



**Control Tolerante a Fallos en una Suspensión Semiactiva.**

Sergio Alberto Rueda Villanoba

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Maestría en Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
2023

**Control Tolerante a Fallos en una Suspensión Semiactiva.**

Sergio Alberto Rueda Villanoba

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para  
optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

Carlos Borrás Pinilla

PhD Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Maestría en Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga

2023

**(Dedicatoria o lema)**

A mi esposa, por creer en mí cuando mi motivación tambaleaba, por ayudarme, por soportarme, por amarme.

A la familia grande que conformo, por ser mi soporte y brindarme su colaboración incondicional.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander, por la financiación y apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a mi director PhD. Carlos Borrás, por su asesoría y apoyo durante el desarrollo de la investigación.

## Resumen

**TÍTULO:** CONTROL TOLERANTE A FALLOS EN UNA SUSPENSIÓN SEMIACTIVA <sup>1</sup>

**AUTOR:** SERGIO ALBERTO RUEDA VILLANOBA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Control Tolerante a fallas, Detección Fallas, Red Neuronal, Amortiguador, ISO 2631-1.

El objetivo del trabajo de investigación descrito en este documento fue modelar y simular un control de tolerancia a fallas, basado en redes neuronales, para compensar fugas de fluido en los cilindros en un sistema de suspensión magnetoreológica. Este sistema se basó en el modelo dinámico de medio automóvil, que se compone de la carrocería del vehículo (masa suspendida) conectada por el sistema de suspensión magnetoreológica a las dos ruedas laterales (masa no suspendida). Este modelo se representa como un modelo no lineal de cuatro estados.

El módulo de detección de fallas y aislamiento se basa en algoritmos de generación de residuos. Se utiliza una transformación de onda para determinar las características de los residuos de las señales de aceleración del modelo durante la falla, estos datos se usarán para entrenar una red neuronal que diagnosticará la falla.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla.

El control tolerante a fallas constará de otra red neuronal, que usando los parámetros de falla modificará los parámetros de control y de este modo compensará la falla utilizando el amortiguador sano restante. El rendimiento de la estructura propuesta de la FTC se demuestra a través de la simulación. Los resultados muestran que el sistema de control podría reducir el efecto de la falla parcial del amortiguador magnetorreológico y así mantener el confort del pasajero.

## Abstract

**TITLE:** FAULT TOLERANT CONTROL IN A SEMIACTIVE SUSPENSION SYSTEM <sup>2</sup>

**AUTHOR:** SERGIO ALBERTO RUEDA VILLANOBA\*\*

**KEY WORDS:** Fault Tolerant Control, Fault Detection, Neural Network, Damper, ISO 2631-1.

The objective of the research work described in this paper was to model and simulate a fault-tolerant control, based on neural networks, to compensate for fluid leakage in the cylinders of a magnetorheological suspension system. This system was based on the dynamic model of half an automobile, which is composed of the vehicle body (suspended mass) connected by the magnetorheological suspension system to the two side wheels (unsprung mass). This model is represented as a nonlinear four-state model.

The fault detection and isolation module is based on residual generation algorithms. A wavelet transform is used to determine the residual characteristics of the model's acceleration signals during the fault, this data will be used to train a neural network that will diagnose the fault.

---

<sup>2</sup> Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla.

The fault tolerant control will consist of another neural network, which using the fault parameters will modify the control parameters and thus compensate for the fault using the remaining healthy buffer. The performance of the proposed FTC structure is demonstrated through simulation. The results show that the control system could reduce the effect of the partial failure of the magnetorheological shock absorber and thus maintain passenger comfort

## Contenido

	Pág.
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>4</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>14</b>
<b>1        Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.1    Objetivo general .....	16
1.2    Objetivos específicos .....	16
<b>2        Antecedentes y Conceptos Fundamentales .....</b>	<b>17</b>
2.1    Antecedentes .....	17
2.2    Conceptos Fundamentales. ....	18
2.2.1    Sistemas de suspensión .....	18
2.2.1.1    Sistema de Suspensión Pasiva.....	18
2.2.1.2    Sistema de Suspensión Activa.....	18
2.2.1.3    Funcionamiento de un Sistema de Suspensión Semiactiva.....	19
2.2.2    Modelamiento Dinámico de Suspensiones Semiactivas. ....	21
2.2.2.1    Modelo Dinámico de Dahl .....	21
2.2.2.2    Modelo Dinámico de Bingham .....	21
2.2.2.3    Modelo Dinámico de Bouc-Wen.....	22
2.2.3    Control de Suspensiones Semiactivas.....	24
2.2.3.1    Controles Clásicos de Suspensiones Semiactivas.....	24
2.2.3.2    Controles Modernos de Suspensiones Semiactivas .....	26
2.2.4    Diagnóstico de fallas en sistemas de suspensión semiactivas. ....	29
2.2.5    Sistemas de control tolerante a fallas en suspensiones automotrices. ....	31
2.2.6    Confort en sistemas de suspensión. ....	31
<b>3        Modelamiento Dinámico de Suspensión Semiactiva.....</b>	<b>34</b>
3.1    Modelo medio vehículo .....	34
3.2    Modelo Amortiguador Magnetoreológico.....	36
3.3    Modelamiento de perturbaciones de entrada. ....	38
3.3.1    Entrada Bache. ....	38
3.3.2    Perfil de Camino ISO 8608 .....	39
3.4    Validación Modelo. ....	42
3.4.1    Validación y Parametrización del modelo de amortiguador. ....	42
3.4.2    Validación modelo de medio sistema de amortiguación. ....	43
3.5    Sistema de control.....	45
3.5.1    Estimación del Modelo.....	45
3.5.2    Control de los amortiguadores. ....	47
<b>4        Sistema de Control Tolerante a Fallas .....</b>	<b>49</b>
4.1    Sistema de Diagnóstico de fallas. ....	49
4.1.1    Sistema Detección de Fallas.....	49
4.1.2    Severidad de la falla. ....	50

4.1.3	Sistema Aislamiento de Fallas.....	50
4.2	Redes neuronales Diagnóstico de Fallas.....	53
4.2.1	Entrenamiento Redes Neuronales Diagnóstico. ....	54
4.3	Sistema de compensación de falla.....	56
<b>5</b>	<b>Simulación.....</b>	<b>59</b>
5.1	Escenario de fallas bajo un bache. ....	61
5.1.1	Falla Incipiente.....	61
5.1.1.1	.Falla Incipiente en amortiguador delantero. ....	61
5.1.1.2	Falla Incipiente Amortiguador Trasero. ....	62
5.1.2	Falla Moderada.....	63
5.1.2.1	Falla Moderada Amortiguador Delantero. ....	63
5.1.2.2	Falla Moderada Amortiguador Trasero. ....	64
5.1.3	Falla Severa.....	65
5.1.3.1	Falla Severa Amortiguador Delantero. ....	65
5.1.3.2	Falla Severa Amortiguador Trasero ....	66
5.2	Escenario de Fallas Camino No Pavimentado. ....	67
5.2.1	Falla Incipiente.....	67
5.2.1.1	Falla Incipiente Amortiguador Delantero ....	67
5.2.1.2	Falla Incipiente Amortiguador Trasero ....	68
5.2.2	Falla Moderada.....	69
5.2.2.1	Falla Moderada Amortiguador Delantero ....	69
5.2.2.2	Falla Moderada Amortiguador Trasero ....	70
5.2.3	Falla Severa.....	71
5.2.3.1	Falla Severa Amortiguador Delantero ....	71
5.2.3.2	Falla Severa Amortiguador Trasero ....	72
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusiones.....	73
	<b>Anexo A: Datos Entrenamiento Redes Neuronales.....</b>	<b>75</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>81</b>

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2-1: <i>Sistema de suspensión Activa.</i> .....	19
Figura 2-2: <i>Efecto Magnetoreológico.</i> .....	21
Figura 2-3: <i>Modelo Dinámico de Bingham</i> .....	22
Figura 2-4: <i>Modelo Bouc-Wen de amortiguador magneto-reológico.</i> .....	23
Figura 2-5: <i>Modelo Modificado de Bouc-Wen</i> .....	23
Figura 2-6: <i>Generación de Residuales.</i> .....	30
Figura 3-1: <i>Modelamiento Vehículo.</i> .....	34
Figura 3-2: <i>Modelo Dinámico Medio Vehículo.</i> .....	35
Figura 3-3: <i>Modelamiento Bache.</i> .....	39
Figura 3-4: <i>Modelo PSD Camino ISO 8608.</i> .....	41
Figura 3-5: <i>Curvas Características Amortiguador Magnetorreológico.</i> ....	43
Figura 3-6: <i>Perfil Bache Validación.</i> .....	44
Figura 3-7: <i>Comparación Dinámica Llanta Delantera.</i> .....	44
Figura 3-8: <i>Comparación Dinámica Llanta Trasera.</i> .....	45
Figura 3-9: <i>Redes Neuronales de Control.</i> .....	47
Figura 4-1: <i>Esquema Red Neuronal de Identificación.</i> .....	53
Figura 4-2: <i>Esquema Red Neuronal Aislamiento Falla.</i> .....	54
Figura 4-3: <i>Resultados Entrenamiento Red Identificación Falla.</i> .....	55
Figura 4-4: <i>Resultados Entrenamiento Aislamiento Falla.</i> .....	56
Figura 4-5: <i>Esquema Red Neuronal Compensación.</i> .....	57
Figura 4-6: <i>Resultados Entrenamiento Red Compensación Falla.</i> .....	58
Figura 5-1: <i>Diagrama de Bloques Sistema.</i> .....	59
Figura 5-2: <i>Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Delantera</i> .....	61
Figura 5-3: <i>Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Trasera</i> .....	62
Figura 5-4: <i>Comportamiento Dinámico Falla Moderada Delantera</i> .....	63
Figura 5-5: <i>Comportamiento Dinámico Falla Moderada Trasera</i> .....	64
Figura 5-6: <i>Comportamiento Dinámico Falla Severa Delantera</i> .....	65

Figura 5-7: <i>Comportamiento Dinámico Falla Severa Trasera</i> .....	66
Figura 5-8: <i>Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Delantera</i> .....	67
Figura 5-9: <i>Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Trasera</i> .....	68
Figura 5-10: <i>Comportamiento Dinámico Falla Moderada Delantera</i> .....	69
Figura 5-11: <i>Comportamiento Dinámico Falla Moderada Trasera</i> .....	70
Figura 5-12: <i>Comportamiento Dinámico Falla Severa Delantera</i> .....	71
Figura 5-13: <i>Comportamiento Dinámico Falla Severa Trasera</i> .....	72

.

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 2-1: Escala confort ISO 2631. ....	33
Tabla 3-1: Parámetros camino ISO 8608. ....	41
Tabla 3-2: Parámetros modelo amortiguador. ....	42
Tabla 3-3: Error validación modelo amortiguador. ....	42
Tabla 3-4: Parámetros Entrenamiento Redes Neuronales. ....	46
Tabla 4-1: Escenarios de fallas. ....	50
Tabla 4-2: Energía Descomposición Wavelet. ....	52
Tabla 4-3: Entrada y Salida Típica Redes Neuronales Diagnóstico. ....	54
Tabla 5-1: Parámetro Dinámicos Modelo de Suspensión. ....	60
Tabla 5-2: Nivel Confort Falla Incipiente Delantera. ....	61
Tabla 5-3: Nivel Confort Falla Incipiente Trasera. ....	62
Tabla 5-4: Nivel Confort Falla Moderada Delantera. ....	63
Tabla 5-5: Nivel Confort Falla Moderada Trasera. ....	64
Tabla 5-6: Nivel Confort Falla Severa Delantera. ....	65
Tabla 5-7: Nivel Confort Falla Severa Trasera. ....	66
Tabla 5-8: Nivel Confort Falla Incipiente Delantera. ....	67
Tabla 5-9: Nivel Confort Falla Incipiente Trasera. ....	68
Tabla 5-10: Nivel Confort Falla Moderada Delantera. ....	69
Tabla 5-11: Nivel Confort Falla Moderada Trasera. ....	70
Tabla 5-12: Nivel Confort Falla Severa Delantera. ....	71
Tabla 5-13: Nivel Confort Falla Severa Trasera. ....	72

## Introducción

Los principales objetivos de una suspensión son: aislar el chasis de las perturbaciones de la carretera para asegurar el confort del pasajero y mantener el contacto entre el neumático y la carretera para así proporcionar una mejor maniobrabilidad, seguridad y rendimiento.

Normalmente, el sistema de suspensión suele ser clasificado en tres tipos: suspensión pasiva, suspensión activa y sistema de suspensión semiactiva. En la suspensión pasiva, los elementos no proporcionan energía al sistema de suspensión y comprende elementos de amortiguación, como resortes y amortiguadores, colocados entre la carrocería y las ruedas del vehículo. En cambio, en un sistema de suspensión activa se incluye un actuador que suministra la fuerza necesaria para suprimir las vibraciones causadas por las irregularidades de la carretera. Por otro lado, las suspensiones semiactivas pueden ajustar su coeficiente de amortiguación viscosa sin añadir energía al sistema de suspensión, siendo esta la principal ventaja frente a los sistemas pasivos y activos, los amortiguadores de fluidos electrorreológicos y magnetorreológicos son los más utilizados en el sistema de suspensión semiactiva.

