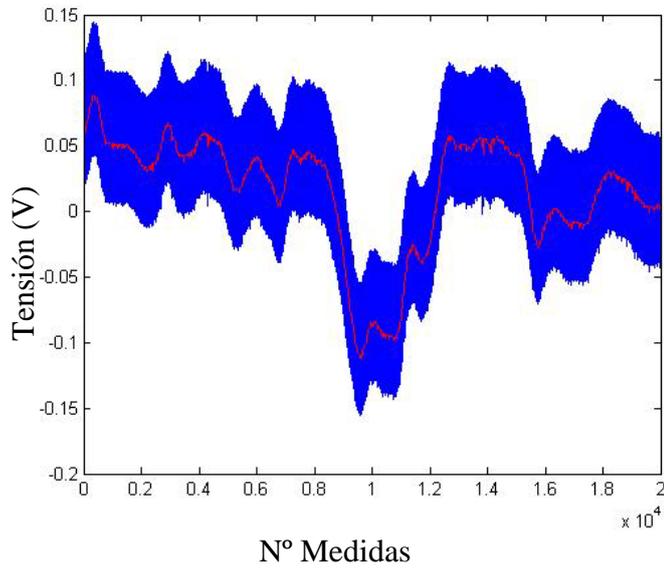
a) Amortiguador magneto-reológico



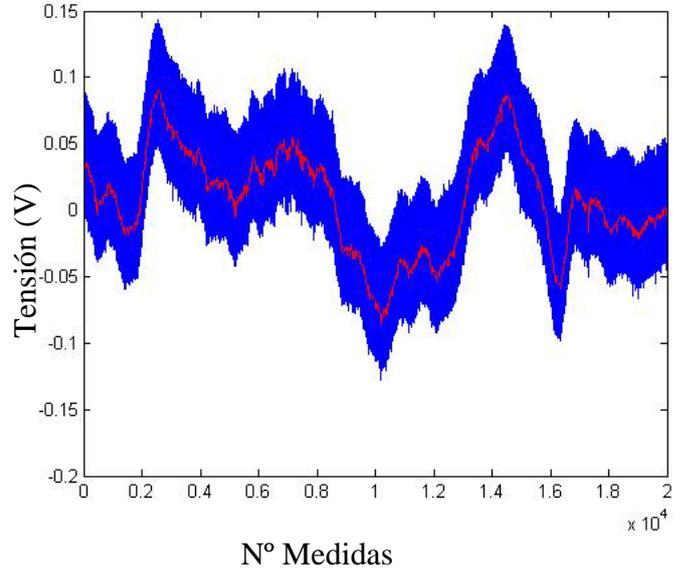
b) Amortiguador convencional

Figura 6.32. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 0 V

• Alimentación del amortiguador: 2,5 V

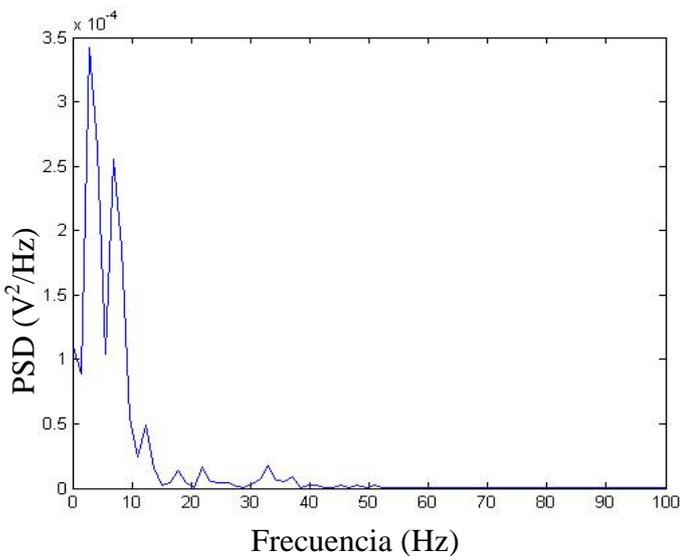


a) Amortiguador magneto-reológico

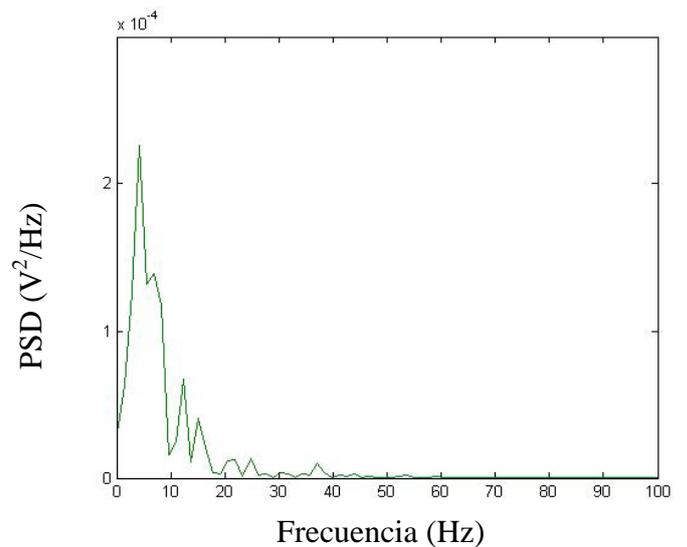


b) Amortiguador convencional

Figura 6.33. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2,5 V



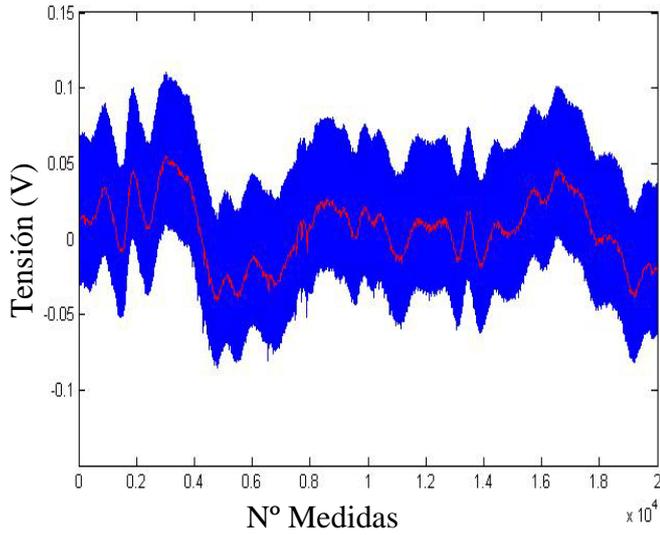
a) Amortiguador magneto-reológico



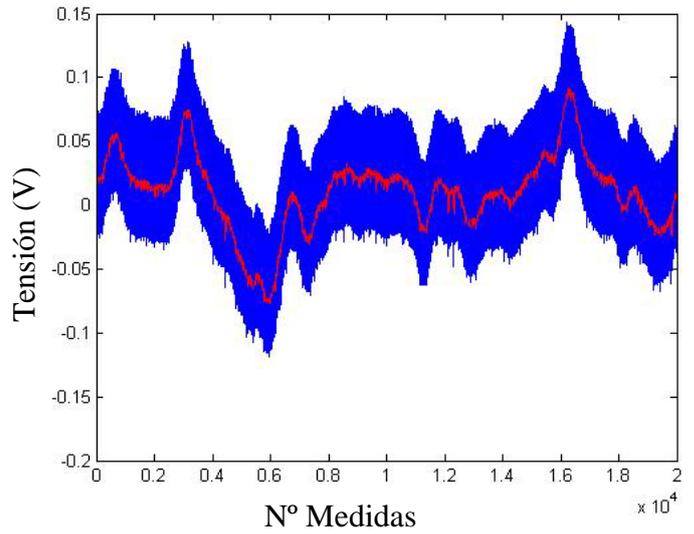
b) Amortiguador convencional

Figura 6.34. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 2,5 V

• Alimentación del amortiguador: 5 V

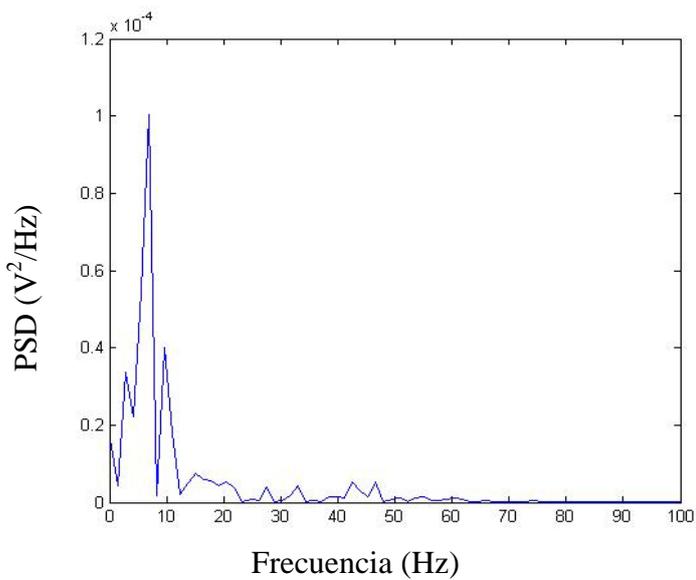


a) Amortiguador magneto-reológico

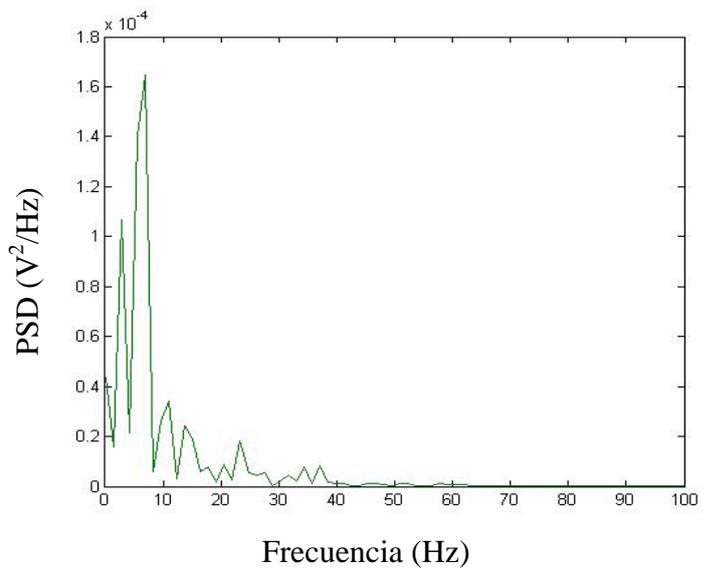


b) Amortiguador convencional

Figura 6.35. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V



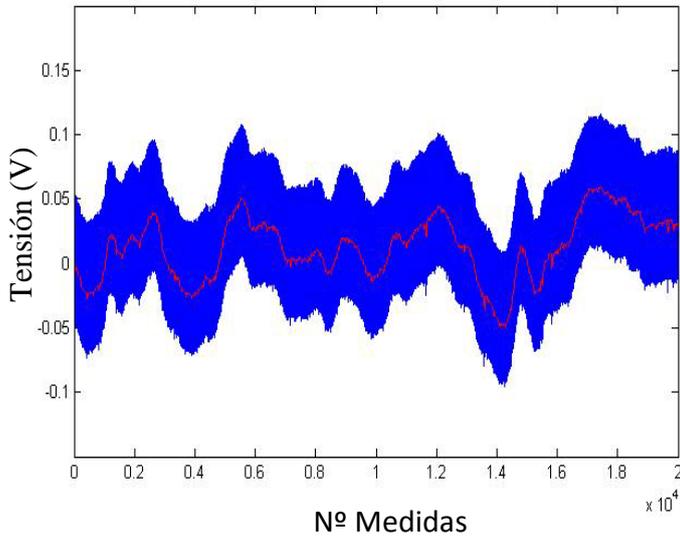
a) Amortiguador magneto-reológico



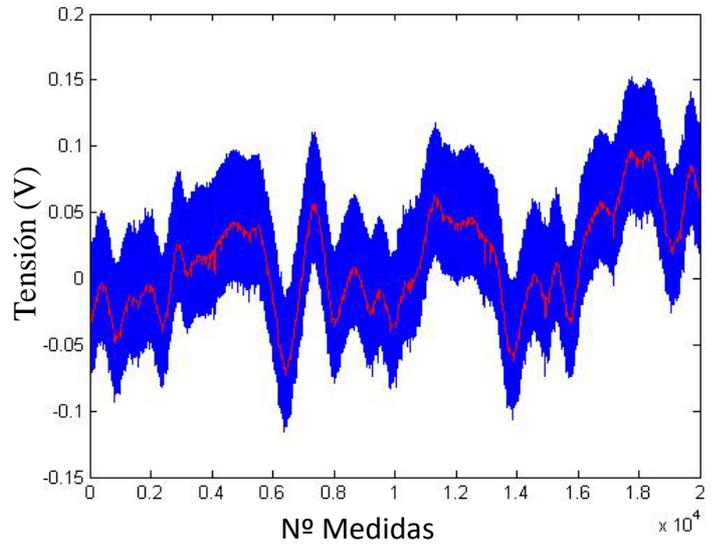
b) Amortiguador convencional

Figura 6.36. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 5 V

• Alimentación del amortiguador: 7,5 V

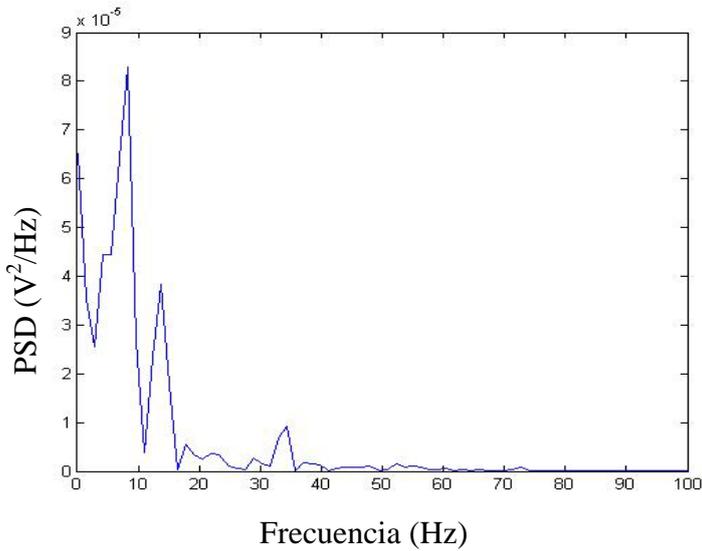


a) Amortiguador magneto-reológico

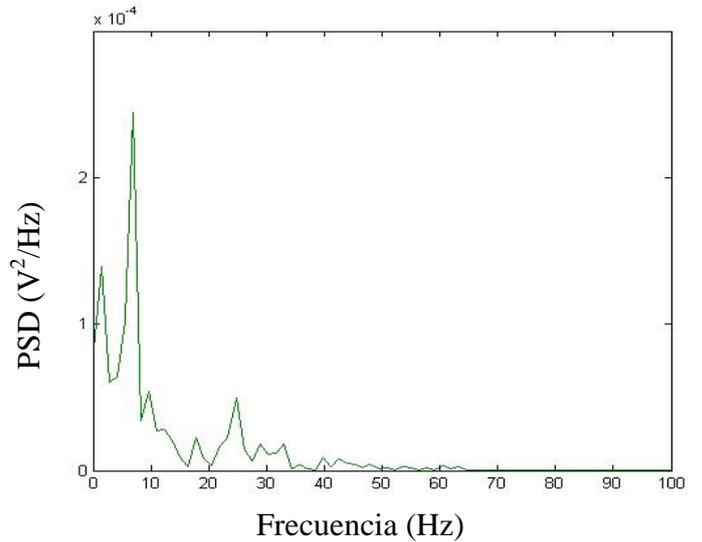


b) Amortiguador convencional

Figura 6.37. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7,5 V



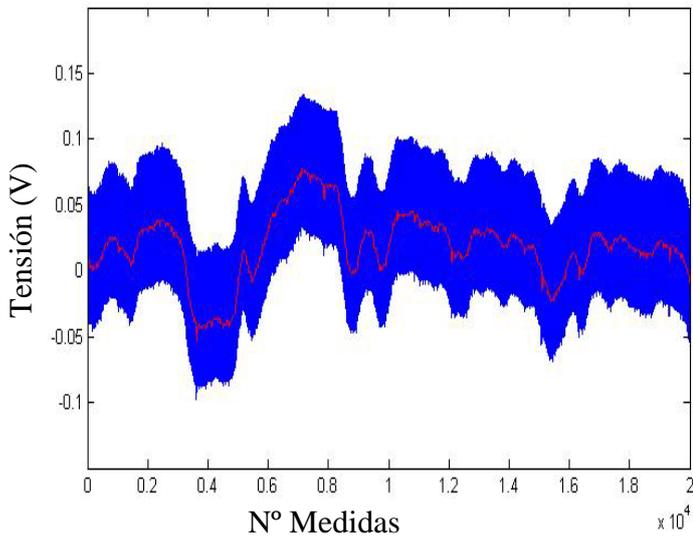
