



Universidad
Carlos III de Madrid

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

MODELO INVERSO DE AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO BASADO EN REDES NEURONALES

AUTOR: DON PABLO SANZ BENITO

TUTORA: DRA. DÑA. MARÍA JESÚS LÓPEZ BOADA

FECHA: OCTUBRE, 2014

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 6

1.1	OBJETIVO DEL PROYECTO.	8
1.2	ESTRUCTURA DEL PROYECTO.	9

CAPÍTULO 2. EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN. 10

2.1	FUNCIONES DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN.	11
2.2	ESTUDIO DE LAS VIBRACIONES EN EL DISEÑO DE LA SUSPENSIÓN	17
2.3	COMPONENTES DE LA SUSPENSIÓN	21
	2.3.1 ELEMENTOS ELÁSTICOS.	21
	2.3.1.1 BALLESTAS.	21
	2.3.1.2 BARRAS DE TORSIÓN.	23
	2.3.1.3 BARRAS ESTABILIZADORAS O ANTI-VUELCO	24
	2.3.1.4 MUELLES HELICOIDALES	25
	2.3.2 ELEMENTOS DE AMORTIGUACIÓN.	28
	2.3.2.1 EL AMORTIGUADOR DE FRICCIÓN	28
	2.3.2.2 EL AMORTIGUADOR HIDRÁULICO.	29
	2.3.2.2.1 EL AMORTIGUADOR BITUBO.	30
	2.3.2.2.2 EL AMORTIGUADOR MONOTUBO.	32
	2.3.2.2.3 DIFERENCIAS ENTRE AMORTIGUADOR BITUBO Y MONOTUBO.	34
	2.3.2.3 NEUMÁTICOS	35
	2.3.3.1 SILENTBLOCKS.	36
	2.3.3.2 RÓTULAS.	37
	2.3.3.3 MANGUETA Y BUJE.	37
	2.3.3.4 BRAZOS O TRAPECIOS DE SUSPENSIÓN.	38
	2.3.3.5 TIRANTES DE SUSPENSIÓN	38
	2.3.3.6 TOPES DE SUSPENSIÓN.	39
2.4	TIPOS DE SUSPENSIÓN.	40
	2.4.1. CLASIFICACIÓN SEGÚN LA GEOMETRÍA.	40
	2.4.1.1. SUSPENSIÓN DE EJE RÍGIDO.	40
	2.4.1.2. SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA	41
	2.4.1.3. SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE.	42
	2.4.2. SEGÚN EL SISTEMA DE CONTROL.	47
	2.4.2.1. SUSPENSIÓN PASIVA.	47
	2.4.2.2. SUSPENSIÓN ACTIVA.	47
	2.4.2.3. SUSPENSIÓN SEMIACTIVA.	49
	2.4.3. OTROS TIPOS DE SUSPENSIONES.	52

CAPÍTULO 3. FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS **54**

3.1	INTRODUCCIÓN A LA REOLOGÍA.	54
3.2	FLUÍDOS REOLÓGICOS.	55
	3.2.1 FLUÍDOS MAGNETO-REOLÓGICOS.	57
3.3	APLICACIONES.	58
	3.3.1 EL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO.	62

CAPÍTULO 4. REDES NEURONALES ARTIFICIALES **65**

4.2	FUNCIONAMIENTO DEL CEREBRO HUMANO.	66
4.3	DEFINICIÓN Y ESTRUCTURA DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL.	68
	4.3.1 ESTRUCTURA DIRECTA E INVERSA.	75
4.4	MODO DE OPERACIÓN.	76
4.5	OPERACIONES DE CAPA.	77
4.6	OTRAS CONSIDERACIONES.	77
4.7	MECANISMOS DE APRENDIZAJE.	78
	4.7.1 APRENDIZAJE SUPERVISADO	79
	4.7.1.1 ALGORITMO DE APRENDIZAJE BACKPROPAGATION.	80
	4.7.1.1.1 REGLA DE APRENDIZAJE.	81
	4.7.2 APRENDIZAJE NO SUPERVISADO	90
	4.7.3 APRENDIZAJE ON-LINE Y OFF-LINE.	90
4.8	VENTAJAS DE LAS REDES NEURONALES.	91
4.9	OTRAS APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES.	92

CAPÍTULO 5. DESARROLLO PRÁCTICO Y RESULTADOS. **94**

5.1	DESARROLLO DEL ENSAYO Y TOMA DE DATOS.	94
5.2	TIPOLOGÍA DE LA RED NEURONAL.	102
5.3	ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN DE LA RED NEURONAL.	106
5.4	RESULTADOS.	108
5.5	CONCLUSIONES.	110

CAPÍTULO 6. DESARROLLOS FUTUROS. **111**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1. VEHÍCULO CIRCULANDO POR UN FIRME IRREGULAR.	11
FIGURA 2-2. OSCILACIONES DEL VEHÍCULO.	12
FIGURA 2-3. OSCILACIÓN DE EMPUJE.	12
FIGURA 2-4. OSCILACIÓN DE CABECEO.	13
FIGURA 2-5. OSCILACIÓN DE BALANCEO.	13
FIGURA 2-6. VEHÍCULO ENTRANDO EN SUBVIRAJE (IZQUIERDA) Y SOBREVIRAJE (DERECHA).	14
FIGURA 2-7. VEHÍCULO SUBVIRADOR.	14
FIGURA 2-8. VEHÍCULO SOBREVIRADOR.	15
FIGURA 2-9. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LAS MASAS SUSPENDIDAS Y NO SUSPENDIDAS.	15
FIGURA 2-10: CURVA DE AMORTIGUACIÓN CRÍTICA.	19
FIGURA 2-11. BALLESTA MONTADA EN UN VEHÍCULO TODOTERRENO.	22
FIGURA 2-12. ELEMENTOS QUE FORMAN UNA BALLESTA.	22
FIGURA 2-13. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BARRA DE TORSIÓN.	23
FIGURA 2-14. UNIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA AL VEHÍCULO.	24
FIGURA 2-15. EFECTO DE LA BARRA ESTABILIZADORA AL TRAZAR UNA CURVA.	24
FIGURA 2-16. FUNCIONAMIENTO DE UNA BARRA ESTABILIZADORA.	25
FIGURA 2-17. PARTES DE UN RESORTE.	26
FIGURA 2-18 INFLUENCIA DE LA DUREZA DEL MUELLE EN LAS OSCILACIONES.	26
FIGURA 2.19. DISPOSICIÓN DE LOS MUELLES HELICOIDALES.	27
FIGURA 2-20. POSICIONES DEL MUELLE.	27
FIGURA 2-21. AMORTIGUADORES DE FRICCIÓN.	28
FIGURA 2-22. A LA IZQUIERDA, FLUJO DE ACEITE A TRAVÉS DE VÁLVULA DE APERTURA POR ÁREA. A LA DERECHA, FLUJO DE ACEITE A TRAVÉS DE LAS VÁLVULAS DE APERTURA POR PRESIÓN.	29
FIGURA 2-23 ELEMENTOS DE UN AMORTIGUADOR BITUBO.	31
FIGURA 2-24. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UN AMORTIGUADOR MONOTUBO.	33
FIGURA 2-25. A LA IZQUIERDA, DIAGRAMA DE UN AMORTIGUADOR BITUBO. A LA DERECHA, UNO MONOTUBO.	34
FIGURA 2-26. NEUMÁTICO ATRAVESANDO UNA IRREGULARIDAD DEL ASFALTO.	35
FIGURA 2-27. SILENTBLOCKS EQUIPADOS EN UNA SUSPENSIÓN.	36
FIGURA 2-28. RÓTULAS MONTADAS EN UN QUAD.	37
FIGURA 2-29. MANGUETA Y BUJE DE LA SUSPENSIÓN.	37
FIGURA 2-30. BRAZOS DE SUSPENSIÓN.	38
FIGURA 2-31. SUSPENSIÓN DELANTERA DE UN MONOPLAZA DE FÓRMULA 1.	39
FIGURA 2-32. TOPE EN SUSPENSIÓN MCPHERSON.	39
FIGURA 2-33. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA SUSPENSIÓN RÍGIDA.	40
FIGURA 2-34. ESQUEMA DE UNA SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA DE EJE TORSIONAL.	41
FIGURA 2-35. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UNA SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE.	42
FIGURA 2-36. ESQUEMA DE UNA SUSPENSIÓN DE EJE OSCILANTE.	43
FIGURA 2-37. ESQUEMA DE SUSPENSIÓN DE BRAZOS ARRASTRADOS.	43
FIGURA 2-38. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE LA SUSPENSIÓN MCPHERSON.	44
FIGURA 2-39. SUSPENSIÓN MCPHERSON DE UN VOLKSWAGEN PASSAT.	44
FIGURA 2-40. ESQUEMA DE UNA SUSPENSIÓN DE PARALELO DEFORMABLE.	45
FIGURA 2-41. SUSPENSIÓN MULTIBRAZO DEL EJE DELANTERO DE UN AUDI A6.	46
FIGURA 2-42. ESQUEMA DE UNA SUSPENSIÓN PASIVA.	47
FIGURA 2-43. ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UNA SUSPENSIÓN ACTIVA.	48
FIGURA 2-44. ESQUEMA DE LAS SUSPENSIONES SEMIACTIVAS.	49
FIGURA 2-45. CADILLAC SEVILLE STS EQUIPADO CON EL SISTEMA MAGNERIDE DE DELPHI.	50
FIGURA 2-46. MAGNETIZACIÓN DEL FLUIDO DEL MAGNERIDE.	51

FIGURA 2-47. SISTEMA DE CONTROL DELPHI.	52
FIGURA 2-48. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN HIDRONEUMÁTICA.	53
FIGURA 3-1. GRÁFICA QUE RELACIONA EL ESFUERZO VISCOZO CON LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN.	56
FIGURA 3-2. FORMACIÓN DE CADENAS PARALELAS AL CAMPO MAGNÉTICO.	57
FIGURA 3-3. PRÓTESIS DE PIERNA DISEÑADA POR BIEDERMAN MOTECH.	58
FIGURA 3-4. FUTURO ROBOT ARTICULADO CON FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO.	59
FIGURA 3-5. AMORTIGUADOR SÍSMICO RHEONETIC MRD-9000.	59
FIGURA 3-6. PUENTE DE LAGO DONG TING EN CHINA.	60
FIGURA 3-7. AMORTIGUADOR DE FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO RHEONETIC RD-1001-4.	61
FIGURA 3-8. ESTRUCTURA DE UN AMORTIGUADOR MAGNETIC RIDE DE DELPHI.	62
FIGURA 3-9. ELEMENTOS DE LA AMORTIGUACIÓN MAGNETO-REOLÓGICA MAGNETIC RIDE EN UN AUDI R8.	64
FIGURA 4-1. RECREACIÓN DE LAS NEURONAS Y SUS CONEXIONES EN EL CEREBRO HUMANO.	66
FIGURA 4-2. PARTES DE UNA NEURONA.	67
FIGURA 4-3. PROCESO DE SINAPSIS.	67
FIGURA 4-4. RED NEURONAL TOTALMENTE CONECTADA.	69
FIGURA 4-5. ESQUEMA DE UNA NEURONA ARTIFICIAL.	70
FIGURA 4-6. FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN LINEAL.	71
FIGURA 4-7. FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TIPO SIGNO.	72
FIGURA 4-8. FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TIPO ESCALÓN.	72
FIGURA 4-9. FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN LOGÍSTICA.	73
FIGURA 4-10. FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TANGENTE HIPERBÓLICA.	73
FIGURA 4-11. FUNCIONAMIENTO DE UNA NEURONA DE LA RED.	74
FIGURA 4-12. DIAGRAMA DE UNA ESTRUCTURA DIRECTA.	75
FIGURA 4-13. DIAGRAMA DE UNA ESTRUCTURA INVERSA.	75
FIGURA 4-14. INFLUENCIA DE LA SALIDA DE LA NEURONA NJ EN LA ENTRADA DE LA NEURONA NI.	79
FIGURA 4-15. ESTRUCTURA DE UNA RED.	86
FIGURA 4-16. COMPONENTES DE UNA NEURONA.	86
FIGURA 4-17. REPARTO DE PESOS EN LA PRIMERA CAPA DE NEURONAS.	87
FIGURA 4-18. REPARTO DE PESOS EN LA SEGUNDA CAPA DE NEURONAS.	87
FIGURA 4-19. SEÑAL DE SALIDA.	88
FIGURA 4-20. DIFERENCIA ENTRE LA SALIDA OBTENIDA Y LA SALIDA DESEADA.	88
FIGURA 4-21. PROPAGACIÓN DEL ERROR EN LA CAPA INTERMEDIA.	88
FIGURA 4-22. PROPAGACIÓN DEL ERROR EN LA PRIMERA CAPA DE LA RED.	88
FIGURA 4-23. MODIFICACIÓN DE LOS PESOS EN LA CAPA DE ENTRADA.	89
FIGURA 5-1. ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN SEMIACTIVA DE UN AUDI TT.	94
FIGURA 5-2. BANCO Y MÁQUINA DE ENSAYOS.	95
FIGURA 5-3. CILINDRO HIDRÁULICO.	95
FIGURA 5-4. TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.	95
FIGURA 5-5. Sonda LASER DE TEMPERATURA.	96
FIGURA 5-6. CURVA EXPERIMENTAL FUERZA FRENTE A DESPLAZAMIENTO DEL AMORTIGUADOR.	98
FIGURA 5-7. CURVA EXPERIMENTAL FUERZA VS VELOCIDAD DEL AMORTIGUADOR.	98
FIGURA 5-8. REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS PARA ENTRENAR Y VALIDAR.	100
FIGURA 5-9. PATRÓN DE DATOS CON EL FORMATO ADECUADO PARA JAVA-NNS.	101
FIGURA 5-10. EJEMPLO DE RED CON UNA CAPA INTERMEDIA (RED 4_5_1).	103
FIGURA 5-11. EJEMPLO DE RED CON UNA CAPA INTERMEDIA (RED 4_10_10_1).	103
FIGURA 5-12. FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TANGENTE HIPERBÓLICA.	104
FIGURA 5-13. EVOLUCIÓN DE ERROR SSE FRENTE A DISTINTOS FACTORES DE APRENDIZAJE.	105
FIGURA 5-14. EVOLUCIÓN DEL MSE CON EL NÚMERO DE CICLOS.	107
FIGURA 5-15. RESULTADOS ESPERADOS Y OBTENIDOS MEDIANTE JAVANNNS.	108
FIGURA 5-16. ERRORES MSE PARA CADA TIPOLOGÍA DE RED ESTUDIADA.	109

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. VEHÍCULO CIRCULANDO POR UN FIRME IRREGULAR.....	17
TABLA 2-2. AMORTIGUACIÓN CRÍTICA	19
TABLA 5-1. AMPLITUDES, FRECUENCIAS Y CORRIENTES UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS	97
TABLA 5-2. DATOS OBTENIDOS PARA CADA REGISTRO	97
TABLA 5-3. REDES ENTRENADAS.....	104
TABLA 5-4. ERROR MSE EN LAS REDES CON UNA CAPA INTERMEDIA.....	109
TABLA 5-5. ERROR MSE EN LAS REDES CON DOS CAPAS INTERMEDIAS	109

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, una de las industrias más importantes del mundo es la industria automovilística, siendo los vehículos automóviles un bien prácticamente indispensable para la sociedad en la que vivimos. El sector es un ejemplo de éxito tanto dentro como fuera de nuestro país por su dinamismo y por su capacidad para generar crecimiento en un entorno tan complejo como el que estamos atravesando. La capacidad para generar empleo, desarrollar tecnología o procesos productivos avanzados ha convertido a la industria en un ejemplo a seguir por otros sectores. Poniendo cifras a estas afirmaciones, durante el año 2012 se fabricaron más de 84.000.000 vehículos a nivel mundial según la OICA (Organización Internacional de Constructores de Automóviles). Dentro de ese volumen de fabricación, España contribuyó con 2.000.000 de vehículos, lo que le convierte en el segundo fabricante europeo de automóviles. Esa cifra, que llegó a alcanzar los 3.000.000 de unidades en el año 2006, supone un 6% del Producto Interior Bruto, llegando a un 10% si incluimos la contribución de otras actividades como la distribución, la financiación o los seguros. Esta industria emplea también al 9% de la población activa española [1] [2].

Los distintos tipos de vehículos existentes se han desarrollado casi en su totalidad con el fin de transportar personas o cargas, tanto para fines particulares como

profesionales. Para evitar o minimizar las vibraciones y movimientos producidos por la interacción de estos vehículos con el entorno que les rodea, es indispensable que el transporte se realice en las mejores condiciones posibles tanto para los ocupantes y cargas como para el propio vehículo. El hecho de evitar o minimizar estos movimientos que se ha mencionado produce un importante ahorro económico tanto en el mantenimiento del vehículo automóvil como en los embalajes especiales para proteger la carga transportada, además de provocar menor fatiga para los pasajeros, sean seres humanos o animales. Esta última consideración referente al confort es especialmente importante en el caso del conductor del vehículo automóvil, ya que, junto a la absorción de las irregularidades, adherencia, estabilidad y seguridad, es una de las principales misiones de un sistema de suspensión.

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

Gracias al constante esfuerzo que se realiza en el sector automotriz en I+D+i (investigación, desarrollo e innovación), se están consiguiendo grandes avances en todos los campos. En el caso que nos ocupa, las investigaciones se centran en la incorporación de elementos que pueden variar sus propiedades de amortiguación o las del sistema (suspensiones activas) mejorando así su respuesta. Una configuración posible es emplear fluidos magneto-reológicos. Este tipo de fluidos se caracterizan por su cambio de densidad en presencia de un campo magnético. Esto permite variar la dureza del amortiguador en cada momento para adaptarse mejor a las condiciones del terreno y el tipo de conducción. Todo ello permite una mejora considerable en las prestaciones dinámicas del vehículo automóvil así como un mayor confort y seguridad para los pasajeros que viajan en su interior.

1.1 Objetivo del proyecto

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera es diseñar un modelo inverso basado en redes neuronales que caracterice lo más fielmente posible el comportamiento de un amortiguador magneto-reológico. Este amortiguador es fabricado por la compañía Delphi y equipado en el Audi TT (2011).

Dicha red deberá cumplir dos requisitos básicos para que pueda llegar a implementarse:

- Sencillez del modelo para que los tiempos de procesamiento bajo un entorno informático sean muy bajos.
- Bajas tasas de error.

Para llevar a cabo el presente Proyecto se realizarán una serie de ensayos para obtener datos experimentales que posteriormente y mediante redes neuronales, permitan encontrar el algoritmo adecuado para relacionar los diferentes parámetros del amortiguador, como lo son la amplitud, frecuencia, velocidad y fuerza de su movimiento con la corriente óptima necesaria para modificar las propiedades del fluido magneto-reológico.

Para ello se procederá de la siguiente forma:

- Obtención de datos mediante ensayos experimentales en el laboratorio.
- Análisis preliminar de los datos obtenidos en los ensayos experimentales.
- Diseño de la red neuronal artificial.
- Entrenamiento de las redes neuronales artificiales.
- Validación de los resultados obtenidos.
- Análisis y estudio de los resultados obtenidos.

1.2 Estructura del Proyecto.

El Proyecto se divide en seis capítulos siendo el primero de ellos la presente *Introducción*.

En el segundo capítulo *“La suspensión de un vehículo automóvil”*, se explican las funciones y la importancia del sistema de suspensión, así como los elementos que lo componen y diferentes tipos y clasificaciones de suspensiones que existen.

En el tercer capítulo *“Fluidos magneto-reológicos”*, se describe qué son estos fluidos, cuáles son sus propiedades y algunas de sus aplicaciones en el mundo de la ingeniería.

En el capítulo cuarto *“Redes neuronales artificiales”*, se explica con detalle qué es una red neuronal y cómo funciona, los elementos que la componen y los mecanismos de aprendizaje que existen.

En el quinto capítulo *“Desarrollo práctico y resultados experimentales”*, se detalla ampliamente todo el proceso experimental del Proyecto, desde la toma de datos hasta el análisis de los resultados obtenidos, describiendo también las conclusiones a las que se han llegado.

En el capítulo sexto *“Conclusiones y trabajos futuros”*, se describen las posibles mejoras para la realización de estudios futuros.

Capítulo 2.

El sistema de suspensión

Se dice que algo está suspendido cuando se encuentra colgado de algún soporte por medio de una cuerda, una cadena, etc. Este elemento mediante el cual se suspende algo, recibe el nombre de suspensión. En el caso que nos ocupa, la suspensión de un vehículo automóvil es el conjunto de elementos que actúan entre las masas no suspendidas, siendo éstas ejes y ruedas, y masas suspendidas, como el bastidor, carrocería y pasajeros.

El sistema de suspensión de un vehículo consta de un elemento elástico, generalmente un muelle, encargado de absorber la energía generada en los impactos producidos por las irregularidades del terreno y de un elemento disipativo (amortiguador) cuya misión es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida originadas por el elemento flexible al devolver la energía acumulada del impacto. Estos dos elementos están unidos mediante una geometría sólida, los brazos de suspensión, los cuales dotan a las ruedas de un movimiento controlado y restringido respecto a la carrocería.

2.1 Funciones del sistema de suspensión

La función principal del sistema de suspensión en un vehículo automóvil es absorber las reacciones producidas en las ruedas al pasar sobre las irregularidades del terreno evitando que se transmitan a la carrocería, asegurando de esta forma la comodidad del conductor y de los pasajeros del vehículo y, al mismo tiempo, asegurar el contacto de las ruedas con el suelo para obtener una estabilidad y direccionalidad del vehículo que permita al conductor y sus ocupantes tener un alto grado de seguridad en los desplazamientos realizados.

Cuando un vehículo circula por un terreno irregular (figura 2-1), las ruedas están sometidas a una serie de impactos que son transmitidos a la carrocería a través de los elementos de unión. Si las irregularidades presentes en el terreno son pequeñas, estas son absorbidas por la elasticidad de los neumáticos. En cambio, si las irregularidades existentes son grandes la unión elástica del sistema de suspensión debe ser capaz de absorber dichas irregularidades evitando que se transmitan la carrocería y asegurar el contacto del neumático con el asfalto.



Figura 2-1. Vehículo circulando por un firme irregular.

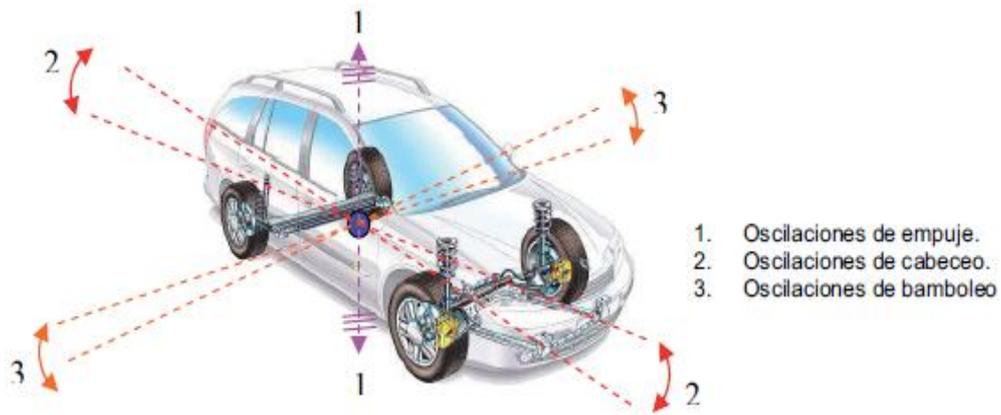


Figura 2-2. Oscilaciones del vehículo.

Se pueden diferenciar tres tipos de oscilaciones (figura 2-2) producidas por las irregularidades del terreno, por una conducción defectuosa o por una carga lateral:

- Empuje: son oscilaciones que se producen en torno al eje vertical y se producen al pasar por un terreno ondulado o con baches (figura 2-3).



Figura 2-3. Oscilación de empuje.

- Cabeceo: son oscilaciones producidas a lo largo del eje transversal del vehículo. Se producen tanto por los defectos que pueda haber en la calzada como en las frenadas y aceleraciones bruscas (figura 2-4).



Figura 2-4. Oscilación de cabeceo.

- Bamboleo o balanceo: son oscilaciones producidas a entorno al eje longitudinal de vehículo y se producen al tomar curvas pronunciadas o a alta velocidad (figura 2-5).



Figura 2-5. Oscilación de balanceo.

El comportamiento del vehículo vendrá determinado en gran medida por el tipo de suspensión que equipe. En este sentido los vehículos pueden ser subviradores o sobreviradores (figura 2-6).

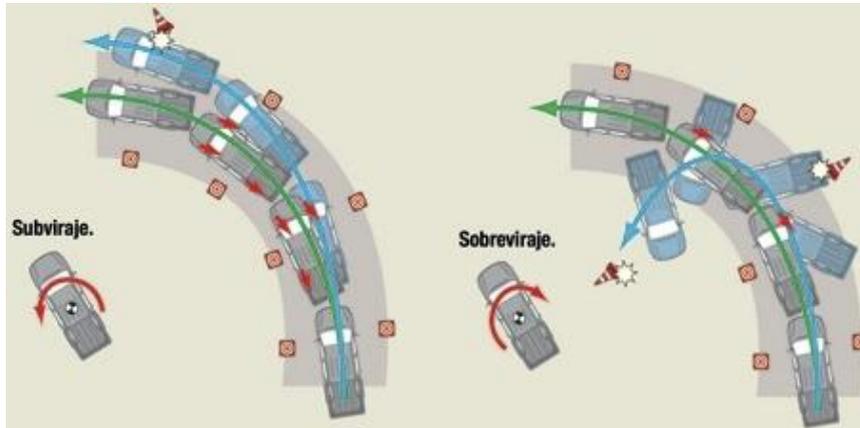


Figura 2-6. Vehículo entrando en subviraje (izquierda) y sobreviraje (derecha).

Se dice que un vehículo es subvirador cuando el vehículo gira menos de lo que se indica con el volante, es decir, que el morro del coche tiende a ir recto y salirse de la curva. Neumáticos con una presión inadecuada y suspensiones muy blandas en el eje delantero pueden acentuar este comportamiento. Este efecto se puede observar en la figura 2-7.



Figura 2-7. Vehículo subvirador.

Un vehículo tiene comportamiento sobrevirador cuando tiene tendencia a girar más de la trayectoria que se le indica con el volante, es decir, la trasera del coche tiende a adelantar al morro del mismo, o a hacer un trompo. Llevar los neumáticos con una presión inadecuada y suspensiones muy blandas en el eje trasero puede acentuar más este comportamiento. En la figura 2-8 se aprecia como el vehículo está sobrevirando al tomar la curva.



Figura 2-8. Vehículo sobrevirador.

Otro cometido del sistema de suspensión es también el de ser el enlace entre las masas que componen el peso del vehículo, pudiendo diferenciarlas en masa suspendida y no suspendida (figura 2-9).

La masa suspendida la integran todos los elementos cuyo peso es soportado por el bastidor o chasis.

La masa no suspendida se puede decir que la conforman los elementos que están permanentemente en contacto con el suelo, como los neumáticos, rodamientos, sistema de frenos, etc. El sistema de suspensión también puede ser considerado como parte de la masa no suspendida, que enlaza con la masa suspendida por medio de un elemento elástico (muelles, ballestas, etc.).

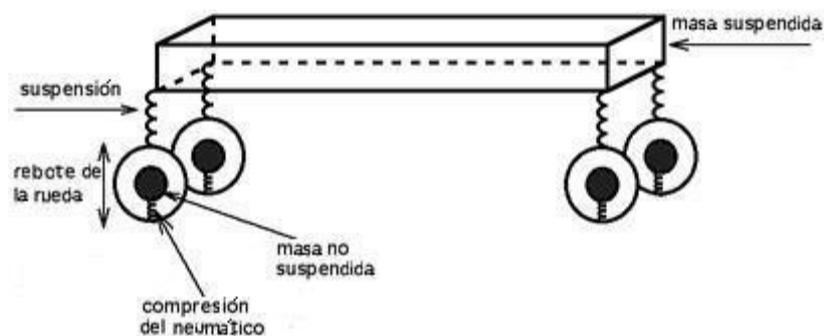


Figura 2-9. Esquema simplificado de las masas suspendidas y no suspendidas.

Es importante controlar la masa no suspendida del vehículo para mejorar su comportamiento. Por ejemplo, al atravesar un bache o una imperfección de la superficie de la carretera el neumático se comprime, generando una fuerza sobre la masa no suspendida. Después, responde a dicha fuerza con un movimiento propio, inversamente proporcional a su peso. Así, una rueda ligera actúa más rápido que una pesada frente a un bache, y tendrá más agarre al circular sobre esa superficie. Por esa razón, las ruedas ligeras se suelen utilizar en competición. En contraste, una rueda pesada que se mueva menos y más lentamente no absorberá tantas vibraciones, las irregularidades del asfalto se transfieren a la cabina, deteriorando así la comodidad. Es decir, a mayor masa no suspendida, más fuerza se tiene oponiéndose al movimiento natural de la suspensión.

Para reducir la masa no suspendida del vehículo y así mejorar su comportamiento, se pueden sustituir las llantas comunes de acero por otras más ligeras de aleación de aluminio y la tornillería que la sujeta puede ser de aluminio. Los frenos se podrían sustituir por unos cerámicos, que además tienen mejor rendimiento.

Para cumplir todos los objetivos anteriormente citados, la suspensión deberá tener dos propiedades importantes:

- Elasticidad: evita que las desigualdades del terreno se transmitan al vehículo en forma de golpes secos.
- Amortiguación: impide un balanceo excesivo de la carrocería y mantiene los neumáticos en contacto con el terreno.

Además, es necesario que el sistema de suspensión cumpla con otras funciones complementarias:

- Transmitir las fuerzas de aceleración y de frenada entre los ejes y bastidor.
- Resistir el par motor y de frenada junto con las aceleraciones producidas en las curvas.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido.
- Conservar el paralelismo entre los ejes y la perpendicularidad del bastidor.
- Proporcionar una estabilidad adecuada ante el balanceo.
- Soportar el peso y la carga del vehículo.
- Mantener la altura óptima del vehículo.

2.2 Estudio de las vibraciones en el diseño de la suspensión

Los automóviles viajan a elevada velocidad y, por ello, están sometidos a un amplio espectro de vibraciones. Estas vibraciones se transmiten a los pasajeros, por lo que deben ser analizadas para que no interfieran en el confort ya que es un criterio fundamental a la hora de juzgar el diseño de un vehículo. El origen de estas vibraciones puede ser externo al vehículo, como las debidas a las irregularidades del terreno, o intrínseco al vehículo como son los conjuntos llantas/neumáticos, el sistema de tracción/transmisión, el motor y las acciones aerodinámicas.

Existen muchos estudios e investigaciones realizadas para determinar el rango de frecuencias de vibraciones a las que el cuerpo humano responden con síntomas de fatiga, malestar, etc. al conducir o circular en un vehículo. Los dos factores más influyentes son el tiempo de oscilación o la frecuencia y la amplitud de las oscilaciones.