Ahora bien, para controlar suspensiones semiactivas y activas se han usado con eficacia algoritmos de control difuso, modo deslizante y control no lineal. Estos escenarios funcionan correctamente en un escenario sin fallos, pero los amortiguadores de suspensiones semiactivas, son propensos a presentar fallas debido a fugas del fluido. Detectar y diagnosticar rápidamente esta falla en el sistema, evitaría daños mayores en el sistema y garantizaría la seguridad del conductor. Es necesario implementar un control tolerante a fallos para así mantener un desempeño aceptable del sistema de suspensión en un escenario de falla.

En la actualidad, se han propuesto numerosos esquemas de control caracterizados por su estabilidad, aplicados a sistemas de suspensión semiactivos sometidos a perturbaciones y/o incertidumbres. En mayor medida se han aplicado controles

adaptativos y modelos deslizantes tolerantes a fallas, para acomodar la falla del amortiguador.

Para abordar el objetivo del trabajo, se siguió un enfoque sistemático que comenzó con una revisión bibliográfica de los sistemas de control y tolerantes a fallos utilizados en suspensiones semiactivas. A partir de la información recopilada, se modeló y simuló un control tolerante a fallos basado en redes neuronales para un modelo de medio sistema de amortiguación. El trabajo se ha estructurado en los siguientes capítulos: después de la introducción (**Capítulo 1**), se presentan los conceptos fundamentales en sistemas de control en sistemas de suspensión automotriz (**Capítulo 2**), posteriormente se describe el modelo de suspensión semiactiva (**Capítulo 3**). En el siguiente capítulo (**Capítulo 4**), se detalla el sistema de control tolerante a fallas. En el **capítulo 5** el esquema de control es evaluado por simulaciones. Finalmente, el **capítulo 6** presenta las conclusiones, observaciones y recomendaciones

# 1 Objetivos

## 1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de control tolerante a fallos para la suspensión semiactiva de un automóvil de turismo ligero utilizando técnicas de redes neuronales y ecuaciones de paridad, y así continuar la investigación en dinámica y control de sistemas automotrices tolerante a fallas en el grupo de investigación DicBot de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

## 1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo dinámico no lineal del sistema de suspensión semi-activa de un automóvil de turismo ligero destinado al transporte de pasajeros, para simular su comportamiento dinámico frente a un perfil de camino ISO 8608 Tipo D identificado como un terreno no pavimentado y un bache que será construido como una señal de tipo cuadrada , en el entorno Matlab-Simulink.
- Diseñar, modelar y simular un sistema que detecte y diagnostique seis escenarios de falla, usando ecuaciones de paridad y dos arquitecturas de redes neuronales (MPL y dinámica recurrente)
- Desarrollar una estrategia de control tolerante a fallas, frente a los seis escenarios utilizando reconfiguración activa del controlador.
- Validar numéricamente el modelo no lineal de suspensión frente a los modelos usados por (Cho et al., 2005; Feng et al., 2003) comparando su comportamiento dinámico.

---

## 2 Antecedentes y Conceptos Fundamentales

### 2.1 Antecedentes

La seguridad y el confort del pasajero son elementos cruciales en el diseño de una suspensión automotriz. Sin embargo, debido a que las fallas son inevitables, es importante considerar su impacto en el desempeño del sistema. En el caso de una suspensión semiactiva, las fugas de líquido en los amortiguadores son una causa común de fallas. Estas fallas alteran las propiedades del sistema de suspensión y aumentan la transferencia de carga, lo que se traduce en movimientos peligrosos como cabeceo y bamboleo del vehículo. Para evitar accidentes, es fundamental detectar y corregir oportunamente estas fallas, y es aquí donde la implementación de un sistema de control tolerante a fallas adquiere una gran importancia.

Los sistemas de suspensión semiactiva han sido controlados exitosamente en escenarios sin fallas mediante diversos esquemas de control, desde los más clásicos (Skyhook, Groundhook) hasta esquemas más recientes como el control PID y Fuzzy (Feng et al., 2003), control  $H_\infty$  (Fang & Wei, 2012), modos deslizantes (H. Kim & Lee, 2011)(Xiaomin Dong et al., 2011) y control no lineal (Xi Dong et al., 2005) (Borrás Pinilla et al., 2018).

Dentro de los esquemas de control tolerantes a fallos aplicados a sistemas semiactivos de suspensión se encuentran los controles a fallas pasivos (Jiang & Yu, 2012) aunque tiene un desempeño aceptable debido a su robustez, su poca flexibilidad es su principal desventaja.

Por su parte los controles tolerantes a fallos activos, reconfiguran la línea del controlador con base en la información de la detección y diagnóstico, este esquema de diagnóstico y detección en la mayoría de los casos está basados en la generación de residuos por espacio de paridad (Zhang & Jiang, 2008). Estos controles tolerantes a fallos aplicados a suspensiones,

están basados en reconfiguración conmutada. En (Gáspár et al., 2008) se propone una reconfiguración del controlador en presencia de fallas, el objetivo principal es compensar la falta de fuerza de amortiguación, sin embargo el confort no es analizado ni considerado. De la misma manera, se han propuesto controladores LQ, para cada modo de falla dentro del sistema de suspensión, pero dada la necesidad de conocer previamente todos los modos de falla, la factibilidad de este esquema es limitado.

## **2.2 Conceptos Fundamentales.**

### **2.2.1 Sistemas de suspensión**

Un sistema de suspensión está compuesto principalmente por dos componentes, un muelle o resorte y un elemento de amortiguación. Se pueden clasificar estos sistemas en tres categorías:

- Sistemas de Suspensión Pasiva
- Sistemas de Suspensión Semiactiva
- Sistemas de Suspensión Activas.

#### **2.2.1.1 Sistema de Suspensión Pasiva**

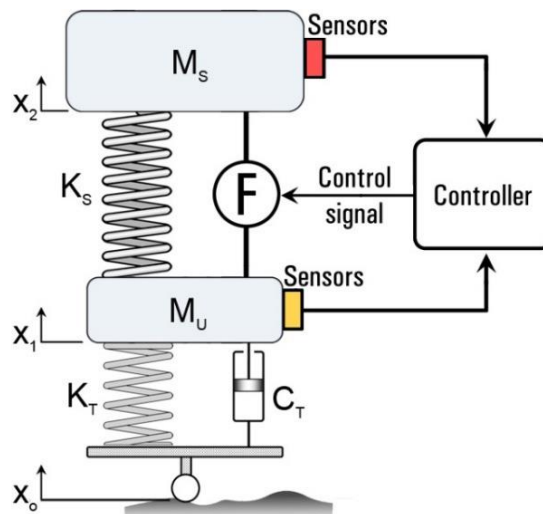
Un sistema de amortiguación pasiva no recibe energía externa, solo disipa la energía almacenada por los resortes usando amortiguadores. El coeficiente de amortiguamiento de una suspensión es fijo y está seleccionado para garantizar el confort bajo un perfil de terreno y una carga predeterminada.

#### **2.2.1.2 Sistema de Suspensión Activa**

El sistema de suspensión activa se caracteriza por contar con la capacidad de introducir energía al sistema por medio de actuadores controlados. Estos actuadores pueden ser de diferentes tipos, tales como: electro-hidráulicos (Xinjie & Shengjin, 2009), electromagnéticos (Gysen et al., 2008) y

neumáticos (V. Bhandari S. C. Subramanian, 2010). Además, los sensores ubicados en el automóvil registran el comportamiento del sistema de suspensión ante las perturbaciones del terreno, y definen una respuesta de acuerdo al objetivo de control. A pesar de sus ventajas, es importante mencionar que el costo total de una suspensión activa depende del ancho de banda requerido y suelen tener un costo mucho mayor en comparación con los sistemas pasivos y semiactivos.

Figura 2-1: *Sistema de suspensión Activa.*



Nota: Tomado de (Elattar et al., 2016)

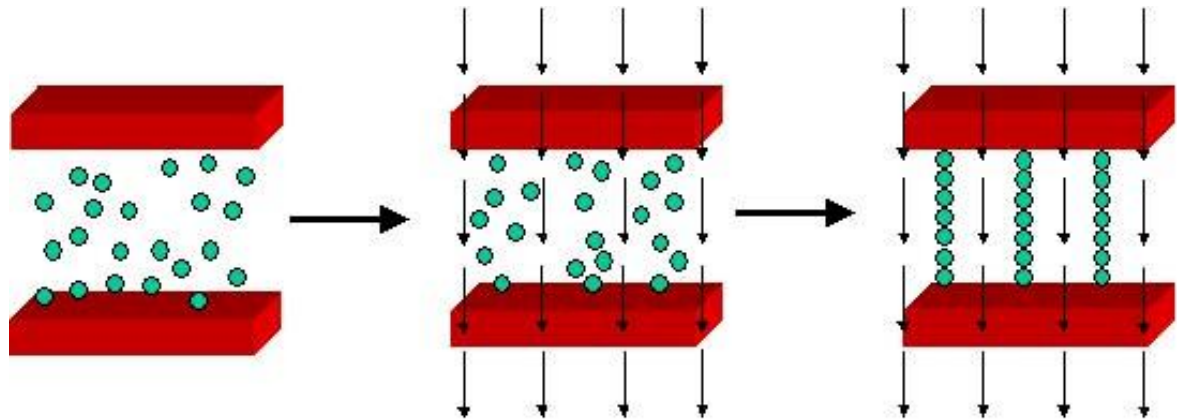
### 2.2.1.3 Funcionamiento de un Sistema de Suspensión Semiactiva

Una suspensión semiactiva no requiere una fuerza externa para su funcionamiento, pero a diferencia de una suspensión pasiva, el coeficiente de amortiguamiento es controlado mediante la modificación de las características del amortiguador. Generalmente, una suspensión semiactiva se puede ajustar remotamente para adaptarse a las características de las perturbaciones externas y así optimizar el control y la seguridad del pasajero.

Los tres tipos principales de amortiguadores semiactivos usados en el mercado son:

- Amortiguadores electro-hidráulicos: Un amortiguador electro hidráulico cuenta con una válvula electrónica que hace que el coeficiente de amortiguación del mismo varíe de manera lineal con el área de la válvula.
- Amortiguadores electro-reológicos: Este amortiguador contiene un fluido electro reológico (ER), el cual es una mezcla de aceite y partículas sensibles al campo eléctrico, al variar el campo eléctrico el volumen del fluido cambia y por consecuencia el coeficiente de amortiguación.
- Amortiguadores magneto-reológicos: Estos amortiguadores contienen un fluido magneto-reológicos (MR), el cual puede cambiar su viscosidad cuando se le aplica un campo magnético. Cuando un campo magnético es aplicado al fluido, las partículas suspendidas en el fluido adquieren un momento dipolar que las alinea en estructuras similares a una cadena, esta configuración tipo cadena modifica la viscosidad del fluido, lo que lleva a un cambio del coeficiente de amortiguación del sistema de suspensión.

Figura 2-2: *Efecto Magnetoreológico.*



Nota: Tomado de (<https://www.innovent-jena.de>)

## 2.2.2 Modelamiento Dinámico de Suspensiones Semiactivas.

El amortiguador magnetoreológico es un componente esencial en el sistema de suspensión semiactivo. Para lograr controlarlo exitosamente y diseñar un controlador tolerante a fallos, es necesario tener un modelo de fuerza de amortiguación que pueda representar la dinámica altamente no lineal, así como la histéresis del amortiguador.

Los modelos dinámicos desarrollados que frecuentemente se encuentran en la literatura son los siguientes:

### 2.2.2.1 Modelo Dinámico de Dahl

La ecuación que rige la dinámica de este modelo está dada por:

$$\frac{dF}{dt} = \sigma \left( 1 - \frac{F}{F_c} \operatorname{sgn} v \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Donde  $\sigma$  es el coeficiente de rigidez,  $\alpha$  es un parámetro que define la forma que se obtiene en la curva de tensión. La fuerza de fricción en este modelo es función del desplazamiento y del signo que tenga la velocidad.

### 2.2.2.2 Modelo Dinámico de Bingham

El modelo de Bingham consiste en un elemento con fricción de Coulomb y un amortiguador ambos conectados en paralelo (ver (Figura 2-3)). La fuerza

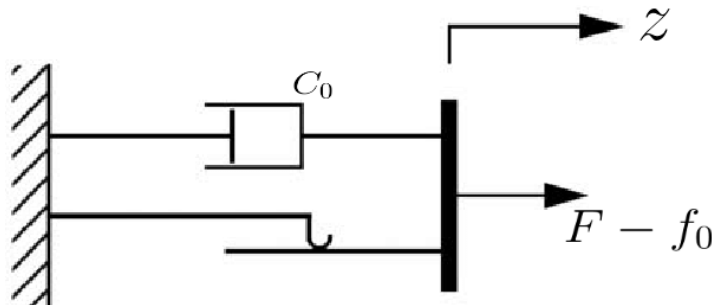
ejercida por el amortiguador, es función del desplazamiento relativo  $z$  y la velocidad del pistón  $\dot{z}$

$$F_{mr} = F_c \operatorname{sgn}(\dot{z}) + C_0 \dot{z} + k_0 z + f_0 \quad (2.2)$$

Donde  $F_c$  corresponde a la fuerza de fricción,  $C_0$  constante del amortiguador,  $k_0$  es la rigidez del elemento elástico del amortiguador. La función  $\operatorname{sgn}(\dot{z})$  es usada para tener en cuenta la dirección de la fuerza friccional respecto a la velocidad del pistón.