a) Amortiguador magneto-reológico



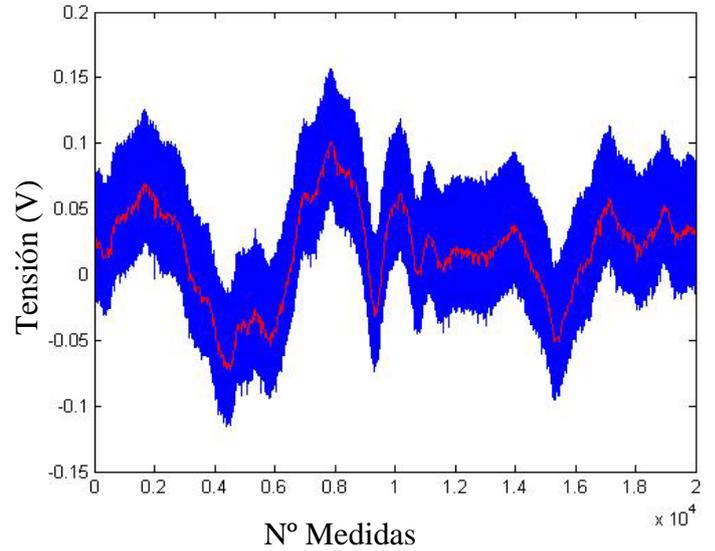
b) Amortiguador convencional

Figura 6.38. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 7,5 V

• Alimentación del amortiguador: 10 V

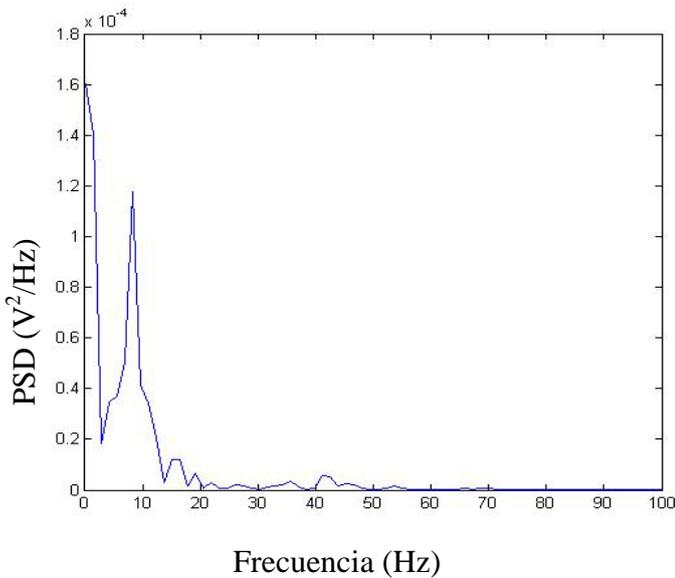


b) Amortiguador magneto-reológico

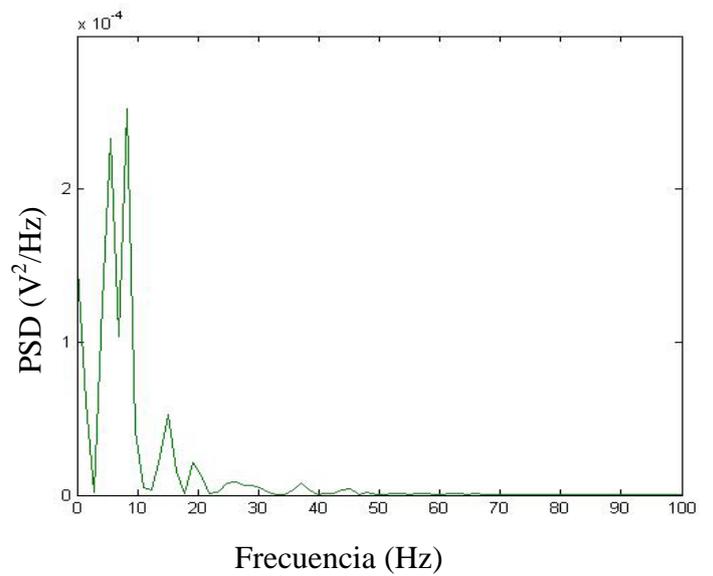


c) Amortiguador convencional

Figura 6.39. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V



b) Amortiguador magneto-reológico



c) Amortiguador convencional

Figura 6.40. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre adoquinado a 40 km/h y 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.5 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.5. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para adoquinado a 40 km/h

| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ADOQUINADO 40 km/h | 0.0650 | 0.0472 | 0.0318 | 0.0272 | 0.0227 |

La tabla 6.6 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.6. Datos RMS amortiguador convencional para adoquinado a 40 km/h

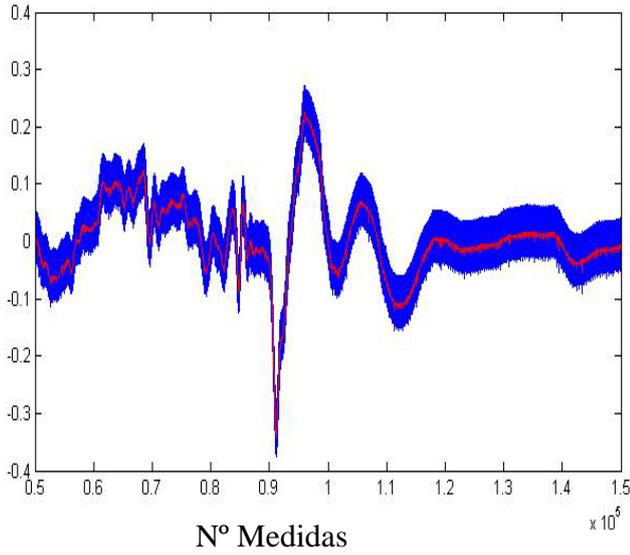
| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ADOQUINADO 40 km/h | 0.0382 | 0.0391 | 0.0313 | 0.0395 | 0.0406 |

6.6.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE ESCALÓN

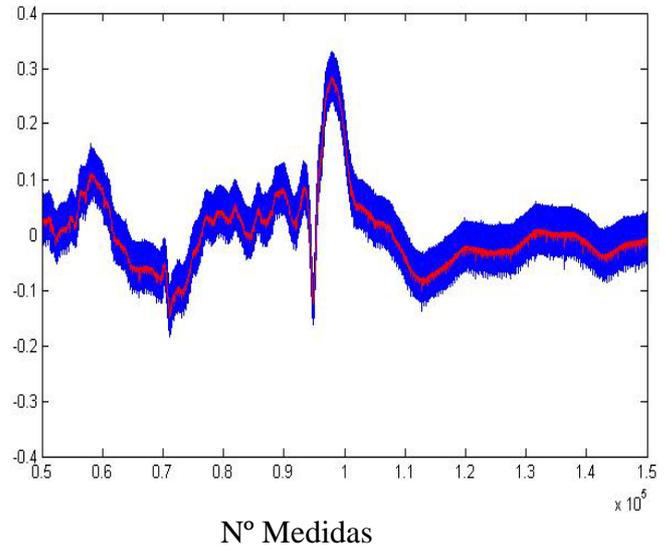
Las figuras 6.41, 6.43, 6.45, 6.47 y 6.49 muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.42, 6.44, 6.46, 6.48 y 6.50 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