TABLA 2-1. CONFORT SEGÚN LA FRECUENCIA Y AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES [3].

Período oscilación [s]/ Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm]	Sensación de confort	Tolerancia física
0,2/5	10	Muy mala	Intolerable
0,4/2,5	40	Muy mala	Intolerable
0,5/2	62,5	Suspensión seca (sport)	Tolerable poco tiempo
0,9/1,1	200	Confortable	Tolerable indefinidamente
1/1	250	Confortable	Tolerable indefinidamente
1,26/0,8	400	Excesivamente confortable	Tendencia al mareo

Como se deduce de la tabla 2-1, los periodos de oscilación de la suspensión comprendidos entre 0,5 y 1 segundos (1-2 Hz) son tolerados por el pasajero sin perjuicio para la sensación de confort ya que esos valores corresponden al del balanceo normal del cuerpo humano al caminar normalmente. Por debajo de este periodo (oscilación más rápida), las aceleraciones verticales que sufre el cuerpo son intolerables con una utilización continuada del vehículo, pudiendo producir pérdida de

equilibrio, mareo y vértigos. Por el contrario, superado el periodo de un segundo (1 Hertzio), la sensación que siente el pasajero, es tan lentamente acompasada que puede llegar a producir mareo.

Durante el diseño de un sistema de suspensión a parte de la elasticidad y amortiguamiento hay que considerar otros aspectos que afectan directamente a la estabilidad y confort del propio automóvil, como la resonancia y la amortiguación crítica:

- Resonancia

Una suspensión entra en resonancia cuando la frecuencia de la masa suspendida coincide con la frecuencia producida por las oscilaciones de la carretera, llegando, en teoría, a amplificar infinitamente la amplitud, siendo esto totalmente incompatible con el confort y con la seguridad ya que la rueda podría perder el contacto con el suelo.

Para que una suspensión entre en resonancia basta con que las oscilaciones estén formadas a distancias simétricas, o que no más de dos accidentes de la carretera se tarden en recorrer el mismo tiempo que el periodo de oscilación de la propia suspensión.

Para evitar este fenómeno es necesario instalar un amortiguador cuya misión es disipar la energía potencial acumulada en el elemento elástico, evitando que el sistema de suspensión entre en resonancia.

- Amortiguación crítica

Otra forma de comprobar el confort y la estabilidad de un vehículo es en función del valor de la amortiguación que tenga el vehículo respecto a la amortiguación crítica.

Una amortiguación es crítica cuando ante una compresión de la suspensión hasta el final de su recorrido y se suelta repentinamente la amortiguación impide una nueva oscilación. Es decir, la amortiguación crítica es aquella bajo la cual, al comprimir la suspensión hasta el final de su recorrido y soltarla, no se produce la menor oscilación debido a que la fuerza de amortiguación es superior a la energía potencial acumulada por el muelle en la compresión.

En la tabla 2-2 se presentan los valores porcentuales de la amortiguación crítica sobre la amortiguación total del vehículo. Si un sistema de suspensión se aproxima más al valor crítico menos confortable será el vehículo pero, en cambio, será más estable. Este efecto, como es de esperar, también ocurre de forma inversa.

TABLA 2-2. AMORTIGUACIÓN CRÍTICA [3].

Tipos de suspensión	Compresión [%]	Extensión [%]	Amortiguación crítica [%]
Coche cómodo	25-30	75-70	15-25
Semideportivo	30-35	70-65	25-30
Deportivo	40-45	65-60	30-35
Competición	50-60	50-40	35-40

De la tabla 2-2 se puede deducir que un menor porcentaje de la amortiguación crítica indica que la amortiguación total del vehículo se encuentra en el extremo opuesto a la amortiguación crítica, es decir, permite algunas oscilaciones y, por lo tanto, más confortable será, aunque el vehículo es menos controlable desde el punto de vista de la amortiguación, y más difícil su utilización en una conducción deportiva.

En la figura 2-10, la curva de línea continua corresponde a la oscilación de un sistema de masa suspendida sometido a la oscilación de un muelle de rigidez K amortiguado. La curva de trazos se corresponde con la amortiguación crítica.

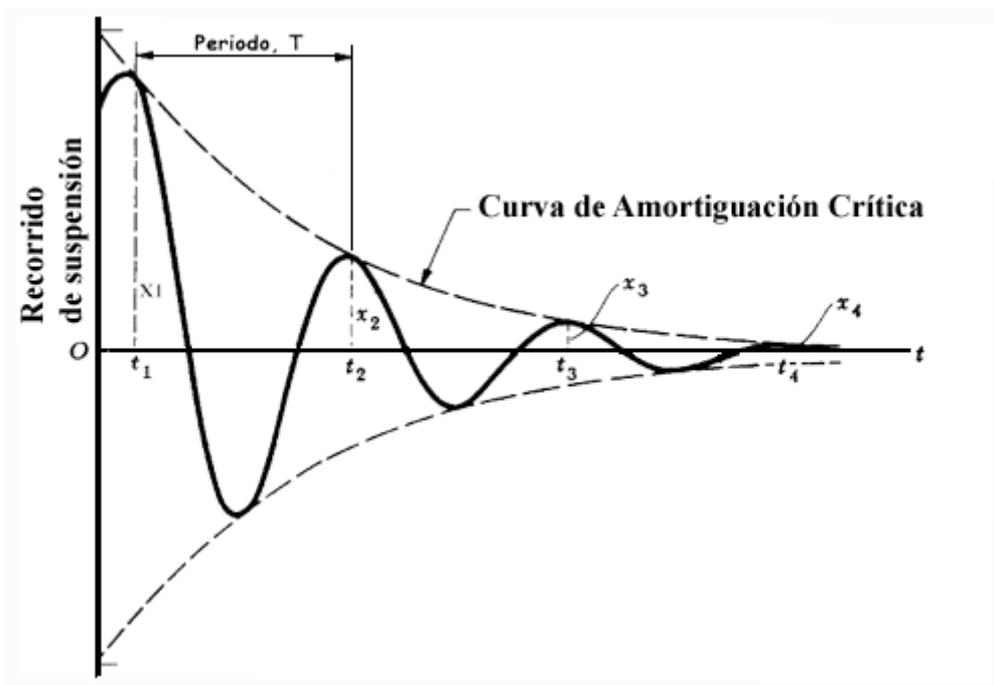


Figura 2-10: Curva de amortiguación crítica.

Por tanto, para evitar que aparezcan fenómenos como los descritos anteriormente, en el diseño del sistema de suspensión se deben tener en cuenta los siguientes parámetros [3]:

- Correcto cálculo de sus parámetros de elasticidad para evitar que tengan lugar rebotes demasiado duros cuando se absorben las irregularidades del terreno. La elasticidad de un sistema de suspensión depende principalmente del elemento elástico y del peso suspendido.
- Determinar el coeficiente de amortiguación óptimo, de forma que no se produzcan oscilaciones elevadas cuando el sistema entre en funcionamiento.

2.3 Componentes de la suspensión

En un sistema de suspensión, los elementos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Elementos elásticos, tales como muelles helicoidales, ballestas o barras de torsión.
- Elementos de amortiguación, de fricción e hidráulicos.
- Elementos constructivos, como los *silentblocks*, brazos o rótulas.

2.3.1 Elementos elásticos

La misión de los elementos elásticos es impedir que las oscilaciones del terreno lleguen a la carrocería en forma de golpes, mejorando el confort y la seguridad del vehículo al asegurar el contacto de las ruedas con el terreno, mejorando la estabilidad y la capacidad para dirigir el vehículo.

Elementos elásticos como los muelles, las ballestas o las barras de torsión están fabricados con acero de alta calidad, confiriéndole la elasticidad deseada mediante diversos tratamientos. Por el contrario, tienen poca capacidad de absorción de energía mecánica, por lo que no pueden ser montados solos en la suspensión y se montan siempre con un amortiguador de doble efecto que frena tanto su compresión como expansión debido a las oscilaciones producidas en su deformación.

2.3.1.1 Ballestas

Las ballestas actúan como un resorte de flexión. Son capaces de soportar esfuerzos de flexión y cortantes y poseen un determinado amortiguamiento propio debido a la fricción que se produce entre las hojas cuando se flexionan. En la figura 2-11 se puede ver una ballesta trabajando en un vehículo todoterreno.

Las ballestas están formadas por un conjunto de láminas de acero resistente y elástico, unidas mediante unas abrazaderas que permiten el deslizamiento entre las láminas cuando estas se deforman por el peso que soportan.



Figura 2-11. Ballesta montada en un vehículo todoterreno.

La hoja superior de las ballestas se denomina hoja maestra. Sirve de guía de los muelles así como de los ejes, suele ser más larga y gruesa que las demás hojas y en los extremos posee unos terminales llamados ojos en los que se montan unos casquillos de bronce para su acoplamiento al soporte del bastidor por medio de unos pernos o bulones.

Las hojas se unen mediante abrazaderas y un eje rígido o perno capuchino. Debido a la deformación elástica que se produce en la ballesta no pueden unir de forma rígida al vehículo, se fijan a través de un dispositivo llamado gemela.

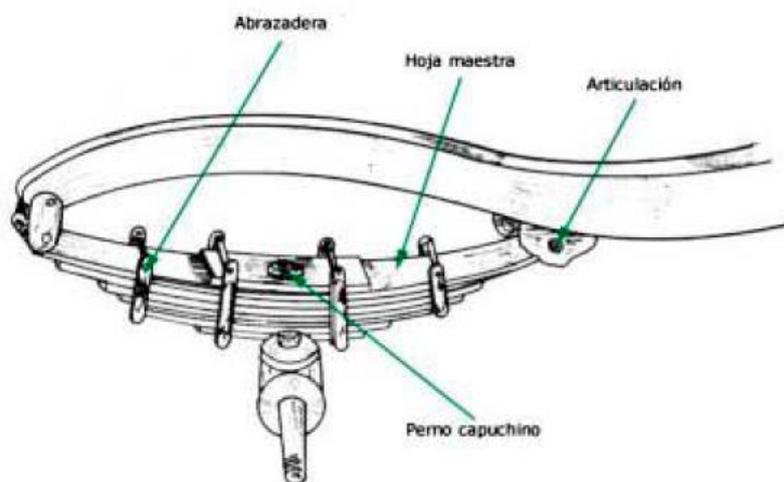


Figura 2-12. Elementos que forman una ballesta.

Como se puede observar en la figura 2-12, las hojas van disminuyendo escalonadamente de longitud desde las superiores (más largas) a las inferiores (más cortas). La razón para este escalonamiento es conseguir una resistencia a la flexión aproximadamente uniforme en todas las secciones de la ballesta.

Las principales ventajas que aportan las ballestas son:

- Sólo se deforman en el sentido vertical y no en el horizontal, por lo que al usarlas, los puentes se mantienen alineados sin otros elementos.
- Transmiten la propulsión y tracción.
- Son de fácil construcción y baratas.

Sin embargo, su principal inconveniente es que en el eje delantero limitan el ángulo de orientación de la rueda y son relativamente pesadas. Además requieren limpieza y lubricación en los extremos de las hojas para que no se endurezca la suspensión.

Aunque han sido el resorte más utilizado en todo tipo de vehículos, en la actualidad su uso ha quedado reducido a vehículos todo terreno e industriales debido a su gran capacidad de carga.

2.3.1.2 Barras de torsión

Las barras de torsión son un tipo de resorte utilizado en algunos turismos con suspensión independiente. Está basado, como se puede ver en la figura 2-13, 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 2-13. Principio de funcionamiento de una barra de torsión.

Las barras de torsión se montan sobre el vehículo fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería, de forma que no puedan 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 (figura 2-14).



Figura 2-14. Unión de la barra estabilizadora al vehículo.

Las ruedas suben o bajan por efecto de las desigualdades del terreno, produciendo en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda.

En un gran número de turismos modernos se utilizan barras de torsión como elementos elásticos, especialmente en suspensiones independientes.

2.3.1.3 Barras estabilizadoras o anti-vuelco

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 que la carrocería tiende a inclinarse hacia ese lado con peligro de vuelco como se aprecia en la figura 2-15. Este tipo de oscilación del vehículo es conocido como bamboleo o balanceo (ver sección 2.1).

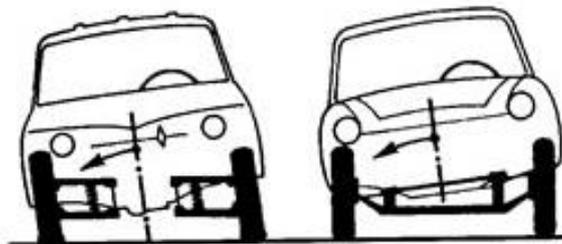


Figura 2-15. Efecto de la barra estabilizadora al trazar una curva.

Para evitar este fenómeno, pueden montarse sobre los ejes delantero y trasero las barras estabilizadoras, que consisten en una barra de acero elástico en forma de “U” 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 (figura 2-16).

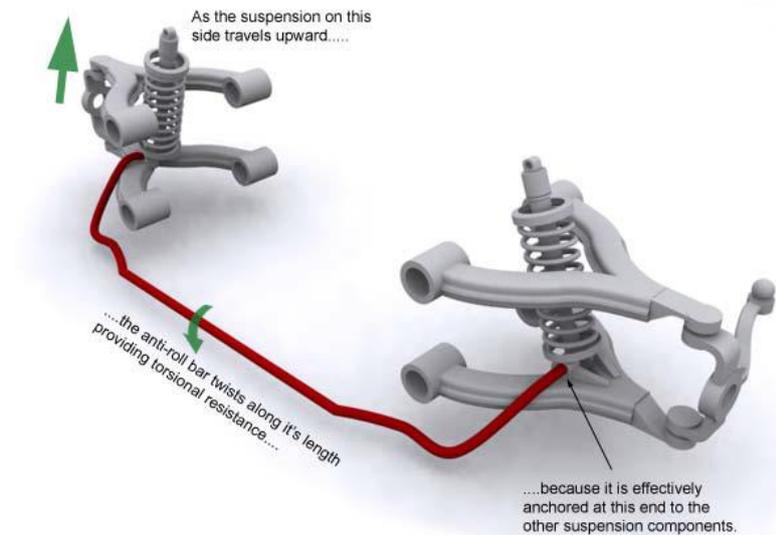


Figura 2-16. Funcionamiento de una barra estabilizadora.

2.3.1.4 Muelles helicoidales

Los muelles o resortes helicoidales son en la actualidad los más utilizados en los automóviles. Se emplean tanto en la suspensión delantera como la trasera y ofrecen la ventaja de conseguir una elasticidad blanda debido al gran recorrido del resorte sin apenas ocupar espacio ni sumar peso.

Estos muelles (figura 2-17) consisten en un arrollamiento helicoidal de acero elástico formado por un hilo de diámetro variable en función de la carga que tienen que soportar. Sus propiedades elásticas dependen del diámetro de la espira, de la distancia entre espiras (paso de la espira), y del diámetro y las propiedades del hilo utilizado. Las últimas espiras son planas para facilitar el asiento del muelle sobre sus bases de apoyo.

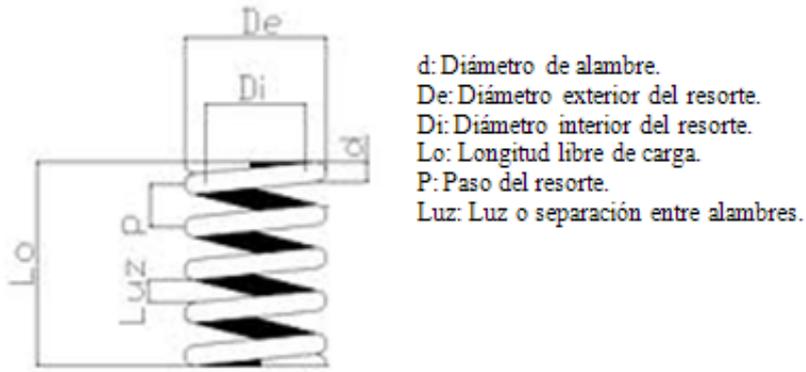


Figura 2-17. Partes de un resorte.

Las espiras de un muelle helicoidal no deben hacer contacto entre sus espiras; es decir, que la deformación tiene que ser menor que el paso del muelle por el número de espiras para no alcanzar la longitud de bloque. De ocurrir lo contrario, el efecto del muelle desaparece convirtiéndose en una unión rígida y las sacudidas por la marcha del vehículo se transmiten de forma directa al chasis, lo que sería perjudicial para los integrantes y las piezas del vehículo.

La rigidez del resorte es distinta para cada automóvil (figura 2-18) e incluso en algunos casos es distinta de lado derecho al izquierdo, por lo que es necesario calcular la compatibilidad. Los muelles están diseñados para soportar carga en dirección longitudinal, y proporcionar al mismo tiempo una conducción confortable.

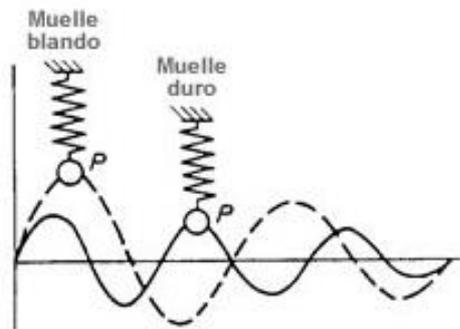


Figura 2-18 Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones.

Los muelles helicoidales no pueden transmitir esfuerzos laterales, por lo que es necesario el montaje de bielas de empuje lateral y transversal para la absorción de las reacciones de la rueda. 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.

Como se puede observar en la figura 2-19, los muelles helicoidales (R) son colocados de forma vertical entre los largueros del bastidor. Las bielas de empuje (B) fijan el eje trasero respecto al bastidor mediante un travesaño (T).

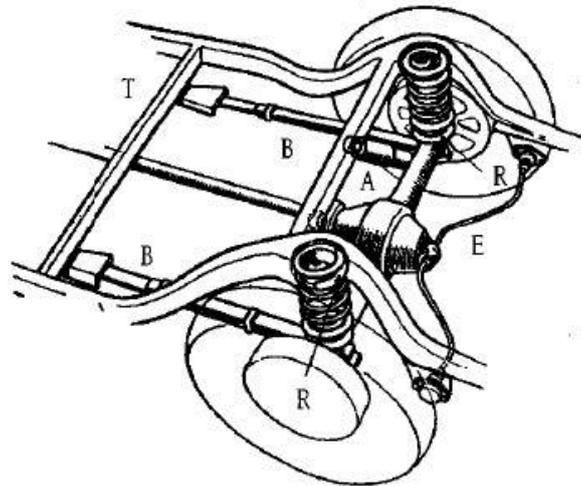


Figura 2.19. Disposición de los muelles helicoidales.

En la figura 2-20 puede apreciarse de forma gráfica las tres posiciones de carga del muelle: sin montar, montado en el vehículo y el muelle bajo la acción de la carga.

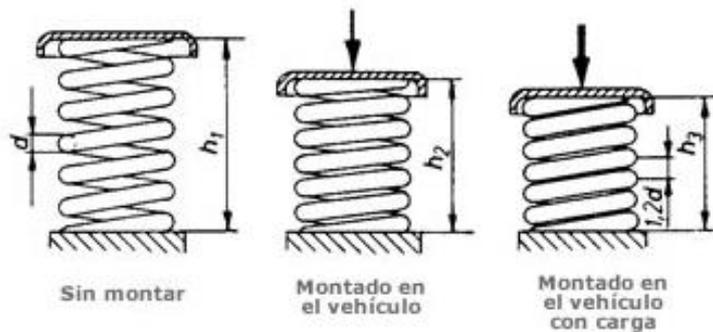


Figura 2-20. Posiciones del muelle.

2.3.2 Elementos de amortiguación

Los elementos elásticos descritos en el apartado anterior, al deformarse vuelven a su posición inicial experimentando una serie de oscilaciones de amplitud decreciente. Como se ha visto en el apartado 2.3.1 los elementos elásticos tienen excelentes propiedades elásticas pero poca capacidad de absorción de energía mecánica, en especial los muelles helicoidales y las barras de torsión, por lo que es necesario montar un elemento de amortiguación que frene el número de oscilaciones, su amplitud y su frecuencia producidas en su deformación.

Por tanto, la función del amortiguador es la de disipar la energía acumulada por los elementos elásticos, cuando estos se deforman, de la manera más suavizada pero a la vez más rápida posible. El amortiguador disipa en forma de calor la energía cinética de la suspensión para permitir que el conjunto vuelva a su posición neutra de forma controlada, evitando el rebote del neumático y la pérdida de control del vehículo.

A continuación, se describirán los amortiguadores de fricción y telescópicos, que engloban al amortiguador monotubo y al bitubo.

2.3.2.1 El amortiguador de fricción

Los amortiguadores de fricción se usan muy poco en la actualidad. 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 dos brazos se enlaza a la rueda y el otro al bastidor, de manera que con las oscilaciones del elemento elástico se pueda producir el frotamiento entre los discos que genera la acción de frenado. La figura 2-21 muestra dos ejemplos de amortiguador de fricción común [4].

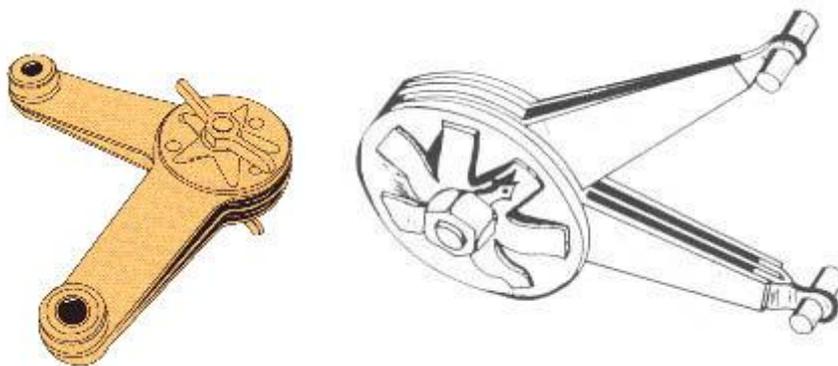


Figura 2-21. Amortiguadores de fricción.

Los inconvenientes que presentan los amortiguadores de fricción son:

- Una vez superada la fuerza de fricción que ejercen estos amortiguadores, la fuerza amortiguadora disminuye en vez de aumentar con la velocidad, como sería deseable.
- Su comportamiento se altera con el desgaste.
- Es necesario reponer las piezas desgastadas periódicamente.

2.3.2.2 El amortiguador hidráulico

Los amortiguadores hidráulicos constituyen el presente en cuanto a elementos amortiguadores de las suspensiones de los vehículos. En estos, la fuerza disipativa es función de la velocidad.

Aunque han existido otros tipos de amortiguadores hidráulicos, como son los giratorios y los de pistón, los que actualmente se utilizan son los de tipo telescópico. Básicamente constan de un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite. Sobre el pistón existen dos tipos de válvulas (de apertura por área y de apertura por presión, figura 2-22) que permiten el paso de aceite de una parte a otra cuando la presión supera un valor establecido por diseño.

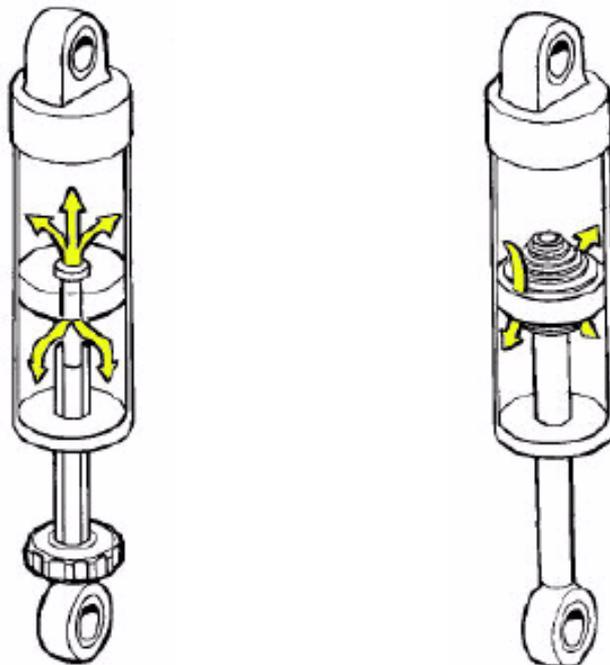


Figura 2-22. A la izquierda, flujo de aceite a través de válvula de apertura por área. A la derecha, flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión.

Las válvulas de apertura por área son orificios fijos (salvo cuando se trata de un amortiguador monotubo regulable) que restringen el paso del caudal; mientras que las válvulas de apertura por presión consisten en unas láminas sobre las que es necesario ejercer una determinada presión para que se abran y a medida que esta aumenta la apertura va siendo mayor.

Cuando la velocidad entre ambos extremos del amortiguador es baja, la válvula de apertura por presión permanece cerrada y el aceite pasa a través de los orificios de apertura por área. Una vez que la presión del aceite alcanza la de tarado de la válvula de presión, esta empieza a abrirse y deja pasar el aceite.

Lo normal es que las válvulas de extensión y compresión sean diferentes posibilitando, de esta forma, que el esfuerzo en compresión sea menor para una misma velocidad, característica que interesa utilizar en los vehículos de carretera para evitar la transmisión a través del amortiguador de las grandes fuerzas compresivas que se generarían en el mismo cuando la rueda se encuentra con un obstáculo.

Existen fundamentalmente dos tipos de amortiguadores hidráulicos telescópicos; los de doble tubo, o bitubo, y los de un solo tubo, o monotubo [4].

2.3.2.2.1 El amortiguador bitubo

Los amortiguadores de doble tubo son los más comunes en la actualidad y los hay de dos tipos: presurizados y no presurizados. Los primeros tienen aceite y gas mientras que los segundos solo aceite.

Como se puede observar en la figura 2-23, un amortiguador bitubo está formado por un cilindro interior concéntrico y solidario con un tubo o cilindro exterior, formando entre ambos la cámara de reserva de aceite. La parte inferior del cilindro está cerrada y se comunica con la cámara de reserva mediante la válvula de pie o fondo. En el interior del cilindro, totalmente lleno de aceite se desplaza el pistón de trabajo o émbolo que está unido al vástago, este a su vez es portador, en este caso, del *silentblock* a través del cual se fija a la carrocería y tubo protector.

El amortiguador se une al brazo de la suspensión mediante otro *silentblock* solidario al cilindro exterior. Por lo que el cilindro sigue las oscilaciones de la rueda y el émbolo, y a través del vástago, las de la carrocería.

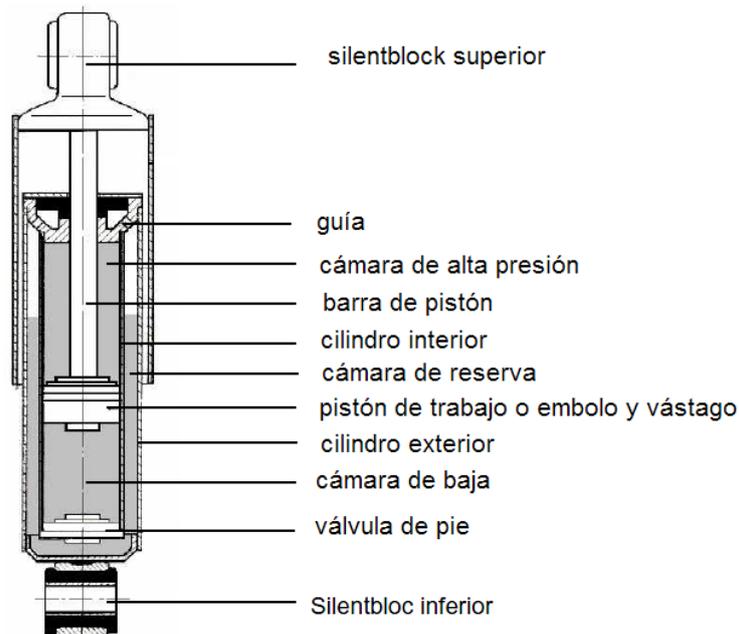


Figura 2-23 Elementos de un amortiguador bitubo.

El funcionamiento del amortiguador es el siguiente: cuando disminuye la distancia entre la carrocería y la rueda, el émbolo se desplaza hacia abajo en relación al cilindro, comprimiendo el aceite en la cámara de baja presión, que es obligado a pasar a la cámara de alta presión a través de la válvula del émbolo.

Como la reducción del volumen en la cámara de baja presión es mayor que el aumento en la cámara de alta presión ya que parte del aceite pasa por la válvula de fondo dirigiéndose hacia la cámara de reserva. Se puede decir que el mismo proceso sucede cuando la distancia entre la carrocería y la rueda se alarga, con la diferencia que en esta ocasión el aceite desalojado anteriormente hacia la cámara de reserva, vuelve a la cámara de baja presión a través de la válvula de fondo.

La amortiguación se produce al ser frenado el émbolo por el paso del aceite de una cámara a la otra a través de las válvulas.

En el mercado existen dos tipos de amortiguadores según el fluido de amortiguación:

- No presurizados (aceite).
- Presurizados (con aceite y gas).

Los amortiguadores no presurizados tienen la desventaja de que se pueden formar en ellos bolsas de aire bajo las siguientes condiciones:

- El amortiguador se almacena o transporta horizontalmente antes de ser instalado.
- La columna de aceite de la cámara principal cae por gravedad cuando el vehículo permanece estático durante mucho tiempo.
- El aceite se contrae como consecuencia de su enfriamiento al final de un viaje succionado aire hacia la cámara principal.

Los amortiguadores presurizados son uno de los más utilizados en los vehículos cuando se busca mejorar las prestaciones de los amortiguadores de doble tubo convencionales. La solución consiste en añadir una cámara de gas de baja presión, 4 bares es una presión suficiente, ya que la fuerza amortiguadora en compresión la sigue proporcionando la válvula de fondo.

De esta forma, la fuerza de extensión realizada por el amortiguador en su posición nominal es baja.

Las ventajas de estos amortiguadores respecto a los no presurizados son:

- 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.

2.3.2.2.2 El amortiguador monotubo

Los amortiguadores hidráulicos monotubo aparecieron más tarde que los bitubo pero su uso es cada vez más extendido, principalmente en vehículos de altas prestaciones y en competición. Constan de dos cámaras principales. Una contiene el aceite y la otra el gas a presión. El gas utilizado por lo general suele ser nitrógeno, debido a que no reacciona con el aceite y no presenta grandes cambios en sus propiedades por efecto del calor generado. Ambas cámaras están separados por un pistón en el cual están situadas las válvulas.

En la figura 2-24 se muestra un esquema simplificado de un amortiguador monotubo.

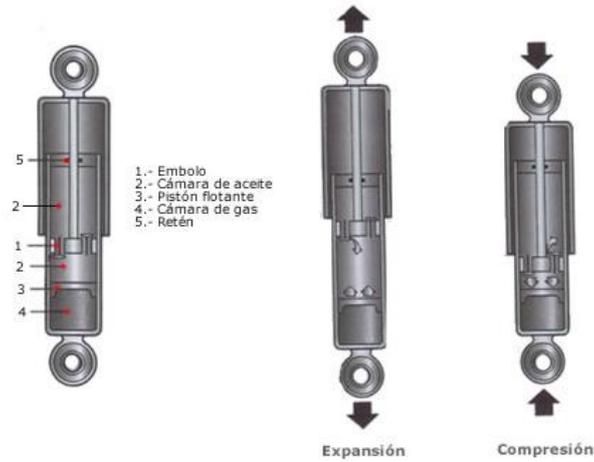


Figura 2-24. Esquema simplificado de un amortiguador monotubo.