Aunque este modelo representa bien el comportamiento fuerza-desplazamiento del amortiguador, la respuesta fuerza-velocidad no es correctamente modelada.

Figura 2-3: *Modelo Dinámico de Bingham*



Nota: Tomado de (Stanway et al., 1985)

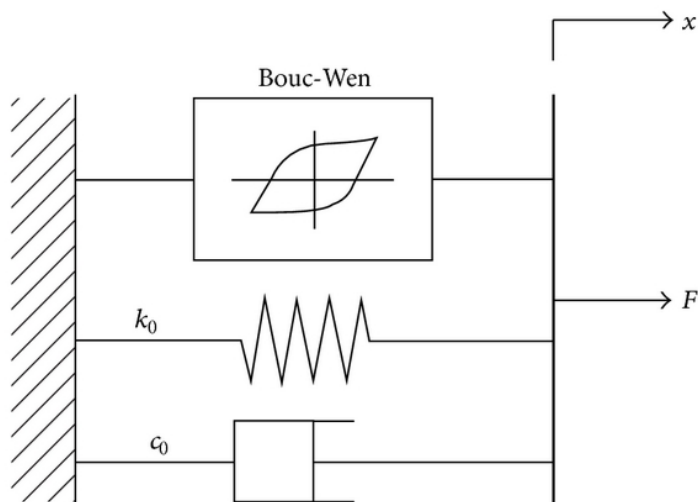
### 2.2.2.3 Modelo Dinámico de Bouc-Wen

Este modelo está compuesto por tres componentes, un amortiguador viscoso, un resorte y un componente de histéresis. La ecuación que describe la fuerza generada por el amortiguador es la siguiente:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z = c_0 \dot{x} + k_0 x + f_0 + \alpha z \quad (2.3)$$

Este modelo si cuenta con una variable evolutiva o de histéresis representada como la variable  $z$ , siendo esta su mayor ventaja frente a los otros modelos.

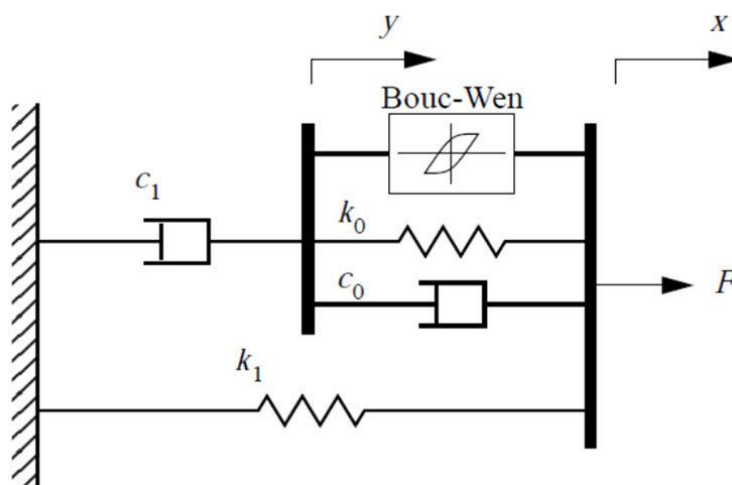
Figura 2-4: *Modelo Bouc-Wen de amortiguador magneto-reológico.*



Nota: Tomado de (D. H. Wang & Liao, 2011)

El modelo de Bouc-Wen generalmente posee el comportamiento fuerza-velocidad más cercano a los datos experimentales dentro de los modelos paramétricos, sin embargo, presenta errores en la zona en que la velocidad es muy pequeña. Por esto (Spencer B et al., 1997) desarrollaron el modelo modificado de Bouc-Wen.

Figura 2-5: *Modelo Modificado de Bouc-Wen*



Nota: Tomado de (D. H. Wang & Liao, 2011)

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de este modelo están dadas por:

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (2.4)$$

La dinámica de este modelo de amortiguador será desarrollada a profundidad en el capítulo de modelamiento de la suspensión.

### 2.2.3 Control de Suspensiones Semiactivas.

Múltiples estrategias de control para suspensiones semiactivas han sido propuestas desde la aparición del algoritmo de control Skyhook, propuesto por Crosby y Karnopp (Crosby, M. J., and Karnopp, 1973). Se han utilizado enfoques de controles más clásicos como el skyhook, groundhook y control ADD, así como enfoques más modernos tales como control óptimo, modelos predictivos de control, estrategias  $H_\infty$ , Fuzzy, control robusto y redes neuronales.

El objetivo principal, de todas estas estrategias es lograr un mayor aislamiento vibracional de la masa suspendida pero que el control sea relativamente práctico.

#### 2.2.3.1 Controles Clásicos de Suspensiones Semiactivas

- Control Skyhook.

Este algoritmo de control tiene como objetivo minimizar el desplazamiento vertical y la aceleración de la masa suspendida (chasis) , mediante el uso de un amortiguador que se sitúa entre ésta y una superficie imaginaria que está sobre el sistema, se dice entonces que el amortiguador estaría conectado al cielo, de ahí su nombre en inglés “*skyhook*”.

Este control utiliza una estrategia *on/off* donde el coeficiente del amortiguador virtual varía según las siguientes condiciones:

$$C_{sky} = \begin{cases} C_{min} & \text{si } \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0 \\ C_{max} & \text{si } \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) > 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Siendo  $\dot{x}_s$  y  $\dot{x}_u$  la velocidad de la masa suspendida y no suspendida respectivamente.

- Control Groundhook.

El modelo de groundhook se basa en conectar un amortiguador entre la masa no suspendida (rueda) y el suelo, disminuyendo las deflexión y las fuerzas que actúan sobre los neumáticos.

Al igual que el control skyhook, utiliza una estrategia *on/off*, y la ley de control se puede representar de la siguiente forma:

$$C_{Ground} = \begin{cases} C_{min} & \text{si } -\dot{x}_u(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0 \\ C_{max} & \text{si } -\dot{x}_u(\dot{x}_s - \dot{x}_u) > 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Siendo  $\dot{x}_s$  y  $\dot{x}_u$  la velocidad de la masa suspendida y no suspendida respectivamente.

- Control Híbrido Sky/Ground.

Esta estrategia de control, presenta las ventajas de los controles que lo componen, diseñado para reducir tanto la aceleración del cuerpo suspendido como las fuerzas dinámicas presentes en las ruedas, combinando los controles Skyhook y Groundhook usando la siguiente ley de control:

$$C_{Hybrid} = [\mu C_{sky} + (1 - \mu) C_{Ground}] \quad (2.7)$$

Las condiciones para cambiar entre un control y el otro vienen dadas por:

$$C_{\text{Híbrido}} = \begin{cases} C_{\text{min}} & \text{si } \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0 \\ C_{\text{hybrid}} & \text{si } \dot{x}_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) > 0 \\ C_{\text{min}} & \text{si } -\dot{x}_u(\dot{x}_s - \dot{x}_u) \leq 0 \\ C_{\text{hybrid}} & \text{si } -\dot{x}_u(\dot{x}_s - \dot{x}_u) > 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Este tipo de controles han sido analizados (Ahmadian & Goncalves, 2004) y los resultados indican que el control híbrido presenta el mejor desempeño en la disminución de la aceleración de la masa suspendida y en consecuencia mejora el confort del pasajero.

### 2.2.3.2 Controles Modernos de Suspensiones Semiactivas

- Control óptimo.

El control lineal cuadrático (LQR) es una de las técnicas pioneras aplicado al control de suspensiones, especialmente suspensiones activas.

En suspensiones semiactivas se han propuesto múltiples estrategias basadas en control óptimo (Yan et al., 2018), además se ha demostrado la superioridad del control con retroalimentación de estado frente a los controles más clásicos en términos de confort (A. Soliman, 2004).

En (A. M. A. Soliman et al., 2006) se propone un control óptimo autoajutable incorporando un control de ponderación, un observador de estado y un estimador de parámetros basado en LQR, los resultados obtenidos por simulación muestran un desempeño superior del sistema de amortiguación comparado con sistemas de control no autoajustables.

- Control predictivo basado en modelos

Este tipo de control es ampliamente usado en control automotriz. En el campo de las suspensiones semiactivas, se ha demostrado que con su aplicación se obtienen mejores resultados comparado con las estrategias clásicas y el control LQR.

En un estudio (Giua et al., 2004) se propone un control predictivo que provee un mejor desempeño del sistema de amortiguación, pero los requerimientos para la optimización limitan su aplicabilidad.

Un sistema de control predictivo con implementación “rápida” es propuesto en (Canale et al., 2006) el objetivo principal de esta estrategia es rápidamente determinar la dinámica del sistema, se utiliza un observador robusto cuyo desempeño no se ve afectado por la variación de los parámetros del modelo. Esta estrategia mostró un mejor desempeño que los sistemas clásicos de control y las basadas en el algoritmo “clipped-control”.

- Control  $H_\infty$  *clipped*

En las suspensiones semiactivas, la fuerza ejercida por el amortiguador no puede ser controlada directamente, pero sí las tensiones que ingresan al elemento. Para inducir a los amortiguadores a generar la acción de control más próxima a la deseada se introdujo el enfoque *clipped-control*. En este enfoque (For et al., 2000) el voltaje que rige el control viene dado por:

$$V = V_{max}H[(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{MR})^T \mathbf{u}_{MR}] \quad (2.9)$$

Donde  $V_{max}$  es el voltaje máximo aplicado,  $\mathbf{u}_{MR}$  es la fuerza realmente aplicada por el amortiguador,  $\mathbf{u}$  es la fuerza de control deseada y  $H$  es la función escalón. Los estudios realizados en suspensiones semiactivas con esta estrategia de control (Du et al., 2005)(Rossi & Lucente, 2004) muestran una mejora en la estabilidad de la masa no suspendida y en el confort del pasajero, utilizando una técnica relativamente simple.

- Control Fuzzy

La naturaleza no lineal del sistema de suspensión semiactiva y la dificultad para simularlo facilitan y favorecen el uso de la estrategia Fuzzy, la cual se adecúa efectivamente al control de estos sistemas.

La implementación de una estrategia de control Fuzzy en suspensiones semiactivas ha sido presentado por (Kurczyk & Pawełczyk, 2013) obteniendo resultados tan efectivos como los de las anteriores estrategias. Su principal ventaja consiste en la no necesidad de un modelo inverso del amortiguador para obtener una señal de control. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el control Fuzzy es más complejo de implementar computacionalmente.

En otro estudio (Kaldas et al., 2013) se profundiza en el desarrollo de procesos avanzados de optimización de control, usando la estrategia Fuzzy y una estrategia discreta para obtener las funciones difusas pertinentes, esto hace que se tengan mejoras significativas en el confort y estabilidad del pasajero, respecto a un control Fuzzy no optimizado.

Otra posibilidad que ofrece el control difuso es el cambio de reglas de acuerdo a los requerimientos del pasajero. En (Kaldas et al., 2015) se propone un control que puede ser ajustado en tres diferentes modos (normal, confort y deportivo) obteniendo un rendimiento superior que una suspensión pasiva en cada uno de los modos mencionados.

- Control PID

El control proporcional-integral-derivativo (PID) es usado ampliamente en aplicaciones industriales debido a su bajo costo computacional y fácil implementación.

En el campo de las suspensiones semiactivas (Rao, 2014) se ha demostrado que el control PID mantiene el confort del pasajero en diferentes tipos de señales de entrada o perfiles de camino. Estos estudios recalcan la importancia del diseño del esquema de control como una cuestión clave para superar las restricciones del amortiguador y eliminar dinámicas no deseadas.

---

El uso de enfoques de optimización evolutiva ha demostrado solventar la dificultad del diseño y sintonización del control PID, obteniendo parámetros óptimos para el control del sistema de suspensión semiactiva (Ab Talib et al., 2021).

- Redes Neuronales

La principal ventaja de las redes neuronales en el control de suspensiones semiactivas es su capacidad para la aproximación de funciones no lineales desconocidas en un sistema dinámico. Una suspensión semiactiva es un sistema altamente no lineal, por lo que estrategias de control basadas en modelos matemáticos no pueden ser aplicados tan fácilmente. Un sistema de control usando redes neuronales adaptativas en las que no se requiera información previa del sistema es un enfoque que asegura un control efectivo y el confort del pasajero. (Ding et al., 2017)

#### **2.2.4 Diagnóstico de fallas en sistemas de suspensión semiactivas.**

Una falla es una desviación no permitida de por lo menos una característica del sistema respecto a su condición aceptable, usual o estándar (Isermann & Isermann, 2006). Una falla puede ocurrir en cualquiera de los componentes de un sistema, sea un actuador sensor u otro componente.