• Alimentación del amortiguador: 0 V

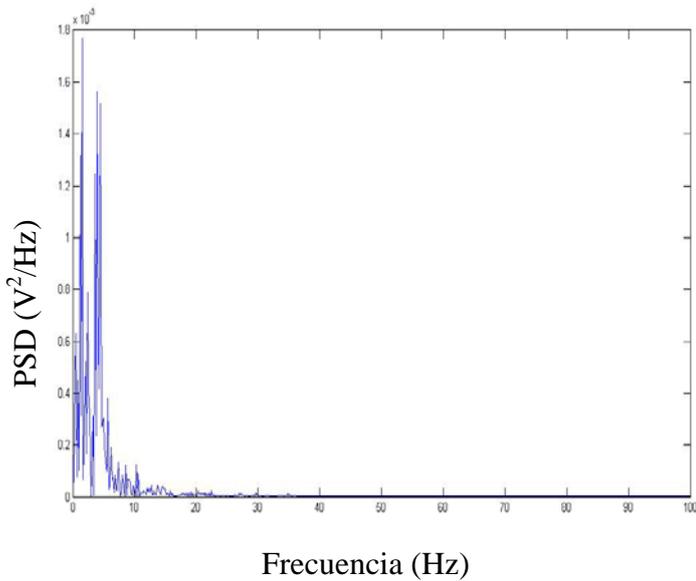


a) Amortiguador magneto-reológico

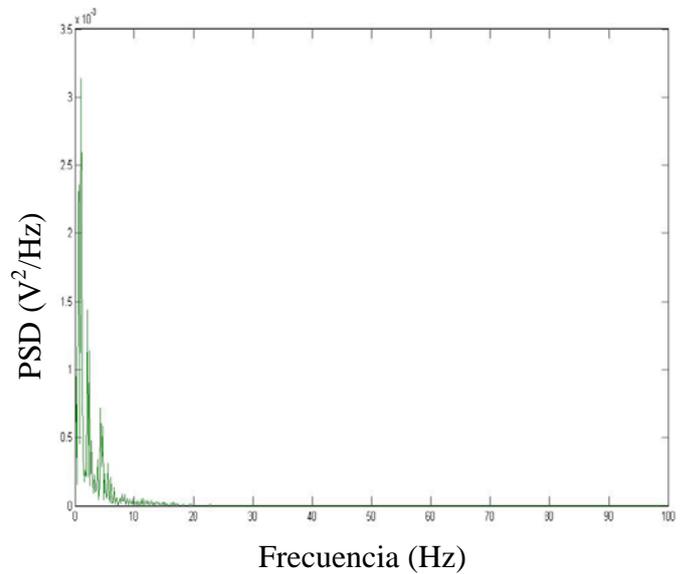


b) Amortiguador convencional

Figura 6.41. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre escalón a 0V



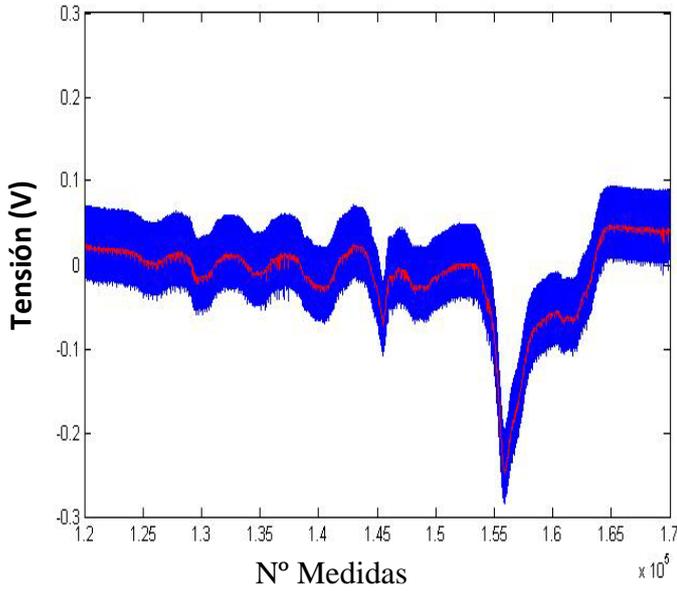
a) Amortiguador magneto-reológico



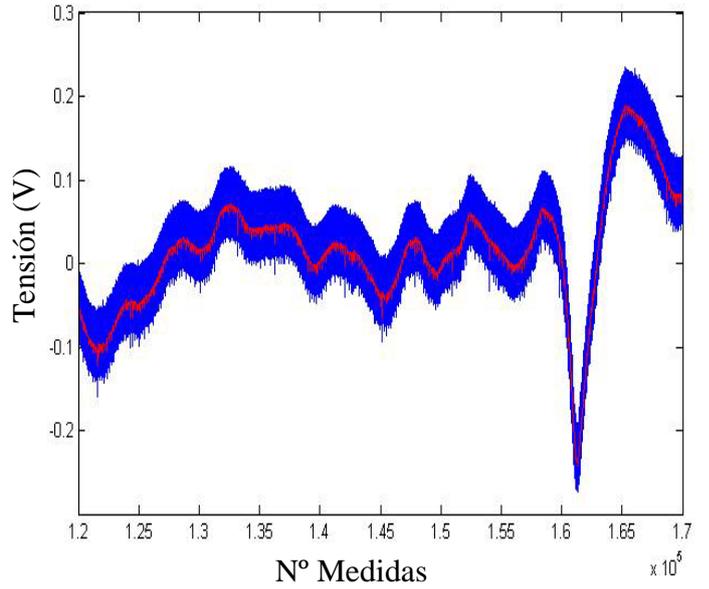
b) Amortiguador convencional

Figura 6.42. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 0 V

- Alimentación del amortiguador: 2,5 V

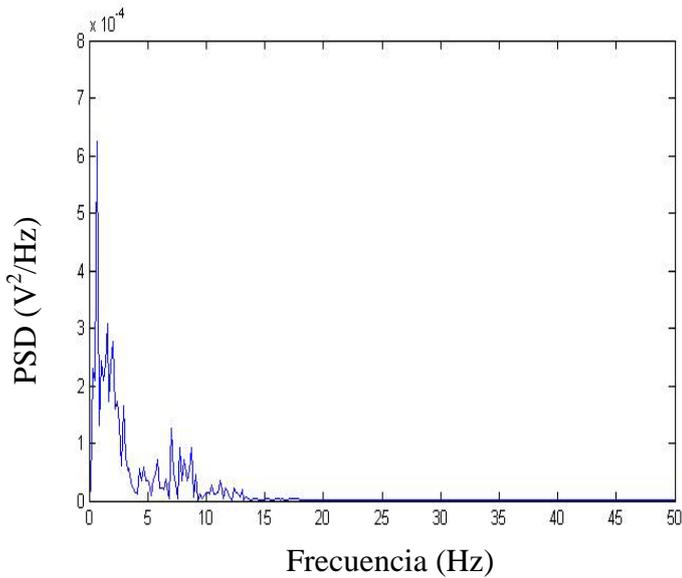


a) Amortiguador magneto-reológico

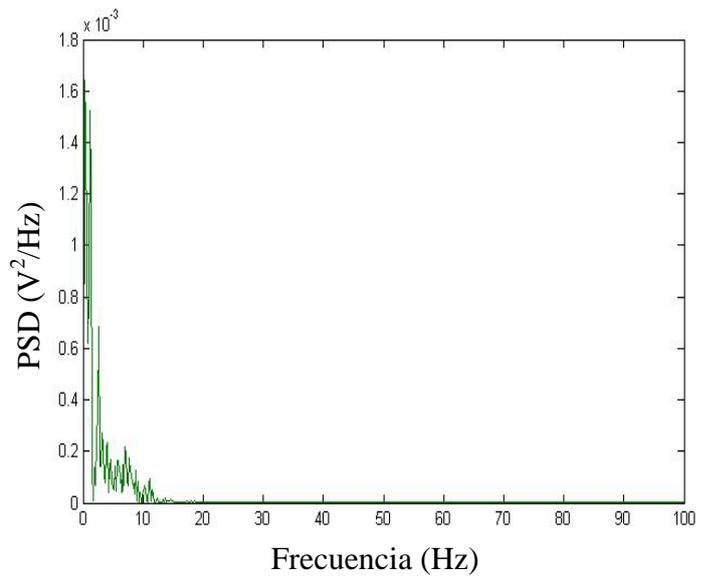


b) Amortiguador convencional

Figura 6.43. Tensión frente al número, medidas de ensayo sobre escalón a 2,5 V



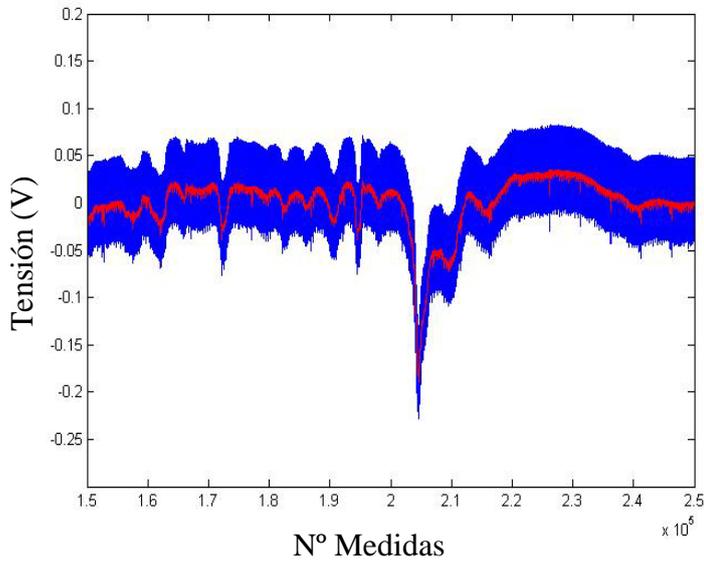
a) Amortiguador magneto-reológico



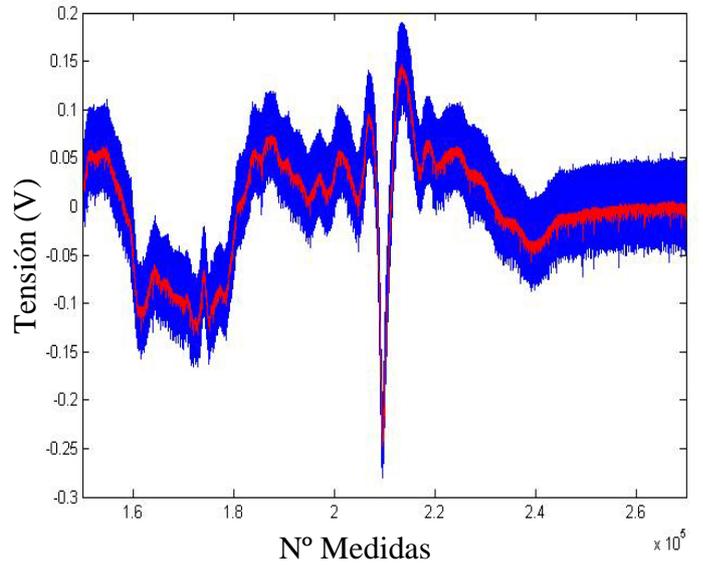
b) Amortiguador convencional

Figura 6.44. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 2,5 V

• Alimentación del amortiguador: 5 V

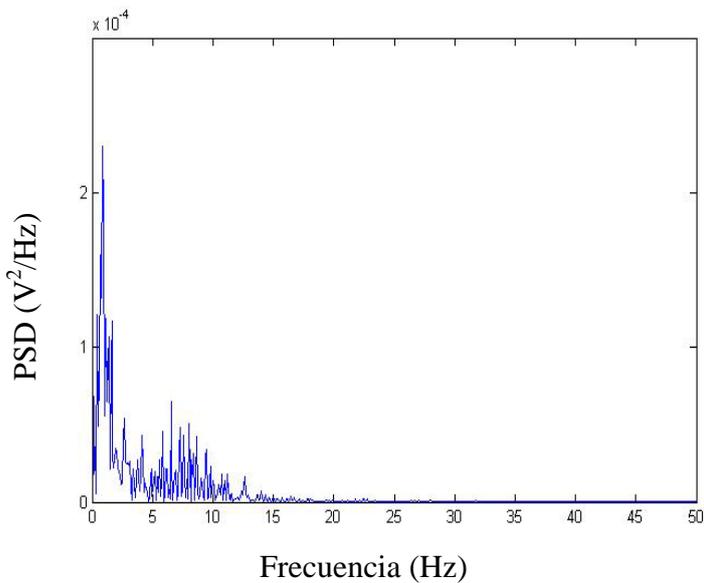


a) Amortiguador magneto-reológico

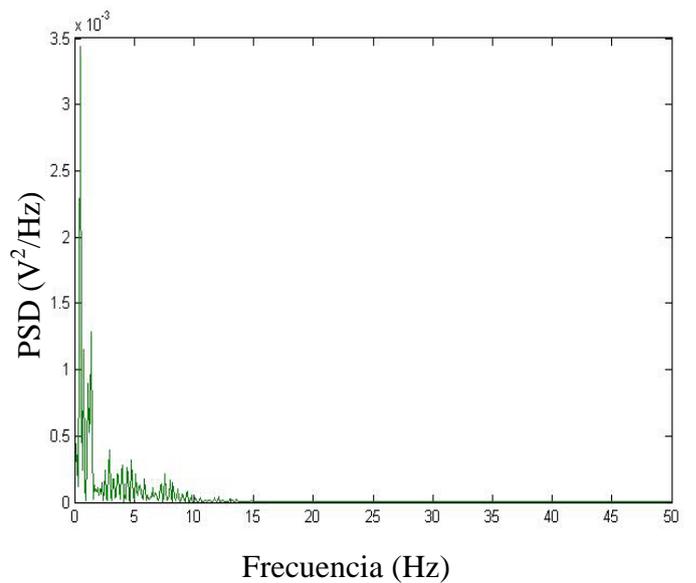


b) Amortiguador convencional

Figura 6.45. Tensión frente al número, medidas de ensayo sobre escalón a 5 V



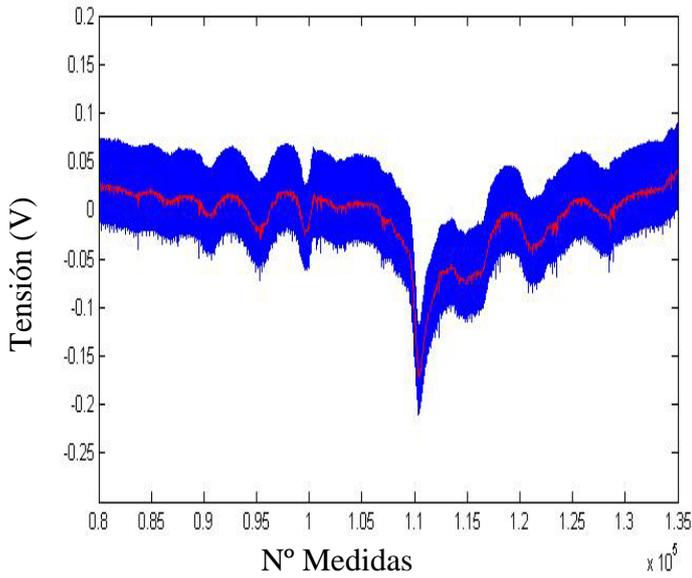
a) Amortiguador magneto-reológico



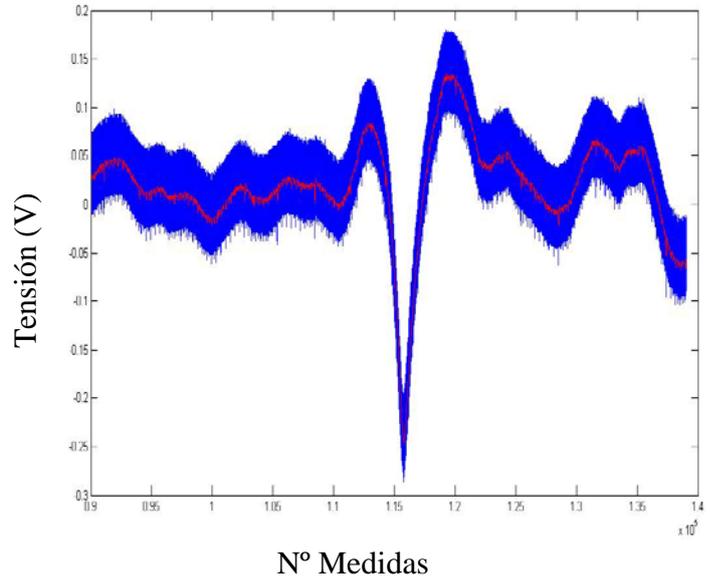
b) Amortiguador convencional

Figura 6.46. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 5 V

- Alimentación del amortiguador: 7,5 V

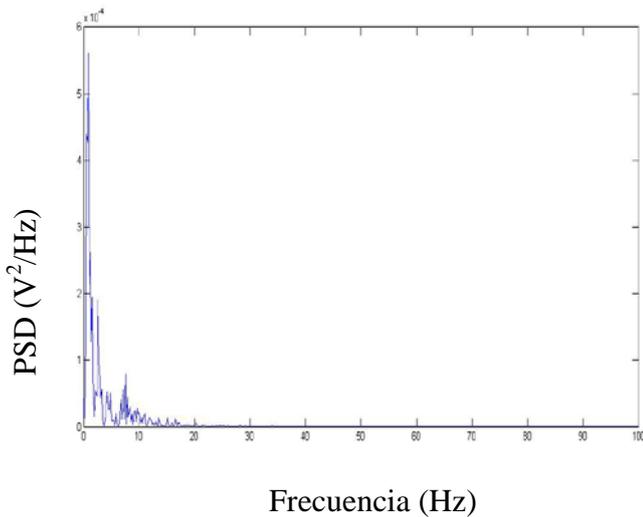


a) Amortiguador magneto-reológico

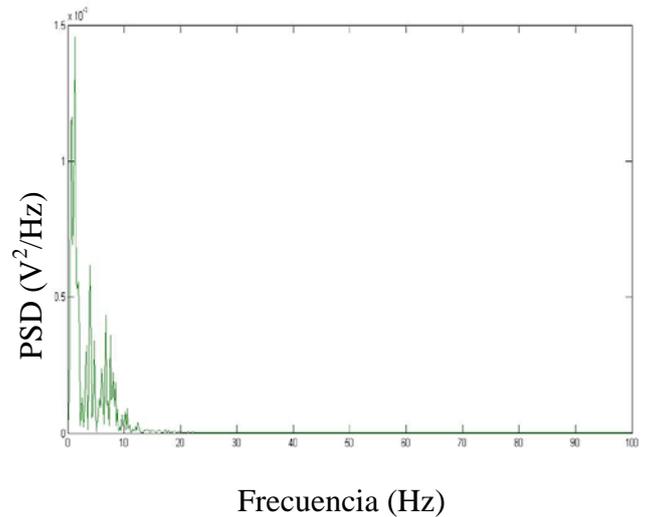


b) Amortiguador convencional

Figura 6.47. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre escalón a 7,5 V



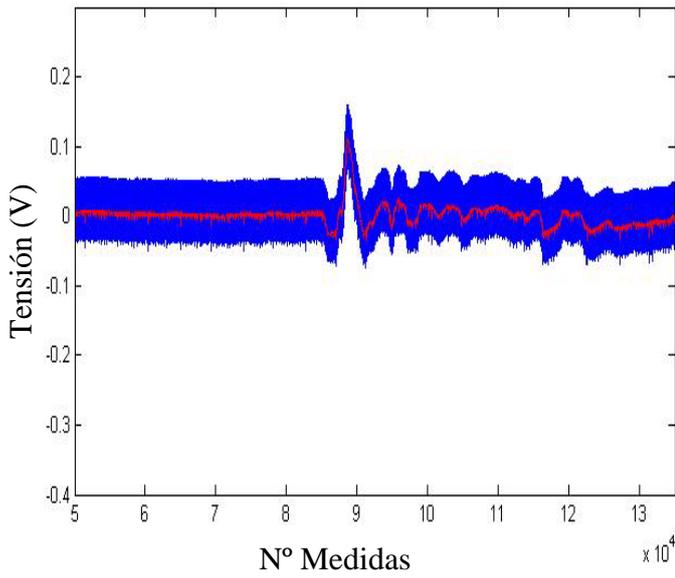
a) Amortiguador magneto-reológico