En cuanto a su funcionamiento, cuando disminuye la distancia entre la carrocería y la rueda se produce la carrera de compresión. Al empujar el vástago hacia dentro la presión que ejerce el aceite sobre el pistón flotante hace que la zona del gas se comprima, aumentando la presión en ambos lados, por lo que el aceite se ve obligado a pasar a través de las válvulas del pistón. La resistencia que oponen dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento.

En el caso de que aumente la distancia entre la carrocería y la rueda, se tiene la carrera de expansión. Al tirar del vástago hacia fuera el aceite que queda por encima del pistón se comprime y pasa a través de las válvulas que hay en él. La resistencia que el aceite encuentra en dichas válvulas es la fuerza de amortiguamiento de extensión.

Los amortiguadores monotubo tienen algunas ventajas respecto de los bitubo no presurizados:

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire.
- Mayor diámetro del pistón a igual diámetro de carcasa, lo que permite reducir las presiones de operación.
- El nivel de aceite no baja al quedar estacionado el vehículo.
- Debido a la presurización, el aceite no forma espuma, evitando problemas de cavitación.

Como desventajas se pueden citar las siguientes:

- Mayores costos derivados de requerimientos superiores de precisión, tolerancia y estanqueidad del gas.
- Las válvulas son más complejas.
- Su mayor necesidad de espacio puede aumentar su longitud por encima de los 100 mm en aplicaciones de automóviles.

2.3.2.2.3 Diferencias entre amortiguador bitubo y monotubo

Los amortiguadores monotubo presentan algunas ventajas con respecto a los bitubo no presurizados (figura 2-25):

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire. Esto se traduce en una mayor eficacia, pues hay que tener en cuenta que el amortiguador es un dispositivo que convierte la energía cinética en energía calorífica.
- Mayor diámetro de pistón a igual diámetro de carcasa, lo que permite reducir las presiones de operación.
- El nivel de aceite no baja al quedar el vehículo estacionado (problema que ocasiona bolsas de aire).
- El aceite no forma espuma debido a la presurización, evitando problemas de cavitación y resultando un buen amortiguamiento incluso con pequeñas vibraciones de alta frecuencia.
- Gracias al pistón separador no queda restringida la posición de montaje, pudiéndose colocar incluso horizontalmente.

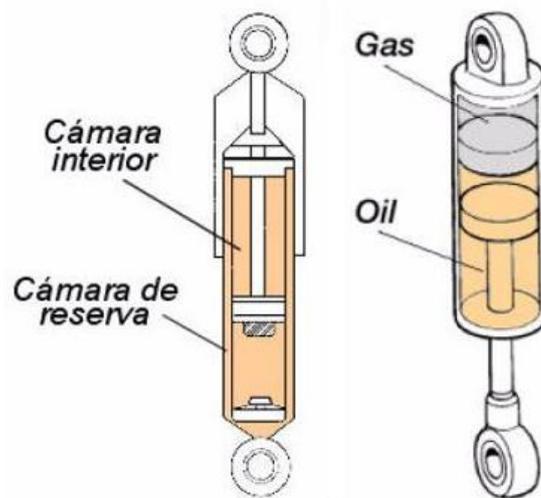


Figura 2-25. A la izquierda, diagrama de un amortiguador bitubo. A la derecha, uno monotubo.

Como desventajas se podrían citar:

- Mayores costos derivados de requerimientos de precisión, tolerancias de fabricación y estanqueidad del gas.
- La valvulería es más compleja.
- Su mayor necesidad de espacio puede aumentar su longitud por encima de 100 mm en aplicaciones a automóviles.
- Debido a la presión interna del gas y a la diferencia de áreas efectivas a ambos lados del pistón la fuerza de extensión que realizan en su posición nominal puede provocar variaciones en la altura de suspensión.

2.3.2.3 Neumáticos

Por último, se va a incluir el neumático como elemento de amortiguación aunque no sea su principal cometido. El neumático es considerado uno de los elementos más importantes del automóvil, debido a que tiene que soportar el peso del vehículo, las fuerzas de inercia producidas en las distintas aceleraciones y debe transmitir el par producido por el motor al firme. Todo ello produce grandes esfuerzos tangenciales en la banda de rodadura, y además, es el encargado de mantener la trayectoria del vehículo en las ruedas directrices.

El neumático debe estar en permanente contacto con el suelo. Esto hace que sea el primer elemento del vehículo que entra en contacto con el asfalto y por tanto, con los baches e irregularidades del terreno. Debido a su baja elasticidad sólo absorbe las pequeñas irregularidades del terreno, como por ejemplo las juntas de dilatación de los puentes o tramos bacheados (figura 2-26) ejerciendo como un elemento más del sistema de suspensión.



Figura 2-26. Neumático atravesando una irregularidad del asfalto.

Este fenómeno se debe a las propiedades físicas de los componentes del neumático, que tras comprimirse al recibir el impacto del bache, vuelven a extenderse. Cierto es que no vuelven a la misma posición ya que se ha producido una pérdida de energía que se ha transformado en calor para el neumático, pero la disminución del golpe para los resortes de suspensión se ve disminuida gracias a esta propiedad.

2.3.3 Elementos constructivos y de unión

Además de los elementos de amortiguación y elásticos, el sistema de suspensión necesita elementos de unión entre sus elementos, las ruedas y el bastidor.

La función de estos elementos es absorber los esfuerzos de tracción del motor y transmitirlos a la carrocería, así como los esfuerzos del eje directriz y los esfuerzos producidos de la conducción.

2.3.3.1 *Silentblocks*

Los *silentblocks* son unos casquillos de goma que se utilizan para unir los puntos donde el chasis del vehículo se une a un componente móvil de la suspensión, como los brazos, la barra estabilizadora, etc. de forma que no existan piezas móviles en contacto. Están preparados para absorber el ruido y las vibraciones entre la carretera y el conductor. Deben conseguir un buen aislamiento y permitir que las suspensiones trabajen correctamente.

Los casquillos presentan la ventaja de tener un buen mantenimiento y buena amortiguación propia. A su vez presenta algunos inconvenientes como ser muy sensible al aceite, compuestos químicos y a la temperatura. En la figura 2-27 se muestra la imagen de los diversos *silentblocks* montados en una suspensión.

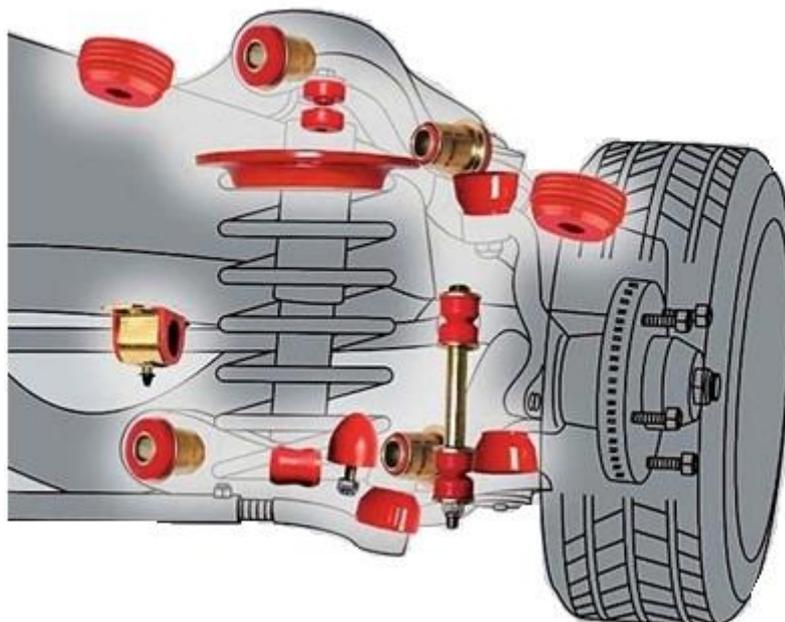


Figura 2-27. *Silentblocks* equipados en una suspensión.

2.3.3.2 Rótulas

Las rótulas constituyen un elemento de unión y fijación de la suspensión y de la dirección, que permiten el pivotamiento y giro de los extremos de la barra de dirección manteniendo la geometría de las ruedas. Su fijación suele realizarse mediante tornillos. En la figura 2-28 se pueden ver dos rótulas montadas en un *quad*. La flecha amarilla señala la rótula del trapecio superior de la suspensión y la flecha roja, la rótula de la dirección.

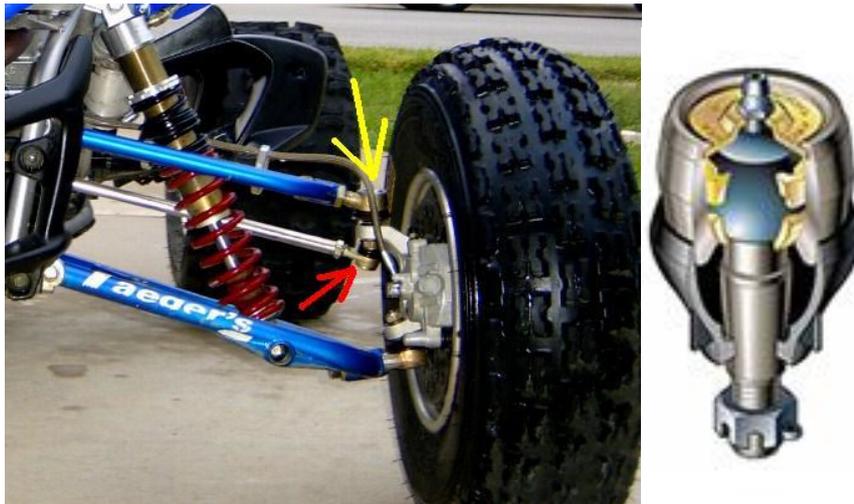


Figura 2-28. Rótulas montadas en un *quad*.

2.3.3.3 Mangueta y buje

La mangueta de la suspensión es una pieza fabricada con acero o aleaciones que une el buje de la rueda y la rueda a los elementos de la suspensión, tirantes, trapecios, amortiguador, etc. La mangueta se diseña teniendo en cuenta las características geométricas del vehículo. En el interior del buje se montan los rodamientos o cojinetes que garantizan el giro de la rueda. En la figura 2-29 se puede apreciar la vista explosionada del conjunto.

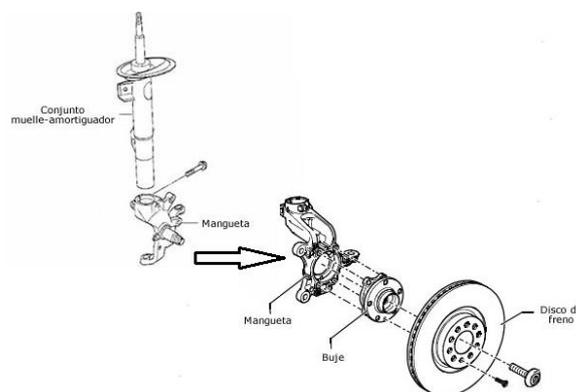


Figura 2-29. Mangueta y buje de la suspensión.

2.3.3.4 Brazos o trapecios de suspensión.

Los brazos de suspensión son, como su nombre indica, brazos articulados fabricados en acero estampado, forjado o de aluminio que soportan al vehículo a través de la suspensión. Son los acoplamientos que conectan la mangueta y su buje mediante elementos elásticos (*silentblocks*) y elementos de guiado (rótulas) al vehículo, como se muestra en la figura 2-30, soportando los esfuerzos generados por éste en su funcionamiento.

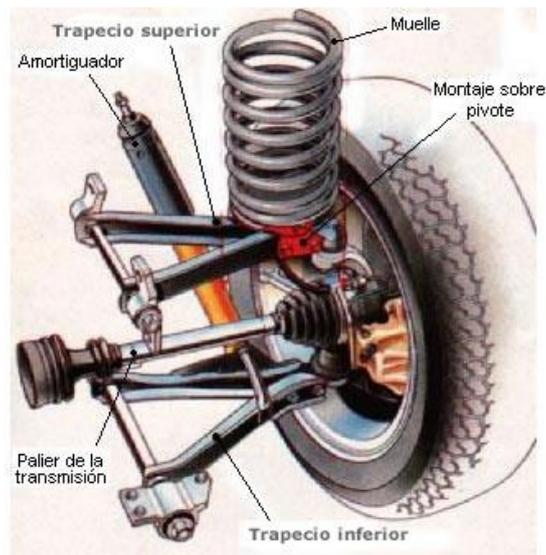


Figura 2-30. Brazos de suspensión.

2.3.3.5 Tirantes de suspensión

Los tirantes de suspensión son brazos de acero longitudinales o transversales situados entre la carrocería y la mangueta o trapezio que sirven como sujeción de estos y facilitan su guiado. Absorben los desplazamientos y esfuerzos de los elementos de la suspensión a través de los *silentblocks* o cojinetes elásticos montados en sus extremos.

Existen dos tipos de disposiciones constructivas *pull-rod* (*pull*=tirar), que es la de tirantes, que permite que el brazo sea más delgado, pues solo trabaja a tracción y la *push-rod* (*push*=empujar), cuyo brazo trabaja a compresión, por lo que debe ser más robusta para evitar el pandeo (que se doble).

En la figura 2-31 se muestra esas dos posibles configuraciones de suspensión sobre un monoplaza de Fórmula 1.

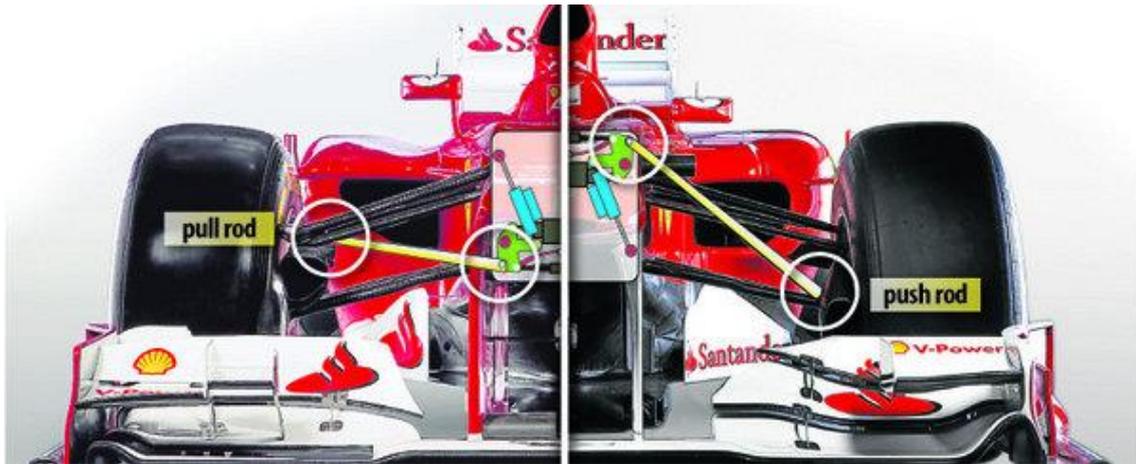


Figura 2-31. Suspensión delantera de un monoplaza de Fórmula 1.

2.3.3.6 Topes de suspensión

Su función es servir de tope para el conjunto de la suspensión, de manera que en una compresión excesiva esta no se detiene. El montaje de este elemento es muy diverso dependiendo de la forma del taco. En las suspensiones McPherson (figura 2-32) se monta en el interior del vástago del amortiguador, mientras que en las suspensiones por ballesta se suele montar anclado en la carrocería.

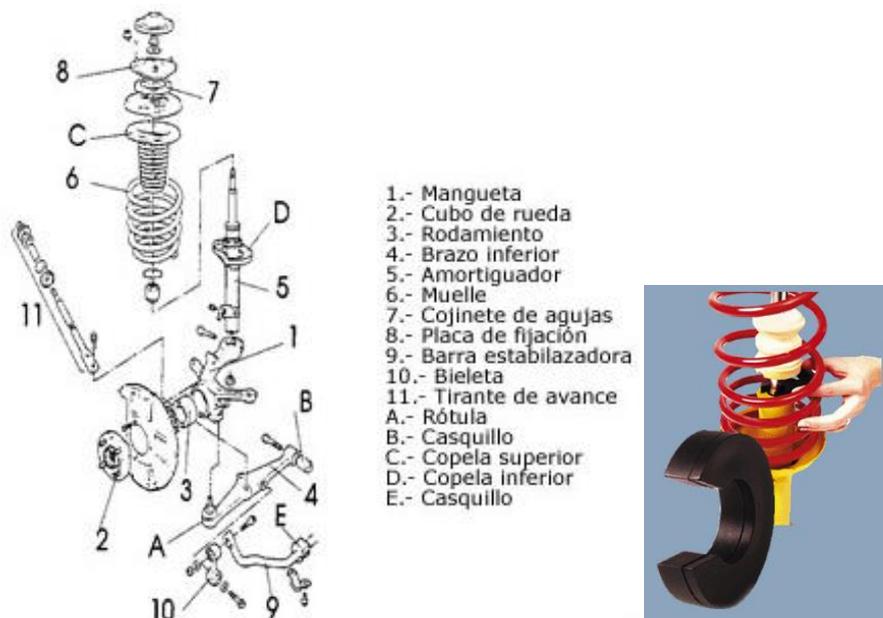


Figura 2-32. Tope en suspensión Mcpherson.

2.4 Tipos de suspensión

Existen muchos criterios para la clasificación de los sistemas de suspensión, debido a que se pueden clasificar según la geometría, del elemento amortiguador, componentes que forman la amortiguación, sistemas de control, etc.

En este proyecto se hará referencia a dos tipos de clasificaciones. La primera clasificación atiente a la capacidad que tiene las ruedas opuestas de girar con independencia una de otra, es decir, hace referencia al tipo de construcción geométrica o estructural. En segundo lugar se clasificarán según el sistema de control que dirige la suspensión.

2.4.1. Clasificación según la geometría

En la clasificación según la geometría, se engloba a tres grupos de suspensión principales: suspensiones de eje rígido, semirrígidas e independientes. En este apartado, se procede a comentar las principales características de estos tres tipos de suspensiones [5].

2.4.1.1. Suspensión de eje rígido

La suspensión de eje rígido también es denominada “sistema dependiente”. En esta configuración las ruedas del mismo eje están conectadas mediante un elemento rígido, normalmente una barra. Como consecuencia de ello, todo el movimiento que afecta a una rueda se transmite a la otra del mismo eje. En la figura 2-33 se puede ver como al elevarse una rueda, se extiende su inclinación al eje y de este a la otra rueda. Como el eje va fijado directamente sobre el bastidor, la inclinación se transmite a todo el vehículo.

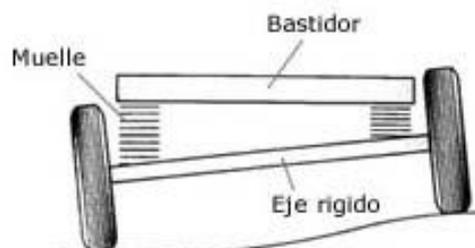


Figura 2-33. Esquema simplificado de la suspensión rígida

Las ventajas son su sencillez de diseño y su capacidad de no producir variaciones importantes en los parámetros de la rueda como caída o avance.

El inconveniente de este tipo de suspensiones es obvio: las vibraciones de un lado del pavimento se transmiten al otro lado del eje. Además, el peso del eje rígido, y grupo cónico diferencial si hubiera, aumenta el total de las masas no suspendidas.

El uso de este tipo de suspensiones se restringe a vehículos industriales, camiones de bajo y gran tonelaje, todo-terrenos y vehículos de gran capacidad en general.

2.4.1.2. Suspensión semirrígida

Las suspensiones semirrígidas se diferencian de las suspensiones rígidas en que transmiten de forma parcial las irregularidades del terreno. En cualquier caso aunque la suspensión no es rígida totalmente, tampoco es independiente.

El "eje torsional" es un tipo de suspensión semirrígida muy utilizada en las suspensiones traseras, en vehículos de tracción delantera, tiene forma de "U", por lo que es capaz de deformarse elásticamente un cierto ángulo cuando una de las ruedas sobrepasa un obstáculo.

Este sistema mediante la torsión del puente permite, una recuperación parcial del ángulo de caída de alto efecto de estabilización, características que junto al bajo peso, al bajo coste y al poco espacio que ocupan la hacen ideal para instalarla junto con otros componentes debajo del piso.

En la figura 2-34 se muestra una suspensión semirrígida montada en el eje posterior de un vehículo de tracción delantera.



Figura 2-34. Esquema de una suspensión semirrígida de eje torsional.

2.4.1.3. Suspensión independiente

En la suspensión independiente las ruedas tienen una suspensión independiente para cada una de ellas. Debido a esta configuración, las oscilaciones no se transmiten de unas a otras. Actualmente, este tipo de suspensión es el único que se utiliza para las ruedas directrices, aunque cada vez se va utilizando más la suspensión independiente a las cuatro ruedas, debido a que es la configuración que ofrece una mejor opción desde el punto de vista del confort y estabilidad al reducir de forma independiente las oscilaciones generadas por el terreno a cada rueda, sin transmitirse estas a la otra rueda del mismo eje. En la figura 2-35 se muestra un esquema simplificado de una suspensión independiente.

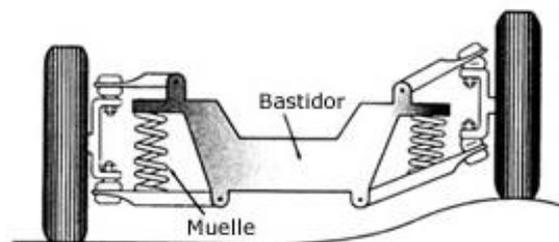


Figura 2-35. Esquema simplificado de una suspensión independiente.

La principal ventaja añadida de la suspensión independiente es que posee menor peso no suspendido que otros tipos de suspensión, por lo que las acciones transmitidas al chasis son de menor magnitud. El diseño de este tipo de suspensión, deberá garantizar que las variaciones de caída de rueda y ancho de ruedas en las ruedas directrices sean pequeñas para conseguir una dirección segura del vehículo.

Como inconvenientes, la suspensión independiente presenta un mayor coste, una mayor complejidad del sistema, además de problemas para cargas elevadas.

Existen varios tipos de suspensión independiente, como por ejemplo la suspensión de eje oscilante, de brazos tirados, McPherson, de paralelogramo deformable y multibrazo, que se explicarán a continuación:

- **Suspensión de eje oscilante.**

La peculiaridad de la suspensión de eje oscilante (figura 2-36) es que el elemento de rodadura y el semieje son solidarios (salvo el giro de la rueda), de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Es un tipo de suspensión que no puede ser utilizada como eje directriz

debido a que en el movimiento oscilatorio de sus semiejes se altera notablemente la caída de las ruedas en las curvas. El sistema de suspensión es completado con dos conjuntos muelle-amortiguador telescópico.

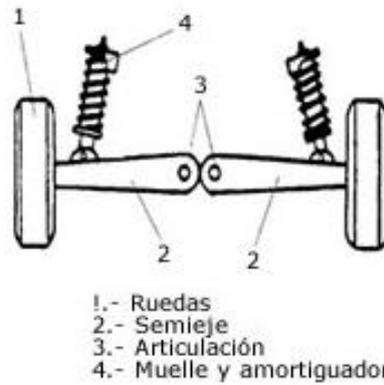


Figura 2-36. Esquema de una suspensión de eje oscilante.

- **Suspensión de brazos tirados.**

La suspensión de brazos tirados (figura 2-37) realiza la unión de la rueda y el bastidor mediante una articulación delante del eje, mediante dos elementos soporte, llamados “brazos”, que en su parte anterior está unido al bastidor y en la posterior a la rueda. Las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería.

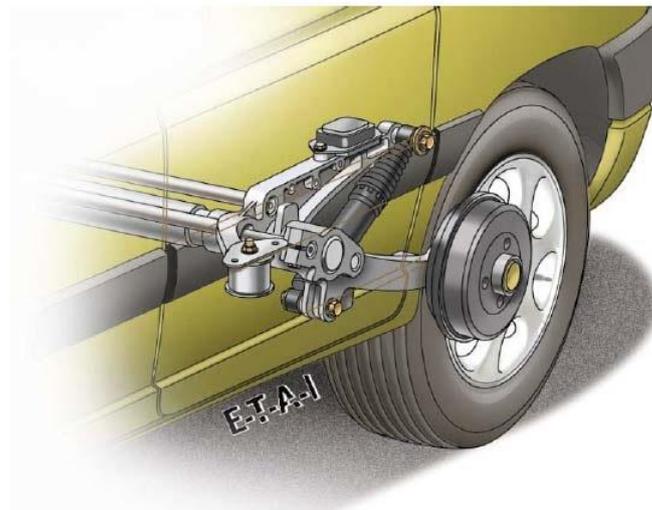


Figura 2-37. Esquema de suspensión de brazos arrastrados.

La unión puede ser con un punto de unión, “brazo”, o con dos puntos de unión, triángulo, o varios puntos montadas con varios brazos independientes.

- **Suspensión McPherson.**

La suspensión McPherson (figura 2-38) se caracteriza por tener unido solidariamente el amortiguador al buje de la rueda, de manera que el movimiento del bastidor con relación a la rueda tiene la misma dirección que el eje perpendicular del amortiguador.



Figura 2-38. Esquema simplificado de la suspensión McPherson.

Este sistema de suspensión, el cual fue desarrollado por Earle S. McPherson, ingeniero de Ford del cual recibe su nombre, es uno de los más utilizados en el tren delantero, aunque también es compatible para el trasero. El éxito de este sistema, sobre todo en vehículos modestos, es debido a su sencillez de fabricación y mantenimiento, al bajo coste de producción, al poco espacio que ocupa y al bajo consumo de gasolina que experimentan los vehículos en los que este sistema va incorporado. En la figura 2-39 podemos observar la suspensión delantera McPherson de un Volkswagen Passat del año 2009. Utiliza triángulos como elementos inferiores de soporte del buje y una barra estabilizadora anclada al amortiguador a través de brazos adicionales.

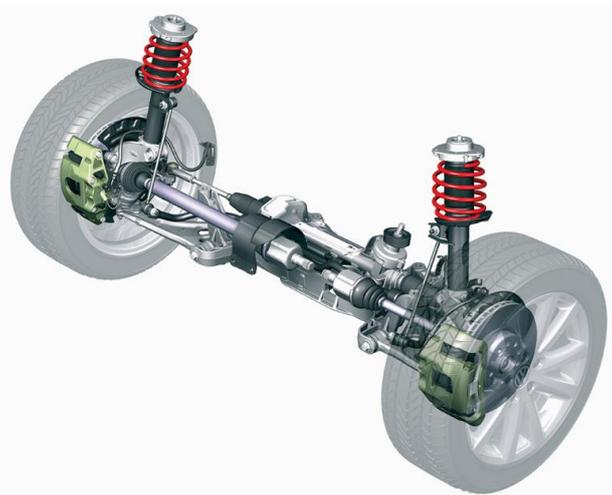


Figura 2-39. Suspensión McPherson de un Volkswagen Passat.

Con el sistema de suspensión McPherson es muy importante que la carrocería sea muy resistente en los puntos donde se fijen los amortiguadores y los muelles, para así absorber los esfuerzos transmitidos por la suspensión.

- **Suspensión de paralelo deformable.**

La suspensión de paralelo deformable, trapecio articulado o de triángulos superpuestos es, junto con la McPherson, la más usada en un gran número de automóviles tanto para el tren delantero como el trasero.

El paralelogramo deformable está formado por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. Los elementos de unión entre la rueda y la carrocería son elementos transversales colocados en distintos planos (figura 2-40). Su nombre se debe a los primeros sistemas desarrollados con este tipo de tecnología, puesto que con dos elementos superpuestos paralelos, junto con rueda y carrocería, recuerdan la forma de un paralelogramo.

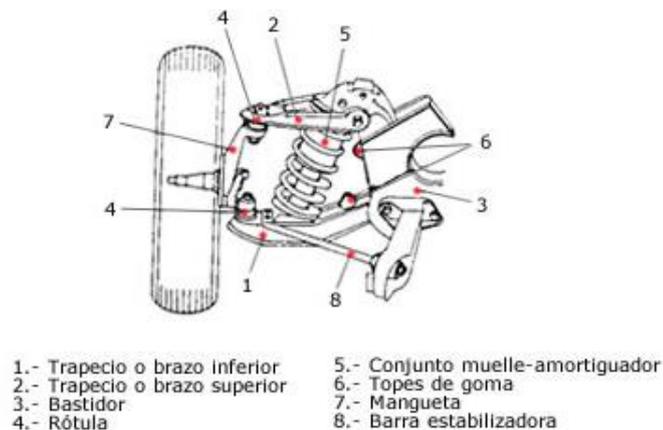


Figura 2-40. Esquema de una suspensión de paralelo deformable.

- **Suspensión multibrazo o multi-link.**

Las suspensiones multibrazo son la evolución de los sistemas de suspensiones de paralelogramo deformable explicados en el apartado anterior. La diferencia fundamental añadida en esta evolución es que los elementos de guía de las suspensiones multibrazo o *multi-link* pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Debido a esta variante estas suspensiones permiten modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda como la caída o la convergencia, de la forma más apropiada atendiendo a la estabilidad del automóvil.

2.4.2. Según el sistema de control

Si se clasifican a día de hoy las suspensiones acorde al sistema de control que rige el funcionamiento se encuentran tres grupos: activas, pasivas y semiactivas. Estos tipos se desarrollan a continuación.

2.4.2.1. Suspensión pasiva

Los elementos descritos en apartados anteriores son los que formarían un sistema de suspensión de este tipo (figura 2-42). Su uso está muy generalizado por menor coste, aunque presentan una difícil adecuación entre confort del pasajero y seguridad del vehículo. Esto se debe a que cuanto mayor nivel de confort se requiera, el sistema deberá ser más flexible para absorber lo que el terreno le exige al vehículo y esta flexibilidad repercute negativamente en el terreno. Cuanto más blanda sea la suspensión, mayor será el balanceo y desplazamiento de las masas suspendidas. Este tipo de suspensión no es recomendable cuando se requieran unos niveles altos de seguridad porque repercutirá en la rigidez del sistema de suspensión y, por tanto, en el confort de los pasajeros [6].

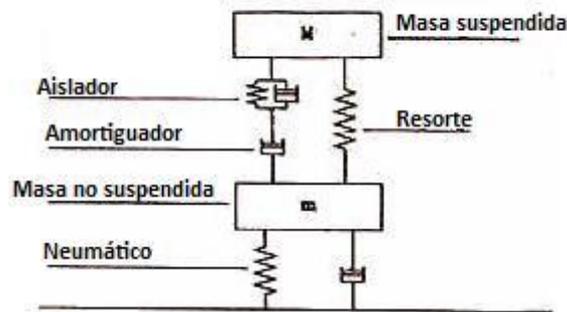


Figura 2-42. Esquema de una suspensión pasiva.