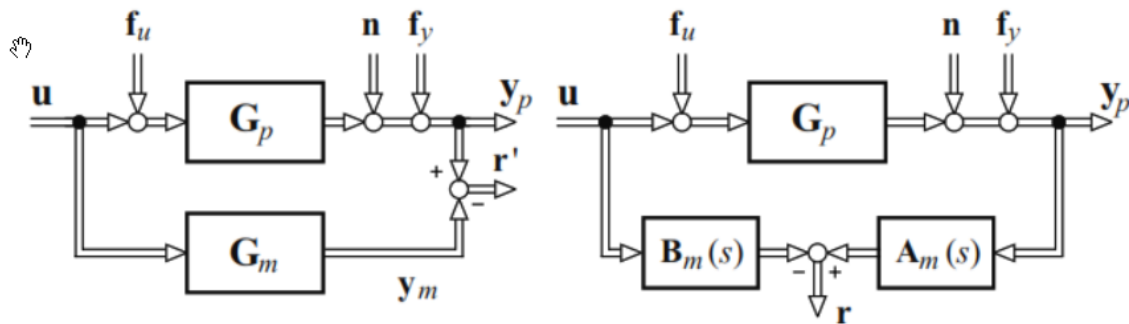
Una falla cuya influencia es independiente del valor de las variables observables es una falla aditiva, mientras que una falla que afecta los parámetros de la planta se considera multiplicativa.(Patton et al., 2010)

En un sistemas de suspensión la falla más común es la pérdida de amortiguamiento debido a fugas del fluido, esto puede deberse a diferentes causas: daños en el vástago, defectos de manufactura, desgaste en los sellos del pistón(Hamed et al., 2014).

Aunque existen varias técnicas para la detección de fallas, en suspensiones el trabajo se ha centrado en la generación de residuos (H. Kim & Lee, 2011) (M Börner et al., 2002) (Haffner et al., 2009). El residuo  $r$  determina la existencia de una falla al sobrepasar un valor umbral previamente definido

De acuerdo a (Isermann, 2006) en modelos dinámicos existen dos formas principales de encontrar residuales, ya sea comparando las señales de salida de un modelo ya conocido y un proceso o hallar los residuales de las variables de estado de estos mismos.

Figura 2-6: *Generación de Residuales.*



Nota: Tomado de (Isermann, 2006)

En amortiguadores semiactivos se han utilizado relaciones de paridad para aislar funciones y hallar residuos (Marcus Börner et al., 2002) (Fischer & Isermann, 2004). Estos residuos han sido utilizados para crear una reconfiguración del controlador del amortiguador, utilizando técnicas de inteligencia artificial (J. Kim & Lee, 2011). Por otra parte se han propuesto esquemas de detección de falla utilizando filtros  $H_\infty$  y de este modo minimizar el error de estimación (H. Wang & Song, 2011).

### **2.2.5 Sistemas de control tolerante a fallas en suspensiones automotrices.**

En un sistema de control tolerante a fallos, el controlador es configurado para disminuir los efectos de la falla en el desempeño del sistema y acercarse al funcionamiento normal del sistema.

Los sistemas de control tolerantes a fallos, pueden ser divididos en dos clases: pasivos y activos.

El pasivo apunta al diseño de un controlador que pueda acomodar los efectos de la falla, y obteniendo controladores bastante robustos. Por otra parte un controlador activo está ligado a un esquema de diagnóstico de fallas (Lunze & Richter, 2008), con base en la información provista por este esquema el controlador es reconfigurado. En (Poussot-Vassal et al., 2008) se propone un sistema de frenado activo que compense la fuerza en el actuador, sin embargo el confort del pasajero no es considerado.

Dentro de los sistemas basados en modos deslizantes se han utilizado para diagnosticar fallas en el sensor (Chamseddine et al., 2006),, así como en el actuador magneto reológico (Xiaomin Dong et al., 2011).

Los esquemas de control LQ, también han sido utilizados para el control de fallas en sistemas de suspensión (Yetendje et al., 2007), pero dado el hecho de que se deben conocer previamente todas las fallas, la factibilidad de la propuesta es limitada.

### **2.2.6 Confort en sistemas de suspensión.**

La tarea principal de un control y más aún de uno tolerante a fallas, es garantizar el confort del pasajero, mediante el diagnóstico y posterior compensación de la falla.

El confort del pasajero es evaluado usando la aceleración vertical de la masa suspendida que en un modelo de medio vehículo corresponde al chasis, esta señal debe permanecer en los rangos descritos en la ISO 2631.

Ya que el nivel de vibración que experimentará el pasajero depende de la intensidad, la frecuencia, dirección, ubicación y duración de la aceleración presentada por el chasis, la norma provee un método de evaluación mediante la ponderación de la aceleración cuadrática media (r.m.s) esta se calcula usando la siguiente ecuación:

$$a_{wk}^{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (a_{wk})^2 dt} \quad (2.10)$$

Donde  $a_{wk}$  corresponde a la aceleración traslacional ponderada.

Y  $T$  corresponde a la duración de la medida en segundos.

Existen múltiples filtros para describir las curvas de ponderación, uno de los más usados fue descrito por (Müller et al., 2018), para aproximarse a los valores ponderados de aceleración vertical ( $a_{wk}$ ) de la norma ISO de 1974, usando un filtro de segundo orden.

Aunque los filtros de bajo orden son preferidos para aplicaciones de control en ocasiones sus resultados difieren hasta en un 20% con los estándares de la ISO 2631- 1997.

La aproximación desarrollada por (Zuo & Nayfeh, 2003) tiene un porcentaje de error menor al 3% y mantiene las ventajas de los filtros de bajo orden. La expresión de esta aproximación es la siguiente :

$$W_k(s) = (87.72 s^4 + 1138s^3 + 11336s^2 + 5453s + 5509) \quad (2.11) \\ * (s^5 + 92.6854 s^4 + 2549.83s^3 + 25969s^2 \\ + 81057s + 79783)^{-1}$$

Los valores calculados usando los filtros de ponderación deben ser comparados con los estándares de confort dados por la norma. Una escala de confort para varios valores de  $\alpha_{w_k}^{RMS}$  dada por la norma ISO 2631 es presentada a continuación:

<b>Magnitud de la aceleración ponderada (RMS)</b>	<b>Nivel de confort</b>
Menos de $0.315 \text{ m/s}^2$	No inconfortable
$0.315\text{-}0.63 \text{ m/s}^2$	Un poco inconfortable
$0.5 - 1 \text{ m/s}^2$	Relativamente inconfortable
$0.8 - 1.6 \text{ m/s}^2$	Inconfortable
$1.25 - 2.5 \text{ m/s}^2$	Muy inconfortable
Mayor a $2 \text{ m/s}^2$	Extremadamente inconfortable

Tabla 2-1: **Escala confort ISO 2631.**

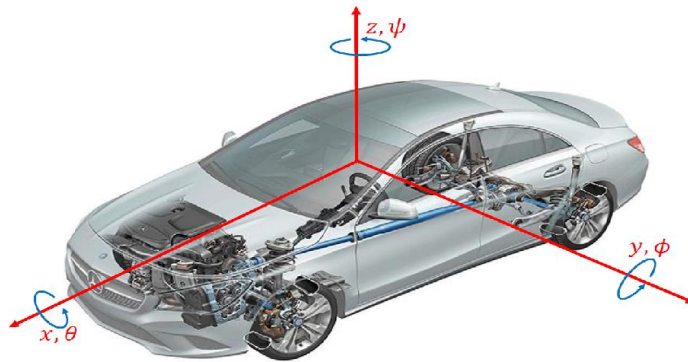
### 3 Modelamiento Dinámico de Suspensión Semiactiva.

Los modelos dedicados a la dinámica vertical del vehículo pueden ser divididos en tres tipos:

- Modelo de un cuarto de vehículo
- Modelo de medio vehículo
- Modelo de vehículo completo.

El modelo que se utilizará en este trabajo para el diseño de control, así como para la simulación es el de medio vehículo, este consta de cuatros grados de libertad y contempla el desplazamiento vertical y el movimiento angular del vehículo.

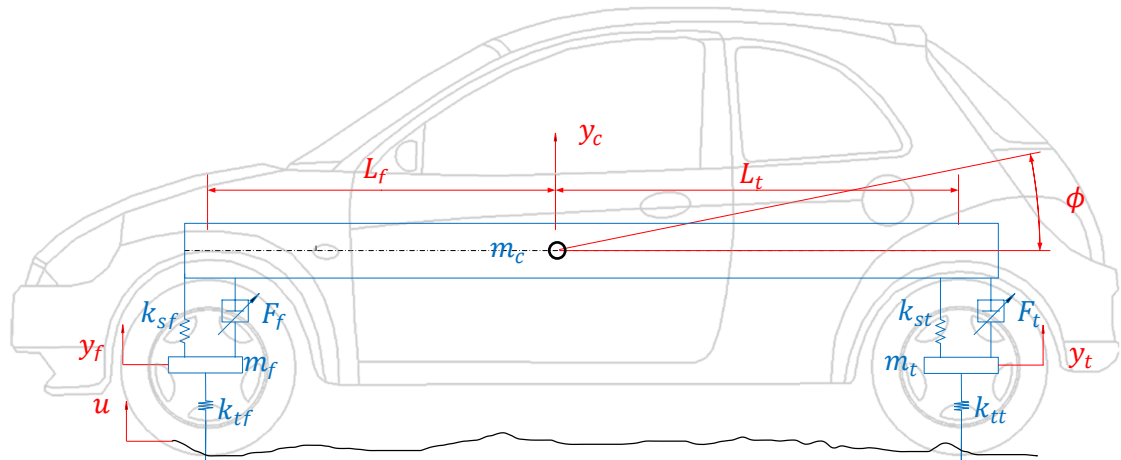
Figura 3-1: *Modelamiento Vehículo.*



Nota: Tomado de (Ersoy et al., 2017)

#### 3.1 Modelo medio vehículo

Este modelo contempla el sistema de suspensión conformado por dos llantas laterales, una delantera y otra trasera. El modelo dinámico está compuesto por:

Figura 3-2: *Modelo Dinámico Medio Vehículo*

Nota: Fuente Autor

- Dos masas no suspendidas,  $m_f$  y  $m_t$  que representa las ruedas delantera y trasera del vehículo respectivamente.
- $y_f$  es el desplazamiento vertical de  $m_f$ , así como  $y_t$  es el desplazamiento vertical de  $m_t$ .
- Una masa suspendida  $m_c$  que representa la mitad del chasis.  $y_c$  es el desplazamiento vertical de  $m_c$ .
- La suspensión delantera compuesta por un resorte con coeficiente  $k_{sf}$  y un amortiguador magnetoreológico cuya fuerza es expresada como  $F_f$ .
- La suspensión trasera compuesta por un resorte con coeficiente  $k_{st}$  y un amortiguador magnetoreológico cuya fuerza es expresada como  $F_t$ .
- Los neumáticos delantero y trasero son modelado como un resorte con coeficiente de rigidez  $k_{ft}$  y  $k_{tt}$  respectivamente.
- El desplazamiento angular o movimiento de cabeceo, está dado por  $\phi$ .
- La distancia desde la suspensión delantera hasta el centro de masa es  $L_f$  de igual forma la distancia desde la suspensión trasera hasta el centro de masa se denomina  $L_t$ .
- El sistema es perturbado con un perfil de camino  $u$ .

El desplazamiento de la masas suspendidas en la ubicación extremas está dado por:

Llanta delantera:

$$y_{cf} = y_c - L_f \sin\phi \quad (3.12)$$

Llanta trasera:

$$y_{ct} = y_c + L_t \sin\phi \quad (3.13)$$

Ya que el ángulo de cabeceo del vehículo  $\phi$  es bastante pequeño, se utilizará la aproximación de ángulos pequeños de la siguiente forma:

$$\sin\phi = \phi \quad \cos\phi = 1$$

Utilizando esta aproximación, las ecuaciones dinámicas que gobiernan el modelo de un medio de vehículo según la segunda ley de newton son:

$$\ddot{y}_f m_f = C_f(\dot{y}_c - \dot{y}_f - L_f \dot{\phi}) + k_{sf}(y_c - y_f - L_f \phi) + k_{tf}(u - y_f) \quad (3.14)$$

$$\ddot{y}_t m_t = C_t(\dot{y}_c - \dot{y}_t + L_t \dot{\phi}) + k_{st}(y_c - y_t + L_t \phi) + k_{tt}(u - y_t) \quad (3.15)$$

$$\ddot{y}_c m_c = C_f(-\dot{y}_c + \dot{y}_f + L_f \dot{\phi}) + C_t(-\dot{y}_c + \dot{y}_t - L_t \dot{\phi}) + k_{sf}(-y_c + y_f + L_f \phi) + k_{st}(y_c - y_t + L_t \phi) \quad (3.16)$$

$$I\ddot{\phi} = L_f C_f(\dot{y}_c - \dot{y}_f - L_f \dot{\phi}) + L_t C_t(-\dot{y}_c + \dot{y}_t - L_t \dot{\phi}) + L_f k_{sf}(y_c - y_f - L_f \phi) + L_t k_{st}(-y_c + y_t - L_t \phi) \quad (3.17)$$

## 3.2 Modelo Amortiguador Magnetoreológico

El modelo dinámico de Bouc-Wen modificado cuenta con un elemento de histéresis y ha sido utilizado para controlar dispositivos eficientemente, por

esto será usado en la simulación y control de la suspensión semiactiva presentada en este trabajo.