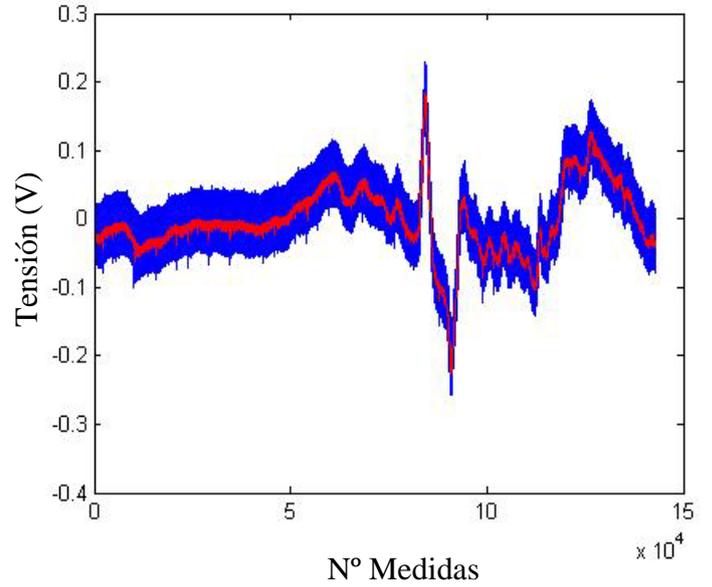
b) Amortiguador convencional

Figura 6.48. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 7,5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

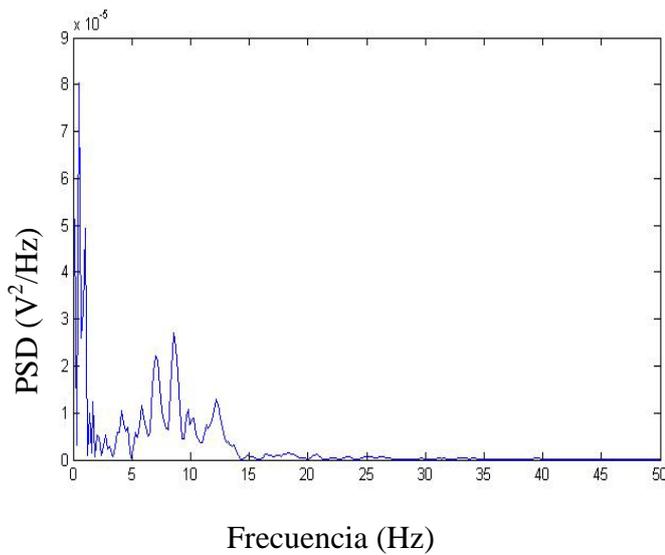


a) Amortiguador magneto-reológico

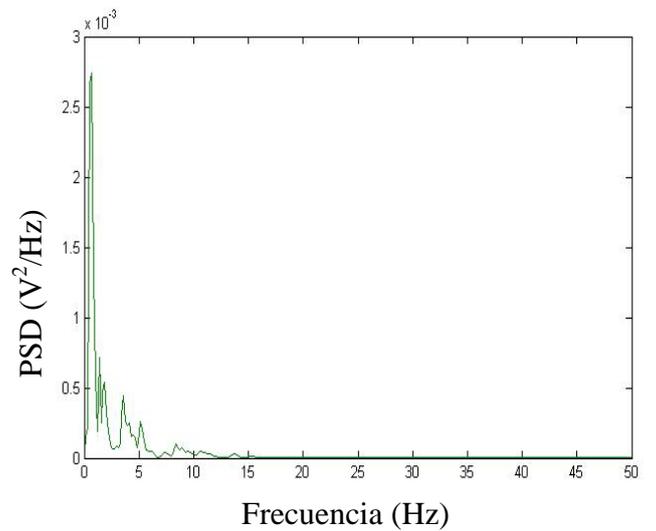


b) Amortiguador convencional

Figura 6.49. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre escalón a 10V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.50. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre escalón a 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.7 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.7. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para escalón

| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ESCALÓN | 0.0560 | 0.0311 | 0.0183 | 0.0273 | 0.0126 |

La tabla 6.8 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.8. Datos RMS amortiguador convencional para escalón

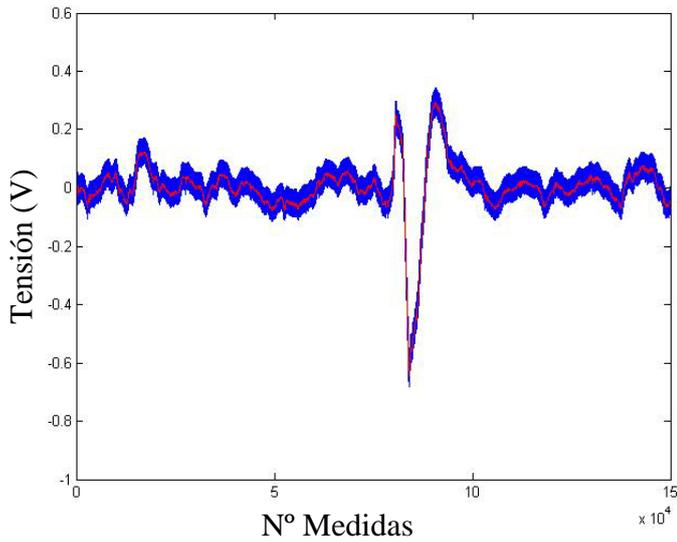
| RMS (V) | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ESCALÓN | 0.0590 | 0.0516 | 0.0426 | 0.0523 | 0.0513 |

6.6.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES SOBRE BADÉN

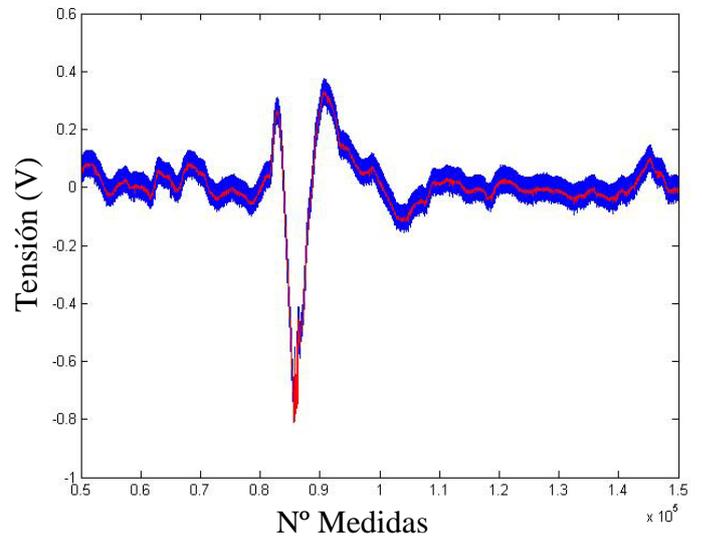
Las figuras 6.51, 6.53, 6.55, 6.57 y 6.59 muestran las lecturas, en voltios, proporcionadas por los sensores de desplazamiento (señal original - color azul, señal filtrada – color rojo) colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

Por otra parte, los resultados que se muestran en las figuras 6.52, 6.54, 6.56, 6.58 y 6.60 corresponden a la respuesta en frecuencia (valores PSD) de las lecturas proporcionadas por los sensores de desplazamiento colocados en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico (a) y con amortiguador convencional (b).