2.4.2.2. Suspensión activa

La suspensión activa se crea para solucionar el conflicto entre la fuerza que ejerce la rueda contra el suelo y el confort del vehículo. Con este tipo de suspensión se consigue una solución tecnológicamente muy avanzada que permite solucionar este conflicto, consiguiendo además grandes niveles de control, maniobrabilidad y confort en un amplio rango de frecuencias.

Se le denomina suspensión activa porque es capaz de almacenar, disipar e introducir energía en el sistema. Así, se ajusta en cada instante a las sollicitaciones cambiantes de

la carretera, debido a distintos sensores que recogen información que un actuador interpreta y corrige.

Un procesador indica a un dispositivo ubicado en cada rueda cuándo, de qué modo, a cuánta distancia y a qué velocidad debe moverse. Esto significa que los movimientos de las ruedas ya no están sujetos a interacciones aleatorias entre carretera y los distintos elementos que componen la suspensión. Los sensores se encargan de medir velocidad del vehículo, aceleraciones longitudinales y laterales, fuerzas y aceleraciones que actúan sobre cada rueda. Así, el actuador toma la decisión idónea para el buen comportamiento del vehículo. En la figura 2-43 se refleja el esquema simplificado de una suspensión activa.

La mayor ventaja frente a la suspensión pasiva es el control independiente de cada rueda, consiguiendo mayor adherencia de las ruedas al terreno a la vez que un reposicionamiento perfecto de la carrocería, por lo que el confort también es óptimo. El inconveniente es el elevado coste, sobre todo en la implantación de altas frecuencias [6].

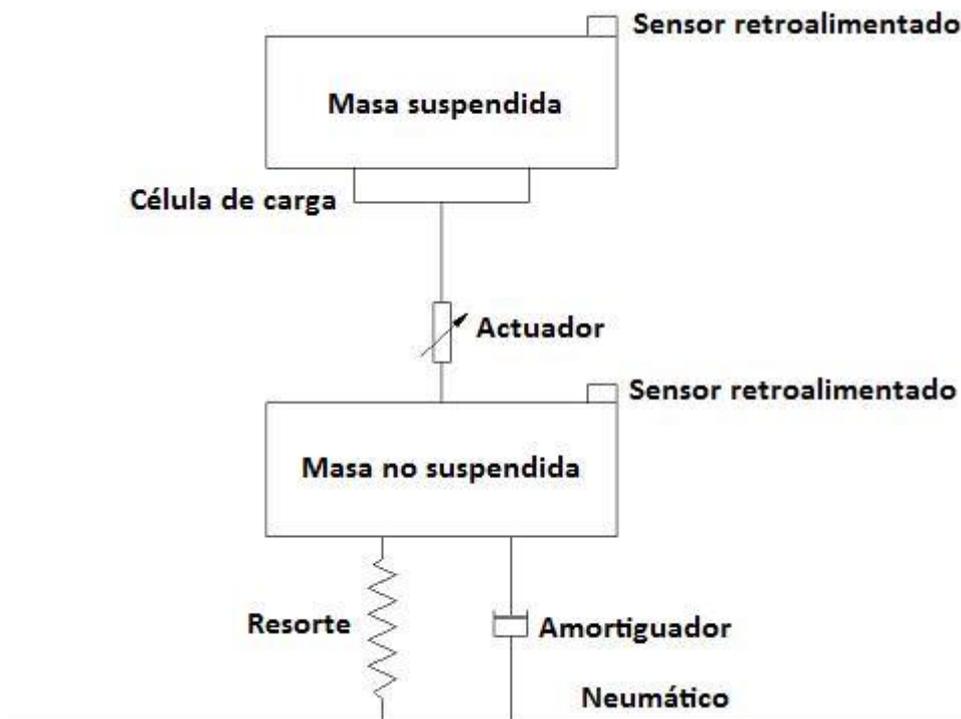


Figura 2-43. Esquema simplificado de una suspensión activa.

2.4.2.3. Suspensión semiactiva

Las suspensiones semiactivas incorporan elementos pasivos y activos para lograr optimizar el comportamiento del vehículo ante las irregularidades del terreno. Surgieron como alternativa a las suspensiones activas debido al elevado coste de éstas. En la figura 2-44 se muestra un esquema de suspensión semiactiva [7].

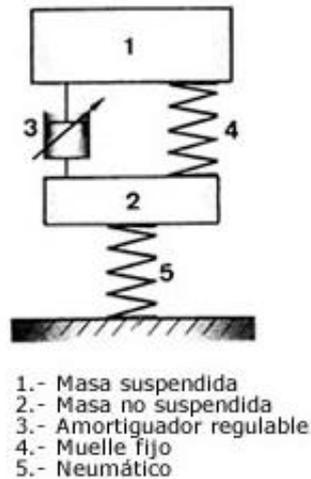


Figura 2-44. Esquema de las suspensiones semiactivas.

Las suspensiones semiactivas se basan en la modificación la rigidez del muelle o del amortiguador en función de diferentes parámetros previamente monitorizados por sensores. Las bajas frecuencias son controladas con elementos activos y las altas con pasivos.

Algunos sistemas de suspensión semiactiva incorporan amortiguadores hidráulicos que varían el caudal del fluido mediante sus válvulas. El inconveniente que presentan estos tipos de amortiguadores es que tienen un tiempo de respuesta (100-200 ms) superior al tiempo de muestreo del controlador, haciendo que la fuerza de control generada sea diferente a la fuerza de control deseada. Para solucionar este problema, muchos investigadores están centrando su atención en sistemas de suspensión semiactiva basados en fluidos inteligentes, como son los fluidos electro-reológicos y los magneto-reológicos, cuyos tiempos de respuesta son inferiores a 25 ms.

Los fluidos magneto-reológicos generan mayores niveles de fuerza que los electro-reológicos y pueden trabajar en un rango mayor de temperaturas. Es por ello que en la actualidad amortiguadores magneto-reológicos están tomando mucha fuerza, siendo utilizados para mejorar el comportamiento de la suspensión en vehículos automóviles y obteniendo muy buenos resultados.

Este fluido está compuesto de partículas metálicas flotando en él. Al magnetizarse, según si lo hace mucho o poco, modifica su viscosidad, consiguiendo variar la dureza del amortiguador. A medida que aumenta el campo magnético, el fluido se vuelve fibroso y su estructura llega a ser casi plástica. Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad.

Cuando no está magnetizado, hay una gran diferencia de velocidad entre las partículas que están próximas a las paredes del orificio, y las que fluyen rodeadas de otras partículas del fluido. Gracias a esa diferencia de velocidad, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave.

Cuando el fluido está magnetizado, la velocidad de todas las partículas es muy semejante. El flujo es más lento y, por tanto, la dureza del amortiguador aumenta.

El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, bien por razones de estabilidad o por frenada. También actúa para frenar movimientos como balanceo o cabeceo, aunque la amplitud de esos movimientos depende de los muelles y las barras estabilizadoras, no de los amortiguadores.

La principal ventaja de este sistema frente a los tradicionales es la rapidez de variación del tipo de amortiguación, y las infinitas posibilidades de regulación que permite.

En los últimos años se han estado desarrollando los amortiguadores magneto-reológicos, cuyas aplicaciones no están limitadas al área automotriz sino también a las construcciones civiles y a la robótica [8].

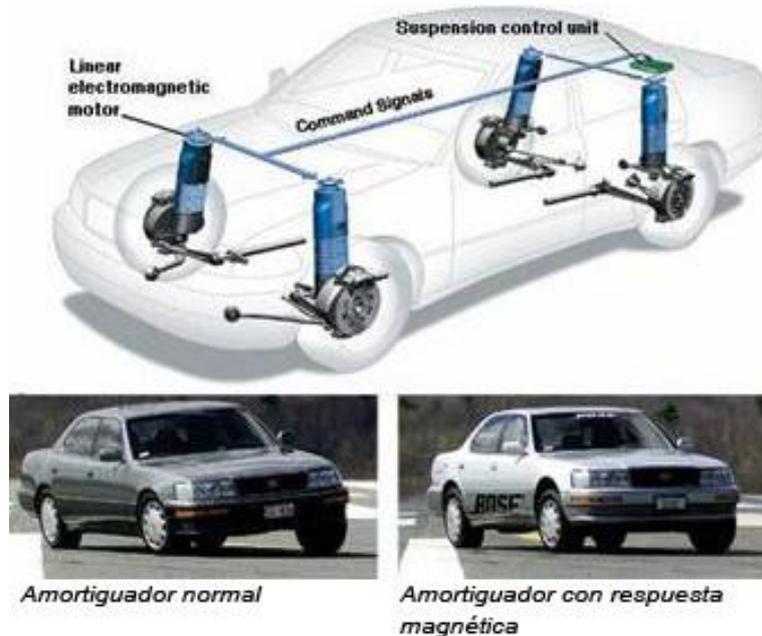


Figura 2-45. Cadillac Seville STS equipado con el sistema MagneRide de Delphi.

Los prototipos datan de principios de los 90, aunque General Motors presentó este sistema en el Salón de Fráncfort de 1999, y emplea la segunda generación en modelos como el Cadillac Seville y el Chevrolet Corvette.

En la figura 2-45 se muestra un Cadillac Seville STS equipado con el sistema *MagneRide* de *Delphi Automotive*. Dicho sistema es la primera aplicación industrial de un fluido con viscosidad variable debido a la presencia de un campo magnético.

El fluido que utiliza el sistema MagneRide es una suspensión no coloidal, con partículas de hierro con un tamaño de algunas micras en un hidrocarburo sintético. En ausencia de un campo magnético, las partículas de hierro se encuentran dispersas al azar en el seno del fluido. A medida que aumenta el campo magnético, se vuelve fibroso y su estructura llega a ser casi plástica.

Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad. Cuando no está magnetizado, la diferencia de velocidad entre las partículas es muy grande (figura 2-46). Gracias a ello, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave. Cuando el fluido está magnetizado, la diferencia de velocidad de las partículas es muy pequeña, el fluido es más lento, provocando que la dureza del amortiguador aumente.

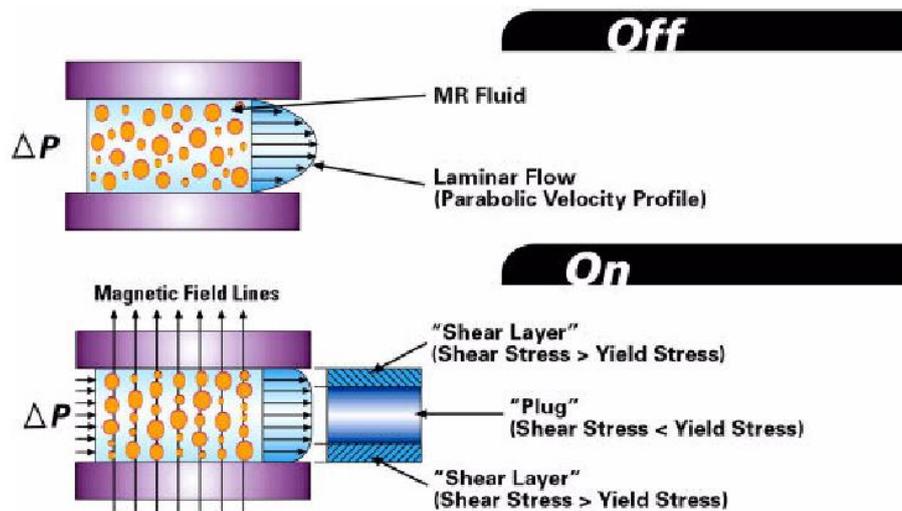


Figura 2-46. Magnetización del fluido del MagneRide.

La intensidad del campo magnético es ajustada por una centralita, que recibe señales de cinco sensores (figura 2-47). Tres de ellos están en el control de estabilidad (ángulo de dirección, guiñada y aceleración transversal), otro en la velocidad del coche y otro en la posición relativa de las ruedas. Delphi ha previsto que esta misma centralita pueda controlar un sistema de altura constante.

Este sistema de suspensión variable sigue el mismo principio que una suspensión activa o semiactiva: suave cuando es posible y dura cuando es necesario.

El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, ya sea por razones de estabilidad o de frenada.

También actúa para frenar movimientos como el balanceo o el cabeceo, a pesar de que la amplitud de estos movimientos depende de los muelles y las barras estabilizadoras y no de los amortiguadores [4].

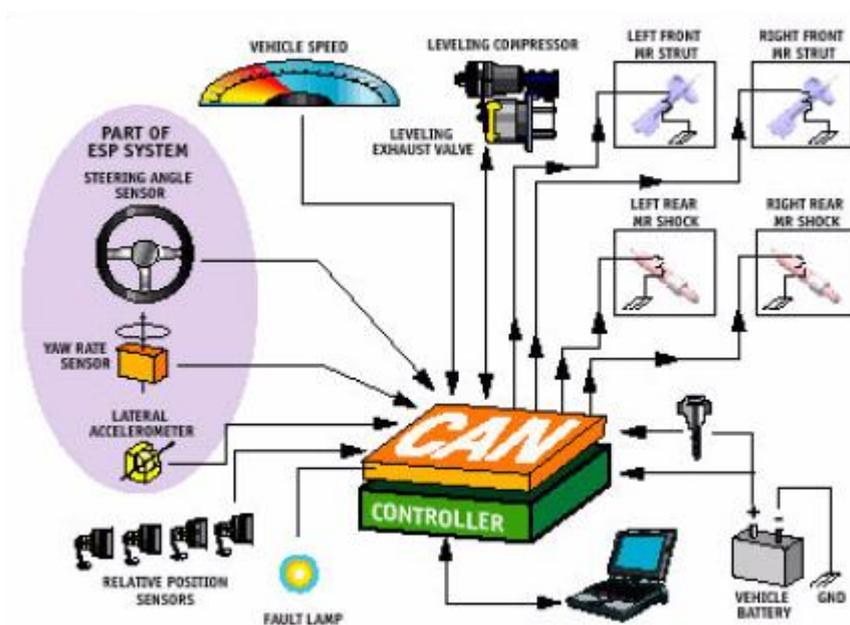


Figura 2-47. Sistema de control Delphi.

2.4.3. Otros tipos de suspensiones

Además de los tipos de suspensión expuestos anteriormente, existen otros tipos de sistemas que no atienden a la disposición muelle helicoidal - amortiguador telescópico. Aunque son suspensiones particulares y no muy extendidas en el mercado, a continuación se detallarán la suspensión hidroneumática y la suspensión neumática.

- **Suspensiones hidroneumáticas**

La suspensión hidroneumática es un sistema que poco tiene que ver con los convencionales. Se basa en esferas que sustituyen al conjunto muelle-amortiguador. En su interior contienen aire y un fluido separados por una membrana. El líquido, empujado por una bomba de alta presión, forma parte de un circuito hidroneumático que une los cuatro extremos del coche. Cuando la rueda encuentra un obstáculo

aumenta la presión del líquido y a través de la membrana comprime el aire, que luego se vuelve a expandir, haciendo las funciones de muelle y amortiguador, como se muestra en la figura 2-48. El sistema hidroneumático aporta algunas ventajas, como son el hecho de poder nivelar el vehículo así como la posibilidad de ajustar la rigidez de la suspensión.

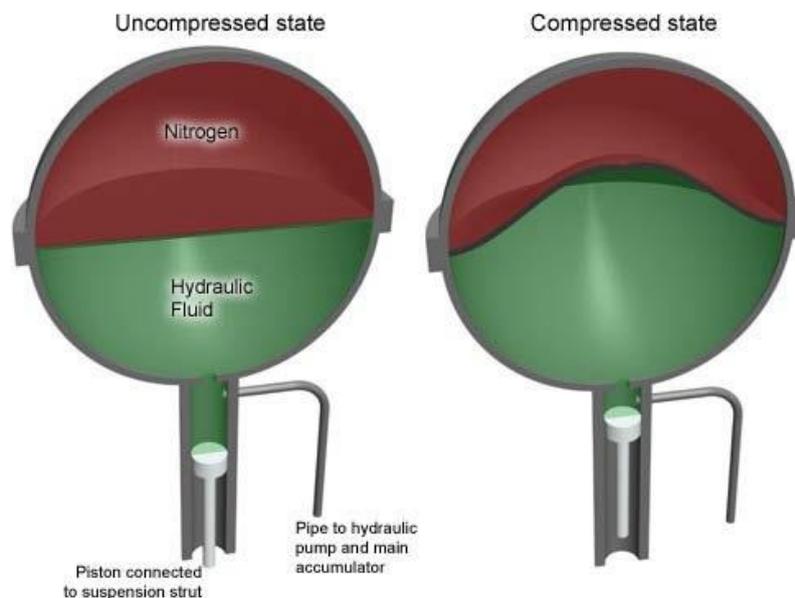


Figura 2-48. Funcionamiento del sistema de suspensión hidroneumática.

- **Suspensiones neumáticas**

Este tipo de suspensión se usa, sobre todo, en vehículos de alta gama desde hace pocos años. El funcionamiento se basa en que el aire a presión sustituye al muelle, ballesta o barra de torsión por un fuelle o cojín de aire capaz de variar su rigidez.

Las ventajas de una suspensión neumática son la posibilidad de adaptar la carrocería a distintas alturas dependiendo de la necesidad del terreno y la amortiguación a la forma de conducir.

Posee una elevada flexibilidad, notable capacidad de amortiguación de las vibraciones y autorregulación del sistema que permite mantener constante la distancia chasis-terreno, independientemente de la carga [4].

Capítulo 3

Fluidos magneto-reológicos

3.1 Introducción a la reología.

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

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

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

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

3.2 Fluídos reológicos

Los fluidos reológicos son fluidos cuyas propiedades varían ante la presencia de un campo eléctrico o magnético exterior. Estos fluidos son líquidos inertes que contienen partículas en suspensión, cuyo tamaño es del orden de milímetros o incluso inferior y son habitualmente aceites de silicona o minerales.

Cuando los fluidos reológicos no se ven alterados por un campo exterior, pueden considerarse fluidos newtonianos. En esta condición se comportan como un fluido normal, es decir, ante una velocidad de deformación de deslizamiento oponen un esfuerzo viscoso y este esfuerzo es proporcional a la velocidad de deformación a través de la viscosidad del fluido.

Cuando se aplica un campo exterior, las partículas en suspensión forman cadenas en la dirección del campo. Si el campo se aplica perpendicularmente a la dirección del fluido, entonces las cadenas se forman perpendicularmente al flujo y como consecuencia del propio flujo estas cadenas se rompen y deben ser otra vez formadas, de manera que la continua rotura y formación de cadenas da como resultado la aparición de un esfuerzo que se opone al movimiento. Para producir el deslizamiento de las capas de fluido es necesario superar este esfuerzo denominado de fluencia.

Existen dos tipos de fluidos reológicos que pueden considerarse materiales activos. El primer tipo son los fluidos magneto-reológicos, mientras que el segundo son los fluidos electro-reológicos. Ambos comparten el principio o la base de los fluidos reológicos, y su diferencia radica en que son sensibles a campos externos diferentes. Los fluidos magneto-reológicos varían sus propiedades frente a un campo magnético, mientras que los fluidos electro-reológicos cambian frente a un campo eléctrico. Esta

propiedad es consecuencia de la formación de estructuras dentro del fluido como respuesta a los estímulos exteriores.

La ventaja que presentan estos fluidos 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 es controlable en función de la intensidad del campo exterior. Como se observa en la figura 3-1, este aumento del esfuerzo viscoso no se debe a un aumento de la viscosidad, sino que se produce porque el esfuerzo de fluencia aumenta con el valor del campo exterior. Dicho aumento de esfuerzo viscoso hace a estos fluidos especialmente atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones. El aumento del esfuerzo viscoso de estos fluidos los hace especialmente atractivos para aplicaciones relacionadas con el amortiguamiento y control activo de vibraciones.

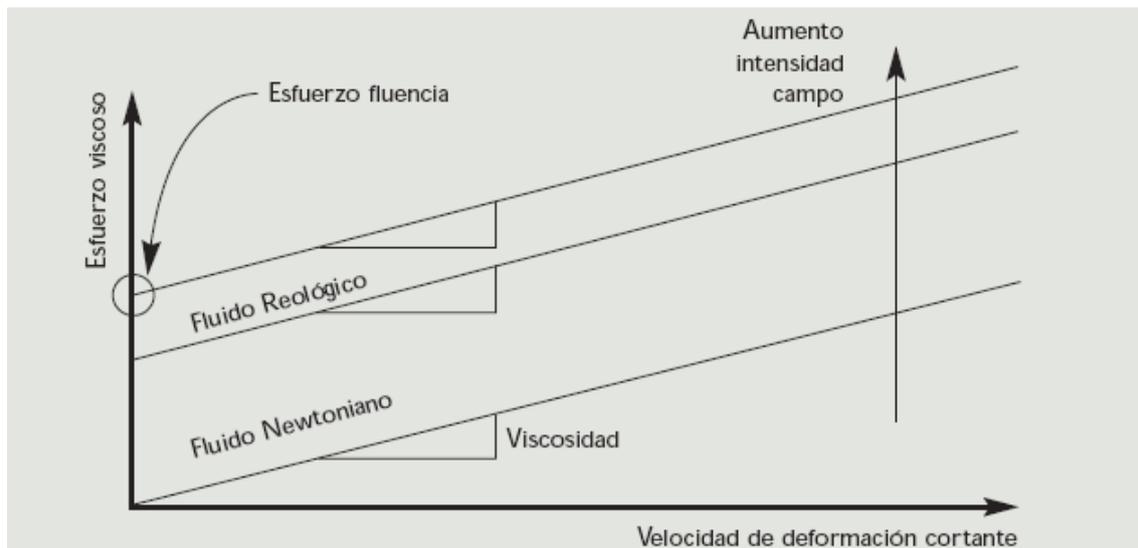


Figura 3-1. Gráfica que relaciona el esfuerzo viscoso con la velocidad de deformación.

Es debido a esta característica por lo que los fluidos reológicos se han empleado generalmente como actuadores y especialmente en el control de vibraciones. Como inconveniente, estos fluidos presentan limitaciones de su implantación ya que necesitan elevados niveles de campo exterior para producir niveles aceptables de actuación.

El presente proyecto se centra en los amortiguadores magneto-reológicos, por lo que los fluidos que adquieren una mayor importancia son los sensibles a la influencia de un campo magnético exterior, es decir, los fluidos magneto-reológicos, que se detallarán a continuación [9].

3.2.1 Flúidos magneto-reológicos

El descubrimiento y desarrollo de los fluidos magneto-reológicos (MR) puede acreditarse a Jacob Rabinow en el año 1.947. Estos fluidos se componen de partículas magnetizables muy pequeñas suspendidas en un líquido portador adecuado.

Normalmente los fluidos magneto-reológicos son líquidos de consistencia similar a los aceites de motor, pero, cuando se aplica un campo magnético exterior se produce un momento dipolar en las partículas de hierro, formando una estructura fibrosa y paralela al campo como se muestra en la figura 3-2. Cuando desaparece el campo magnético, las partículas suspendidas en el fluido no quedan magnetizadas y el fluido magneto-reológico se comporta como un fluido newtoniano normal.

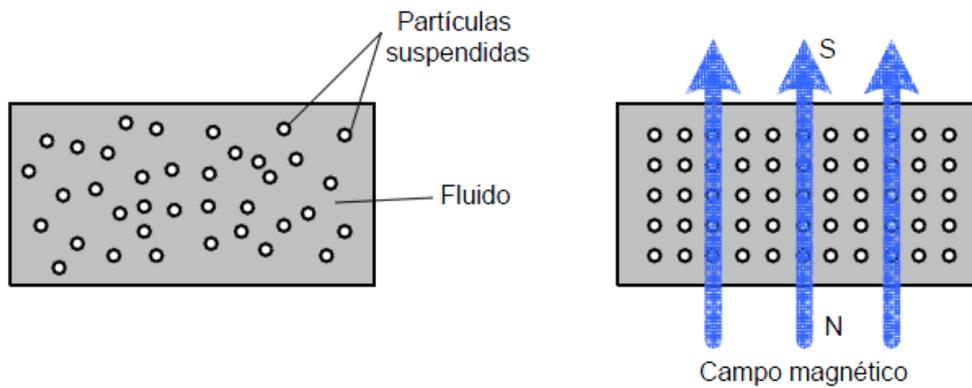


Figura 3-2. Formación de cadenas paralelas al campo magnético.

La alineación de las partículas de hierro suspendidas en el líquido provoca que se pueda restringir el movimiento del fluido, en consecuencia, se desarrolla una fuerza en el fluido que depende de la magnitud del campo magnético aplicado, lo importante es que esto ocurra en un rango de tiempo de milisegundos .

El tamaño de las partículas influye en la suspensión de las mismas en el fluido, esto es, mientras menor sea el tamaño de las partículas la suspensión en el fluido es mucho mejor, favoreciendo la regulación de la dureza de amortiguación; por el contrario, cuanto mayor sea el tamaño de las partículas se hace más difícil la suspensión de las mismas en el fluido y por consiguiente la regulación de la amortiguación [10].

3.3 Aplicaciones

Las áreas de aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos son muy diversas, entre ellas cabe destacar:

- **En las prótesis médicas**, la principal aplicación de este tipo de amortiguadores en la industria médica trata de mejorar la movilidad de aquella pierna que fue amputada por encima de la rodilla.

Biederman Motech, un fabricante alemán de productos protésicos, desarrolló un sistema que aumenta el equilibrio del paso, la estabilidad y la eficiencia de la energía empleada al caminar (Figura 3-3).

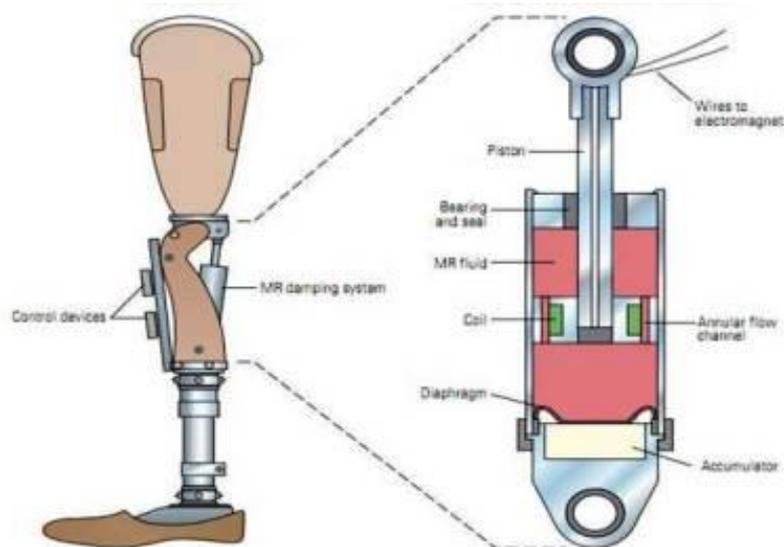


Figura 3-3. Prótesis de pierna diseñada por Biederman Motech.

Este sistema, aparte de disponer de un amortiguador, contenía un sistema de sensores que transferían la información a un programa informático, que a su vez transmitía la orden necesaria al amortiguador.

- **En el campo de la robótica**, el sistema nervioso de los futuros robots (figura 3-4) puede utilizar fluidos magneto-reológicos para mover las articulaciones y extremidades de forma semejante a los seres vivos.

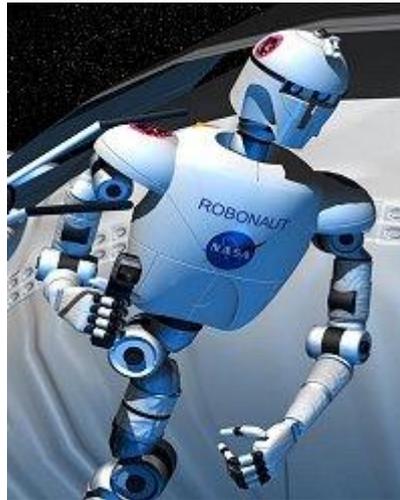


Figura 3-4. Futuro robot articulado con fluido magneto-reológico.

- **En las construcciones civiles,** la prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magneto-reológico es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil.

En la figura 3-5 se muestra un esquema de un amortiguador de fluido magneto-reológico de gran escala.

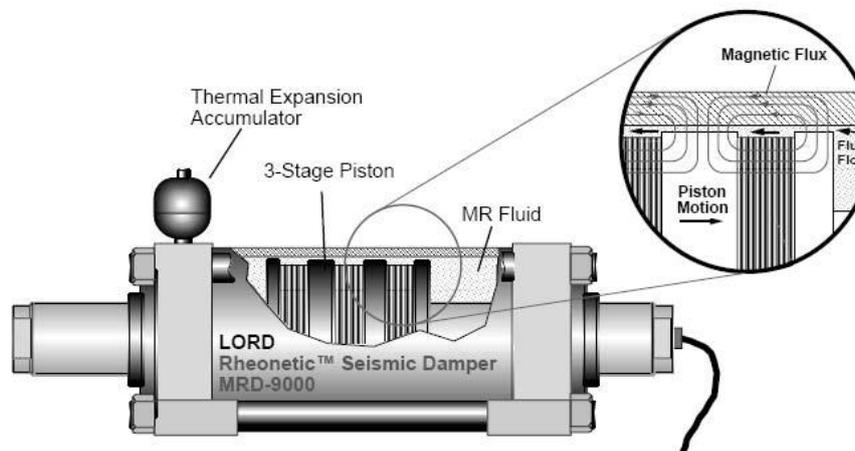


Figura 3-5. Amortiguador sísmico Rheonetic MRD-9000.

Una de las aplicaciones más frecuentes consiste en la protección sísmica de edificios, este hecho se debe a unas características muy determinadas de este tipo de amortiguadores. Estos amortiguadores amplían el control sobre los choques sísmicos iniciales como los de las réplicas gracias a su alta fuerza de disipación a baja velocidad, características que fundamentalmente actúan frente al choque de las réplicas.

No obstante, la reducción del choque inicial, se debe a su rápido tiempo de respuesta, así como a su alto margen dinámico, lo cual permite una optimización continua del sistema.

Otra de las aplicaciones civiles donde más se utiliza este tipo de dispositivos es el de los puentes suspendidos por cables, de esta forma, al situar los amortiguadores atados a los cables proporciona una situación continuamente controlable frente a las tensiones producidas por el viento y la lluvia.

En Japón ya se han instalado dispositivos en la construcción de edificios y puentes específicamente en el Museo Nacional de Ciencias Emergentes del Japón y en el puente del Lago Dong Ting en China (figura 3-6).



Figura 3-6. Puente de Lago Dong Ting en china.

- **En el área automotriz**, se emplea en el sistema de suspensión, específicamente en los amortiguadores. El confort en los vehículos se asegura con estos amortiguadores magneto-reológicos, porque mediante un control electrónico se puede ajustar en una fracción de segundo la rigidez del amortiguador garantizando así un viaje cómodo y seguro.