La ecuación que rige el comportamiento dinámico de este modelo es :

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (3.18)$$

Donde  $c_0$  corresponde al coeficiente viscoso del amortiguador,  $k_0$  = rigidez del resorte lineal,  $x_0$  = desplazamiento inicial del resorte,  $\alpha$  es un factor asociado a las características estructurales del amortiguador, cabe notar que si  $\alpha = 0$  , la dinámica sería la de un amortiguador pasivo.

La variable evolutiva o de histéresis del modelo  $z$  es representada de la siguiente manera

$$\dot{z} = -\gamma z |\dot{x}| |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + \delta \dot{x} \quad (3.19)$$

$\gamma, \beta, \delta$  son parámetros que determinan la forma del bucle de histéresis, mientras que  $n$  controla la suavidad de la curva fuerza – desplazamiento.

El ciclo de histéresis del modelo de Bouc-Wen representa la forma característica de relación entre la fuerza y la velocidad en los amortiguadores magnetorreológicos.

La variable de dinámica interna viene dada por:

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + K_0(x - y) \} \quad (3.20)$$

El modelo usado en este trabajo fue presentado por (Spencer B et al., 1997), inicialmente propuesto para excitaciones de corrientes fluctuantes, pero dentro de las observaciones experimentales los investigadores notaron que las variables  $\alpha$ ,  $c_0$  y  $c_1$  variaban linealmente respecto al voltaje de entrada, obteniendo las relaciones:

$$\alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3.21)$$

$$c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u \quad (3.22)$$

$$c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (3.23)$$

Cabe notar que  $c_{0a}$  y  $\alpha_a$  en estas relaciones corresponderían al coeficiente de amortiguación y la fuerza de Coulomb respectivamente.

Usando un filtro de primer orden se toma en cuenta la dinámica reológica del amortiguador y su punto de equilibrio.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (3.24)$$

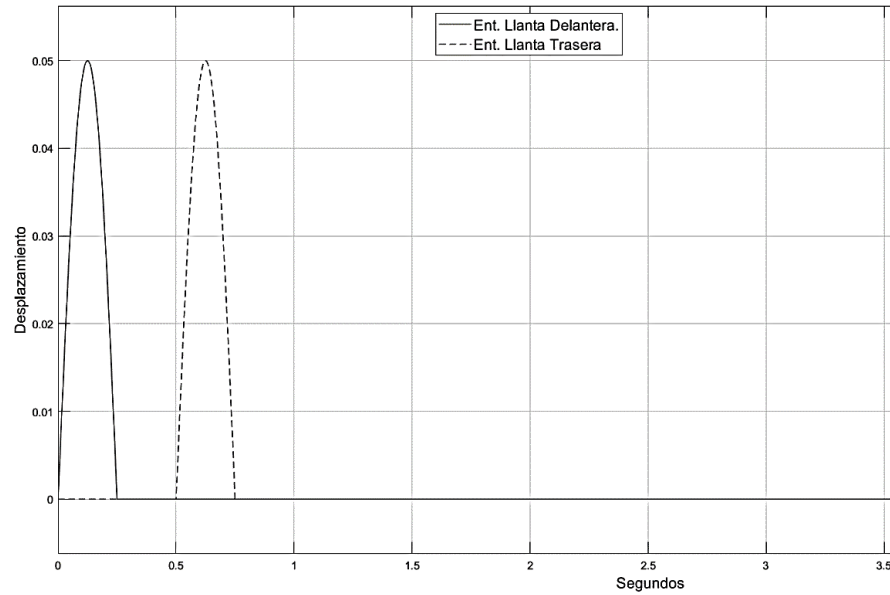
Donde  $v$  es el voltaje aplicado al amortiguador.

### 3.3 Modelamiento de perturbaciones de entrada.

Como entradas para la simulación de las perturbaciones causadas por la carretera en el sistema de amortiguación, se usaron dos señales: un bache y un perfil de camino estandarizado por la norma ISO 8608.

#### 3.3.1 Entrada Bache.

La entrada de bache se modeló como una señal sinusoidal con una duración de 0.25 segundos tomando una velocidad de movimiento del automóvil de 20 km/h, a continuación, se presenta la señal tanto para la llanta delantera como la trasera.

Figura 3-3: *Modelamiento Bache.*

Nota: Fuente Autor

El retardo entre la señal delantera y trasera se calculó cómo:

$$T_r = \frac{L_f + L_t}{Vel} \quad (3.25)$$

### 3.3.2 Perfil de Camino ISO 8608

El perfil de camino fue simulado siguiendo los estándares de la ISO 8608, esta norma describe una metodología para determinar la calidad de un camino basado en la *Densidad Espectral de Potencia* (DEP) medida en el perfil del camino.

Una señal de ruido blanco o una entrada randómica puede ser usado para recrear el perfil de la carretera en el dominio del tiempo mediante un filtro de primer orden como lo expresan (Lenkutis et al., 2021) y (Tyan et al., 2009).

Usando la DEP puede aproximarse un perfil de camino cómo:

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \quad (3.26)$$

Donde  $\Omega = \frac{2\pi}{L}$  es la frecuencia angular espacial,  $L$  es la longitud de la onda.

El valor de la DEP de camino es descrito como  $\Phi(\Omega_0)$  en  $m^2 \left( \frac{rad}{m} \right)$  con una frecuencia angular espacial referencia  $\Omega_0 = 1 \text{ rad/m}$

Si el vehículo se mueve a una velocidad constante, la distribución de el espectro de potencia puede ser descrita cómo:

$$G_d(\omega) = \frac{2\alpha v \sigma^2}{\pi} \frac{1}{(\alpha v)^2 + \omega^2} \text{ o } G_d(\Omega) = \frac{2\alpha \sigma^2}{\pi} \frac{1}{(\alpha)^2 + \Omega^2} \quad (3.27)$$

Donde  $\sigma^2$  es la variance de la rugosidad del camino,  $v$  es la velocidad del vehículo,  $\omega$  es la frecuencia angular en el dominio del tiempo y  $\Omega$  es la frecuencia angular especial y  $\alpha$  es una variable que depende de la superficie del camino.

El perfil de camino en dominio del tiempo puede entonces ser descrito como:

$$\frac{d}{dt} z(t) = -\alpha v z(t) + \eta(t) \quad (3.28)$$

Donde  $\eta(t)$  es un ruido blanco gaussiano de media cero con una dimensión de velocidad  $\left( \frac{m}{s} \right)$  con una DEP igual a  $2\alpha \sigma^2$ , el valor de varianza mas usado en la literatura es  $\sigma^2 = 4G_d(\Omega_0)$  .(Dodds & Robson, 1973)(Goenaga et al., 2017).

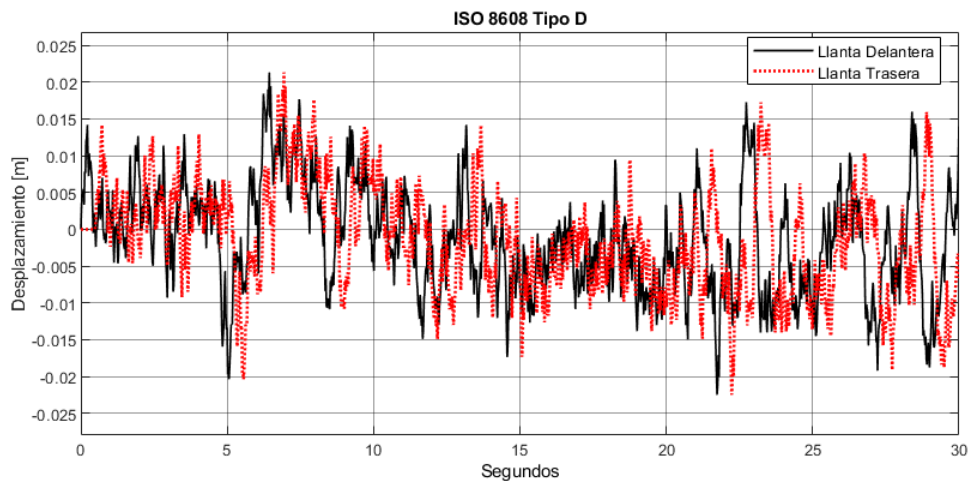
Los valores típicos de la rugosidad para diferentes tipos de caminos descritos en la ISO 8608 son presentados a continuación:

Tipo de Camino	$\sigma [10^{-3}m]$	$\Phi(\Omega_0)(10^{-6}m^3), (\Omega_0) = 1$	$\alpha(\text{rad/m})$
A (muy bueno)	1	1	0.127
B (bueno)	4	4	0.127
C (promedio)	8	16	0.127
D (malo)	16	64	0.127
E (muy malo)	32	256	0.127

Tabla 3-1: **Parámetros camino ISO 8608.**

El perfil usado corresponde a uno TIPO D, con un vehículo moviéndose a una velocidad constante de 40 km/h. El tiempo de retardo entre la entrada de la llanta delantera y trasera es la misma usada en la señal bache.

Figura 3-4: *Modelo PSD Camino ISO 8608.*



Nota: Fuente Autor

### 3.4 Validación Modelo.

#### 3.4.1 Validación y Parametrización del modelo de amortiguador.

(Lai & Liao, 2002) identificaron los parámetros para la caracterización del comportamiento de un amortiguador magnetoreológico RD-1005 el cual es ampliamente comercializado para la suspensión semiactiva de automóviles.

Estos parámetros son listados a continuación:

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$C_{0a}$	784 Ns/m	$\alpha_a$	12441 N/m
$C_{0b}$	1803 Ns/Vm	$\alpha_b$	38430 N/Vm
$k_0$	3610 N/m	$\gamma$	136320 /m <sup>2</sup>
$C_{1a}$	14649 Ns/m	$\mu$	2059020 /m <sup>2</sup>
$C_{1b}$	34622 Ns/Vm	$A$	58
$k_1$	840 N/m	$n$	2
$x_0$	0.0245 m	$\eta$	190 /s

Tabla 3-2: **Parámetros modelo amortiguador.**

Los errores reportados entre el modelo y los datos experimentales del amortiguador fueron calculados de la siguiente forma:

$$Error = e^2 = \sum (f_{experimentales} - f_{modelo})^2 \quad (3.29)$$

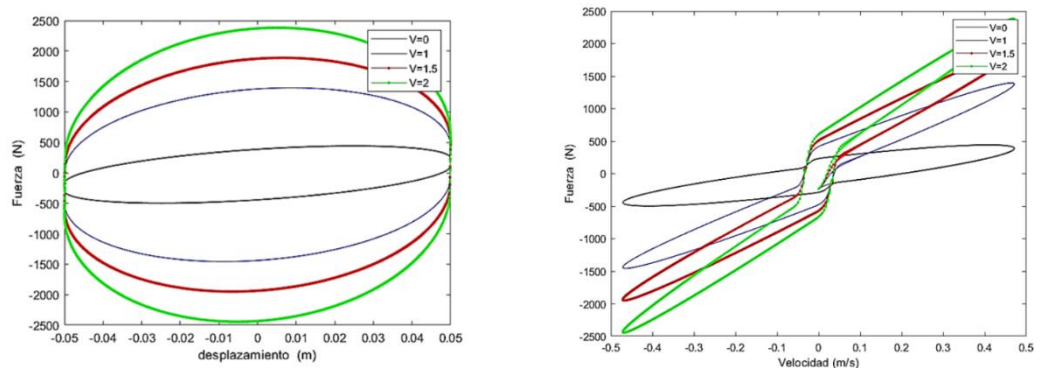
Obteniendo los resultados listados en la tabla, para diferentes voltajes de entrada al amortiguador.

Voltaje [V]	0	0.5	1	1.5	2
<b>Error</b>	0.194	0.0989	0.0843	0.0621	0.0861

Tabla 3-3: **Error validación modelo amortiguador.**

Usando estos parámetros. se construyó un modelo y se introdujo a este una señal sinusoidal con una amplitud equivalente a la de un bache, para mostrar el comportamiento y el ciclo de histéresis del amortiguador a diferentes voltajes (0V, 1V, 1.5V 2V) .

Figura 3-5: *Curvas Características Amortiguador Magnetorreológico.*



Nota: Fuente Autor

### 3.4.2 Validación modelo de medio sistema de amortiguación.

Haciendo uso de las ecuaciones del sistema de amortiguación y del amortiguador magnetorreológico, se desarrolló un modelo de un sistema de suspensión semiactiva, controlado por la tensión de entrada al amortiguador y excitado por un bache y un perfil de camino. Se analizaron las señales de desplazamiento, velocidad y aceleración de la masa suspendida y se contrastaron con modelo ya validados experimentalmente.