• Alimentación del amortiguador: 0 V

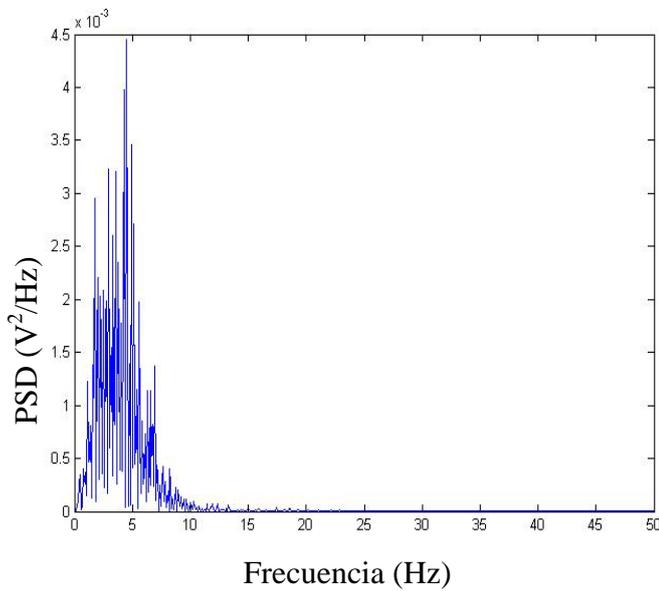


a) Amortiguador magneto-reológico

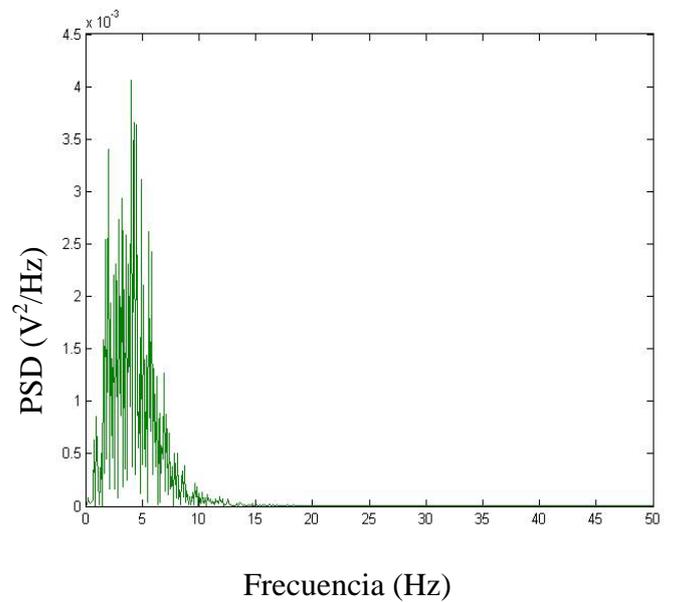


b) Amortiguador convencional

Figura 6.51. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 0V



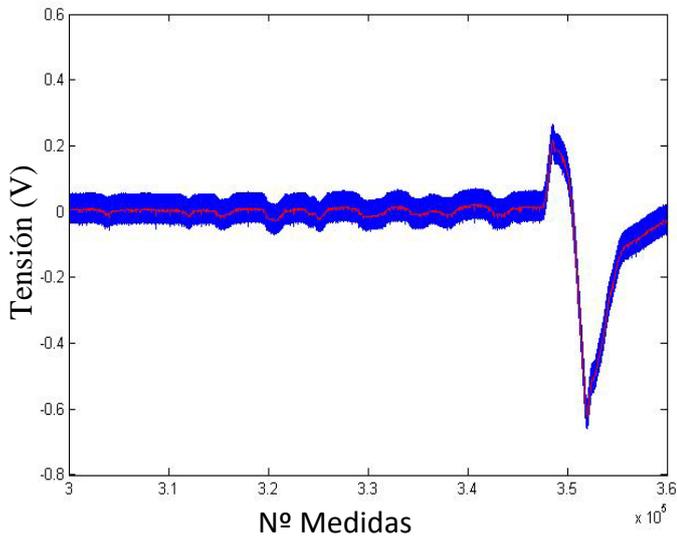
a) Amortiguador magneto-reológico



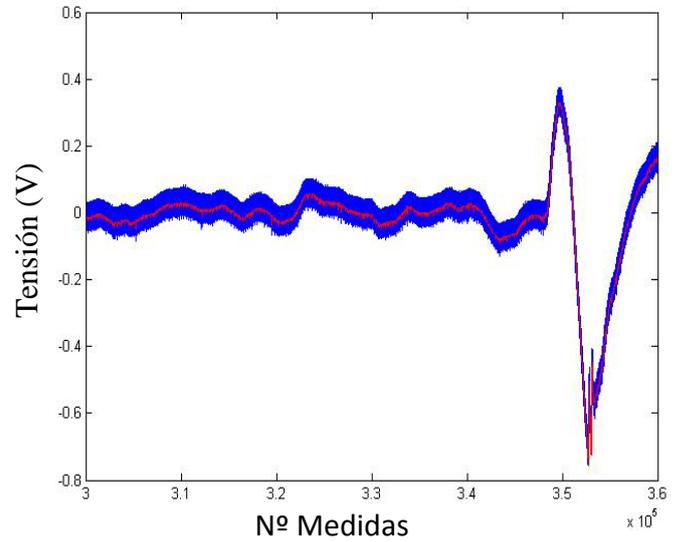
b) Amortiguador convencional

Figura 6.52. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 0 V

• Alimentación del amortiguador: 2.5 V

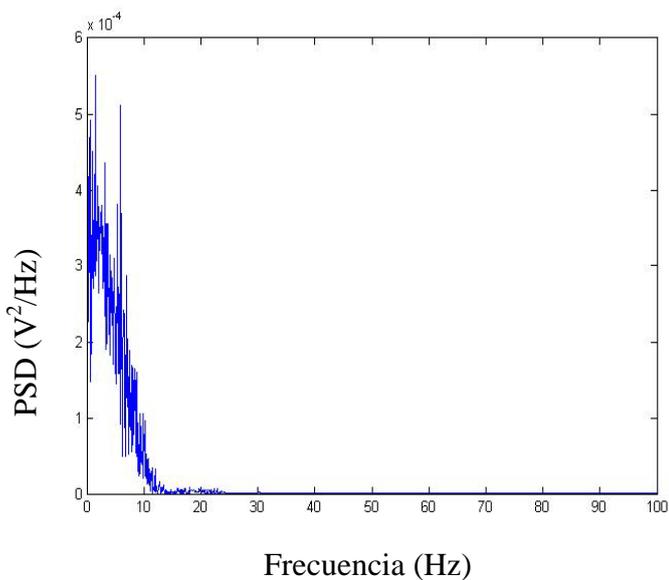


a) Amortiguador magneto-reológico

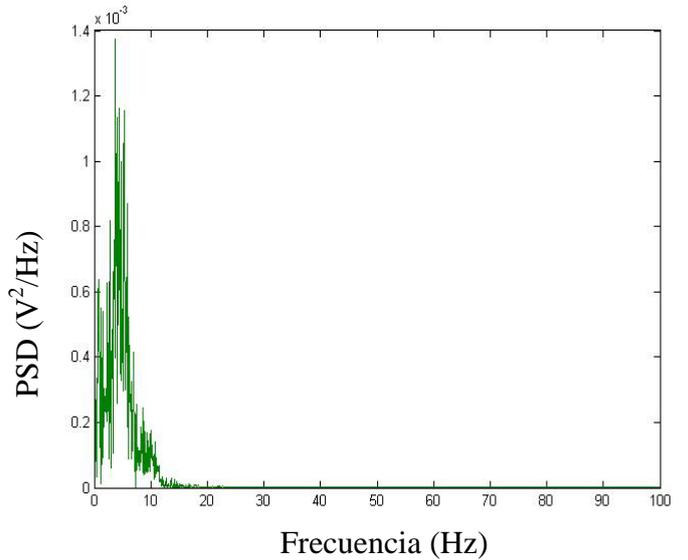


b) Amortiguador convencional

Figura 6.53. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 2,5 V



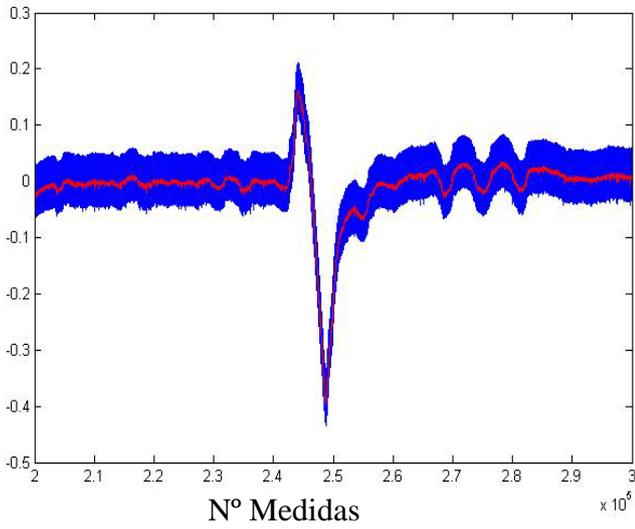
a) Amortiguador magneto-reológico



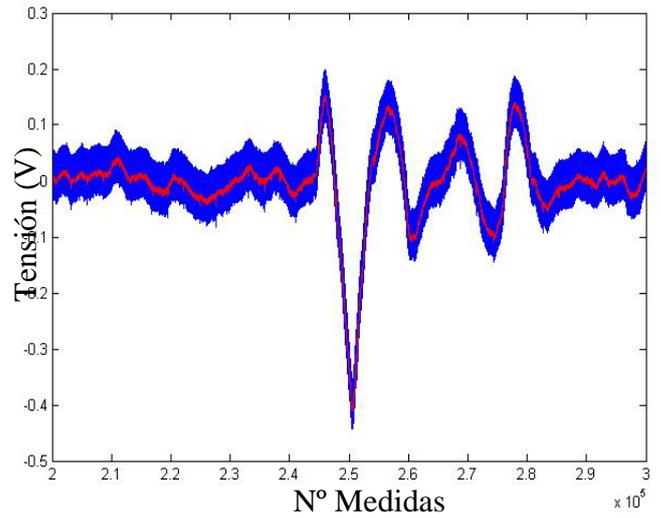
b) Amortiguador convencional

Figura 6.54. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 2,5 V

• Alimentación del amortiguador: 5 V

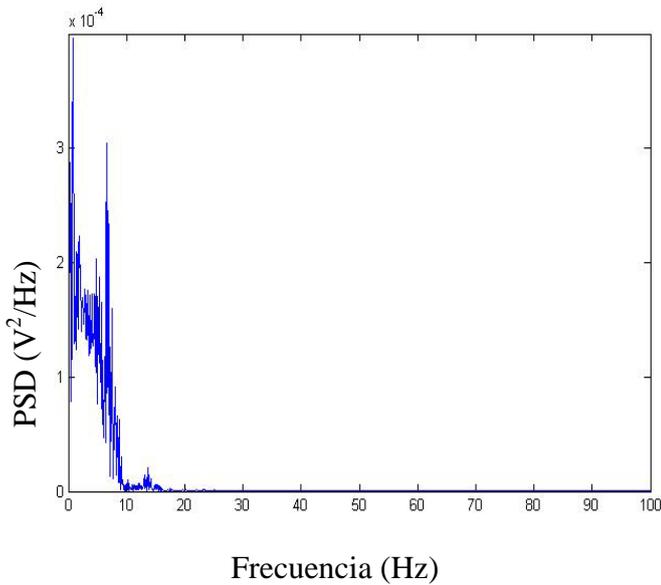


a) Amortiguador magneto-reológico

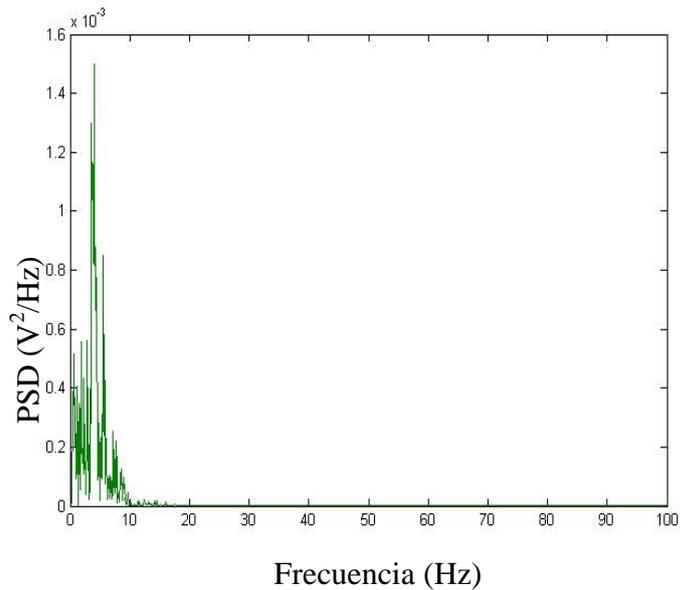


b) Amortiguador convencional

Figura 6.55. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 5 V



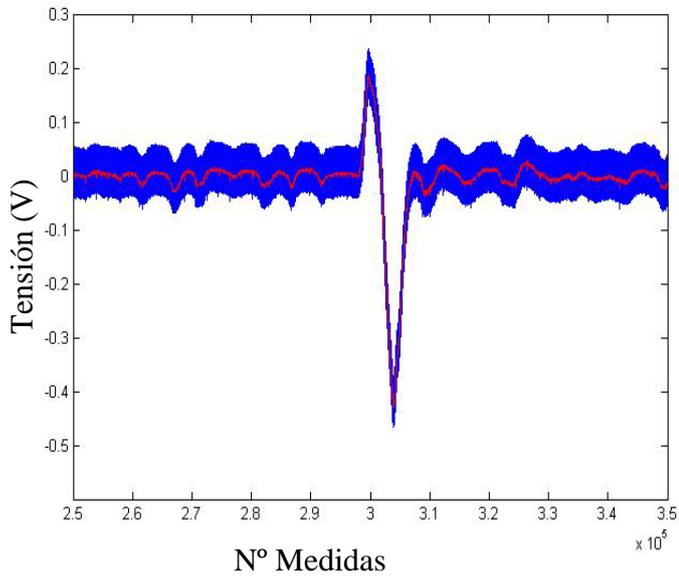
a) Amortiguador magneto-reológico



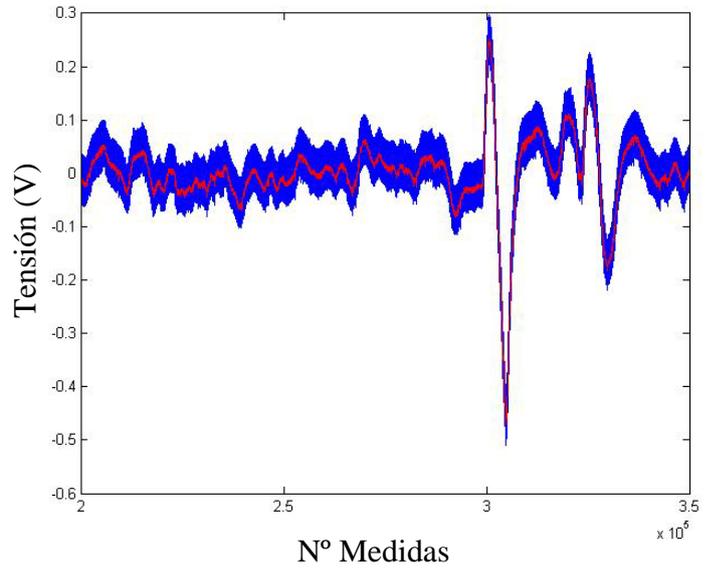
b) Amortiguador convencional

Figura 6.56. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 5 V

• Alimentación del amortiguador: 7.5 V

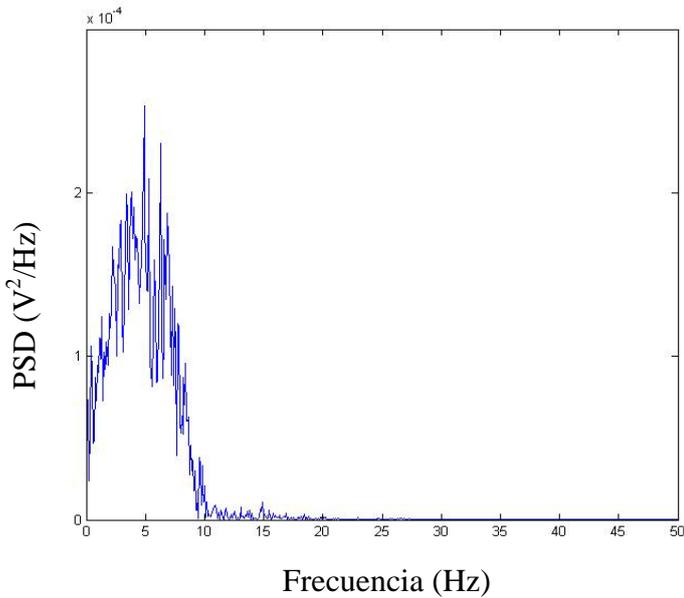


a) Amortiguador magneto-reológico

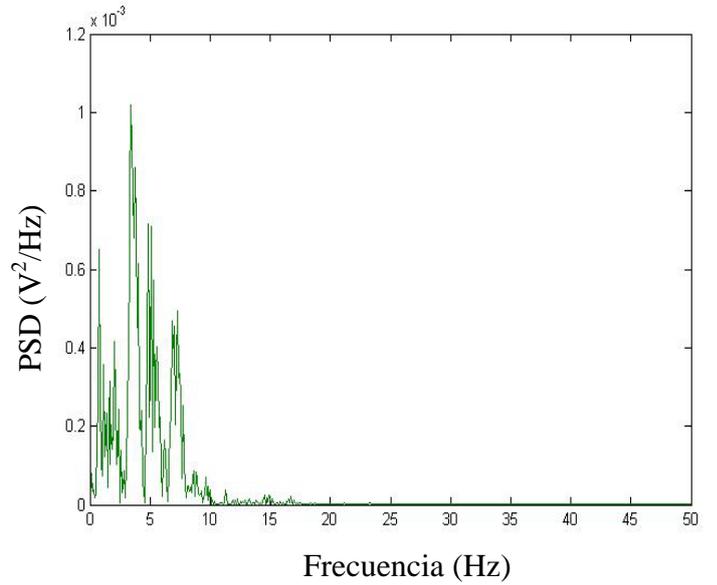


b) Amortiguador convencional

Figura 6.57. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 7,5 V



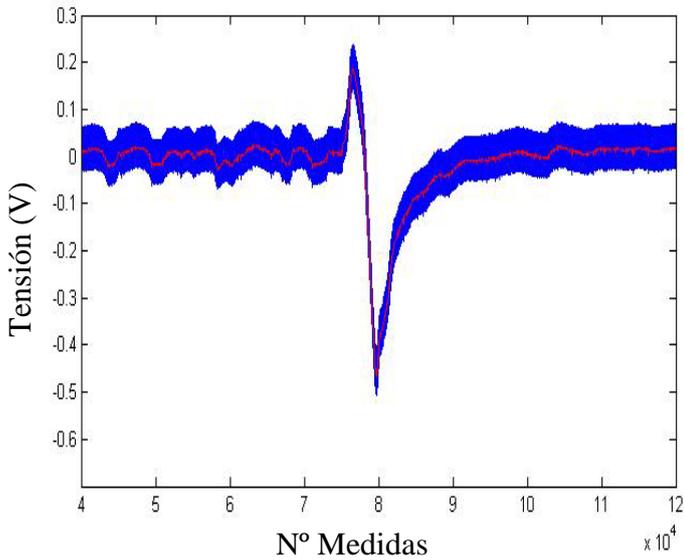
a) Amortiguador magneto-reológico



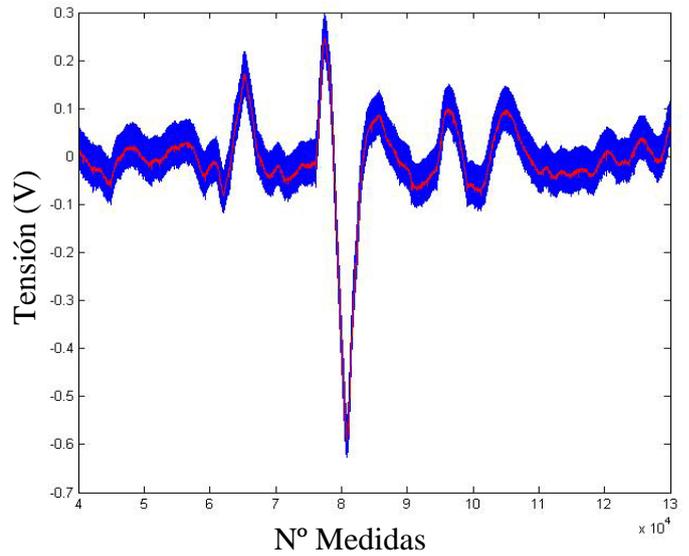
b) Amortiguador convencional

Figura 6.58. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 7,5 V

- Alimentación del amortiguador: 10 V

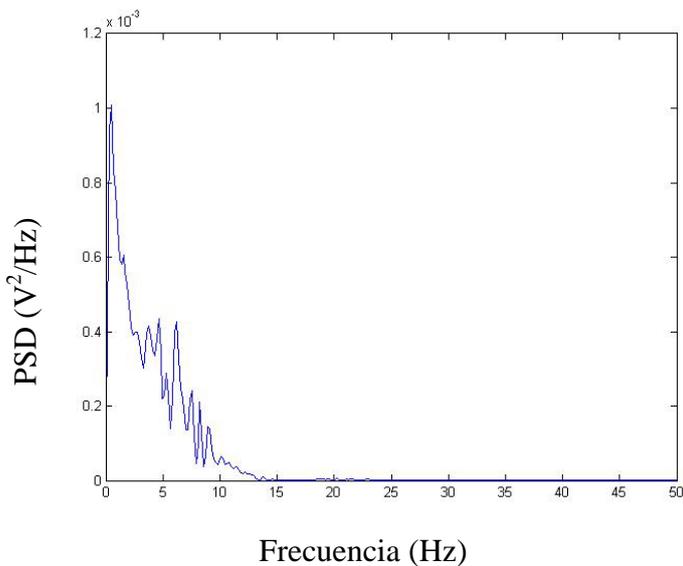


a) Amortiguador magneto-reológico

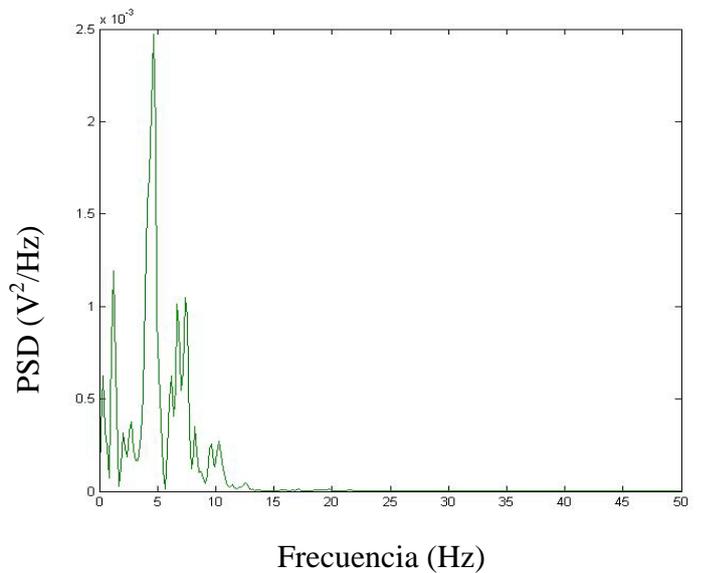


b) Amortiguador convencional

Figura 6.59. Tensión frente al número de medidas, ensayo sobre badén a 10 V



a) Amortiguador magneto-reológico



b) Amortiguador convencional

Figura 6.60. PSD frente a la frecuencia, ensayo sobre badén a 10 V

- **Valor del *Root Mean Square* (RMS)**

La tabla 6.1 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador magneto-reológico, para diferentes valores de tensión de alimentación de dicho amortiguador.

Tabla 6.9. Datos RMS amortiguador magneto-reológico para badén

| RMS | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| BADÉN | 0.0889 | 0.0486 | 0.0354 | 0.0338 | 0.0586 |

La tabla 6.2 contiene los datos del RMS correspondientes a la lectura del sensor de desplazamiento colocado en la suspensión equipada con amortiguador convencional, para diferentes valores de tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico.

Tabla 6.10. Datos RMS amortiguador convencional para badén

| RMS | 0 V | 2.5 V | 5 V | 7.5 V | 10 V |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| BADÉN | 0.0922 | 0.0602 | 0.0485 | 0.0476 | 0.0740 |

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

7.1 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha montado un amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 en la suspensión delantera derecha de un vehículo automóvil. Para poder analizar el comportamiento del amortiguador convencional y del magneto-reológico se han instalado dos sensores de desplazamiento a ambos lados de la suspensión. El amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 está diseñado para ser utilizado en asientos de vehículos pesados, por lo que sus características no son óptimas para ser empleado como elemento amortiguador en la suspensión de un vehículo automóvil, por ello ha sido necesario realizar un estudio para poder adaptarlo como elemento amortiguador de una suspensión vehicular.