También se usa en la suspensión de los asientos de los vehículos de trabajo pesado. En la figura 3-7 se muestra un amortiguador de fluido magneto-reológico diseñado para utilizarse en un sistema de suspensión de asiento semiactivo en vehículos de cargas para travesías largas.

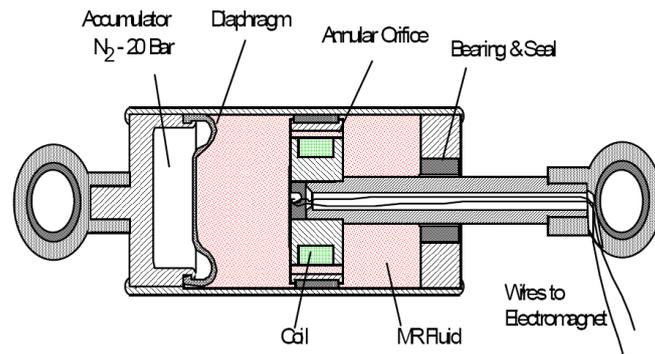


Figura 3-7. Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4.

Este amortiguador es capaz de proveer un amplio rango dinámico de control de fuerza para niveles modestos de potencia de entrada.

El uso de estos amortiguadores en suspensiones de asiento favorece un control en tiempo real de una posición óptima para ejercer la conducción. Esto se debe a que se consigue adaptar automáticamente el peso del cuerpo del conductor así como los niveles de choque y de vibración debidos al terreno por el que se circula.

De esta forma, se consigue un ambiente de trabajo más seguro, dado que se mejora la sensibilidad de la conducción, reduciendo la fatiga que se produce, y por tanto, reduciendo el nivel de riesgos de sufrir accidentes [11].

3.3.1 El amortiguador magneto-reológico

El fabricante de componentes para la automoción Delphi fue el primero en desarrollar un sistema de amortiguación basado en amortiguadores magneto-reológicos para un automóvil. Este sistema de suspensión fue presentado en sociedad en el salón de Fráncfort en 1999.

El sistema desarrollado por la compañía 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 amortiguadores que contienen el fluido magneto-reológico (figura 3-8), bobinas electromagnéticas, sensores que detectan tanto el desplazamiento de la suspensión como la aceleración transversal y longitudinal y por una unidad de mando.

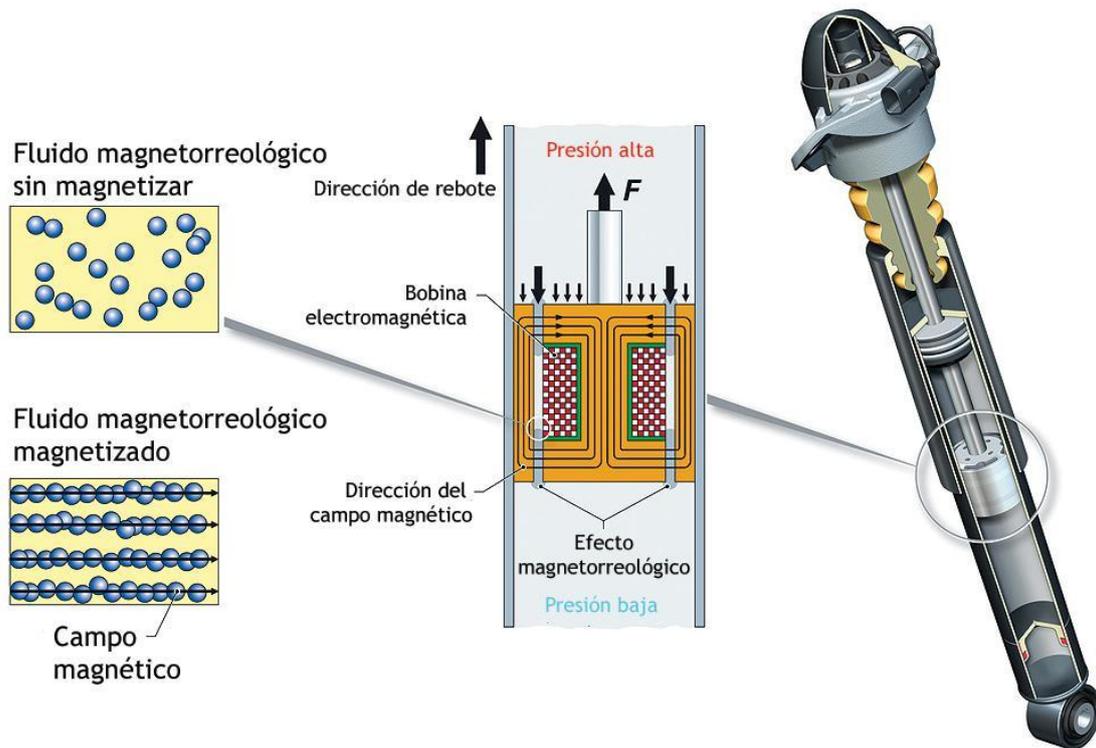


Figura 3-8. Estructura de un amortiguador *Magnetic Ride* de Delphi.

El fluido magneto-reológico está formado por una suspensión de microesferas de acero de dos tamaños diferentes en un fluido compuesto de hidrocarburos sintéticos o siliconas, con la propiedad añadida de antiapelmazante. En posición de reposo o sin magnetizar, la suspensión de acero se encuentra de forma aleatoria dentro del

amortiguador, pero al aplicar el campo magnético, las microesferas de acero se alinean.

Dicho de otra manera, al aplicar una corriente eléctrica con un voltaje bajo, las partículas se orientan en una disposición similar y convierten el líquido en una sustancia con aspecto fibroso y mucho más viscoso (figura 3-8).

La consistencia de la suspensión depende de la intensidad del campo magnético aplicado. A continuación se explica el modo de funcionamiento del sistema *Magnetic Ride*:

Los sensores de desplazamiento de la amortiguación mandan señales a la unidad de mando, esta 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 magneto-reológico.

Los valores de la consistencia del fluido magneto-reológico 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 adaptará 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 se eleva la dureza, mediante el campo magnético, de la suspensión delantera aumentando la estabilidad. En caso de una aceleración aumente 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.

Aunque la amplitud de movimientos descritos anteriormente depende de los muelles y las estabilizadoras y no de los amortiguadores.

La ausencia de válvulas, frente a los amortiguadores hidráulicos, hace que el sistema sea silencioso, frente a la presencia de ruidos de confort que las válvulas hacen en esta clase de amortiguadores.

Actualmente este tipo de suspensión la utilizan vehículos de altas prestaciones y de lujo. Como ejemplos de vehículos que utilizan esta suspensión son Chevrolet Corvette, Audi TT y R8 (figura 3-9), Cadillac Seville o Ferrari 599 GTB y California.

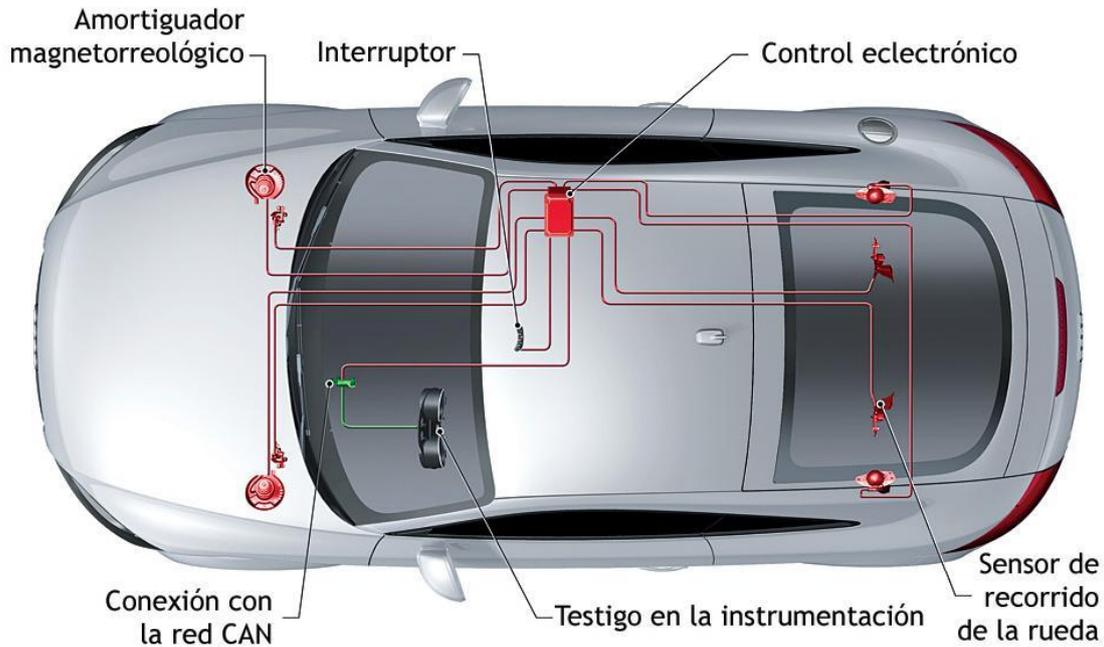


Figura 3-9. Elementos de la amortiguación magneto-reológica Magnetic Ride en un Audi R8.

Las principales ventajas del tipo de amortiguador magneto-reológico son:

- Su reacción es diez veces más rápida que el amortiguador convencional.
- Los sensores pueden modificar la viscosidad del líquido hasta mil veces cada segundo.
- Fiabilidad: no requiere mantenimiento.
- Bajo requerimiento energético: 20 vatios por cada amortiguador.
- Control dinámico de todo el automóvil, independiente en cada una de las cuatro ruedas.
- Simplicidad mecánica, al no precisar de válvulas ni electroválvulas.

Sin embargo, los principales inconvenientes son:

- Supone un sobrecoste al ser una tecnología que aún no está totalmente implantada ni totalmente desarrollada.
- Es necesario, para una correcta optimización de los amortiguadores magneto-reológicos, la utilización de dispositivos electrónicos (figura 3-10), que suponen un coste para poderlos implementarlos en el vehículo, así como a la hora de adquisición del propio vehículo.
- Necesitan un aporte de energía, frente a los amortiguadores convencionales que no necesitan dicho aporte energético.

Capítulo 4

Redes neuronales artificiales

El cerebro humano es el sistema de cálculo más complejo que conoce el hombre. La capacidad del cerebro humano de pensar, memorizar, asociar datos y resolver problemas ha inspirado a muchos científicos intentar o procurar modelar en el ordenador su funcionamiento

Los profesionales de diferentes campos como la ingeniería, filosofía, fisiología y psicología han unido sus esfuerzos debido al potencial que ofrece esta tecnología y están encontrando diferentes aplicaciones en sus respectivas profesiones. Un grupo de investigadores ha perseguido la creación de un modelo en el ordenador que iguale o adopte las distintas funciones básicas del cerebro.

El resultado ha sido una nueva tecnología llamada Computación Neuronal o también Redes Neuronales Artificiales (RNA).

El resurgimiento del interés en esta nueva forma de realizar los cálculos tras dos décadas de olvido se debe al extraordinario avance y éxito tanto en el aspecto teórico como de aplicación que se está obteniendo estos últimos años [12].

4.2 Funcionamiento del cerebro humano.

El cerebro humano está compuesto de un número de células nerviosas llamadas neuronas que son la unidad fundamental del sistema nervioso y en particular del cerebro. Según cálculos recientes, puede alcanzar un total de unos cien mil millones y están interconectadas entre sí. En la figura 4-1 podemos observar una recreación de las interconexiones entre neuronas en el cerebro humano.

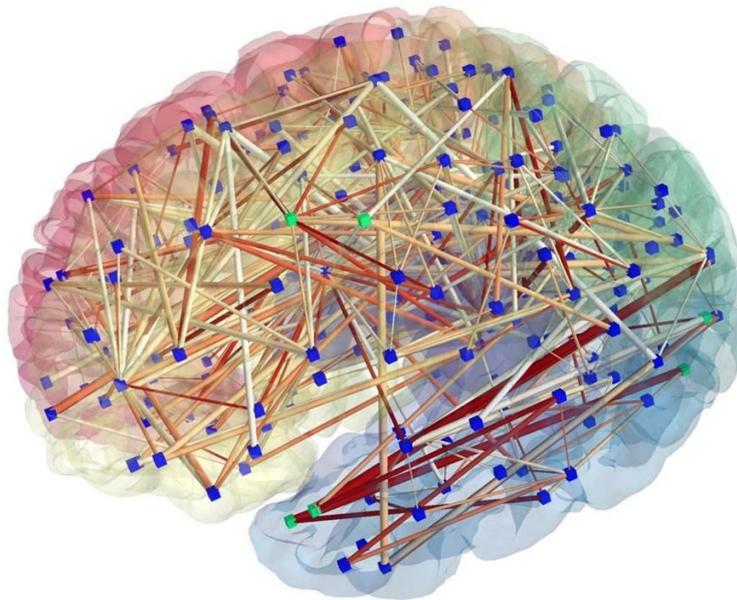


Figura 4-1. Recreación de las neuronas y sus conexiones en el cerebro humano.

Las neuronas son células especializadas en la recepción y transmisión de información. Cada una de estas neuronas está conectada a cientos o incluso miles de otras neuronas, formando redes extremadamente complejas. De estas conexiones depende nuestra memoria, el habla, el aprendizaje de nuevas habilidades, el pensamiento, los movimientos conscientes y en fin, todo el funcionamiento de nuestra mente.

Cada neurona está formada por tres partes fundamentales (ver figura 4-2):

- **Núcleo:** está situado en el cuerpo celular o soma. Contiene la información que dirige la actividad de la neurona.
- **Dendritas:** ramificaciones que constituyen la parte de la neurona que se especializa en recibir excitación o señales, que puede provenir de estímulos en el ambiente o de otra célula.
- **Axón:** es una prolongación del soma. Cada neurona tiene un único axón y a través de él se propaga la información a otras neuronas.

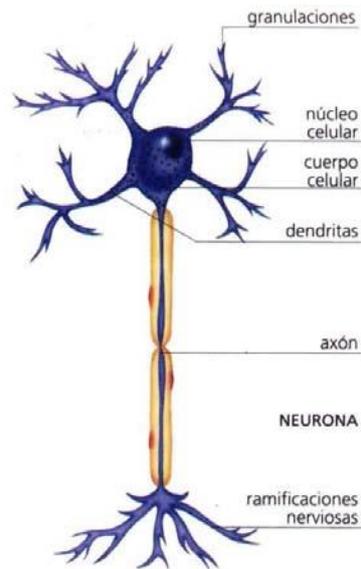


Figura 4-2. Partes de una neurona.

El proceso que permite la comunicación y conexión entre todas las neuronas del sistema nervioso se conoce como sinapsis (figura 4-3). Esta comunicación se produce mediante impulsos eléctricoquímicos. La neurona es estimulada o excitada a través de sus entradas (dendritas) y cuando se alcanza un cierto umbral, la neurona se dispara o activa, pasando una señal hacia el axón que es el encargado de transmitirla.

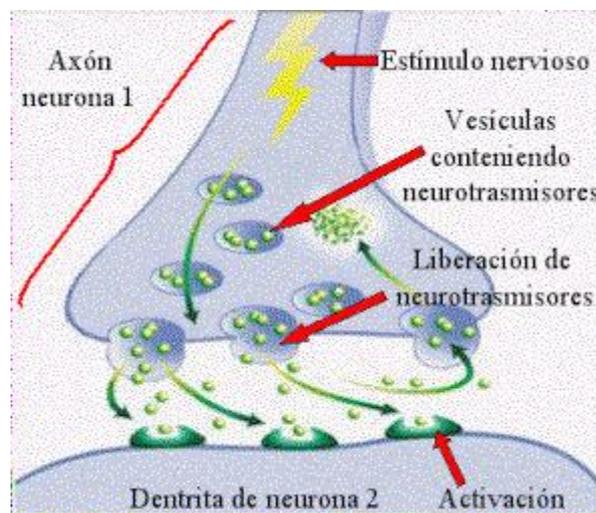


Figura 4-3. Proceso de sinapsis.

Estas conexiones se desarrollan y modifican a lo largo de la vida de acuerdo al aprendizaje y a las experiencias de la persona. La cantidad total de sinapsis en el cerebro no se conoce pero es un número muy elevado. Algunas estimaciones sitúan esa cifra entre $10 \cdot 10^5$ y $10 \cdot 10^6$

4.3 Definición y estructura de una red neuronal artificial.

Como se ha mencionado en el apartado anterior las Redes Neuronales Artificiales están inspiradas en las redes neuronales biológicas del cerebro humano. Están constituidas por elementos que se comportan de forma similar a la neurona biológica en sus funciones más comunes. Por ejemplo las Redes Neuronales Artificiales aprenden de la experiencia, generalizan de ejemplos previos a ejemplos nuevos y abstraen las características principales de una serie de datos. Las redes neuronales artificiales, por tanto, son capaces de [13]:

- Aprender: adquirir el conocimiento de algo por medio del estudio, ejercicio o experiencia. Las Redes Neuronales Artificiales pueden cambiar su comportamiento en función del entorno. Se les muestra un conjunto de entradas y ellas mismas se ajustan para producir unas salidas consistentes.
- Generalizar: extender o ampliar una cosa. Las Redes Neuronales Artificiales generalizan automáticamente debido a su propia estructura y naturaleza. Estas redes pueden ofrecer, dentro de un margen, respuestas correctas a entradas que presentan pequeñas variaciones debido a los efectos de ruido o distorsión.
- Abstraer: aislar mentalmente o considerar por separado las cualidades de un objeto. Algunas Redes Neuronales Artificiales son capaces de abstraer la esencia de un conjunto de entradas que aparentemente no presentan aspectos comunes o relativos.

Por tanto una red neuronal artificial se puede considerar como un modelo computacional basado en el procesamiento de datos e información que se caracteriza por su aprendizaje a través de ejemplos, adaptabilidad, robustez, capacidad de generalización y tolerancia a fallos.

Una red neuronal artificial, análogamente a lo que ocurre en el cerebro humano, está caracterizada por las conexiones de unas neuronas artificiales o elementos de procesamiento con otras que se disponen en forma de capas. Los diferentes tipos de capa que existen son:

- Capa de entrada: Las neuronas que pertenecen a este grupo, no reciben como entrada la salida de ninguna otra neurona y su salida es la entrada a otras neuronas de la red. Por tanto, esta capa actúa como entrada al sistema.
- Capa de salida: Las neuronas situadas en esta capa, reciben como entrada la salida de otras neuronas pero no es la entrada de ninguna otra capa. Por lo tanto, se tratan de salidas de la información para que puedan éstas ser leídas.

- **Capa oculta o intermedia:** una red neuronal artificial puede estar formada por varias capas ocultas. Son internas a la red y no tienen contacto directo con el exterior. Reciben como señal la salida de otras neuronas y, a su vez, su salida es la entrada de otra capa sucesiva. Las neuronas de las capas ocultas pueden estar interconectadas de diferentes maneras, lo que determina junto con su número las distintas topologías de redes neuronales. Son las encargadas de extraer, procesar y memorizar la información concerniente al problema estudiado, basándose para ello en los pesos de las conexiones de la red principalmente.

En la figura 4-4 se puede ver un ejemplo de red neuronal. En este caso dicha red estaría formada por X_n nodos o neuronas en la capa oculta, Y_n neuronas en la capa de salida y estarían conectadas por dos capas ocultas o intermedias, que como se ha dicho son las encargadas de tratar toda la información de la que se dispone.

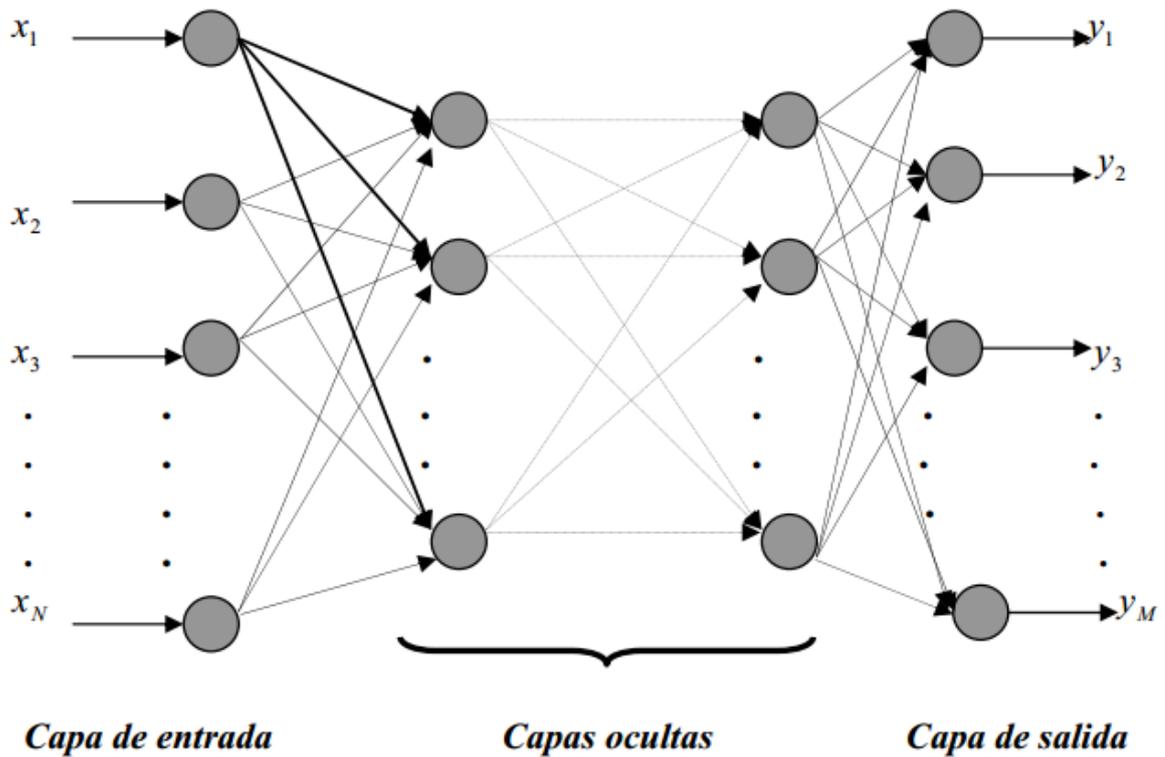


Figura 4-4: Red neuronal totalmente conectada.

Cada neurona artificial que compone la red se implementa de la siguiente manera: las entradas (x_j) se introducen en las dendritas. Cada una posee un peso (w_{ij} , neurona "j", entrada "i"). Si hacemos una analogía con las neuronas biológicas, dentro del soma se aplican diferentes funciones de procesamiento (de propagación, de activación y de

salida). Toda esa información posteriormente es transmitida al llegar al axón (salida y_i). Podemos ver reflejado este proceso en la figura 4-5:

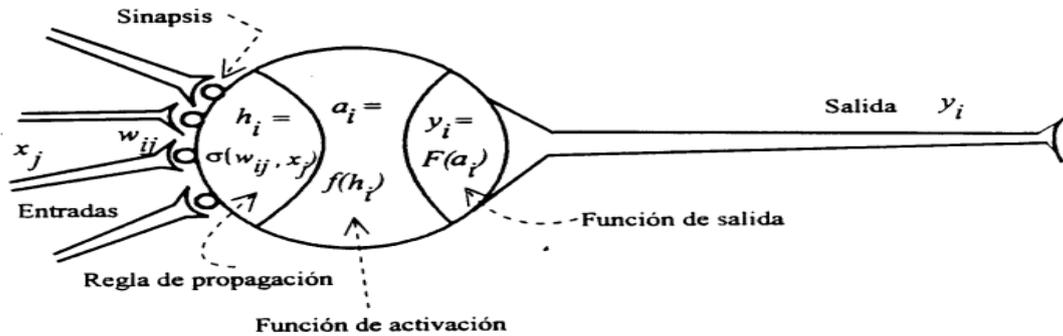


Figura 4-5: Esquema de una neurona artificial.

Ahora se pasa a analizar todas las diferentes funciones que se llevan a cabo dentro de cada neurona:

- **Función de entrada.**

Cada neurona cuenta con una cantidad variable de entradas que provienen del exterior o de otras neuronas, pero a su vez dispone de una sola salida que transmitirá la información al exterior o hacia otras neuronas. Por lo tanto nos enfrentamos al reto de cómo se pueden combinar todas estas entradas para conseguir un valor único de entrada global. Esto se logra a través de la función de entrada, y puede describirse como sigue:

$$Input_i = (x_j \cdot w_{ij}) * (x_{j+1} \cdot w_{ij+1}) * \dots (x_n \cdot w_{in})$$

Donde * representa el operador apropiado (sumatorio, producto, máximo...), n el número de entradas de la neurona y w_i el peso de cada neurona.

Algunas de las funciones de entrada más utilizadas son:

- **Sumatorio:** Suma de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicados por sus correspondientes pesos:

$$\sum_j (x_j w_{ij}), \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n$$

- **Producto:** producto de todos los valores de entrada a la neurona multiplicados por sus correspondientes pesos:

$$\prod_j (x_j w_{ij}), \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n$$

- **Máximo** de las entradas pesadas: solamente toma en consideración el valor de entrada más fuerte, previamente multiplicado por su peso correspondiente:

$$\text{Max}_j (x_j w_{ij}), \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n$$

- **Función de activación.**

La función de activación es la característica principal de una neurona. Se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total a la misma. Una neurona puede estar inactiva (no excitada) o activa (excitada).

La función activación calcula el estado de actividad de una neurona; transformando la entrada global en un valor o estado de activación, cuyo rango normalmente va de 0 a 1 o de -1 a 1. Esto es así, porque una neurona puede estar totalmente inactiva (0 ó -1) o activa (1).

Las funciones de activación más comúnmente utilizadas se detallan a continuación:

- **Lineal:** La activación de la neurona es proporcional a la entrada total. La función lineal más típica es la que se muestra en la figura 4-6.

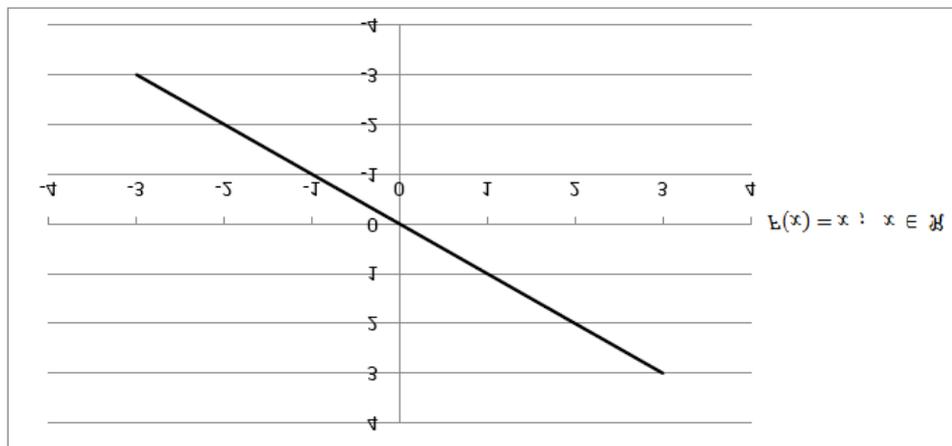


Figura 4-6. Función de activación lineal.

Este tipo de función produce comportamientos neuronales inestables debido a que sus activaciones tienden a incrementarse sin límites. Lo ideal es que la función de activación tenga umbral para que cuando el estímulo total exceda de un cierto valor la salida sea constante.

- **Escalón:** La activación es un valor discreto, (0,1) que depende de si la entrada total supera o no un determinado umbral. Presenta el inconveniente de no ser derivable en cero, por lo tanto, se limita su capacidad de aprendizaje y representación. De este tipo son la función signo (figura 4-7) y la función escalón (figura 4-8).

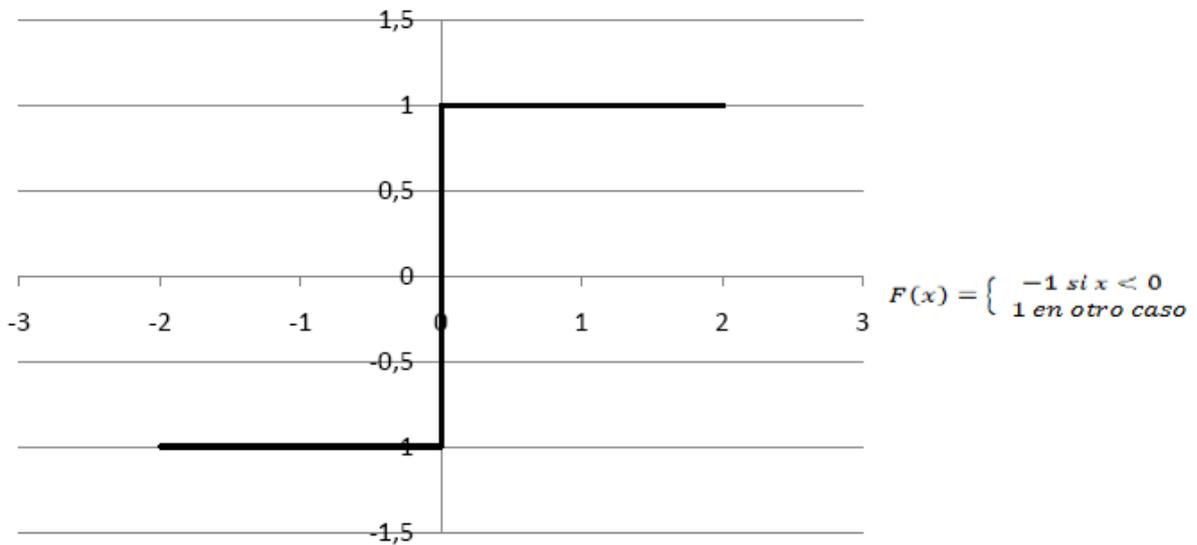


Figura 4-7. Función de activación tipo signo.

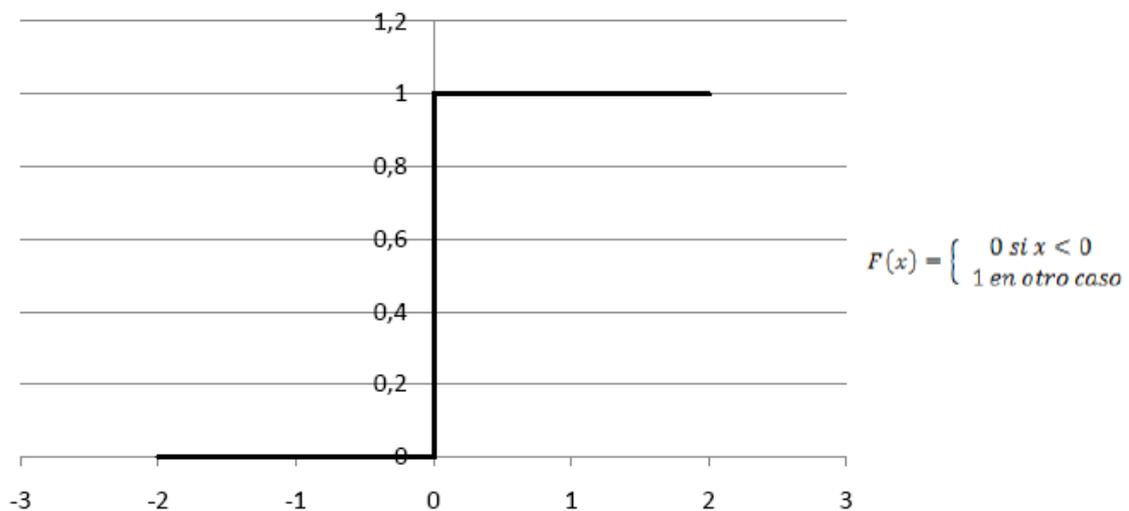


Figura 4-8. Función de activación tipo escalón.