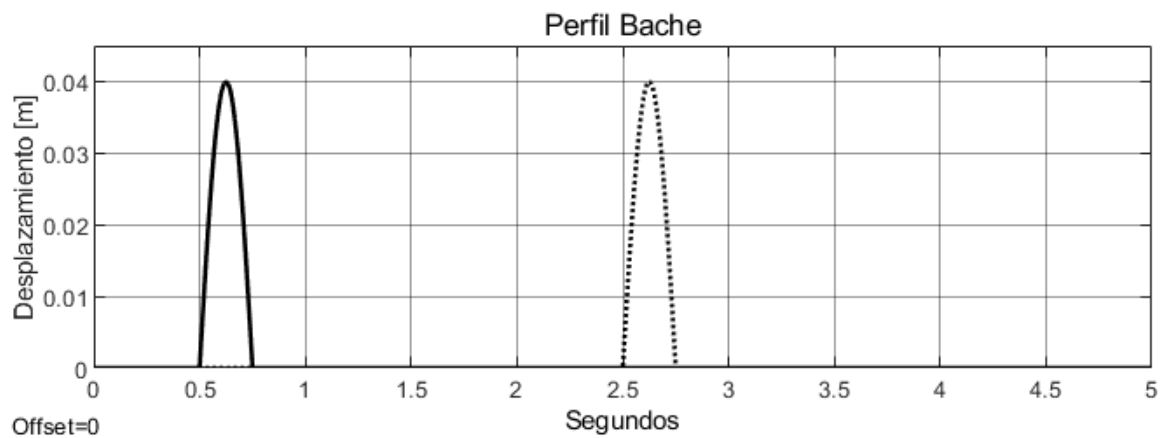
Se propuso validar el modelo con los anteriormente desarrollados por (Feng et al., 2003) y (Cho et al., 2005), pero diferencias estructurales del modelo de suspensión y del tipo de amortiguador dificultan una comparación directa y con validez de los resultados obtenidos.

Por esto, se realizó la validación del modelo respecto a otros modelos existentes. Aunque estos modelos no son exactamente iguales, ya que el

modelo de amortiguador presentado ha sido usado mayormente en sistemas de un cuarto de vehículo, tienen una similitud mayor respecto a la dinámica tanto del medio sistema como del amortiguador magnetoreológico.

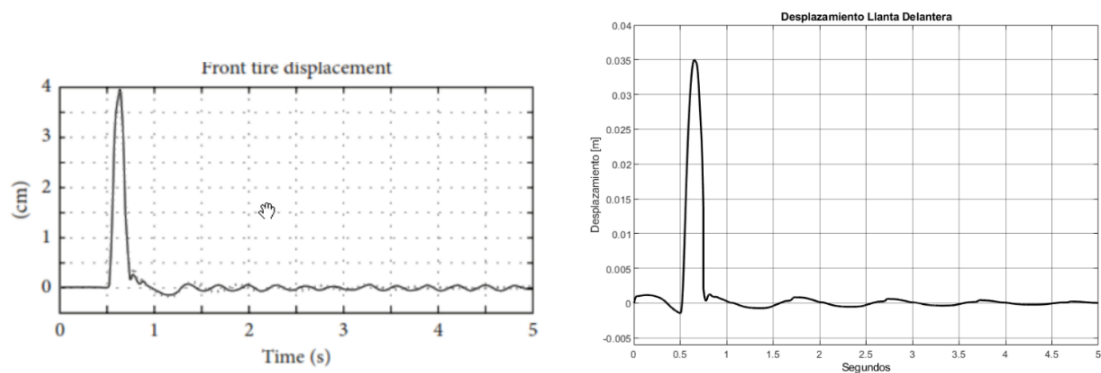
Se comparó la dinámica del modelo de medio sistema de suspensión frente al desarrollado por (Félix-Herrán et al., 2015) usando la entrada de bache mostrada a continuación.

Figura 3-6: *Perfil Bache Validación.*



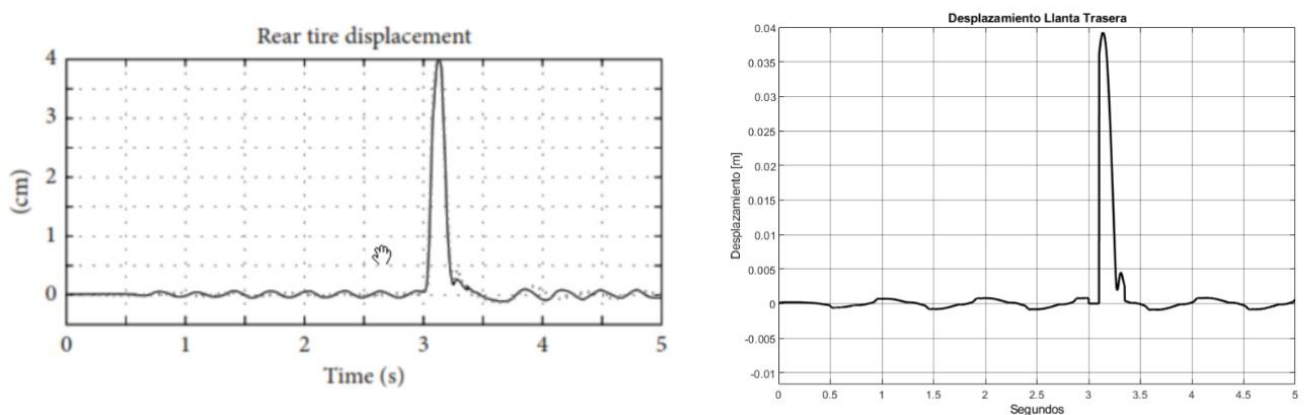
Nota: Fuente Autor.

Figura 3-7: *Comparación Dinámica Llanta Delantera.*



Nota: Tomado de (Félix-Herrán et al., 2015)

Figura 3-8: *Comparación Dinámica Llanta Trasera.*



Nota: Tomado de (Félix-Herrán et al., 2015)

Al comparar las respuestas de estos dos modelos, los resultados muestran que la dinámica del modelo coincide con la referencia dada, lo que significa que es válido para utilizarse en la simulación y prueba del sistema de control.

### 3.5 Sistema de control.

Se diseñaron dos redes neuronales de linealización por retroalimentación usando la herramienta Narma-L2 de MATLAB/Simulink®. Este tipo de control adaptativo consta de dos pasos: la identificación o estimación del sistema o planta y el diseño del control.

#### 3.5.1 Estimación del Modelo.

En primera instancia se realizó la identificación del sistema a controlar, se entrenaron dos redes neuronales para representar la dinámica no lineal del sistema, una red para cada uno de los amortiguadores magnetorreológicos

Para encontrar una función que se aproxime a la dinámica del sistema. se usó el método de retro propagación, el cual tiene como objetivo minimizar el error cuadrático medio dado por:

$$ECM = n^{-1} \sum_0^n (e_i)^2 = n^{-1} \sum_0^n (Y_i - Y_m)^2 \quad (3.30)$$

Donde  $Y_i$  es el valor de salida de la planta y  $Y_m$  es el del modelo generador por la red neuronal,  $e_i$  es el error entre las salidas y  $n$  es el número de muestras de entrenamiento. Este error cuadrático medio es una medida del desempeño de la red en identificar el modelo. Se obtuvieron unos resultados de ECM de  $5.21 \times 10^{-7}$  para el amortiguador delantero en 36 epochs y de  $1.02 \times 10^{-7}$  en 44 epochs para el amortiguador trasero.

Los datos utilizados para el entrenamiento son:

Parámetro	Valor
Tamaño Capas Ocultas	5
Núm. Entradas retardadas	2
Núm. Salidas retardadas.	2
Intervalo Muestreo	0.001 seg
Datos Normalizados	NO
Rango Entrada Planta	[0V- 2V]
Valor Máximo Intervalo	0.5
Valor Mínimo Intervalo	0.1
Número de muestras entrenamiento	5000

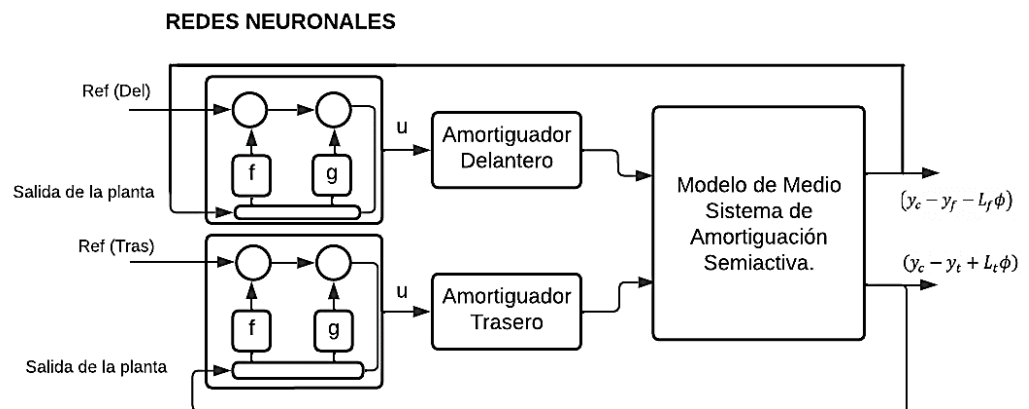
Tabla 3-4: Parámetros Entrenamiento Redes Neuronales.

### 3.5.2 Control de los amortiguadores.

Cada una de las redes entrenadas controla un amortiguador de los dos presentes en el medio modelo de suspensión, puesto que el algoritmo Narma-L2 es de una entrada y una salida (SISO) y que el uso diferenciado de controladores favorece la reconfiguración individual de estos en el apartado tolerante a fallos.

La red Narma-L2 es una modificación de las redes recurrentes y que presenta ventajas sobre redes neuronales *feedforward* para control de sistemas con series temporales, es por esto que fueron usadas en el esquema de control que se muestra en la Figura 3-9.

Figura 3-9: *Redes Neuronales de Control.*



Nota: Fuente Autor

El control desarrollado es alimentado con una señal de salida de la planta, siendo el desplazamiento relativo del chasis frente a la masa no suspendida delantera y trasera respectivamente. El control genera una señal de voltaje que entra al amortiguador, de acuerdo a la salida de la planta y a una señal de referencia, las ecuaciones del controlador son listadas a continuación:

$$\begin{aligned}
y_i(k+d) = & f[y_i(k), y_i(k-i), \dots, y_i(k-n+1), u_i(k), u_i(k-1), \dots, \\
& u_i(k-n+1)] \\
& + g[y_i(k), y_i(k-i), \dots, y_i(k-n+1), u_i(k-1), \dots, u_i(k-n \\
& + 1)] * u_i(k+1)
\end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}
u_i(k) = & [y_{ri}(k+d) \\
& - f[y_i(k), \dots, y_i(k-n+1), u_i(k), u_i(k-1), \dots, u_i(k-n \\
& + 1)]x[g[y_i(k), y_i(k-i), \dots, y_i(k-n+1) u_i(k-1), \dots, u_i(k \\
& - n+1)]^{-1}
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Las redes neuronales de control constan de una capa oculta con cinco (5) neuronas y una capa de salida, fueron entrenadas usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt, esta configuración se adoptó luego de realizar pruebas y contrastar la literatura disponible.

## 4 Sistema de Control Tolerante a Fallas

### 4.1 Sistema de Diagnóstico de fallas.

El sistema de diagnóstico de fallas, debe detectar y aislar la falla dentro del sistema de suspensión. La tarea de la detección consiste en decidir si la falla ha ocurrido o no, y el aislamiento en determinar que elemento del sistema ha fallado. El módulo de detección y aislamiento de fallas desarrollado en este trabajo está basado en un algoritmo de generación de residuos y el uso de transformadas wavelets.

Las fallas que serán introducidas al modelo serán del tipo multiplicativas y representarán una pérdida porcentual de fuerza debido a una fuga de aceite en el amortiguador, estarán definidas cómo:

$$F_{MR_f} = \alpha F_{MR} \quad (4.1)$$

Dónde  $\alpha \in [0, 1]$  representa el nivel de fuga en el amortiguador, siendo  $\alpha=0$  el caso en que se ha perdido todo el aceite, y  $\alpha=1$  cuando el amortiguador está libre de fallas.

#### 4.1.1 Sistema Detección de Fallas.

Con el objetivo de detectar la falla se generan residuos asociando la variable del sistema, con la que tendría un modelo nominal libre de fallas, si el residual es igual a cero, el sistema se encuentra libre de fallas

El residual a calcular será la diferencia entre las señales de salida de la aceleración del modelo funcional  $\ddot{y}_3$  y aquel con fallas  $\ddot{y}_3'$ . Aunque usando esta simple herramienta podríamos detectar una falla, se requiere de una serie de análisis para su aislamiento.

$$residual = \ddot{y}_3 - \ddot{y}_3' \quad (4.2)$$

#### 4.1.2 Severidad de la falla.

Para el posterior diagnóstico de la falla, se han definido seis (6) escenarios de acuerdo a la severidad y localización de la falla, siendo estas:

Escenario	Localización	Tipo Fallo	Clasificación
Escenario 1	Amortiguador trasero.	1-9 % Pérdida fuerza amortiguamiento.	Incipiente
Escenario 2	Amortiguador trasero.	10-19 % Pérdida fuerza amortiguamiento.	Moderada
Escenario 3	Amortiguador trasero.	20 % + Pérdida fuerza amortiguamiento.	Severa
Escenario 4	Amortiguador delantero.	1-9 % Pérdida fuerza amortiguamiento.	Incipiente
Escenario 5	Amortiguador delantero.	10-19 % Pérdida fuerza amortiguamiento.	Moderada
Escenario 6	Amortiguador delantero.	20 % + Pérdida fuerza amortiguamiento.	Severa

Tabla 4-1: Escenarios de fallas.

#### 4.1.3 Sistema Aislamiento de Fallas.

Para determinar el elemento cuyo funcionamiento es inadecuado, y la severidad de la falla se realizó un análisis de los residuos de las señales de desplazamiento del modelo usando transformadas wavelets.