Como se comentó en el capítulo 6, se han realizado tres tipos de ensayos: circulando sobre pavimento adoquinado, subiendo un escalón y pasando un badén.

En los ensayos realizados sobre adoquinado se pueden observar pequeñas variaciones en los datos obtenidos ya que el vehículo no dispone de control automático de velocidad y esta pudo no ser constante a lo largo de todo el recorrido. No obstante, se observa que los resultados obtenidos para el amortiguador convencional se encuentran dentro de un rango de valores constante, por lo que su RMS sigue una tendencia constante. En el caso del amortiguador magneto-reológico, al aumentar la tensión del mismo se registran menores valores de desplazamiento del vástago, hasta el punto de llegar a comprimirse menos que el amortiguador convencional para las mismas condiciones de trabajo. Por otra parte, se obtienen mayores valores del RMS según se aumenta la velocidad de la prueba y, para el amortiguador magneto-reológico, cuando su voltaje toma menores valores.

El comportamiento registrado durante el ensayo sobre el escalón es el esperado, ya que se obtiene un pico en los valores recogidos a causa de esta excitación. El amortiguador convencional se comporta de manera semejante a lo largo de todo el ensayo, proporcionando un RMS constante. Para el amortiguador magneto-reológico, se registran menores desplazamientos conforme se va aumentando el voltaje.

Para el ensayo realizado sobre el badén se obtiene un comportamiento semejante al del escalón, pero acentuado debido a que, en este caso, la excitación a la que se encuentra sometida la amortiguación es mayor. Igualmente se puede apreciar una respuesta constante del amortiguador convencional. El amortiguador magneto-reológico se comprime en menor medida según se aumenta el voltaje.

A la vista de estos resultados, se puede concluir que según se aumenta la tensión de alimentación del amortiguador magneto-reológico, aumenta la resistencia que este ofrece a ser comprimido.

Una vez realizado el ensayo y monitorizado los resultados, se observan algunos datos atípicos para cada uno de los ensayos. De todos los ensayos realizados sobre el adoquinado, cabe destacar los datos obtenidos en los realizados a 20 km/h con un voltaje de 7,5 y 10 V para el amortiguador magneto-reológico, que son 0,0113 y 0,0114 respectivamente. El error existente entre ambas medidas es de un 0,87%, lo que nos lleva a considerarlos como idénticos. Esto puede ser debido a un defecto de velocidad en el caso de 7,5 V o un exceso de la misma en el caso de 10 V. Para el ensayo realizado subiendo el escalón, el amortiguador convencional se comporta de manera semejante a lo largo de todo el ensayo, proporcionando un RMS prácticamente constante ya que el error máximo entre medidas es de un 27,8%, salvo para el caso de 5 V, en el cual se registra un error en la toma de datos debido posiblemente a una pequeña disminución de la velocidad. Este error también afecta a los datos recogidos para el amortiguador magneto-reológico. Finalmente, en el ensayo realizado sobre el badén se observa una diferencia en los datos obtenidos a tensiones de 7,5 y 10V en el amortiguador magneto-reológico y en el convencional, cuyos valores son de 0,0248 y de 0,0264 respectivamente. Los errores que afectan a estas medidas son de un 42,3% para el magneto-reológico y un 35,7% para el convencional. Esta diferencia está motivada por un pequeño aumento de velocidad a la hora de pasar el badén, y se observa que afecta en la misma medida a los datos recogidos de ambos sensores.