- **No lineales:** En las funciones no lineales, la salida no es proporcional a la entrada. Las redes con salida continua usan esta función ya que su algoritmo de aprendizaje necesita una función derivable. En este grupo destacan la función logística (figura 4-9) y la función tangente hiperbólica (figura 4-10).

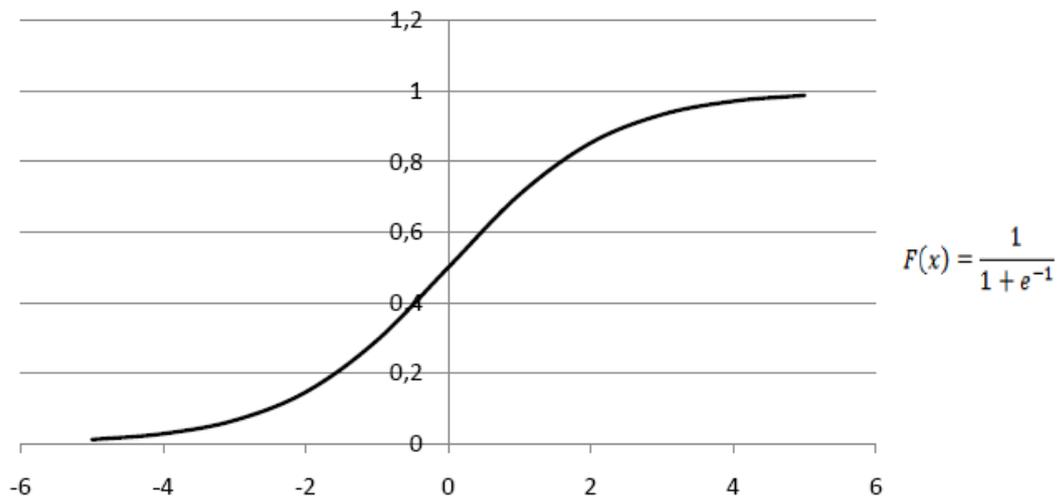


Figura 4-9. Función de activación logística.

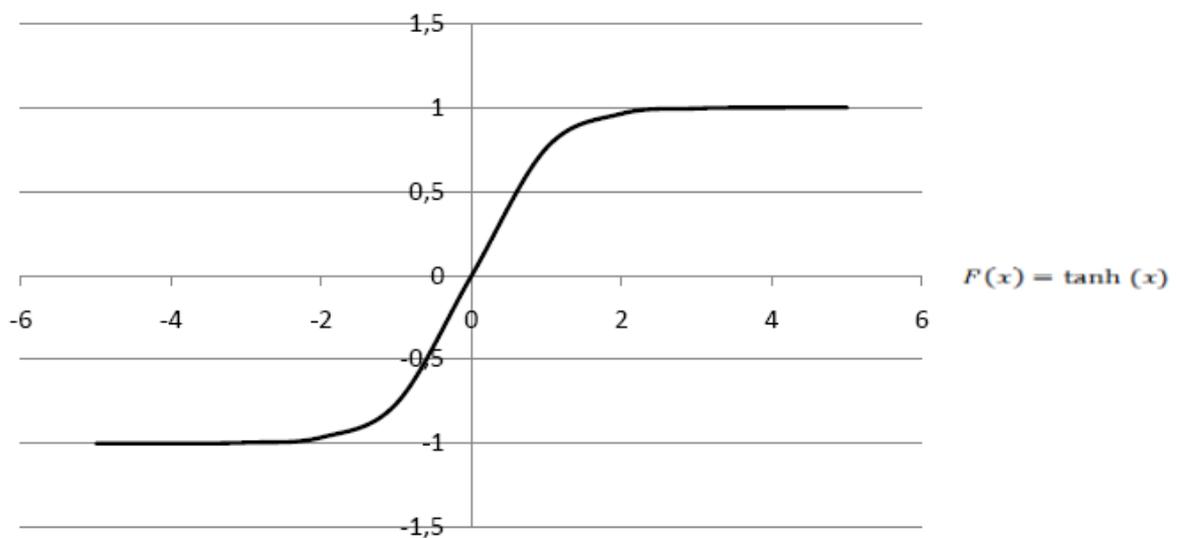


Figura 4-10. Función de activación tangente hiperbólica.

- **Función de salida.**

El último componente que una neurona necesita es la función de salida. El valor resultante de esta función es la salida de esa neurona y por ende determina qué valor se transfiere a las neuronas de la red (figura 4-11). Generalmente los valores de entrada están dentro de un rango de valores que va de [0, 1] o [-1, 1]. Por lo tanto, los valores de salida están comprendidos en el rango [0, 1] o [-1, 1]. En algunos casos también pueden ser binarios.

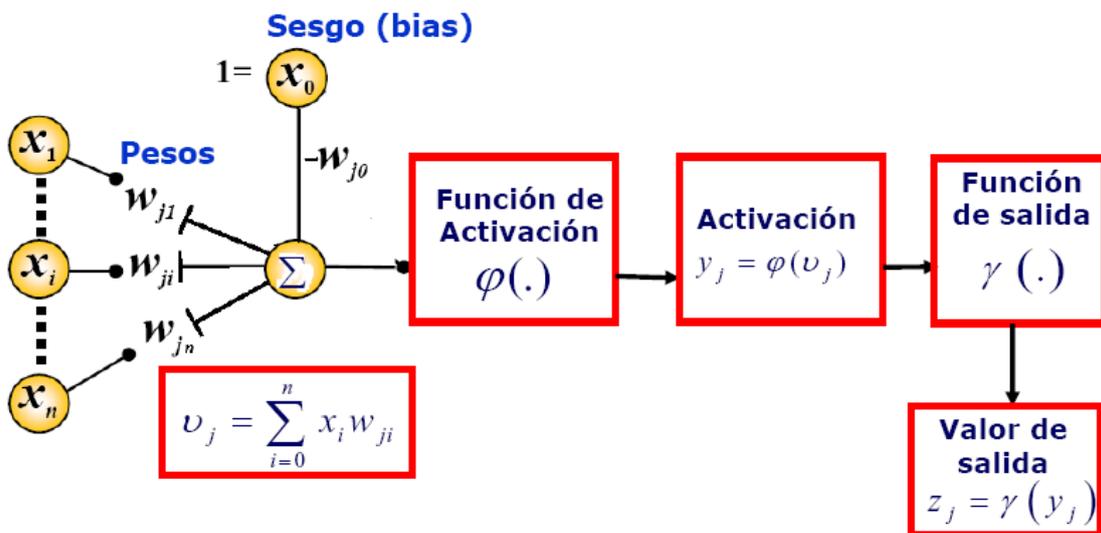


Figura 4-11. Funcionamiento de una neurona de la red.

Las funciones de salida más comunes son:

- **Identidad:** Este es el tipo de función más sencillo, tal que la salida es la misma que la entrada.
- **Binaria:** Si la función de activación está por encima de un umbral determinado, la función toma valor 1. De lo contrario, toma valor 0.

4.3.1 Estructura directa e inversa

Dentro de las redes neuronales también se puede distinguir entre estructura directa e inversa según la disposición de la red [14].

- **Estructura directa**

La estructura directa presenta el esquema de bloques de la figura 4-12. El sistema, en principio desconocido, y la red neuronal tienen las mismas entradas por lo que se conseguirá el mínimo error (objetivo de la red neuronal) cuando la salida de la red neuronal y la señal deseada sean iguales, o lo que es lo mismo, cuando la función de transferencia de la red neuronal sea igual a la del sistema desconocido. Así pues, esta estructura tiene como finalidad la modelización de funciones de transferencia de sistemas de los que, en principio, no se conoce nada pero se tiene la posibilidad de excitarlos con una determinada entrada y así conocer su salida.

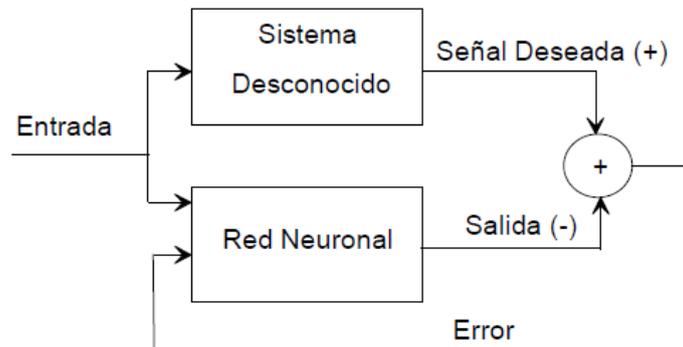


Figura 4-12. Diagrama de una estructura directa.

- **Estructura inversa**

La estructura inversa presenta el esquema de bloques de la figura 4-13 y es la que nos ocupa en el presente Proyecto. El mínimo error en esta estructura se obtendrá cuando la salida de la red neuronal sea la entrada al sistema desconocido lo que conlleva que la función de transferencia de la red neuronal sea la inversa del sistema desconocido. Hay que destacar que el perfecto funcionamiento de esta estructura depende de la estabilidad de la inversa de la función de transferencia del sistema desconocido.

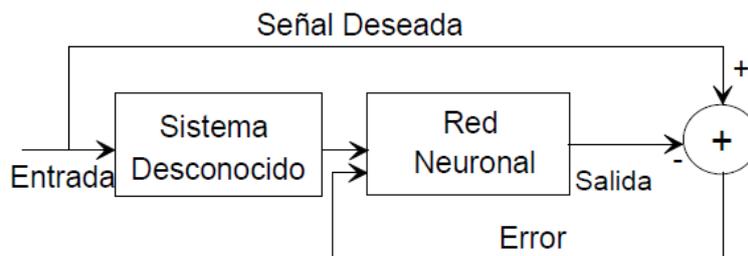


Figura 4-13. Diagrama de una estructura inversa.

4.4 Modo de operación.

El modo de operación se refiere a la manera en que la red neuronal procesa los estímulos externos y crea la respuesta de salida. Puede considerarse a una red neuronal como perteneciente a una de estas dos categorías:

- **Red estática:** En este tipo de red, una vez establecido el valor de las entradas, las salidas alcanzan un valor estacionario independientemente de las entradas en el instante anterior, y en un tiempo siempre por debajo de una determinada cota. Estas redes se pueden caracterizar estructuralmente por la inexistencia de bucles de realimentación y de elementos de retardo entre los distintos elementos de proceso que las forman. Debido a su modo de funcionamiento, estas redes tienen una capacidad limitada para sintetizar funciones dependientes del tiempo en comparación con las redes binarias.
- **Red dinámica:** Este tipo de redes responde de manera diferente ante diferentes secuencias de entradas, haciendo uso de manera implícita o explícita de la variable tiempo. Dicho aspecto las hace más idóneas que las redes estáticas para la síntesis de funciones en las que aparezca de alguna manera el parámetro tiempo.

Es posible considerar también varias opciones en cuanto a la manera en que se realiza la realimentación:

- **Realimentación de la salida,** si las salidas generadas por la red son realimentadas a las capas anteriores.
- **Realimentación del estado,** si la realimentación se produce con las salidas producidas en las capas ocultas.

Las redes con realimentación plantean problemas de convergencia y estabilidad, que son en general de difícil análisis.

4.5 Operaciones de capa

Las operaciones de capa afectan a la capa como un todo. En principio se considerarán las siguientes:

- **Normalización:** Cada elemento de proceso de la capa considerada ajusta su salida para dar un nivel constante de actividad (considerando las salidas de todos los elementos de proceso que forman la capa).
- **Competencia:** Sólo uno o unos pocos elementos de proceso de una capa ganan y producen salida, inhibiendo la generación de las salidas en el resto.

4.6 Otras consideraciones

También es posible caracterizar las redes neuronales teniendo en cuenta la forma de operar a la hora de generar la salida o al actualizar los pesos. Así se tiene:

- **Operación síncrona:** Se dice que una red neuronal opera de forma síncrona cuando todos los elementos de proceso del sistema generan la salida a la vez.
- **Operación asíncrona:** Se dice que una red opera de forma asíncrona cuando los elementos de proceso que la constituyen generan la salida aleatoriamente e independientemente unos de otros. En estos casos puede añadirse a los elementos de proceso entradas de control que indiquen cuando han de ser actualizados los pesos de sus conexiones con los otros elementos de proceso.

Hay que tener en cuenta que, en muchos modelos de redes, la actualización de los pesos requiere la ejecución de la red a fin de calcular el correspondiente error, luego el cambio en el valor de los pesos también queda influido por el modo de operación síncrona o asíncrona.

4.7 Mecanismos de aprendizaje

Los datos de entrada son procesados por la red neuronal con la intención de obtener una salida. Las redes neuronales memorizan los ejemplos anteriores para extraer generalizaciones. Una red neuronal debe aprender a calcular la salida correcta para cada entrada o grupos de entrada, a este proceso de aprendizaje se le denomina proceso de entrenamiento. Al conjunto de datos o ejemplos en el que se basa este proceso se denomina conjunto de datos de entrenamiento.

La topología de la red y las diferentes funciones de cada neurona, bien sea entrada, activación o salida, han de permanecer constantes durante todo el aprendizaje, mientras que los pesos sobre cada una de las conexiones no, es por ello que la clave del aprendizaje de una red neuronal está en la adaptación de los pesos.

El aprendizaje es el proceso por el que una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el mismo se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas.

En los sistemas biológicos, existe una continua destrucción y creación de conexiones entre las neuronas. En los modelos de redes neuronales artificiales un peso con valor distinto de cero supone la creación de una nueva conexión, mientras que un peso de valor cero rompe la conexión.

Durante el proceso de aprendizaje los pesos de las conexiones varían. Se puede decir que el proceso de aprendizaje de la red ha terminado cuando los valores de los pesos permanecen estables:

$$\frac{\delta w_{ij}}{\delta t} = 0$$

Para el aprendizaje de las redes neuronales es importante conocer cuáles son los criterios que se siguen para cambiar el valor asignado a los pesos (las conexiones).

Existen principalmente tres métodos de aprendizaje [15]:

- Aprendizaje supervisado.
- Aprendizaje no supervisado.

4.7.1 Aprendizaje supervisado

El aprendizaje supervisado se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. Se controla la salida de la red y en caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime lo máximo posible a la deseada.

Dentro del aprendizaje supervisado se pueden encontrar:

- **Aprendizaje por corrección del error:** consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos a la salida de la red (en función del error cometido en la salida).

En esta regla de aprendizaje, para cada neurona en la capa de salida se calcula la desviación a la salida conocida como el error (δ), con el objetivo de utilizarlo para modificar los pesos en la conexión de la neurona precedente. El cambio de los pesos se realiza según la siguiente regla:

$$\Delta w_{ij} = \sigma * out_j * (a_{qi} - out_i);$$

donde a_{qi} es la salida deseada de la neurona N_i , $\delta_i = (a_{qi} - out_i)$ la desviación objetivo de la neurona N_i y σ el aprendizaje.

La salida de la neurona N_j (out_j) se utiliza, porque este valor influye en la entrada global y, por tanto, en la activación y luego en la salida de la neurona N_i . Esto es semejante a un “efecto en cadena” (figura 4-14).

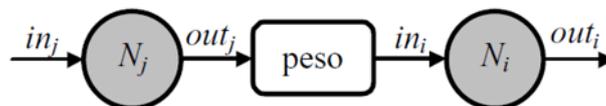


Figura 4-14. Influencia de la salida de la neurona N_j en la entrada de la neurona N_i .

Otro algoritmo muy conocido y que pertenece a esta clasificación es la regla de aprendizaje Delta o regla del mínimo error cuadrado (*LMS Error: Least Mean Squared Error*), al igual que la anterior también utiliza la desviación a la salida, pero toma en consideración a todas las neuronas predecesoras que tiene la neurona de salida. Esto permite cuantificar el error global cometido en cualquier momento durante el proceso de entrenamiento de la red, lo cual es importante, ya que cuanta más información se tenga sobre el error cometido, más rápido se puede

aprender. Por lo que el error calculado (δ) es igualmente repartido entre las conexiones de las neuronas predecesoras.

Hay que destacar la regla de aprendizaje de propagación hacia atrás o de *Backpropagation*, también conocido como regla LMS multicapa, la cual es una generalización de la regla de aprendizaje Delta y será analizada más adelante con mayor detalle ya que será empleada para el entrenamiento de la red con los resultados obtenidos de los ensayos en el laboratorio.

- **El aprendizaje por refuerzo** se trata de un aprendizaje supervisado, más lento que el anterior, se basa en la idea de no disponer de un ejemplo completo del comportamiento deseado, es decir, de no indicar durante el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada. En este tipo de aprendizaje la función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito = +1 o fracaso = -1).
- **El aprendizaje estocástico** consiste en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad.

4.7.1.1 Algoritmo de aprendizaje Backpropagation.

El algoritmo de aprendizaje de *Backpropagation* es un tipo de regla de aprendizaje supervisado por corrección del error, que emplea ciclos de propagación. Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas intermedias de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula el error para cada una de las ellas.

El error se propaga hacia atrás, desde la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa oculta. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta sólo reciben una fracción de la señal total del error, basándose en la contribución relativa que haya aportado cada neurona en la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total. Basándose en la señal de error percibida, se actualizan los pesos de conexión de cada neurona, para hacer que la red converja hacia un estado que permita clasificar correctamente todos los patrones de entrenamiento.

La clave de este proceso se encuentra en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer características de entrada. Tras el entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta de la red responderán con una salida activa si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que las neuronas hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento. Y a la inversa, las unidades de las capas ocultas tienen una tendencia a inhibir su salida si el patrón de entrada no contiene la característica para la que han sido entrenadas.

Varias investigaciones han demostrado que, durante el proceso de entrenamiento, la red *Backpropagation* tiende a desarrollar relaciones internas entre neuronas con el fin de organizar los datos de entrenamiento en clases. Esta tendencia se puede extrapolar, para llegar a la hipótesis de que todas las unidades de la capa oculta de una *Backpropagation* son asociadas de alguna manera a características específicas del patrón de entrada como consecuencia del entrenamiento. La asociación puede no resultar evidente para el observador humano, lo importante es que la red ha encontrado una representación interna que le permite generar las salidas deseadas cuando se le ofrece las entradas, en el proceso de entrenamiento. Esta misma representación interna se puede aplicar a entradas que la red no haya visto antes, y la red las clasificará según las características que comparten con los ejemplos de entrenamiento [13].

4.7.1.1.1 Regla de aprendizaje.

El algoritmo *Backpropagation* para redes multicapa actualiza los pesos y ganancias basándose en el error medio cuadrático. La red *Backpropagation* trabaja bajo aprendizaje supervisado y por tanto necesita un conjunto de entrenamiento que le escriba cada entrada y su valor de salida esperado de la siguiente forma:

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\}$$

Donde p_q es una entrada a la red y t_q es la correspondiente salida deseada para el patrón q -ésimo. El algoritmo debe ajustar los parámetros de la red para minimizar el error medio cuadrático.

El entrenamiento de una red neuronal multicapa se realiza mediante un proceso de aprendizaje, que antes de empezar debe tener definida la tipología de la red esto es: número de neuronas en la capa de entrada que depende del número de componentes del vector de entrada, número de capas ocultas y número de neuronas de cada una de ellas, número de neuronas en la capa de la salida que depende del número de

componentes del vector de salida o patrones objetivo y funciones de transferencia requeridas en cada capa.

Con base a la tipología escogida, se asignan valores iniciales a cada uno de los parámetros que conforman la red.

Hasta ahora no existe una técnica para determinar el número de capas ocultas, ni el número de neuronas que debe contener cada una de ellas para un problema específico, esa elección es determinada por la experiencia del diseñador, el cual debe cumplir con las limitaciones de tipo computacional y considerar que cuantas más capas ocultas el aprendizaje será más complejo y en la etapa de funcionamiento la respuesta tardará más en generarse, pero gracias a los potentes procesadores que existen actualmente la respuesta es instantánea.

Cada patrón de entrenamiento se propaga a través de la red y sus parámetros para producir una respuesta en la capa de salida, la cual se compara con los patrones objetivo o salidas deseadas para calcular el error en el aprendizaje. Este error marca el camino más adecuado para la actualización de los pesos y ganancias que al final del entrenamiento producirán una respuesta satisfactoria a todos los patrones de entrenamiento. Esto se logra minimizando el error medio cuadrático en cada iteración del proceso de aprendizaje.

Cuando se presenta a la red un patrón de entrenamiento, este se propaga a través de las conexiones existentes produciendo una entrada n en cada una de las neuronas de la siguiente capa. La entrada a la neurona j de la siguiente capa se debe a la presencia de un patrón de entrenamiento en la entrada:

$$n_j^0 = \sum_{i=1}^q W_{ji}^0 + b_j^0$$

donde:

- W_{ji}^0 es el peso que une la componente i de la entrada con la neurona j de la primera capa oculta.
- p_i es la componente i del vector p que contiene el patrón de entrenamiento de q componentes.
- b_j^0 es la ganancia de la neurona j de la capa oculta.

El superíndice (0) representa la capa a la que pertenece cada parámetro, en este caso a la capa oculta.

Cada una de las neuronas de la capa oculta tiene como salida a_j^0 que está dada por la ecuación:

$$a_j^0 = f^0 \sum_{i=1}^q W_{ji}^0 p_i + b_j^0$$

donde f^0 es la función de transferencia de las neuronas de la capa oculta.

Las salidas a_j^0 de las neuronas de la capa oculta son las entradas a los pesos de conexión de la capa de salida, $a_k^0 \rightarrow n_k^s$, este comportamiento está descrito por la ecuación:

$$n_k^s = \sum_{j=1}^m W_{kj}^s a_j^0 + b_k^s$$

donde:

- W_{kj}^s es el peso que une la neurona j de la capa oculta con la neurona k de la capa de salida, la cual cuenta con s neuronas.
- a_j^0 es la salida de la neurona j de la capa oculta, la cual cuenta con m neuronas.
- b_k^s es la ganancia de la neurona k de la capa de salida.
- N_k^s es la entrada a la neurona k de la capa de salida.

La red produce una salida final descrita por la ecuación:

$$a_k^s = f^s(n_k^s)$$

donde f^s es la función de transferencia de las neuronas de la capa de salida.

Se obtiene la salida de la red en función de la entrada y de los pesos de conexión con la última capa oculta:

$$a_k^s = f^s\left(\sum_{j=1}^m W_{ki}^s a_j + b_k^s\right)$$

La salida de la red de cada neurona se compara con la salida deseada para calcular el error en cada unidad de salida:

$$\delta_k = (t_k - a_k^s)$$

El error debido a cada patrón p propagado está dado por:

$$ep^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s (\delta_k)^2$$

donde:

- δ_k es el error en la neurona k de la capa de salida.

Este proceso se repite para el número total de patrones de entrenamiento (r). Para un proceso de aprendizaje, el objetivo del algoritmo es actualizar todos los pesos y ganancias de la red minimizando el error medio cuadrático total:

$$e^2 = \sum_{p=1}^r ep^2$$

donde:

- e^2 es el error total en el proceso de aprendizaje en una iteración, después de haber presentado a la red los r patrones de entrenamiento.

El error que genera una red neuronal en función de sus pesos, genera un espacio de n dimensiones, donde n es el número de pesos de conexión de la red. Al evaluar el gradiente del error en un punto de esta superficie se obtendrá la dirección en la cual la función del error tendrá un mayor crecimiento.

Como el objetivo del proceso de aprendizaje es minimizar el error, debe tomarse la dirección negativa del gradiente para obtener el mayor decremento del error y de esta forma su minimización, condición requerida para realizar la actualización de la matriz de pesos en el algoritmo *Backpropagation*:

$$W_{k+1} = W_k - \alpha \nabla ep^2$$

Después de encontrar el valor del gradiente del error, se procede a actualizar los pesos de todas las capas empezando por la de salida. Para la capa de salida la actualización de pesos y ganancias está dada por:

$$W_{kj}(t + 1) = W_{kj}(t) - 2\alpha\delta_k^s$$

$$b_k(t + 1) = b_k(t) - 2\alpha\delta_k^s$$

donde:

- α es el parámetro de aprendizaje que define la velocidad de aprendizaje.

Después de actualizar los pesos y ganancias de la capa de salida se procede a actualizar los pesos y ganancias de la capa oculta mediante las ecuaciones:

$$W_{ji}(t + 1) = W_{ji}(t) - 2\alpha\delta_j^o p_i$$

$$b_j(t + 1) = b_j(t) - 2\alpha\delta_j^o$$

Esta deducción fue realizada para una red de tres capas.

En las técnicas de gradiente descendiente es conveniente avanzar por la superficie de error con incrementos pequeños de los pesos; esto se debe a que se tiene una información local de la superficie y no se sabe lo lejos o lo cerca que se está del punto mínimo, con incrementos grandes, se corre el riesgo de pasar por encima del punto mínimo; con incrementos pequeños, aunque se tarde más en llegar, se evita que esto ocurra.

La elección de un incremento adecuado influye en la velocidad de convergencia del algoritmo, esta velocidad se controla a través del parámetro de aprendizaje α , el cual, por lo general, se escoge como un número pequeño, para asegurar que la red encuentre una solución. Un valor pequeño de α significa que la red tendrá que hacer un gran número de iteraciones. Si se toma un valor muy grande, los cambios en los pesos serán muy grandes, avanzando muy rápidamente por la superficie de error, con el riesgo de saltar el valor mínimo del error y estar oscilando alrededor de él, pero sin poder alcanzarlo.

Es recomendable disminuir el valor de α a medida que disminuye el error de la red durante la fase de entrenamiento, para garantizar así una rápida convergencia, teniendo la precaución de no tomar valores demasiado grandes que hagan que la red oscile alejándose demasiado del valor mínimo.

En el desarrollo matemático que se ha realizado para llegar al algoritmo *Backpropagation*, no se asegura en ningún momento que el mínimo que se encuentre

sea global. En todo caso, si la solución es admisible desde el punto de vista del error, no importa si el mínimo es local o global o si se ha detenido en algún momento previo a alcanzar un verdadero mínimo.

A continuación se expondrá de forma gráfica la deducción matemática alcanzada en el punto anterior. Para ello se utilizará una red formada por dos entradas, una salida y dos capas ocultas de neuronas. La estructura de red utilizada se observa en la figura 4-15.

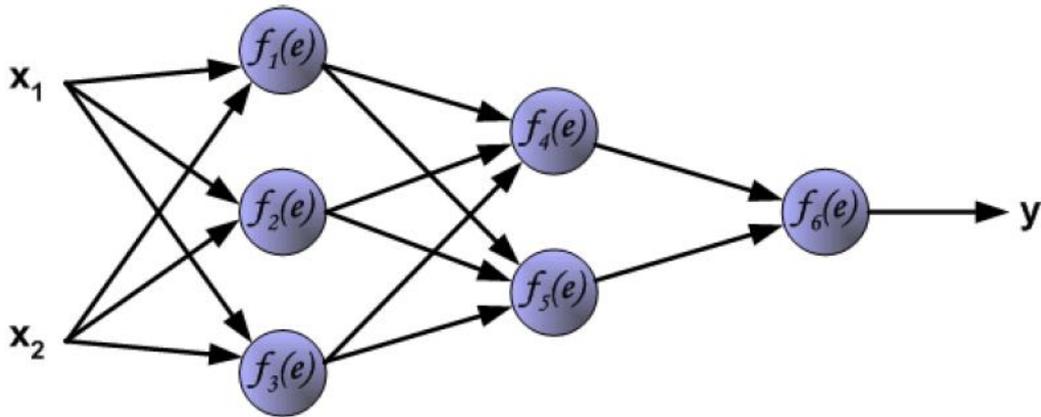


Figura 4-15. Estructura de una red.

Cada neurona está compuesta por dos unidades; la primera unidad representa el coeficiente de pesos de las neuronas de entrada, mientras que la segunda unidad representa la función de activación de la neurona (figura 4-16), donde e es la suma de las señales de entrada, mientras que $y=f(e)$ es la función de salida.

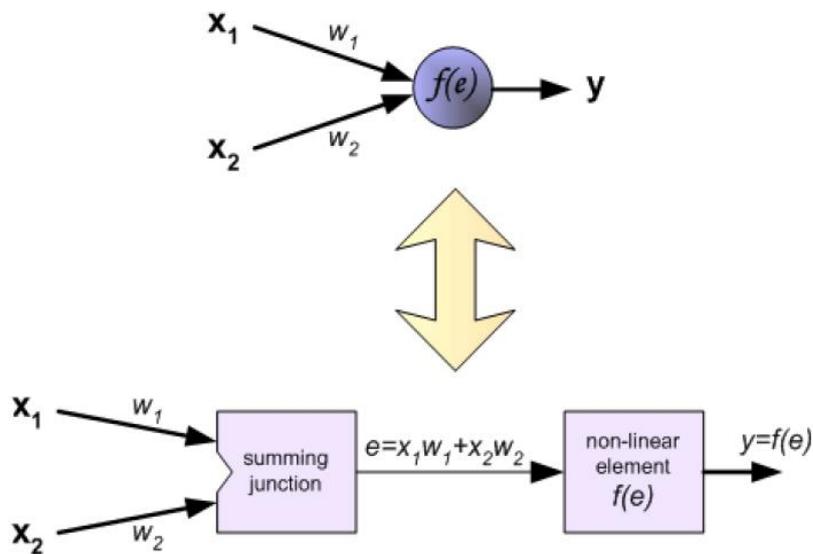


Figura 4-16. Componentes de una neurona.

Se trata de un proceso iterativo y en cada iteración los coeficientes de los pesos son modificados usando los datos de entrenamiento. La modificación se calcula usando el procedimiento descrito a continuación: cada ciclo comienza con las señales de entrada en una neurona entrada (x_1 y x_2), formándose la señal de salida de dicha neurona, y así se puede determinar la salida para cada capa.

La figura 4-17 muestra la propagación de la señal a través de la red, donde $w_{(xm)n}$ representa los pesos de cada neurona x_m de la capa n , e y_n representa la señal de salida de la neurona n .