La transformada wavelet deriva de una familia de funciones descrita por la ecuación (4.3) (Lepine et al., 2015)

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a > b \in \mathfrak{R} \quad (4.3)$$

Este análisis descompone la señal original en paquetes de nivel, en consecuencia, la señal original puede ser reconstruida utilizando los nodos obtenidos.

Dado que la transformada wavelet es una medida de la similitud entre la señal  $y(t)$  y una serie de funciones predeterminadas, esta puede mostrar las características transitorias ocultas en la señal original.

Se realizó un análisis de la señal del residual de aceleración, mediante una descomposición de nivel tres, a través de la función “*wpdec*” de Matlab. Para el análisis se empleó la entropía de Shannon como medida para evaluar la información contenida en la señal, esta medida se calcula de la siguiente forma:

$$\mu(\lambda_{j,r}(n)) = -\lambda_{j,r}(n)^2 \cdot \log(\lambda_{j,r}(n)^2) \quad (4.4)$$

De este árbol wavelet tomamos la medida de energía, con el fin de obtener un vector que pueda ser utilizado para entrenar una red neuronal que va a diagnosticar la falla. Usando la función *wenergy*, se obtuvo el aporte de energía de cada nivel medido en el árbol wavelet, obteniendo un vector con ocho (8) valores, en la Tabla 4-2 se muestran a manera de ejemplificación algunos datos obtenidos en diferentes escenarios de falla, la totalidad de los análisis se presenta en el ANEXO A.

E 3.0	E 3.1	E 3.2	E 3.3	E 3.4	E 3.5	E 3.6	E 3.7	Escenario Falla
91,07970	4,05290	0,70872	1,11843	0,49296	0,86590	0,70821	0,97319	9% Amort.Trasero.
93,85458	2,43751	0,47901	0,99528	0,54411	0,75959	0,43598	0,49395	15% Amort.Trasero
92,44330	3,40127	0,58921	0,97484	0,52480	1,03278	0,50433	0,52947	18% Amort. Trasero
93,09062	3,14138	0,57237	0,76577	0,53234	0,77538	0,45552	0,66662	20% Amort.Trasero
99,72853	0,18516	0,01478	0,03508	0,00676	0,00844	0,00960	0,01165	9% Amort.Delantero
99,67384	0,21315	0,01639	0,04757	0,01102	0,01232	0,01353	0,01218	15% Amort. Delantero
99,75801	0,16271	0,01331	0,03125	0,00647	0,00949	0,01010	0,00866	18% Amort. Delantero
99,80807	0,12907	0,01022	0,02426	0,00583	0,00729	0,00801	0,00726	20% Amort. Delantero

Tabla 4-2: **Energía Descomposición Wavelet.**

Esta descomposición energética wavelet es usada para entrenar una red neuronal, de esta forma el fallo en el amortiguador puede diagnosticarse usando la energía del residual de la señal de aceleración de la masa suspendida.

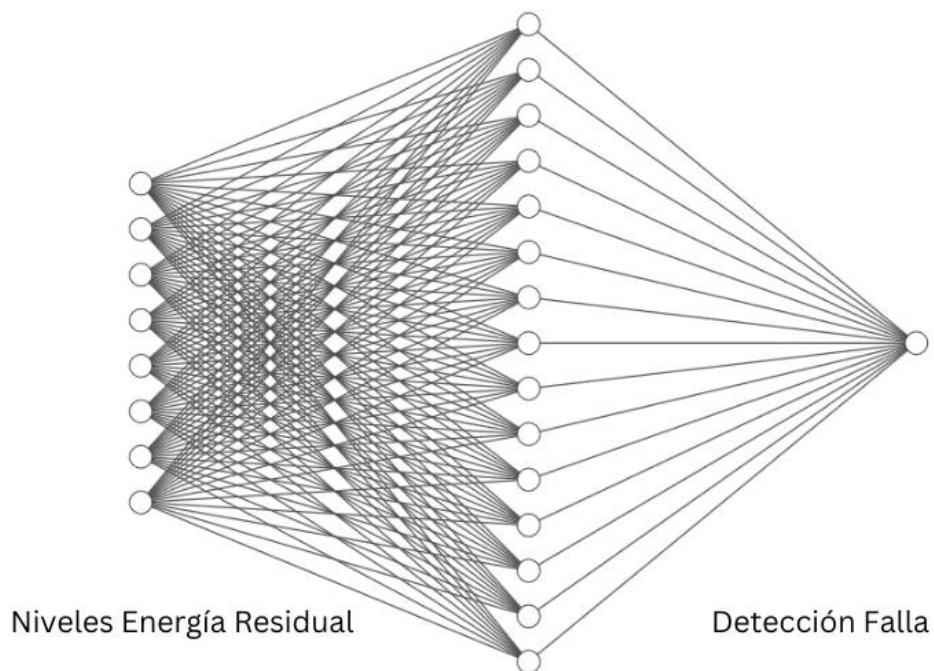
La arquitectura de redes neuronales para el control tolerante a fallas es multilayer perceptrón, dada su aplicabilidad a diferentes vectores de entrada y las pruebas realizadas en la estimación del modelo de suspensión.

## 4.2 Redes neuronales Diagnóstico de Fallas.

Para el diagnóstico de las fallas se dispone primero de una red neuronal perceptrón de dos capas, el algoritmo de retro-propagación fue utilizado para resolver de forma iterativa el ajuste de los pesos y bias del perceptrón multicapa.

El índice de aprendizaje de la red varía en función del índice de rendimiento de la misma, el número óptimo de neuronas en la capa oculta y las funciones a usar se determinaron por ensayo y error, la red neuronal propuesta está basada en una capa de ocho (8) entradas correspondiente a los niveles de energía del residual , una capa oculta con quince (15) neuronas y una capa de salida, con las funciones logística sigmoidea y de transferencia lineal respectivamente en cada capa.

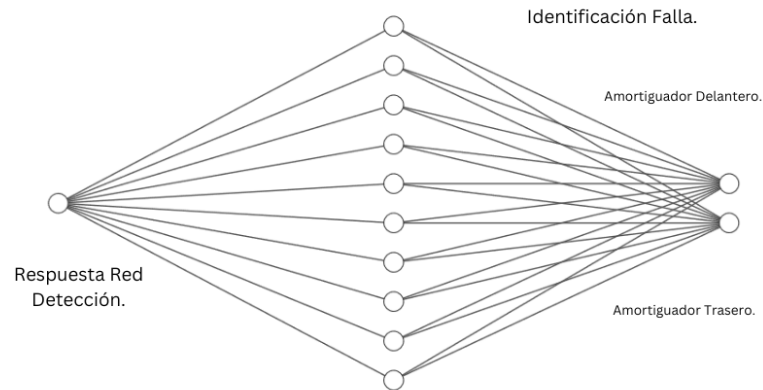
Figura 4-1: *Esquema Red Neuronal de Identificación.*



Nota: Fuente Autor

La segunda red desglosa la salida de la primera red neuronal, obteniendo la ubicación y porcentaje de falla del amortiguador, esta red tiene una entrada y dos salidas, el número de neuronas en la capa oculta es de diez.

Figura 4-2: *Esquema Red Neuronal Aislamiento Falla.*



Nota: Fuente Autor

#### 4.2.1 Entrenamiento Redes Neuronales Diagnóstico.

La entrada de la primera red neuronal es el nivel de energía del residual de aceleración medido, la salida corresponde en su parte entera a la localización de la falla siendo uno (1) para el amortiguador delantero y dos (2) para el trasero, la parte decimal corresponde a el porcentaje de la falla.

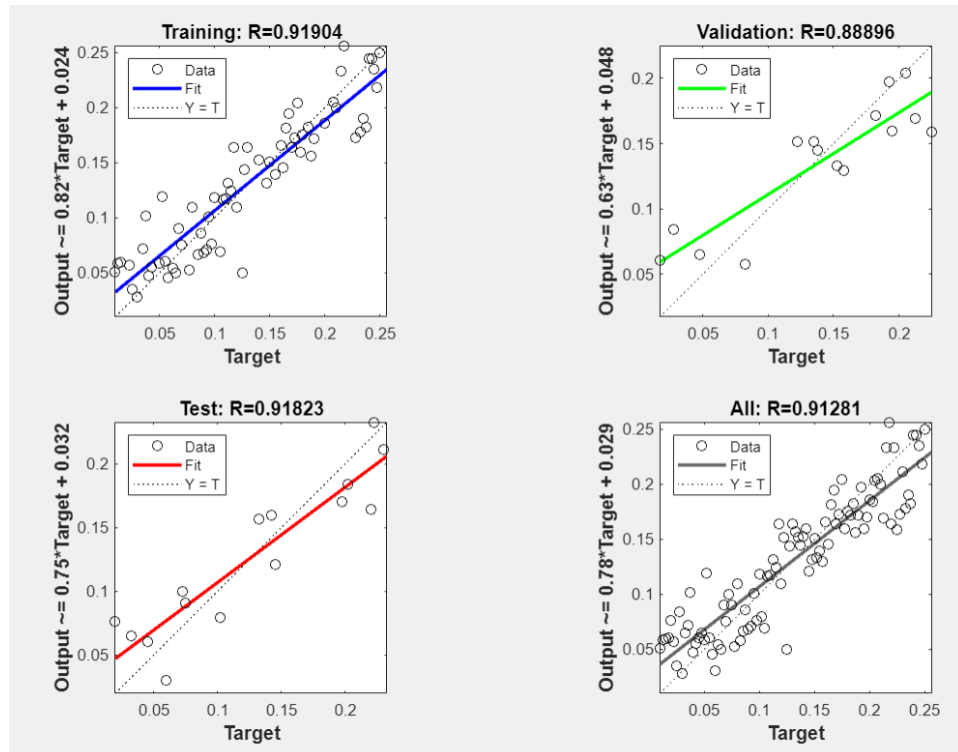
A continuación se muestra una entrada y salida típica de la primera red neuronal de diagnóstico de fallas.

Entrada: Energía del Residual de aceleración								Salida
93.8546	2.4375	0.4790	0.9953	0.5441	0.75961	0.4360	0.49394	2.147
- Esta salida corresponde a una falla de entre 14 y 15% en el amortiguador trasero. .								

Tabla 4-3: **Entrada y Salida Típica Redes Neuronales Diagnóstico.**

Los resultados del entrenamiento con los diferentes escenarios son mostrados a continuación

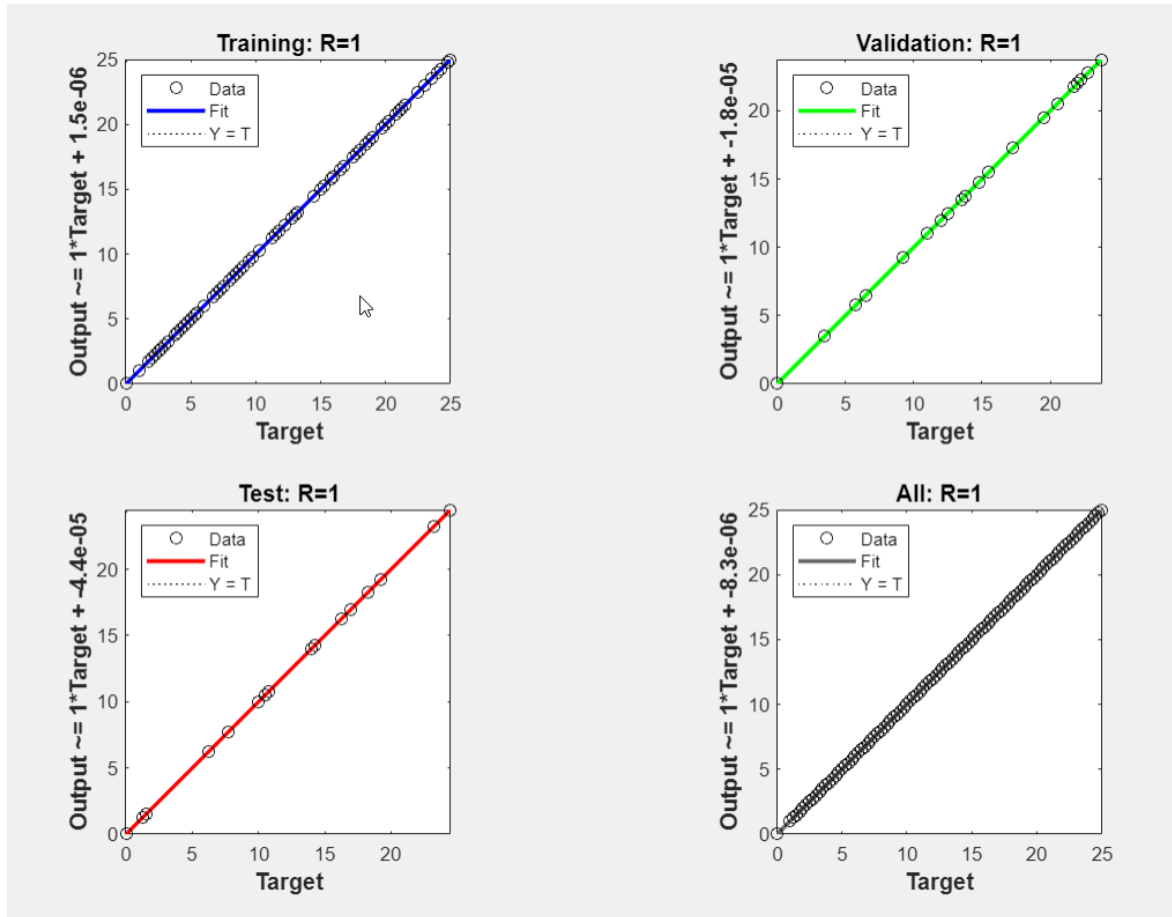
Figura 4-3: *Resultados Entrenamiento Red Identificación Falla.*



Nota: Fuente Autor

La segunda red neuronal tendrá como entrada la salida de la primera y posee dos salidas, correspondiente a cada amortiguador, la salida del amortiguador sano será cero, mientras que en el otro se obtendrá el porcentaje de falla presente.