Finalmente, se puede concluir que la colocación de los sensores de desplazamiento no es exactamente la misma, lo cual puede originar pequeñas diferencias a la hora de realizar los ensayos. Esto se debe a que la disposición de distintos elementos propios del

vehículo impide que el grado de paralelismo entre vástago del amortiguador y la varilla del sensor sea óptima. No obstante, se han instalado de manera que las repercusiones sobre los datos obtenidos en ambos sensores resulte del todo despreciable.

7.2 FUTUROS DESARROLLOS

En la actualidad, los fabricantes de vehículos luchan por intentar innovar en un mercado en el cual las nuevas tecnologías cobran especial importancia a la hora de captar la atención de los clientes. Por otra parte, se intenta dotar a los vehículos de sistemas que garanticen la máxima seguridad y confort en marcha para sus ocupantes.

En esta línea de innovación y desarrollo tiene su fundamento este proyecto. Tomando como base el estudio previo realizado para la adaptación de una suspensión semiactiva en el vehículo mediante la adaptación de un amortiguador magneto-reológico RD 1005.3, se ha implementado el montaje real para, en una primera aproximación, estudiar su comportamiento en diferentes situaciones.

No obstante, los horizontes de este campo de trabajo son muy diversos. Por ello, se proponen las siguientes líneas de trabajo e investigación para futuros desarrollos:

- Continuar la línea de desarrollo seguida en este proyecto, optimizando los parámetros de carrera del amortiguador, e incluso estudiar la posibilidad de acoplar un amortiguador magneto-reológico específico para esta aplicación.
- Diseñar un sistema que permita adaptar la suspensión trasera para la colocación de amortiguadores magneto-reológicos.
- Una vez instalados amortiguadores magneto-reológicos en todo el vehículo, se podrá realizar un completo estudio de una instalación eléctrica, así como de la colocación interna de los equipos necesarios de control y hardware sin que afecten a la disposición de los ocupantes dentro del vehículo.

- Realizar un completo estudio dinámico del comportamiento del vehículo mediante la incorporación de acelerómetros.

- Implementar un sistema *software* capaz de medir las distintas excitaciones que el pavimento ejerce sobre el vehículo y que, a su vez, sea capaz de calcular los parámetros óptimos de voltaje para los amortiguadores magneto-reológicos en cada situación, creando de esta manera un sistema capaz de adaptarse a cada terreno y a cada tipo de conducción.

- Finalmente, se propone ampliar la investigación realizada sobre los amortiguadores magneto-reológicos al mundo de la competición. Se propone el estudio de su comportamiento sobre las motocicletas de competición, en las cuales la dureza de la amortiguación (en particular la trasera) determina la estabilidad en el paso por curva y, en consecuencia, la velocidad de paso por la misma. De esta manera, un sistema de amortiguación magneto-reológico capaz de variar los parámetros para cada curva puede llegar a ser determinante a la hora de obtener mejores tiempos por vuelta.

ANEXOS

ANEXO A

ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

A.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se adjuntan las características técnicas de los equipos empleados para la realización del proyecto. En este apartado se detallarán tanto el amortiguador magneto-reológico, como los equipos PXI de National Instruments utilizados para el gobierno de la toma de datos.

A.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR RD-1000 DE LORD

En la tabla A.1 se incluyen las características más importantes del amortiguador magneto-reológico RD-1000 fabricado por la empresa Lord.

Tabla A.1. Características del amortiguador

| | |
|---|--|
| 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) |
| Máximo rango de operación | 160°F (71° C) |
| Temperaturas límite de Almacenamiento | 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 muestra las diferentes vistas y medidas del amortiguador magneto-reológico.

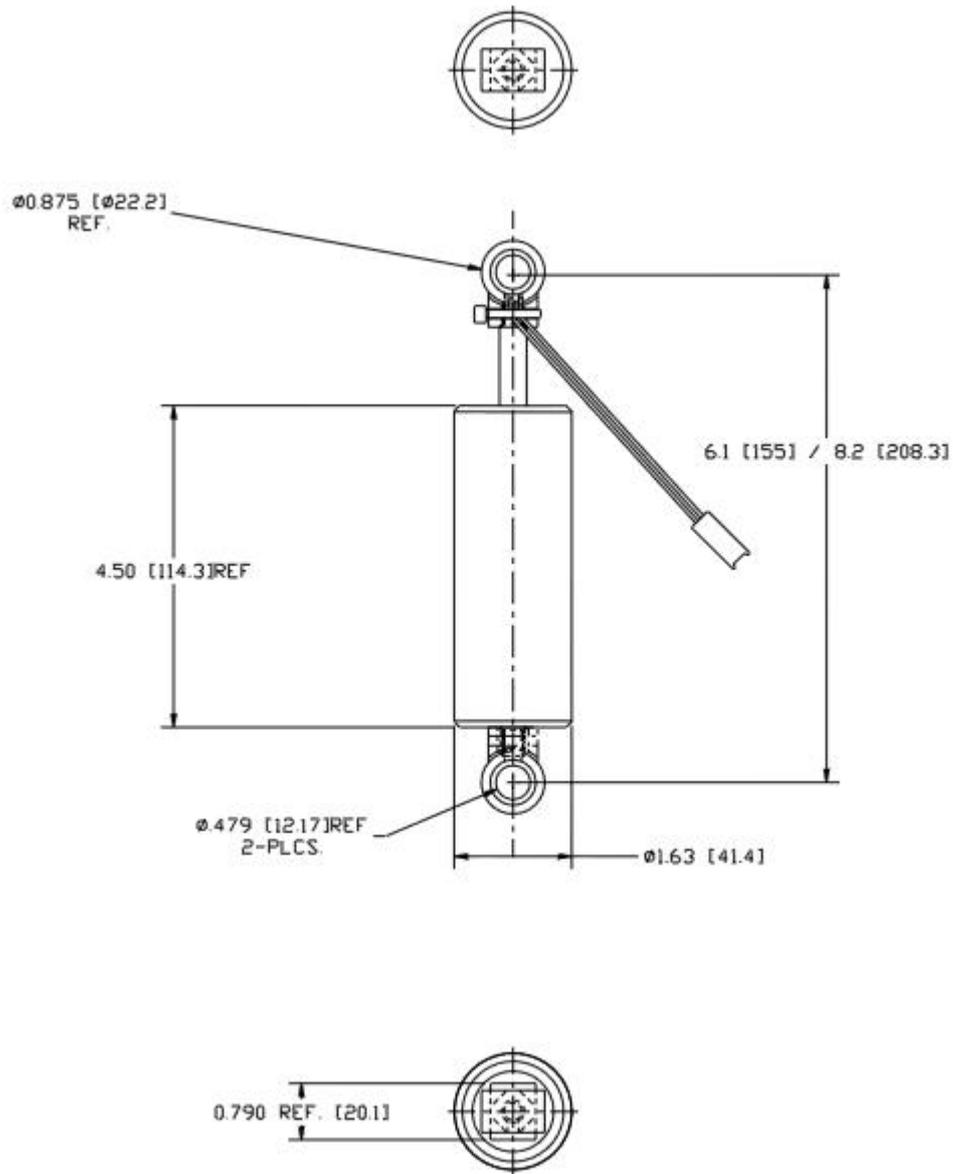


Figura A.1. Medidas del amortiguador magneto-reológico

En la figura A.2 se muestra una gráfica que contiene Fuerza (N) frente a Velocidad (m/s) del amortiguador magneto-reológico RD 1005-3 de Lord.

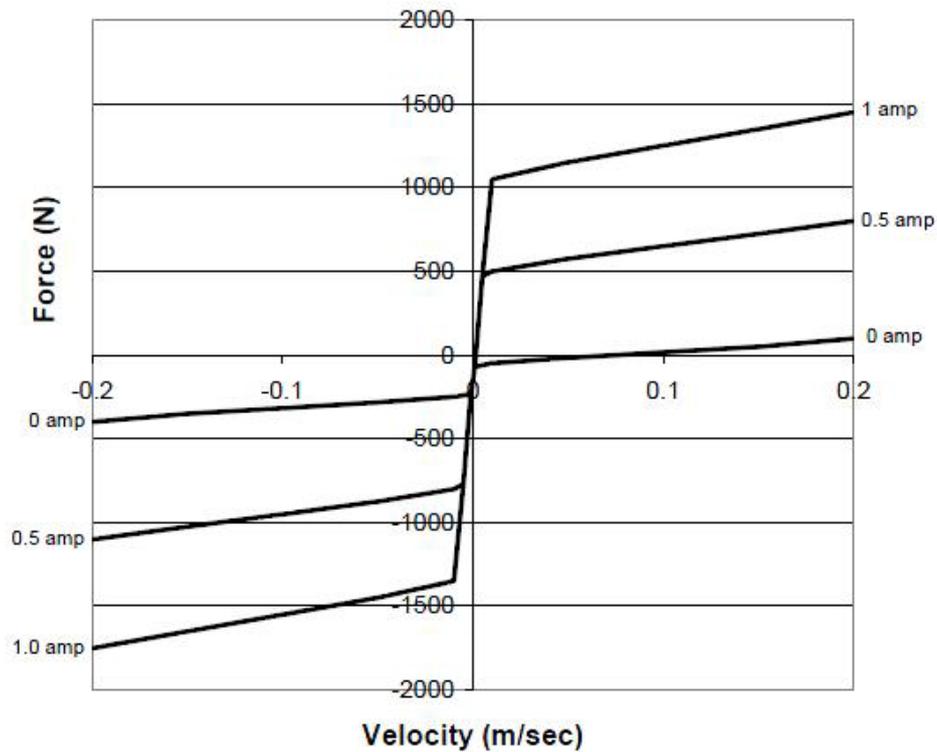


Figura A.2. Gráfica Fuerza vs velocidad del amortiguador RD 1005-3

A.3 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE NATIONAL INSTRUMENTS

A.3.1 NI PXI 1031DC

Electrical

AC Input

| | |
|---------------------------------|--|
| Input voltage range | 100 to 120 VAC/200 to 240 VAC |
| Operating voltage range | 90 to 132 VAC/180 to 254 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_{OUT}), 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) |

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 NI PXI 4472B

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 | ± 25 ppm |
| Input signal range | ± 10 V peak |
| FIFO buffer size | 1,024 samples |
| Data transfers | DMA |

Transfer Characteristics

| | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Offset (residual DC) | ± 3 mV, max |
| Gain (amplitude accuracy) | ± 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) | ± 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 | ± 42.4 V |
| Positive inputs protected | CH<0..7> |
| Negative input (shield) | Not protected, rated at ± 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 (CCIF 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 | $\leq \pm 0.5$ deg |
| Interchannel phase mismatch | $< f_{in}$ (in kHz) $\times 0.018$ deg + 0.082 deg |
| Interchannel gain mismatch | ± 0.1 dB |
| Filter delay through ADC | 38.8 sample periods |

Onboard Calibration Reference

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

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.3.3 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 GΩ in parallel with 100 pF |
| AI- to AI GND | >10 GΩ 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 μs convert interval |
| ±30 ppm of step (±2 LSB) | 5 μs convert interval |
| ±15 ppm of step (±1 LSB) | 7 μs convert interval |

ANEXO B

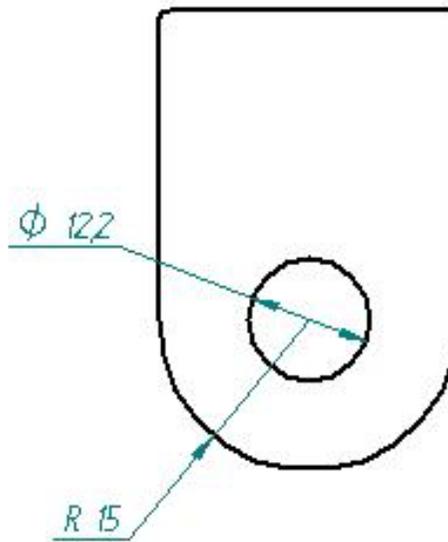
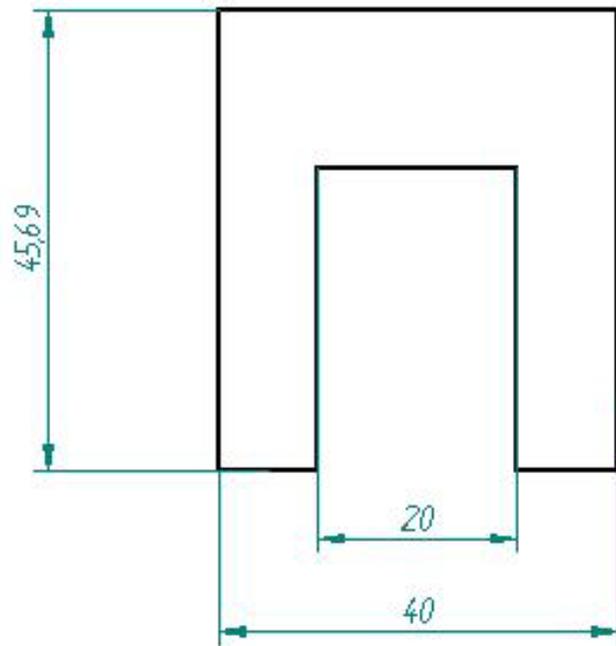
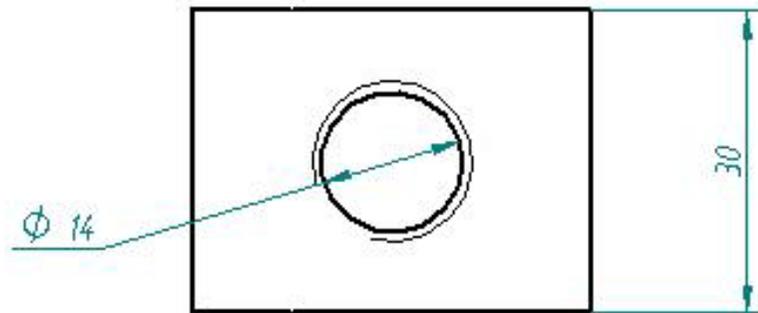
PLANOS

B.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se adjuntan los planos de las piezas que han tenido que ser fabricadas para la adaptación del amortiguador magnetorreológico. Las piezas adjuntas son el soporte superior, el bulón para la unión del amortiguador con el propio soporte y el macho roscado. Como ya se comentó en el capítulo donde se explica el proceso de adaptación necesario para la realización de dicho proyecto, dichas piezas corresponden al dispositivo superior fabricado para salvar las dificultades que ofrecía el amortiguador magnetorreológico debido a su reducido tamaño.