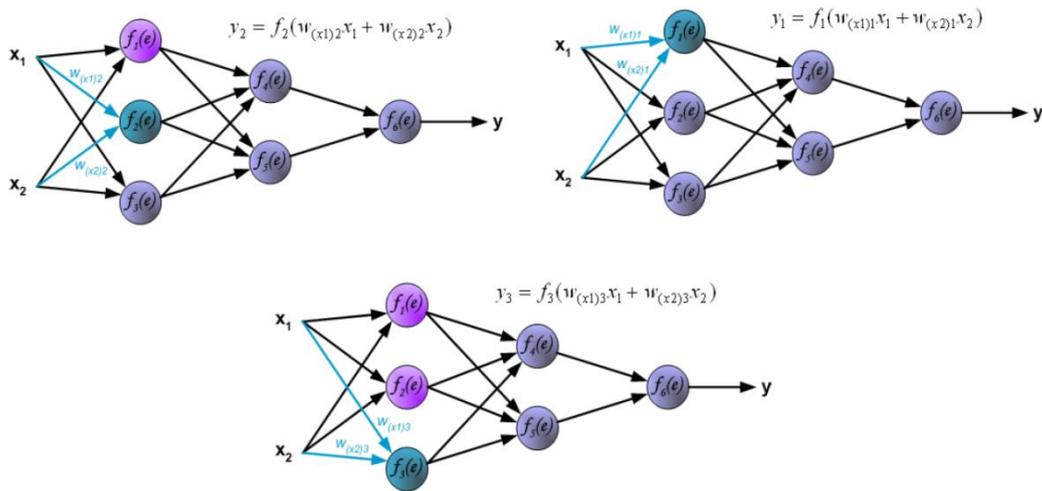


Figura 4-17. Reparto de pesos en la primera capa de neuronas.

La señal de propagación atraviesa la capa oculta como se puede observar en la figura 4-18, donde w_{mn} representa los pesos de conexiones entre la salida de la neurona m y la entrada de la neurona n de la siguiente capa. La señal continúa propagándose hasta alcanzar la capa de salida (figura 4-19).

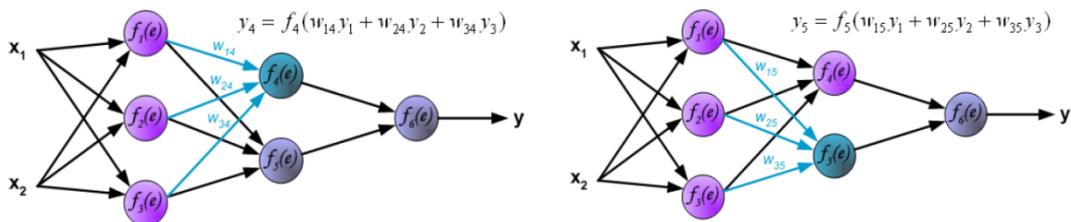


Figura 4-18. Reparto de pesos en la segunda capa de neuronas.

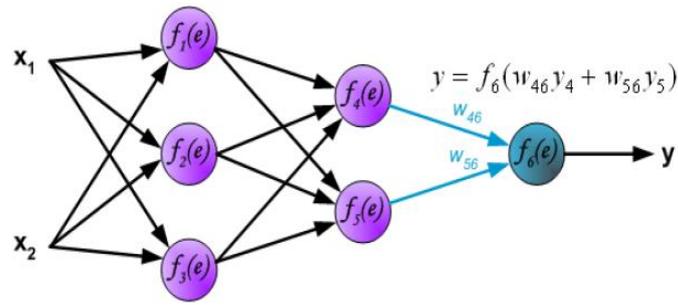


Figura 4-19. Señal de salida.

El siguiente paso del algoritmo consiste en comparar el valor de la señal de salida con el valor deseado. La diferencia entre ambas es conocida como la señal de error δ de la capa de salida (figura 4-20). El error se propaga en dirección contraria, es decir, atravesado todas las capas intermedias hasta alcanzar las neuronas de la capa de salida (figuras 4-21 y 4-22).

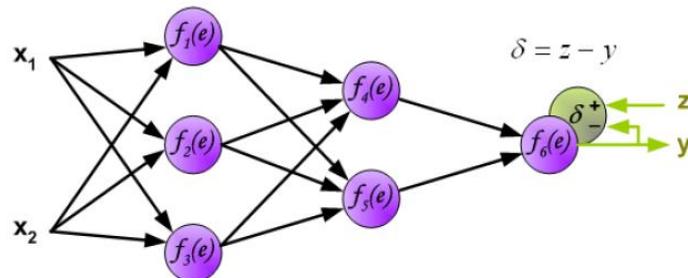


Figura 4-20. Diferencia entre la salida obtenida y la salida deseada.

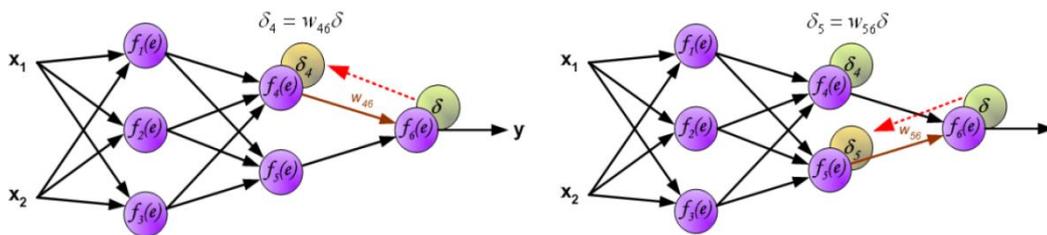


Figura 4-21. Propagación del error en la capa intermedia.

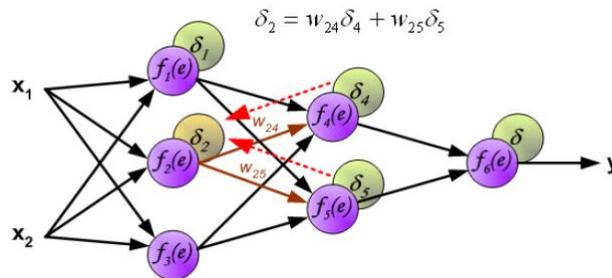


Figura 4-22. Propagación del error en la primera capa de la red.

Cuando la señal de error ha sido propagada por toda la red, los pesos son modificados según las figuras 4-23, 4-24 y 4-25, donde n es el factor de aprendizaje. Este proceso es iterativo hasta que la señal de salida obtenida sea la deseada.

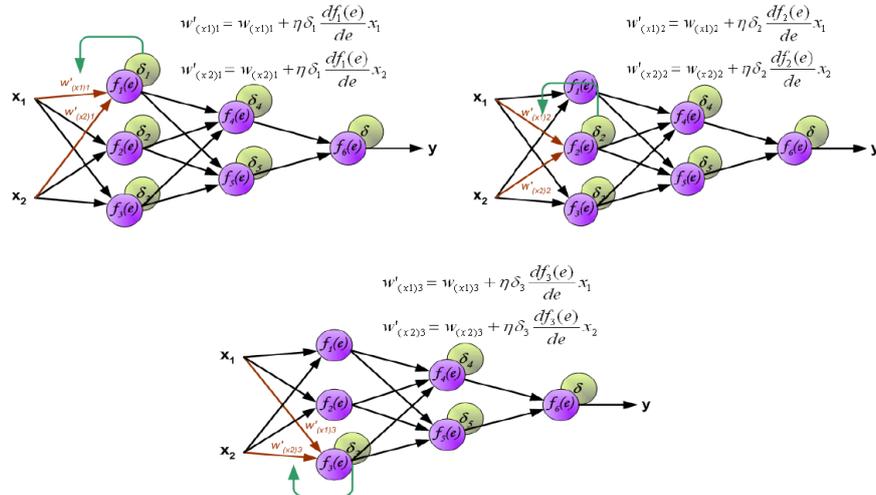


Figura 4-23. Modificación de los pesos en la capa de entrada.

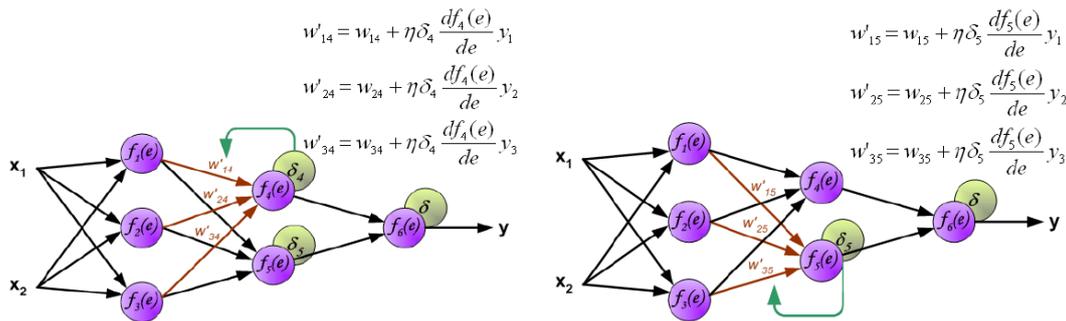


Figura 4-24. Modificación de los pesos en la capa intermedia.

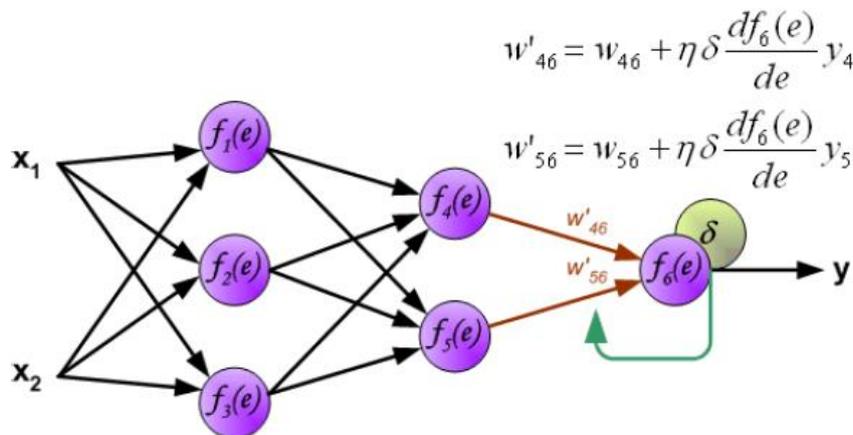


Figura 4-25. Propagación del error hasta la capa de salida.

4.7.2 Aprendizaje no supervisado

Las redes con aprendizaje no supervisado, no precisan influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta. Estas redes deben encontrar las características, regularidades, correlaciones o categorías que se puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada.

Existen varias posibilidades en cuanto a la interpretación de la salida de estas redes, que dependen de su estructura y del algoritmo de aprendizaje empleado.

Se suelen considerar dos tipos de algoritmos de aprendizaje no supervisado:

- **Aprendizaje hebbiano.** La regla de aprendizaje hebbiano pretende extraer características de los datos de entrada. Se basa en que si dos neuronas N_i y N_j toman el mismo estado simultáneamente (ambas activas o ambas inactivas), el peso de la conexión entre ambas se incrementa.
- **Aprendizaje competitivo y comparativo.** El aprendizaje comparativo y competitivo se orienta a la clasificación de los datos de entrada. Como característica principal del aprendizaje competitivo se puede decir que, si un patrón nuevo se determina que pertenece a una clase reconocida previamente, entonces la inclusión de este nuevo patrón a esta clase matizará la representación de la misma. Si el patrón de entrada se determinó que no pertenece a ninguna de las clases reconocidas anteriormente, entonces la estructura y los pesos de la red neuronal serán ajustados para reconocer la nueva clase.

4.7.3 Aprendizaje on-line y off-line

Otro criterio que se puede utilizar para diferenciar las reglas de aprendizaje se basa en considerar si la red puede aprender durante su funcionamiento habitual o si el aprendizaje supone la inhabilitación de la red hasta que el proceso termine.

En el primer caso, se trataría de un aprendizaje *on-line*, mientras que el segundo es lo que se conoce como *off-line*. Cuando el aprendizaje es *off-line*, se distingue entre una fase de aprendizaje o entrenamiento y una fase de operación o funcionamiento, existiendo un conjunto de datos de entrenamiento y un conjunto de datos de test o prueba, que serán utilizados en la correspondiente fase. Una vez terminada la etapa de entrenamiento de la red los pesos de las conexiones permanecen fijos. Debido a su carácter estático, estos sistemas no presentan problemas de estabilidad en su funcionamiento.

4.8 Ventajas de las redes neuronales

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Por ejemplo, son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc. Esto hace que ofrezcan numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas.

Entre las ventajas se incluyen:

- **Aprendizaje adaptativo.** La capacidad de aprendizaje adaptativo es una de las características más atractivas de redes neuronales. Esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante entrenamiento y ejemplos.
- **Auto-organización.** Una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje. Esta auto-organización provoca la generalización: facultad de las redes neuronales de responder apropiadamente cuando se les presentan datos o situaciones a las que no había sido expuesta anteriormente. El sistema puede generalizar la entrada para obtener una respuesta. Esta característica es muy importante cuando se tiene que solucionar problemas en los cuales la información de entrada no es muy clara; además permite que el sistema dé una solución, incluso cuando la información de entrada está especificada de forma incompleta.
- **Tolerancia a fallos.** La destrucción parcial de una red conduce a una degradación de su estructura; sin embargo, algunas capacidades de la red se pueden retener, incluso sufriendo un gran daño.
- **Operación en tiempo real.** Una de las mayores prioridades, casi en la totalidad de las áreas de aplicación, es la necesidad de realizar procesos con datos de forma muy rápida. Las redes neuronales se adaptan bien a esto debido a su implementación paralela.
- **Fácil inserción dentro de la tecnología existente.** Con las herramientas computacionales existentes una red puede ser rápidamente entrenada, comprobada, verificada y trasladada a una implementación hardware de bajo coste. Por lo tanto, no se presentan dificultades para la inserción de redes neuronales en aplicaciones específicas, por ejemplo de control, dentro de los sistemas existentes. De esta manera, las redes neuronales se pueden utilizar para mejorar sistemas en forma incremental y cada paso puede ser evaluado antes de acometer un desarrollo más amplio.

4.9 Otras aplicaciones de las redes neuronales artificiales

Las redes neuronales pueden utilizarse en un gran número y variedad de aplicaciones. Se pueden desarrollar redes neuronales en un periodo de tiempo razonable, con la capacidad de realizar tareas concretas mejor que otras tecnologías. Cuando se implementan mediante hardware, presentan una alta tolerancia a fallos del sistema y proporcionan un alto grado de paralelismo en el procesamiento de datos. Esto posibilita la inserción de redes neuronales de bajo coste en sistemas existentes y recientemente desarrollados.

Hay muchos tipos diferentes de redes neuronales; cada uno de los cuales tiene una aplicación particular más apropiada. Algunas aplicaciones comerciales son:

- Biología:
 - Aprender más acerca del cerebro y otros sistemas.
 - Obtención de modelos de la retina.

- Empresa:
 - Evaluación de probabilidad de formaciones geológicas y petrolíferas.
 - Identificación de candidatos para posiciones específicas.
 - Explotación de bases de datos.
 - Optimización de plazas y horarios en líneas de vuelo.
 - Optimización del flujo del tránsito controlando convenientemente la temporización de los semáforos.
 - Reconocimiento de caracteres escritos.
 - Modelado de sistemas para automatización y control.
 - Medio ambiente:
 - Analizar tendencias y patrones.
 - Previsión de stock.
 - Previsión del tiempo.

- Finanzas:
 - Previsión de la evolución de los precios.
 - Valoración del riesgo de los créditos.
 - Identificación de falsificaciones.
 - Interpretación de firmas.

- Manufacturación:
 - Robots automatizados y sistemas de control (visión artificial y sensores de presión, temperatura, gas, etc.).
 - Control de producción en líneas de procesos.
 - Inspección de la calidad.

- Medicina:
 - Analizadores del habla para ayudar en la audición de sordos profundos.
 - Diagnóstico y tratamiento a partir de síntomas y/o de datos analíticos (electrocardiograma, encefalogramas, análisis sanguíneo, etc.).
 - Monitorización en cirugías.
 - Predicción de reacciones adversas en los medicamentos.
 - Entendimiento de la causa de los ataques cardíacos.
- Militares:
 - Clasificación de las señales de radar.
 - Creación de armas inteligentes.
 - Optimización del uso de recursos escasos.
 - Reconocimiento y seguimiento en el tiro al blanco.
- Procesamiento de señales.
 - Reconocimiento de patrones en imágenes.
 - Reconocimiento de caracteres.
 - Reconocimiento de voz.
 - Detección de objetos.

La mayoría de estas aplicaciones consisten en realizar un reconocimiento de patrones, como puede ser buscar un patrón en una serie de ejemplos, clasificar patrones, completar una señal a partir de valores parciales o reconstruir el patrón correcto partiendo de uno distorsionado. Sin embargo, está creciendo el uso de redes neuronales en distintos tipos de sistemas de control.

Desde el punto de vista de los casos de aplicación, la ventaja de las redes neuronales reside en el procesado paralelo, adaptativo y no lineal. El dominio de aplicación de las redes neuronales también se lo puede clasificar de la siguiente forma: asociación y clasificación, regeneración de patrones, regresión y generalización, y optimización.

Capítulo 5

Desarrollo práctico y resultados experimentales

5.1 Desarrollo del ensayo y toma de datos

Para desarrollar el presente proyecto, se ha requerido realizar unos ensayos experimentales con un amortiguador magneto-reológico en el banco de ensayos. Se ha utilizado un amortiguador que equipa el Audi TT (2011). En la figura 5-1 se puede apreciar los elementos de los que consta la suspensión semiactiva equipada con amortiguadores magneto-reológicos,

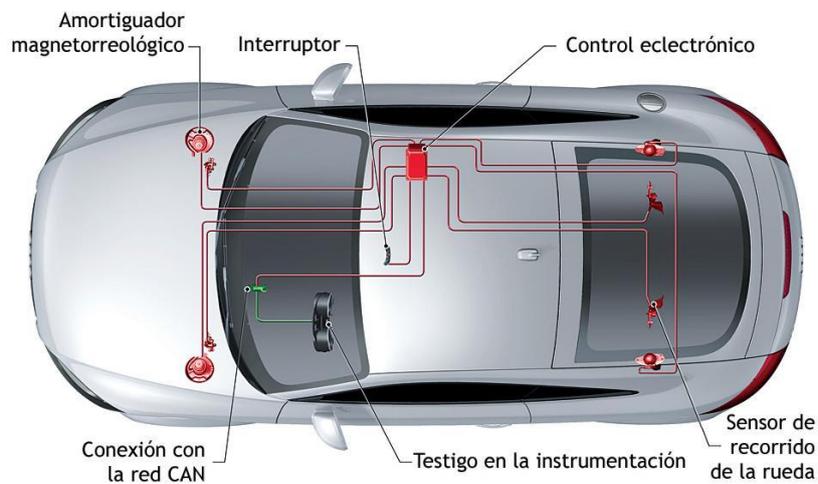


Figura 5-1. Elementos de la suspensión semiactiva de un Audi TT.

Para llevar a cabo los ensayos se ha utilizado un banco de ensayos como el que se muestra en la figura 5-2. Está formado por una torreta con un cilindro hidráulico (figura 5-3) conectado a un ordenador desde el cual, con un sencillo interfaz, se controla el funcionamiento de la máquina. Para ello hay una serie de sensores de fuerza, posición, etc. situados en la máquina que envían la información al ordenador donde se guarda para posteriormente tratarla y depurarla. Para la variación de la corriente se ha empleado un potenciómetro conectado al amortiguador como el de la figura 5-4. Para medir la corriente que le llegaba se ha usado un multímetro digital.



Figura 5-2. Banco y máquina de ensayos.



Figura 5-3. Cilindro hidráulico.

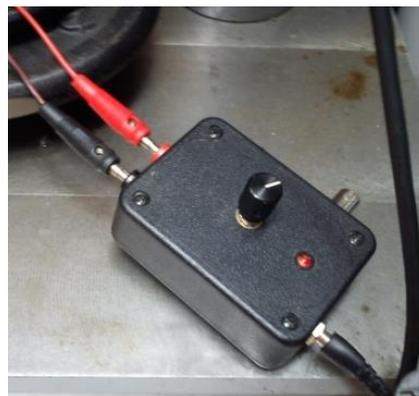


Figura 5-4. Transformador de corriente.

Debido a que el comportamiento del amortiguador no solo varía con la corriente sino que también se ve afectado por la temperatura se ha usado una sonda laser de temperatura (figura 5-5) que indica en todo momento la temperatura de las paredes externas del amortiguador.



Figura 5-5. Sonda laser de temperatura.

Para iniciar el ensayo, es prioritario fijar el amortiguador magneto-reológico adecuadamente. Para ello, se ha necesitado fabricar un soporte que fuera enroscado al banco de ensayos y, al mismo tiempo, sujetara la base del amortiguador. Además, fue preciso hacer una pequeña modificación en el amortiguador para alimentar con corriente eléctrica el fluido magneto-reológico. El amortiguador irá fijado por un extremo al soporte que se ha fabricado y por el otro a la máquina de ensayos. Es necesario comprobar que la instalación es correcta y esté firmemente anclado para obtener unos resultados lo más fidedignos posible.

Posteriormente, se tiene que calcular la carrera del amortiguador para poder hacer que, una vez colocado, en la posición inicial el vástago esté extendido la mitad de su carrera total. Para empezar se toma como posición "0" del ensayo el punto de montaje y se comprime lentamente el amortiguador hasta que se llega a un punto (P1) en el que el sensor detecta un aumento brusco de la fuerza, lo cual indica que se está cerca de la pared inferior y por tanto del punto final de la carrera.

Para calcular la carrera hacia arriba se devuelve el embolo a la posición inicial, y se repite la misma operación pero esta vez levantando lentamente el émbolo, traccionando el amortiguador, hasta la posición (P2) donde la fuerza nuevamente aumenta bruscamente.

Conocidos los puntos P1 y P2, la carrera del amortiguador queda definida como $P1+P2$ y el punto medio será $\frac{P1+P2}{2}$.

Los puntos obtenidos fueron $P1=-52,05$ mm, al estar por debajo del punto "0", y $P2=30.88$ mm. Por tanto la carrera del amortiguador es 80 mm y el punto medio está situado en la posición -10 mm, con respecto al punto "0" de montaje.

Conocido este dato se desplaza el embolo a la posición -10 mm y se le indica al programa que ese va ser el nuevo punto "0".

Por otro lado, el software de control de la máquina permitirá la frecuencia, amplitud, tipo de señal, número de ciclos, etc. A la que se quiere ensayar el amortiguador. A su vez recibe información de los sensores que posee el banco de ensayos. Esta información nos permitirá conocer el comportamiento de dicho amortiguador.

Para los ensayos realizados se ha variado la frecuencia, la amplitud y la corriente acorde a los rangos enumerados en la tabla 5-1:

TABLA 5-1. AMPLITUDES, FRECUENCIAS Y CORRIENTES UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS.

Amplitud [cm]	10		20		30	
Frecuencia [Hz]	1	2	3	4	5	6
Corriente (A)	0	0.5	1	1.5		

Es decir, cada una de las amplitudes se ha ensayado a cada una de las diferentes frecuencias (1, 2, 3, 4, 5 y 6 Hz), y a su vez, a cada una de las diferentes corrientes de alimentación (0, 0.5, 1 y 1.5 A). De todo este proceso se ha obtenido un total de 2424 registros de datos.

Del software controlador de la máquina se obtiene un fichero de texto que contiene para cada uno de los 2424 registros los valores de tiempo, desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza, frecuencia y corriente como se muestra en la tabla 5-2.

TABLA 5-2. DATOS OBTENIDOS PARA CADA REGISTRO.

Tiempo [s]	Desplazam. [cm]	Velocidad [mm/s]	Aceleración [mm/s²]	Fuerza [kN]	Frecuencia [Hz]	Corriente [A]
0,99	-8,24	0,17	0,00	0,26	1	0
1,00	-6,36	0,18	0,00	0,27	1	0
1,01	-4,46	0,18	0,00	0,27	1	0
1,02	-2,53	0,19	0,00	0,28	1	0
...
0,33	-14,18	1,00	0,05	1,90	6	1,5

Una vez se han obtenido los datos, ya se puede dibujar gráficamente el comportamiento del amortiguador magneto-reológico. Por ejemplo, en la figura 5-6 se puede ver la gráfica fuerza frente a desplazamiento a una frecuencia de 1 Hz para las diferentes intensidades de corriente. En la figura 5-7, se muestra cómo se comporta la fuerza frente a la velocidad en nuestro amortiguador.

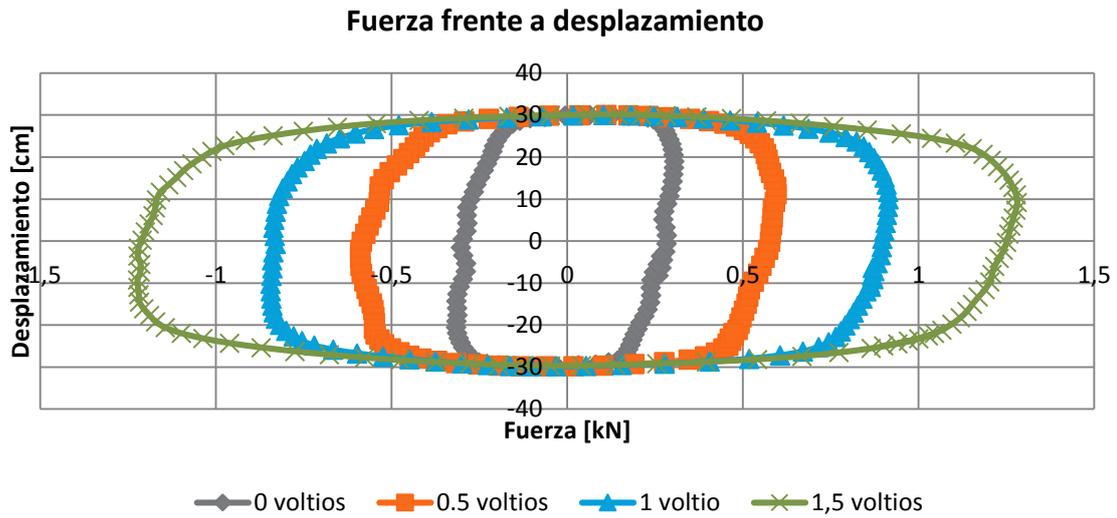


Figura 5-6. Curva experimental fuerza frente a desplazamiento del amortiguador.

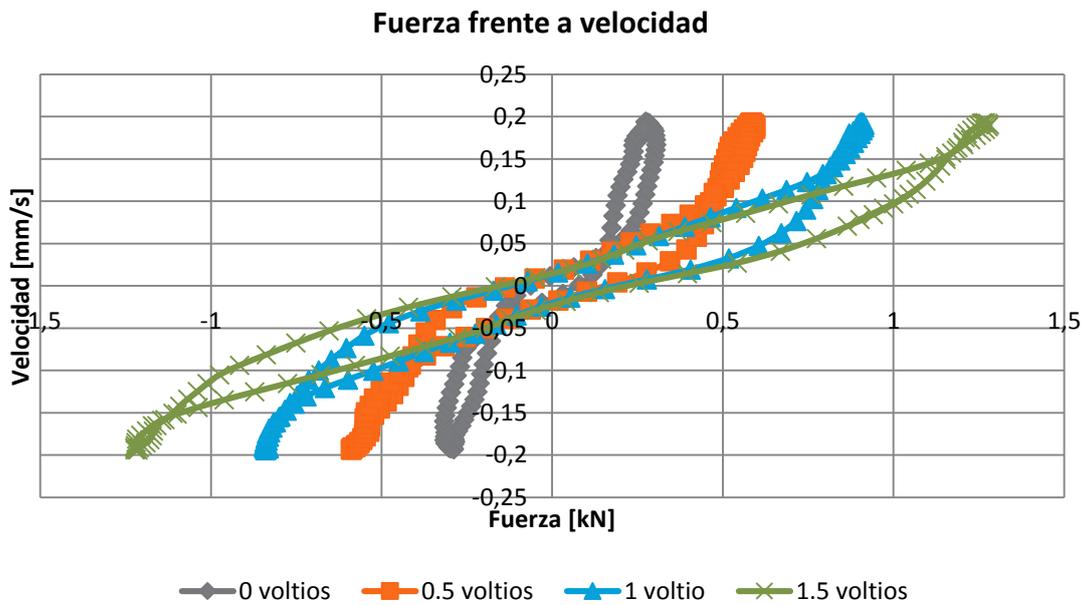


Figura 5-7. Curva experimental fuerza vs velocidad del amortiguador.

Una vez obtenidos todos los datos de los ensayos experimentales, tenemos que prepararlos para su posterior procesamiento en la red neuronal mediante el software Java_NNS.

En primer lugar y para optimizar el aprendizaje de la red neuronal, es necesario normalizar los valores entre -1 y 1 que se van a introducir en la red debido a que son de órdenes de magnitud diferentes. De no ser así, no se conseguiría un buen estudio ya que habría variables que tendrían más peso que otras cuando el software fuera ajustando los parámetros de la red. Para ello, se divide cada valor entre el valor máximo obtenido de dicha magnitud:

- Desplazamiento: $d_i \text{ normalizado} = \frac{d_i}{d_{max}}$
- Velocidad: $v_i \text{ normalizado} = \frac{v_i}{v_{max}}$
- Frecuencia: $f_i \text{ normalizado} = \frac{f_i}{f_{max}}$
- Fuerza: $F_i \text{ normalizado} = \frac{F_i}{F_{max}}$
- Corriente: $v_i \text{ normalizado} = \frac{v_i}{v_{max}}$

Posteriormente, se debe extraer una serie de datos elegidos al azar de todos los disponibles para generar un patrón que servirá para validar la red que se haya entrenado. Es un requisito indispensable que los datos extraídos sean representativos de todo el rango de datos que se ha obtenido de los ensayos. De las 2424 toma de datos que se ha conseguido a través de los ensayos, 2078 de ellas formarán parte del entrenamiento de la red y 347, aproximadamente un 15% del total, formarán parte del patrón de validación de la red. En la figura 5-8 se representa gráficamente los datos utilizados para el aprendizaje y los datos escogidos para la validación usando la fuerza correspondiente a cada toma de datos del ensayo para comprobar que se han escogido unos valores que cubren ampliamente y son representativos de todo el espectro de datos de nuestro ensayo.

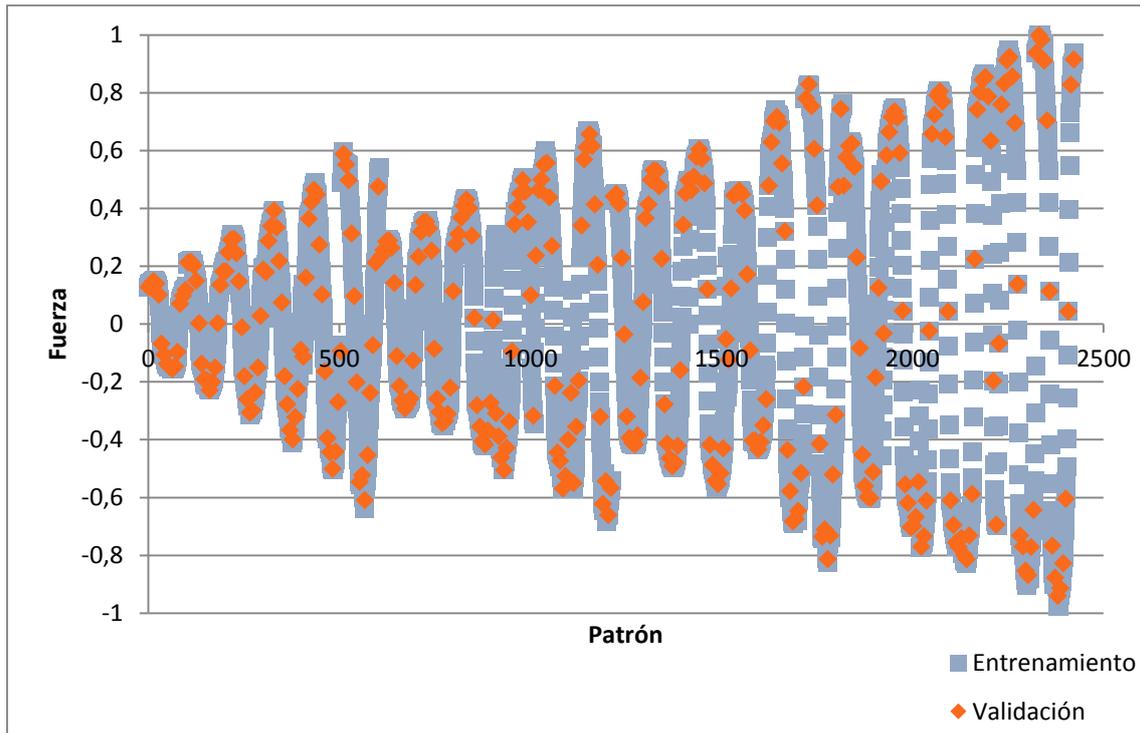


Figura 5-8. Representación de los datos empleados para entrenar y validar.

Por último, se debe adaptar el formato de entrada de datos al que es requerido por nuestro software (Java-NNS) para trabajar. El archivo debe tener un formato de texto plano *.txt* y contar con un encabezado en el que se resume el número de variables de entrada, de salida y el número total de patrones que dispone el documento. A continuación, aparecen en columnas, separadas por una tabulación, los valores que va tomando cada variable para el mismo instante de tiempo en cada una de los ensayos realizados. El caracter delimitador de la parte decimal de cada valor es la *coma (,)*. Se puede ver el resultado en la figura 5-9.

Las primeras columnas se refieren a las variables de entrada, las cuales se han dispuesto en el siguiente orden: desplazamiento, velocidad, frecuencia y fuerza; y la última columna a la variable de salida, la corriente. De esta forma si se lee una línea se puede interpretar que para ese conjunto de datos de entrada, las primeras cuatro columnas, se obtiene el valor registrado en la última columna.

```

Datos.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
SNNS pattern definition file v3.2generated
at Mon Apr 25 15:58:23 1994
No. of patterns : 2424
No. of input units : 4
No. of output units : 1
-0,2757802      0,154335056    0,166666667    0,128254492    0
-0,21289212    0,158641949    0,166666667    0,132080871    0
-0,149076354   0,162338217    0,166666667    0,134913715    0
-0,084643362   0,165441376    0,166666667    0,137847012    0
-0,019887801   0,167904648    0,166666667    0,139805344    0
0,044887086    0,169667268    0,166666667    0,140195166    0
0,109492709    0,170699232    0,166666667    0,137957328    0
0,173598652    0,171005379    0,166666667    0,135051235    0
0,236723206    0,170546622    0,166666667    0,136328188    0
0,298728662    0,169258397    0,166666667    0,140449682    0
0,359598272    0,167200128    0,166666667    0,143696172    0
0,418991428    0,164513018    0,166666667    0,14581798     0
0,476540183    0,161235298    0,166666667    0,147802564    0
0,532088302    0,157322698    0,166666667    0,149120141    0
0,585441974    0,152772638    0,166666667    0,149994558    0
0,636378405    0,147619607    0,166666667    0,150562267    0
0,684701242    0,141891762    0,166666667    0,149574888    0
0,730059733    0,135583851    0,166666667    0,1480995      0
0,772206793    0,128646427    0,166666667    0,146370808    0
0,811121275    0,121074775    0,166666667    0,143616543    0
0,846699012    0,112968034    0,166666667    0,140544773    0
0,878713329    0,104430305    0,166666667    0,137571054    0
0,907028104    0,09549739     0,166666667    0,134652785    0
0,931705074    0,0862129      0,166666667    0,130932064    0
0,95283462     0,076703525    0,166666667    0,126533852    0
0,970458101    0,067132761    0,166666667    0,12139301     0
0,984563706    0,057613369    0,166666667    0,113433306    0
0,994968028    0,048148554    0,166666667    0,101695636    0
1,001611939    0,038647003    0,166666667    0,086278299    0
1,004801786    0,029081761    0,166666667    0,063677333    0
1,004599206    0,019568383    0,166666667    0,031609372    0
1,000482725    0,01012424     0,166666667    -0,002801599   0
0,992019911    0,000486174    0,166666667    -0,031069809   0
0,979026321    -0,009681715   0,166666667    -0,051762102   0
0,961098635    -0,020589531   0,166666667    -0,066631199   0
0,937983043    -0,032345936   0,166666667    -0,076696889   0
0,91005064     -0,044862919   0,166666667    -0,083451232   0
0,877968528    -0,057693264   0,166666667    -0,088966385   0
0,842258751    -0,070171352   0,166666667    -0,094207133   0
0,80324261     -0,081755691   0,166666667    -0,098895305   0
0,761166423    -0,092212766   0,166666667    -0,102502414   0
0,716171866    -0,101580245   0,166666667    -0,105027448   0
0,668326334    -0,110061412   0,166666667    -0,108112445   0
0,617670315    -0,117922894   0,166666667    -0,112621288   0
0,564287799    -0,125400617   0,166666667    -0,116838441   0
    
```

Figura 5-9. Patrón de datos con el formato adecuado para Java-NNS.

5.2 Tipología de la red neuronal

Una vez obtenidos y adaptados todos los datos y patrones, tanto de entrenamiento como de aprendizaje, se debe empezar a darle forma a nuestra red neuronal. A priori, se tiene un sistema con cuatro entradas de datos a la red: desplazamiento, velocidad, frecuencia y corriente. Como salida, tendríamos la fuerza generada. Si utilizáramos esta tipología de red, se trataría de un modelo directo.

En el caso que se está estudiando, se trata de una red neuronal de modelo inverso. Lo que se busca es obtener qué valor de corriente (salida del sistema) se necesita para alimentar el amortiguador para generar así la fuerza requerida por el sistema. Entonces, la fuerza pasaría a ser una entrada del sistema. Por tanto, la diferencia respecto al modelo directo es que la fuerza y la corriente intercambian sus papeles dentro de la red, siendo la fuerza una entrada al sistema y la corriente la salida que buscamos.

Retrocediendo al capítulo 4 en el cual estudiamos las redes neuronales artificiales, cabe recordar que están formadas por tres tipos de capas y se puede empezar a formar nuestra red neuronal:

- Capa de entrada, que actúa como entrada al sistema. En nuestro caso, esta capa estará formada por cuatro neuronas que se corresponden con el desplazamiento, la velocidad, la frecuencia y la fuerza.
- Capas ocultas o intermedias, cuyas neuronas son las encargadas de extraer, procesar y memorizar la información relativa al caso estudiado. En este caso, se entrenará la red utilizando una y dos capas ocultas, según el caso, y el número de neuronas que habrá en cada una de ellas irá variando entre 5 y 25 en incrementos de 5 neuronas.
- Capa de salida, cuyas neuronas son salidas de la información para que esta pueda ser leída. En nuestra red, la capa de salida estará formada por una única neurona de salida que corresponderá con la intensidad de la corriente.

Las distintas redes creadas se han nombrado de la siguiente forma:

- Redes neuronales con una capa intermedia.

Red a_b1_c , donde a es el número de neuronas en la capa de entrada, $b1$ es el número de neuronas de la capa intermedia y c es el número de neuronas de la capa de salida. En la figura 5-10 se puede ver un ejemplo de red 4_5_1 con una capa de entrada de cuatro neuronas, una capa intermedia de cinco neuronas y una capa de salida de una única neurona.

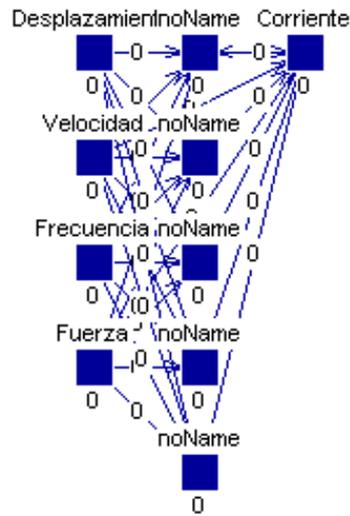


Figura 5-10. Ejemplo de red con una capa intermedia (Red 4_5_1).

- Redes neuronales con dos capas intermedias.

Red $a_b1_b2_c$, donde a es el número de neuronas en la capa de entrada, $b1$ es el número de neuronas de la primera capa intermedia, $b2$ es el número de neuronas de la segunda capa intermedia y c es el número de neuronas de la capa de salida. En la figura 5-11 se puede ver un ejemplo de red 4_10_10_1 con una capa de entrada de cuatro neuronas, dos capas intermedias de diez neuronas cada una y por último una capa de salida de una sola neurona.

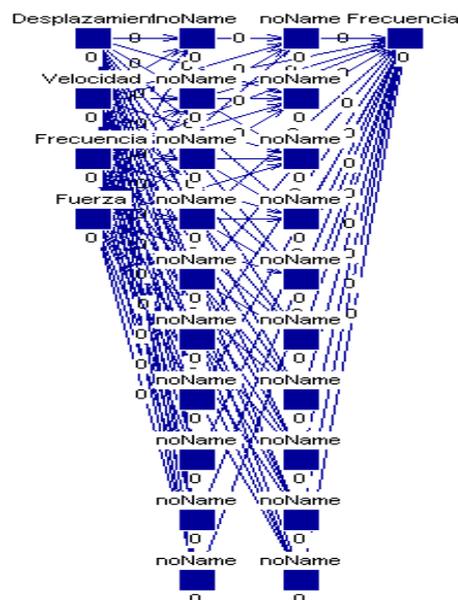


Figura 5-11. Ejemplo de red con una capa intermedia (Red 4_10_10_1).

Las estructuras de red que se han analizado durante el periodo de entrenamiento son diez, y se puede resumir su estructura en la tabla 5-3:

TABLA 5-3. REDES ENTRENADAS.

Redes con una capa oculta	Redes con dos capas ocultas
Red 4_5_1	Red 4_5_5_1
Red 4_10_1	Red 4_10_10_1
Red 4_15_1	Red 4_15_15_1
Red 4_20_1	Red 4_20_20_1
Red 4_25_1	Red 4_25_25_1

Se trata de diez estructuras diferentes de red. Todas ellas tienen en común el número de neuronas en la capa de entrada, cuatro, y una en la capa de salida. La diferencia entre las redes anteriores se encuentra en el número de capas intermedias y las neuronas que componen cada una de esas capas. Además, todas las neuronas se encuentran conectadas entre sí.

Una vez establecida la estructura de la red hay que definir los factores de aprendizaje que se emplean en el entrenamiento de la red y justificar el porqué de su elección.

Para la capa de entrada y las capas ocultas, se utiliza como función de activación la función sigmoideal. La elección de dicha función se debe a que presenta una buena respuesta en las redes que utilizan el algoritmo de *backpropagation*. La función sigmoideal presenta dos variables: la función tangente hiperbólica (figura 5-12) y la función logística, ambas con características similares. Se decide utilizar la primera de ellas, porque el rango de salida se encuentra entre -1 y 1, mientras que la función logística sólo produce salidas positivas. De esta manera, no se limita el comportamiento de las neuronas. En la capa de salida, se utiliza como función de activación la función lineal.

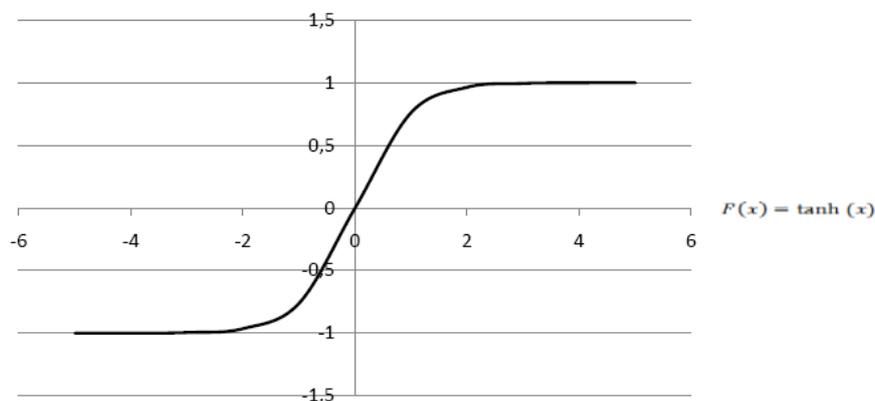


Figura 5-12. Función de activación tangente hiperbólica.

Por último, se tiene que establecer el factor o tasa de aprendizaje. Es el elemento encargado del entrenamiento de red y la importancia reside en su correcta elección para proporcionar resultados favorables. Si el factor es un valor alto, el error disminuye a gran velocidad, necesitando menos tiempo para alcanzar un valor de error aceptable. El problema radica en que el error final obtenido es mayor que el alcanzado con una tasa de aprendizaje más pequeña, siendo esta última más lenta durante el aprendizaje.

La figura 5-13 representa la evolución del error dependiendo de la tasa de aprendizaje usado.

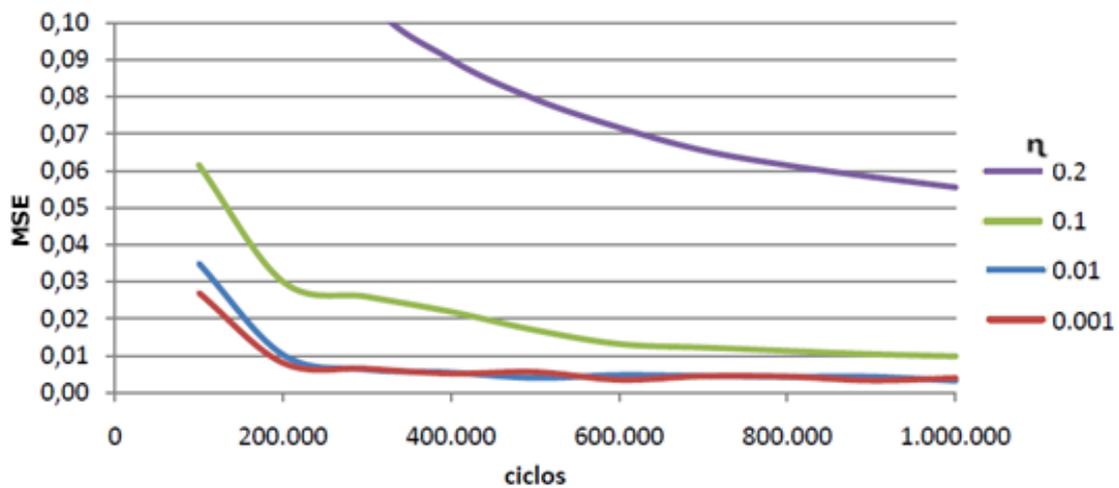


Figura 5-13. Evolución de error MSE frente a distintos factores de aprendizaje.

Para el entrenamiento de la redes comenzará con un factor de aprendizaje alto (0.2), y se mantendrá constante mientras el error siga descendiendo. Cuando alcanza un valor del error tal que no se consiga reducir más, disminuirémos el factor de aprendizaje hasta 0.1, 0.01 y 0.001 procediendo en cada uno de ellos de la misma forma, hasta que se alcance el valor de error final.

Una vez definida la tipología de la red neuronal, el factor de aprendizaje y las funciones de activación, finalmente se procederá a su entrenamiento. El entrenamiento se lleva a cabo a través de los patrones de aprendizaje y validación obtenidos a partir de los datos experimentales como hemos visto anteriormente.

5.3 Entrenamiento y validación de la red neuronal

Llegados a este punto, es conveniente echar de nuevo la mirada atrás para hacer un breve resumen del funcionamiento de la red neuronal. Es importante recordar que el objetivo de una red neuronal es ser capaz de determinar los valores de las variables de salida a partir de unos datos de entrada. Para ello es necesario que adquiera experiencia realizando previamente un aprendizaje a partir de unos patrones de entrenamiento. Estos patrones de entrenamiento incluyen valores obtenidos experimentalmente de las variables de entrada al sistema y los valores que deben obtenerse a la salida. De tal modo que para cada conjunto de datos de entrada, la red irá ajustando todos los parámetros (pesos y ganancias) para que los valores de salida del sistema sean lo más próximos a los valores de salida que se dieron en el patrón de entrenamiento y, así, al final del aprendizaje la red pueda dar una respuesta satisfactoria para cualquier combinación de datos de entrada.

Una vez realizado el proceso de entrenamiento de una red neuronal es necesario comprobar si esta es capaz de obtener por si sola los valores de salida. Para ello, se hace uso de los patrones de validación. Estos patrones tienen el mismo formato que los de entrenamiento, unos valores de entrada y los valores de salida que la red debería estimar. En este caso, la red va introduciendo los conjuntos de datos de entrada para estimar las variables de salida y así calcular la desviación existente entre el valor de salida estimado y el proporcionado en el patrón de validación. Por tanto, una red neuronal será validada cuando para cualquier combinación de valores de entrada es capaz de proporcionar unos valores de salida muy próximos a los reales.

Para saber la precisión de los resultados proporcionados por la red neuronal, se recurre a una función que calcula el error existente entre la salida proporcionada por la red y la salida que debería proporcionar. Como la salida de la red depende de forma directa del valor de los pesos en un determinado instante, se puede afirmar que el error cometido es función de los pesos de la red. Por tanto, se ha decidido utilizar como función que calcule el error existente el error cuadrático medio (*Mean Square Error*, *MSE*) definido como:

$$MSE = \frac{\sum_i (Y_{vi} - Y_{e_i})^2}{r}$$

donde:

- i pertenece al conjunto de patrones.
- Y_{vi} es la salida proporcionada por la red ante el patrón de entrada Y_{e_i} .
- r es el número de patrones utilizados en el aprendizaje.

Por último, vamos a proceder a entrenar y a validar cada una de las tipologías de red que hemos seleccionado anteriormente y que se puede ver en la tabla 5.3. Todas las redes serán entrenadas siguiendo el mismo procedimiento:

- Se cargará el patrón de entrenamiento.
- Se introducirá toda la información y configuración de la red con los parámetros que hemos visto a lo largo del presente capítulo.
- Se iniciará el entrenamiento con un factor de aprendizaje igual a 0.2 durante 10.000 ciclos, valor suficiente para que el error converja y no disminuya significativamente. Este mismo procedimiento se repetirá para unos factores de aprendizaje igual a 0.1, 0.01 y 0.001. En total, cada red será entrenada durante 40.000 ciclos.
- Calcularemos el error de entrenamiento con los valores obtenidos.
- Repetiremos este mismo proceso cargando los patrones de validación, con el objetivo de calcular el error de validación de dicha red.

Para cada red, por tanto, se obtendrá el error cuadrático medio (MSE) tanto de entrenamiento como de validación después de los 40.000 ciclos; y una gráfica en la que se puede ver cómo va disminuyendo el error a medida que el número de ciclos de entrenamiento va aumentando y el factor de aprendizaje se va minorando manualmente (figura 5-14).

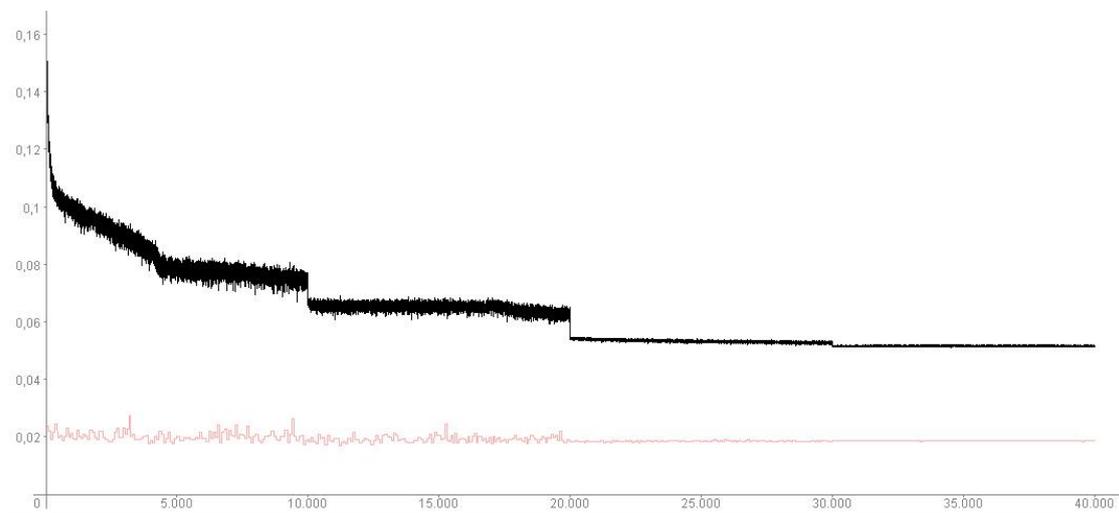


Figura 5-14. Evolución del MSE con el número de ciclos.

5.4 Resultados.

Una vez finalizados los procesos de entrenamiento y validación de la red, el software JavaNNS ofrece el valor de corriente eléctrica esperado y obtenido como salida de la red (figura 5-15); así como los errores cuadráticos medios de cada red estudiada.

```

SNNS result file v1.4-3D
generated at Mon Dec 02 18:12:41 2013

No. of patterns      : 2077
No. of input units  : 4
No. of output units : 1
startpattern        : 1
endpattern          : 2077
teaching output included
#1.1
0
0.02671
#2.1
0
0.02682
#3.1
0
0.02657
#4.1
0
0.0185
#5.1
0
0.00605
#6.1
0
0.00301
#7.1
0
0.00301
    
```

Figura 5-15. Resultados esperados y obtenidos mediante JavaNNS.

JavaNNS muestra en primer lugar datos generales como el número de patrones total, el número de entradas y de salidas. Para cada patrón de entrenamiento muestra el valor esperado de salida (en nuestro caso es la corriente eléctrica) y después el valor que ha obtenido la red neuronal en base a su aprendizaje previo.

Por otro lado JavaNNS calcula automáticamente el error cuadrático medio (MSE) entre los valores esperados y obtenidos. En las tablas 5-4 y 5-5 se recoge el error MSE alcanzando durante el aprendizaje y el error de validación para las diferentes tipologías de red estudiadas.

TABLA 5-4. ERROR MSE EN LAS REDES CON UNA CAPA INTERMEDIA.

Red	4_5_1	4_10_1	4_15_1	4_20_1	4_25_1
Error de Entrenamiento (MSE)	0,02322629	0,01434612	0,0105072	0,00954125	0,00858058
Error de Validación (MSE)	0,02321703	0,01555696	0,01118674	0,00974338	0,00920019

TABLA 5-5 ERROR MSE EN LAS REDES CON DOS CAPAS INTERMEDIAS.

Red	4_5_5_1	4_10_10_1	4_15_15_1	4_20_20_1	4_25_25_1
Error de Entrenamiento (MSE)	0,01501476	0,01049403	0,00899286	0,00297289	0,00305766
Error de Validación (MSE)	0,01492901	0,01075356	0,00941888	0,0034853	0,00309226

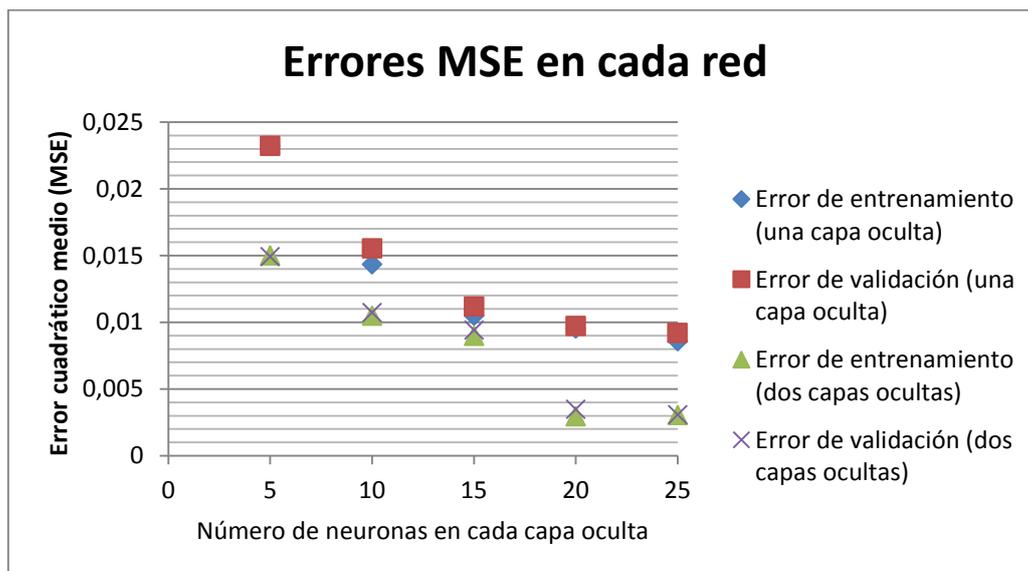


Figura 5-16. Errores MSE para cada tipología de red estudiada.

En la figura 5-16 se puede apreciar cómo los errores de entrenamiento y validación van disminuyendo según aumenta el número de neuronas en la capa oculta. Se puede concluir también que la red neuronal aprende mejor cuando está formada por dos capas intermedias. Observando las tablas 5-4 y 5-5 en las que se han recogido los errores cuadráticos medios (MSE), se puede ver que las redes que ofrecen una menor tasa de error son las 4_20_20_1 y la 4_25_25_1. Al tener ambas redes una tasa de error prácticamente igual, **se opta por la red 4_20_20_1** debido a que tiene una

complejidad menor al tener menos neuronas en las capas ocultas. Esto ayudará a que el procesamiento cuando esté implementada la red sea más rápido, lo cual es uno de los objetivos que se indica en el comienzo del presente Proyecto Fin de Carrera.

5.5 Conclusiones

A modo de resumen, la finalidad del presente Proyecto de Fin de Carrera era el de hallar un modelo inverso que predijera la intensidad de corriente necesaria para los requerimientos del sistema en función de la fuerza, la frecuencia, la amplitud y la velocidad del amortiguador magneto-reológico.

Para ello, se procedió a tomar un total de 2424 muestras o patrones de valores experimentales en un banco de ensayos, mediante un software y hardware específico para la toma de datos.

Para analizar esos datos, se crearon diferentes redes neuronales con el objetivo de entrenarlas para que construyeran un algoritmo que predijera el comportamiento del modelo en estudio.

Para el aprendizaje de las redes neuronales se tuvieron que definir distintos parámetros de entrenamiento, los cuales son de vital importancia para el correcto aprendizaje de la red:

- Tipología de red (número de capas y de neuronas).
- Algoritmo de aprendizaje (*Backpropagation*).
- Activación de la opción *shuffle* (debido al elevado número de datos)
- Función de activación (función tangente hiperbólica).
- Duración del aprendizaje (Nº de ciclos).
- Factor o tasa de aprendizaje.

Una vez entrenada la red, se valida el modelo mediante 347 patrones obteniendo los resultados del apartado anterior. Estos resultados indican que, debido a la pequeña tasa de error que tiene la red, los diferentes parámetros de entrenamiento fueron elegidos correctamente.

Atendiendo a los resultados, se puede afirmar que es posible alcanzar una relación entre el desplazamiento, la velocidad, la frecuencia y la fuerza con la corriente eléctrica mediante redes neuronales artificiales formadas por: una red de cuatro capas, con veinte neuronas en cada una de las capas intermedias, función de activación tangente hiperbólica y función de salida identidad. Esta red ofrece errores inferiores al 1 %.

Finalmente se puede concluir que los objetivos marcados al inicio del presente Proyecto se han alcanzado de forma satisfactoria.

Capítulo 6

Desarrollos futuros

A la hora de estudiar el comportamiento de un amortiguador, es difícil recoger el amplio rango de parámetros que influyen en la dinámica de un vehículo y en la generación de esfuerzos sobre la suspensión. En el presente trabajo sólo se ha tenido en cuenta la fuerza del amortiguador en estático. En un primer lugar sería interesante someter al amortiguador que ha sido objeto de estudio siendo colocado en un vehículo realizando ensayos en carretera en condiciones reales.

Por otro lado, no se ha tenido en cuenta la influencia de la temperatura, factor que puede ser muy importante debido a que las propiedades del fluido magneto-reológico como la viscosidad se ven alteradas con el efecto de ésta. Por tanto, la temperatura del fluido debería ser tenida en cuenta como otro factor a la hora de entrenar la red.

También podría tenerse en cuenta el efecto negativo derivado de la degradación del fluido magneto-reológico al estar sometido a alto número de ciclos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PricewaterhouseCoopers. (2013), *“Temas candentes de la industria del automóvil en España. Acelerar el cambio para garantizar el futuro”*. Disponible en: http://www.pwc.es/es_ES/es/publicaciones/automocion/assets/acelerar-cambio-garantizar-futuro.pdf
- [2] Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA). *“World motor vehicle production by country and type”*. Disponible en: <http://www.oica.net/wp-content/uploads/2013/03/total-production-2012.pdf>
- [3] Baylos, Hermenegildo. (2000), *“Suspensión y amortiguación”*. Disponible en: <http://www.km77.com/tecnica/bastidor/pendulo/texto.asp>
- [4] Alberdi Urbietta, Juan. *“Amortiguadores y suspensión”*. Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra.
- [5] Chacón Hernando, Víctor. (2009), *“Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos”*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [6] Crouse, William. *“Mecánica del Automóvil”*. Colección GTZ.
- [7] Guzmán Mayorga, César Patricio. (2007) *“Diseño y construcción de un prototipo de amortiguador magneto-reológico”*. Universidad Politécnica Salesiana.
- [8] Muñoz Águila, Felipe Borja. (2012), *“Modelo directo no paramétrico de amortiguador magneto-reológico basado en redes neuronales”*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] Cupich, Miguel, y Elizondo, Fernando., *“Amortiguadores magneto-reológicos”*. Revista Ingenierías, Julio-Diciembre de 1998. Universidad Autónoma de Nuevo León (México).
- [10] Yang, G. (2001), *“Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control”*. University of Notre Dame.
- [11] Phillips, Tony; Barry, Patrick. (2003), *“Asombrosos fluidos magnéticos”*. NASA. Disponible en: http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2003/02apr_robotblood/
- [12] Basogain Olabe, Xavier. *“Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones”*. Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao.
- [13] Hernández Peñafiel, Lorena. (2010), *“Modelo de neumático no paramétrico basado en redes neuronales para condiciones de esfueros combinados”*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [14] Serrano, Antonio J., Soria, Emilio, y Martín, José D. (2009), *“Redes neuronales artificiales”*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [15] Matich, Damián Jorge. (2001), *“Redes neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones”*. Universidad Tecnológica Nacional de Rosario (Argentina).