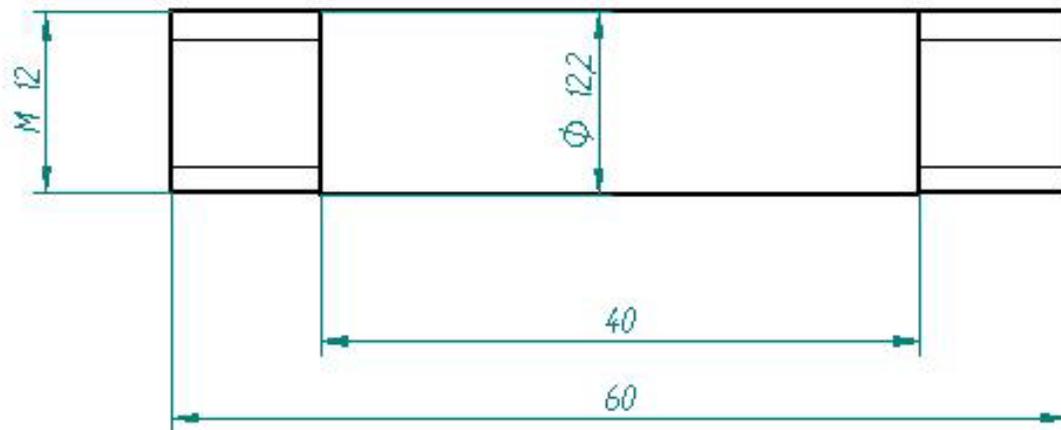
El último plano adjunto corresponde al casquillo diseñado y fabricado para evitar las holguras entre la carcasa del amortiguador deportivo adaptado y el propio amortiguador magnetorreológico.

| Revisiones | | | |
|------------|-------------|-------|----------|
| Rev | Descripción | Fecha | Aprobado |
| | | | |

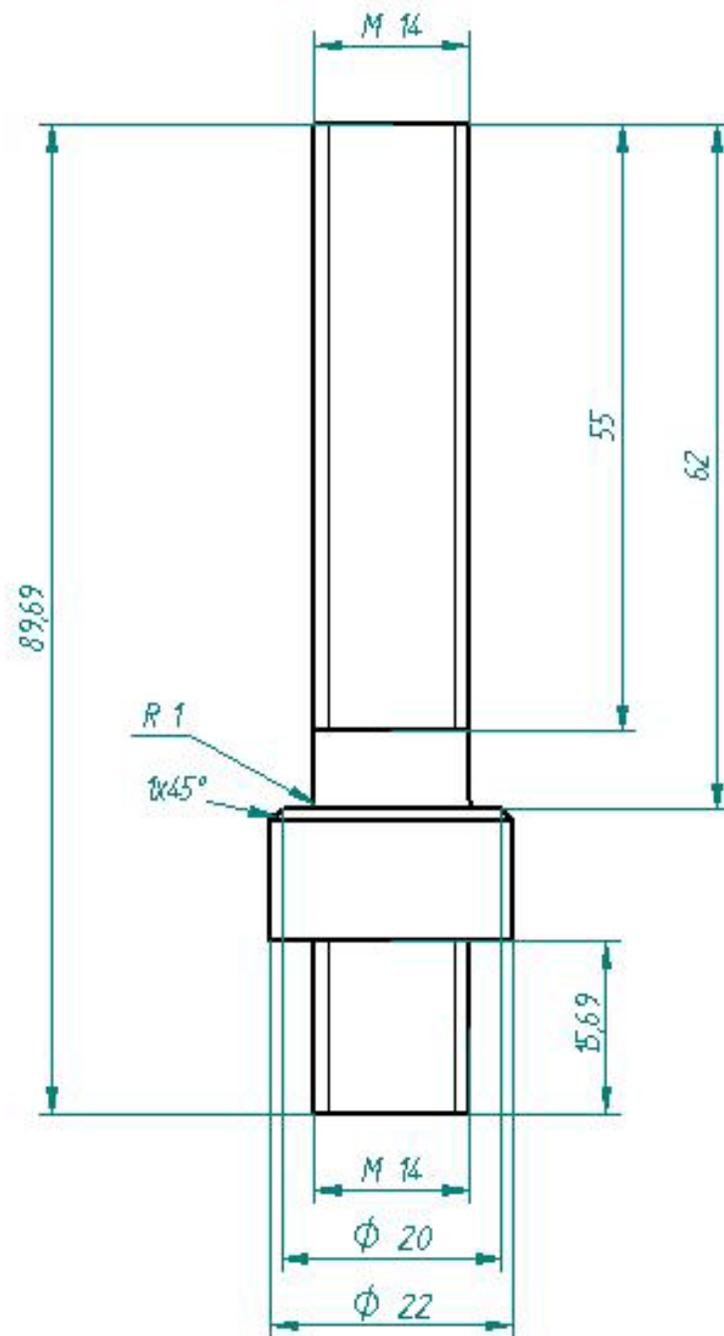


| | | | |
|---|-------|---------------------|-------|
| Nombre | Fecha | SOLID EDGE | |
| Dibujado | | EBS-PLM SOLUTIONS | |
| Comprobado | | Título | |
| Aprobado 1 | | Soporte | |
| Aprobado 2 | | A3 | Piano |
| Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 1 | | Rev | |
| | | Archivo: Soporte.dR | |
| | | Escala | Peso |

| Revisiones | | | |
|------------|-------------|-------|----------|
| Rev | Descripción | Fecha | Aprobado |
| | | | |



| | | | | | |
|---|--------|----------|--|-------|-------------|
| | Nombre | Fecha | SOLID EDGE EOS-PLM SOLUTIONS | | |
| Dibujado | Diego | 16/07/10 | | | |
| Comprobado | | | Título Botón Superior | | |
| Aprobado 1 | | | | | |
| Aprobado 2 | | | A3 | Plano | Rev |
| Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 1 | | | Archivo: Botón.dft | | |
| | | | Escala | Peso | Hoja 1 de 1 |



| Revisiones | | | |
|------------|-------------|-------|----------|
| Rev | Descripción | Fecha | Aprobado |
| | | | |

| | Nombre | Fecha | | |
|--|--------|-------|--|------|
| Dibujado | | | SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS | |
| Comprobado | | | | |
| Aprobado 1 | | | Título Macho Roscado | |
| Aprobado 2 | | | A4 Plano Rev | |
| Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1* | | | Escala | Peso |

| Revisiones | | | |
|------------|-------------|-------|----------|
| Rev | Descripción | Fecha | Aprobado |
| | | | |



| | | | |
|---|----------|------------------------|-------|
| Nombre | Fecha | SOLID EDGE | |
| Dibujado | 16/07/10 | EBS-PLM SOLUTIONS | |
| Comprobado | | Título | |
| Aprobado 1 | | Casquillo | |
| Aprobado 2 | | A3 | Plano |
| Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y ± 1 | | Rev | |
| | | Archivo: Casquillo.dwg | |
| | | Escala | Peso |
| | | Hoja 1 de 1 | |

BIBLIOGRAFÍA

[1] APARICIO IZQUIERDO, F., VERA ÁLVAREZ, C., DÍAZ LÓPEZ, V. “*Teoría de los vehículos automóviles*”. Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid, 1995.

[2] M. CHARLOTEAUX. *Suspensión y Dirección*. Marcombo. Barcelona, 1979.

[3] C. Gil; M. Miranda; F. Nogue. *Suspensiones inteligentes*. Universidad de Navarra, 2000.

[4] FERNÁNDEZ CASAS, Raúl. “*Modelado de un sistema de suspensión de un vehículo automóvil mediante Simmechanics*”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008.

[5] SÁNCHEZ CASTILLO, Noemí. “*Control de un sistema de suspensión semiactiva basado en lógica difusa : modelo de vehículo completo*”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2006.

[6] CHACÓN HERNANDO, Víctor. “*Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos*”. Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2010.

[7] Mecánica general de vehículos. Año 2010

http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html

[8] Documentación e ilustraciones. Año 2010

www.km77.com

[9] Amortiguadores MR_DESCRIPCION . CUPICH RODRIGUEZ, Miguel y ELIOZANO GARZA, F. J. Amortiguadores magneto-reológicos . Año 1998.

[10] Reología (cap. 3.1). Prof. Dr. BREGNI, CARLOS. *Reología*. Departamento de Tecnología Farmacéutica, Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad de Buenos Aires. Año 2010.

<http://www.ffyb.uba.ar/farmacotecnia%20I/Reologia.ppt>

[11] MATELLANES, Lina, CUEVAS, J. M^a, CLEMENTE, Raquel y ALLUÉ, Sandra. *Materiales y estructuras "inteligentes"*. Centro Tecnológico Gaike. Año 2003.

<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/Articulo.asp?A=2971>

[12] ARIAS MAYA, L y VANEGAS USECHE, L. *Materiales compuestos inteligentes*. Scientia et Technica. Año X, No 25, Agosto 2004. UTP. ISSN 0122-1701.

[13] Mat Int I y II: LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto, RUIZ PABLOS, Rosa. *Materiales inteligentes I/II. 1ª parte: Introducción a los materiales del siglo XXI. Anales de mecánica y electricidad*. Año 2003.

[14] Autocity.com *MagneRide* de Delphi. Año 2009.

<http://www.autocity.com/documentos-tecnicos/index.html?cat=3&codigoDoc=210>

[15] Estructura fluidos MR DOMÍNGUEZ-GARCÍA, P, Pastor, J. M, MELLE, Sonia y. RUBIO, M. A. *Microestructura de una suspensión magneto-reológica depositada*. Laboratorio de Sistemas Complejos. Dpto. Física Fundamental. Facultad de Ciencias UNED.

[16] IGLESIAS, Guillermo. *Estabilidad de suspensiones magnéticas concentradas*. Grupo de Física de Interfases y Sistemas Coloidales, Dpto. de Física Aplicada. Universidad de Granada.

[17] LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto, RUIZ PABLOS, Rosa *Materiales inteligentes (II): Aplicaciones tecnológicas anales de mecánica y electricidad*. Año 2004.

[18] B. SAPIŃSKI y S. BYDOŃ *Application of magnetorheological fluid brake to shaft position control in induction motor*. Department of Process Control AGH – University of Science and Technology al. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Poland.

[19] Fundación de EROSKI, versión *online* de la revista CONSUMER EROSKI. El amortiguador reológico. Año 2007. Disponible en *Web* en:

http://www.consumer.es/web/es/motor/mantenimiento_automovil/2007/01/08/158772.php

[20] Lord. Rd-1005-3 damper. Technical report. Año 2007.

[21] Applied measurements LTD. Año 2010

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

[22] Bilstein. Año 2009

www.bilstein.nl

[23] Autorallye. Año 2009

<http://www.autorallye.com/cast/bilstein.htm>

[24] MENESES ALONSO, Jesús, ÁLVAREZ CALDAS, Carolina y RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Santiago. *Introducción al Solid Edge*. Ed. Thonson Editores Spain Paraninfo, S.A. Año 2006.

[25] ROJAS LAZO, Oswaldo y, ROJAS ROJAS Luis Revista DISEÑO Y TECNOLOGÍA, Artículo: Diseño asistido por computador. Junio de 2006. Disponible en web:

http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf

[26] Torres, J.C. *Diseño asistido por ordenador (Asignatura de 4ª Curso Ingeniería Informática)*. Dpto. Lenguajes y Sistemas Informáticos. ETS. Ingeniería Informática. Universidad de Granada. Año 2009. Disponible en web:

http://www.itpuebla.edu.mx/Alumnos/Cursos_Tutoriales/Ana_Sosa_Pintle/SISTEMAS/ARCHIVOS_FUNDAMENTOS/ARCHIVOS/SISTEMASCAD.pdf

[27] BMW. Año 2010

<http://www.bmwfaq.com/f150/instalacion-completa-amortiguadores-en-un-e46-470264/>

[28] Página Web Oficial National Instruments. Año 2010.

<http://www.ni.com>

[29] Tutorial de LabVIEW SignalExpress 2009 facilitado por National Instruments. Año 2010.

<http://www.ni.com/swf/demos/us/sigx/gslv/>