Los resultados del entrenamiento se muestran a continuación:

Figura 4-4: *Resultados Entrenamiento Aislamiento Falla.*

Nota: Fuente Autor.

Una vez el sistema realice la detección aislamiento y diagnóstico, el sistema de control tolerante a fallas buscará reducir los efectos de la misma, mediante una fuerza de compensación realizada por el amortiguador libre de falla.

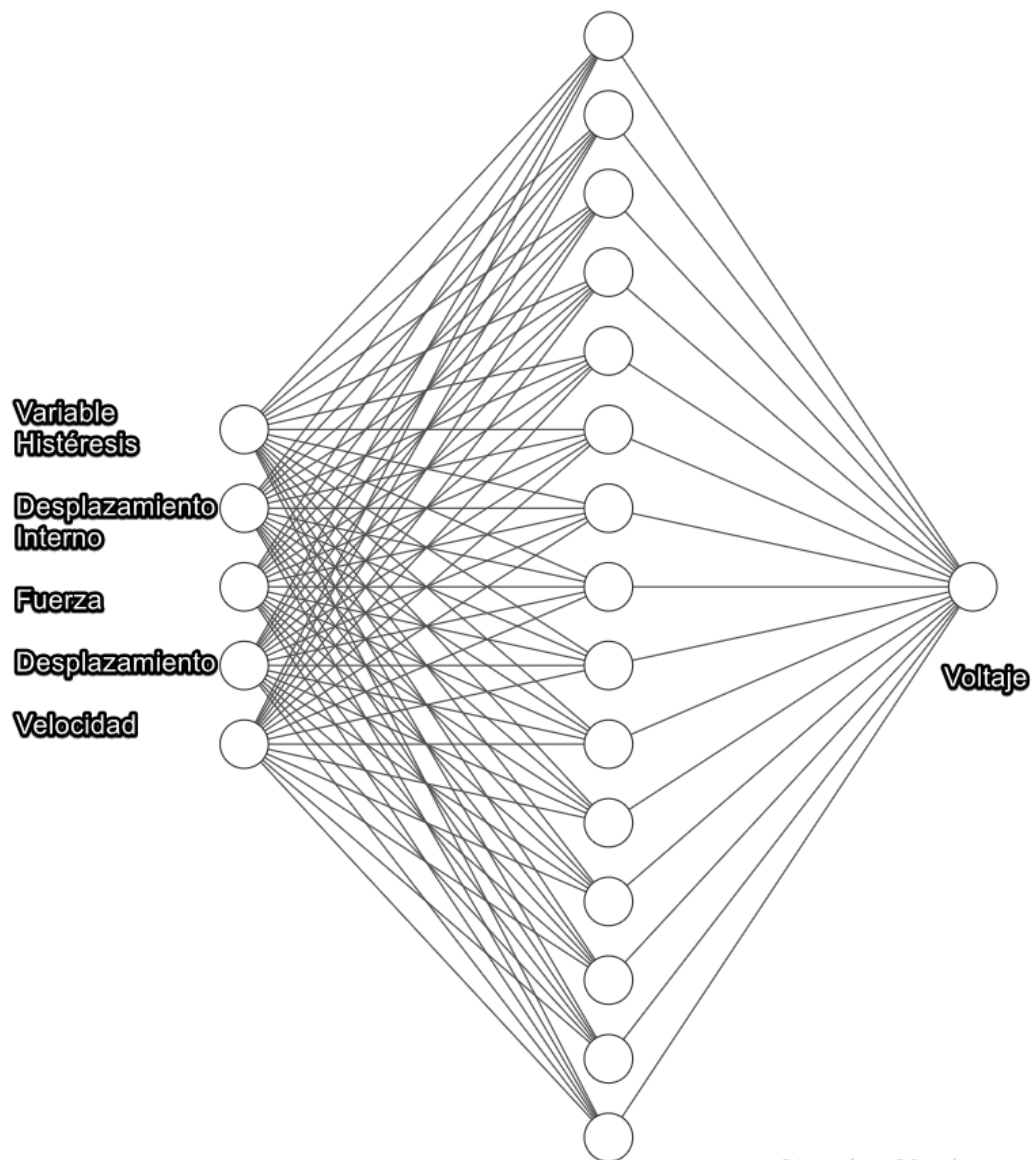
### 4.3 Sistema de compensación de falla

En esta etapa se usó una red neuronal entrenada específicamente para la compensación de la falla presente en el sistema. El objetivo del control es mantener el confort del pasajero y dado que este es afectado directamente por la aceleración de la masa suspendida, se buscará que la fuerza del

amortiguador sano sea equivalente a la del amortiguador con fallas y con esto disminuir cambios abruptos en la velocidad de la masa suspendida.

La señal de control para la compensación será calculada con el modelo inverso de la dinámica inversa del modelo del amortiguador.

Figura 4-5: *Esquema Red Neuronal Compensación.*

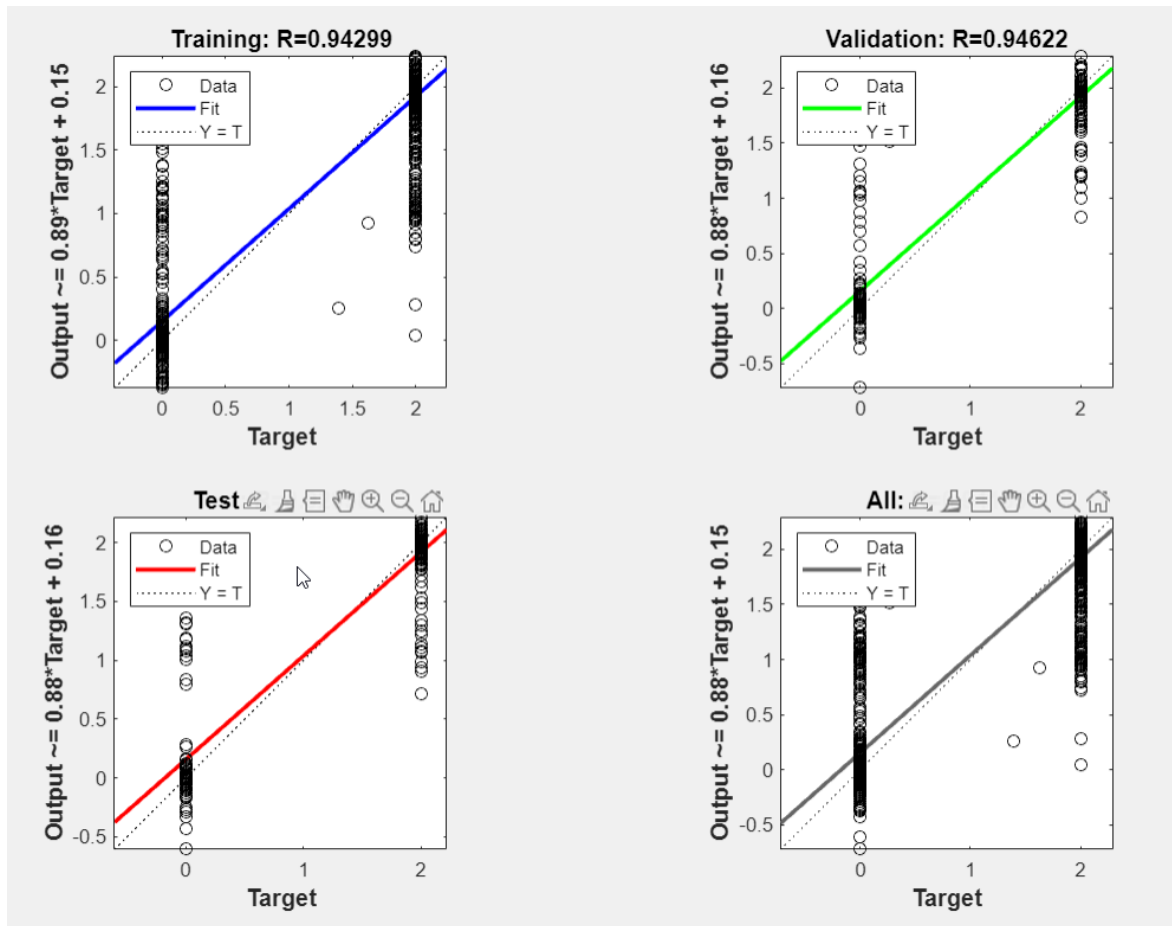


Nota: Fuente Autor

La red neuronal que fue entrenada para simular un modelo invertido del amortiguador magnetoreológico, calculará el nivel de voltaje a disminuir en el amortiguador sano con el fin de equiparar las fuerzas, conociendo el porcentaje de falla en el otro y disminuyendo en este porcentaje la fuerza a entregar.

Los resultados del entrenamiento de esta red son los siguientes:

Figura 4-6: *Resultados Entrenamiento Red Compensación Falla.*



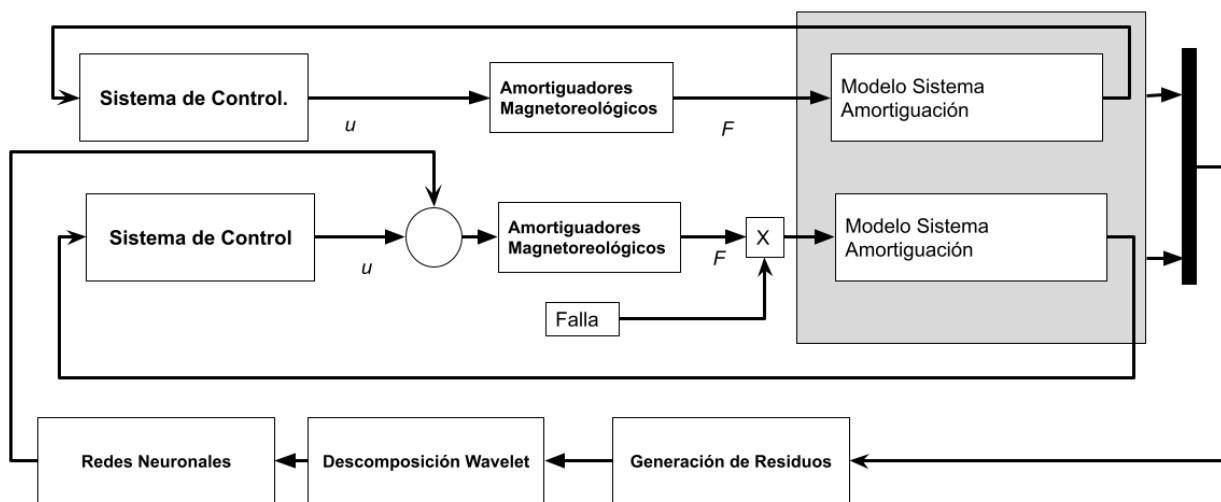
Nota: Fuente Autor

## 5 Simulación

El modelo dinámico de medio sistema de suspensión semiactiva, con dos amortiguadores magnetorreológicos, es empleado para generar unos residuales comparando la dinámica de una planta nominal y otra con fallas. Estos residuales son utilizados para la posterior detección, diagnóstico y compensación de las fallas, a través de un sistema tolerante a fallas que usa un arreglo de redes neuronales previamente descritas. Los escenarios de falla bajo los cuales se llevó a cabo la simulación son descritos en la Tabla 4-1.

Se presenta a continuación el diagrama de bloques general del sistema a simular.

Figura 5-1: *Diagrama de Bloques Sistema.*



Nota: Fuente Autor

Los parámetros del modelo de suspensión usados en la simulación son los siguientes:

<b>Parámetro</b>		<b>Valor</b>
Distancia frontal al centro de masa.	$L_f$	$1.38 [m]$
Distancia trasera al centro de masa.	$L_t$	$1.36 [m]$
Resorte llanta delantera	$K_{tf}$	$210000 [N/m]$
Resorte llanta trasera	$K_{tt}$	$210000 [N/m]$
Resorte Suspensión	$K_{sf}$	$20000 [N/m]$
Resorte Suspensión	$K_{st}$	$20000 [N/m]$
Masa Frontal	$m_f$	$40 [kg]$
Masa Trasera	$m_t$	$40 [kg]$
Masa del Chasis	$m_c$	$800 [kg]$
Damper pasivo frontal	$C_f$	$1000 [N.s/m]$
Damper pasivo trasero	$C_t$	$1000 [N.s/m]$
Momento de Inercia.	$I$	$1400 [kg m^2 ]$

Tabla 5-1: **Parámetro Dinámicos Modelo de Suspensión.**

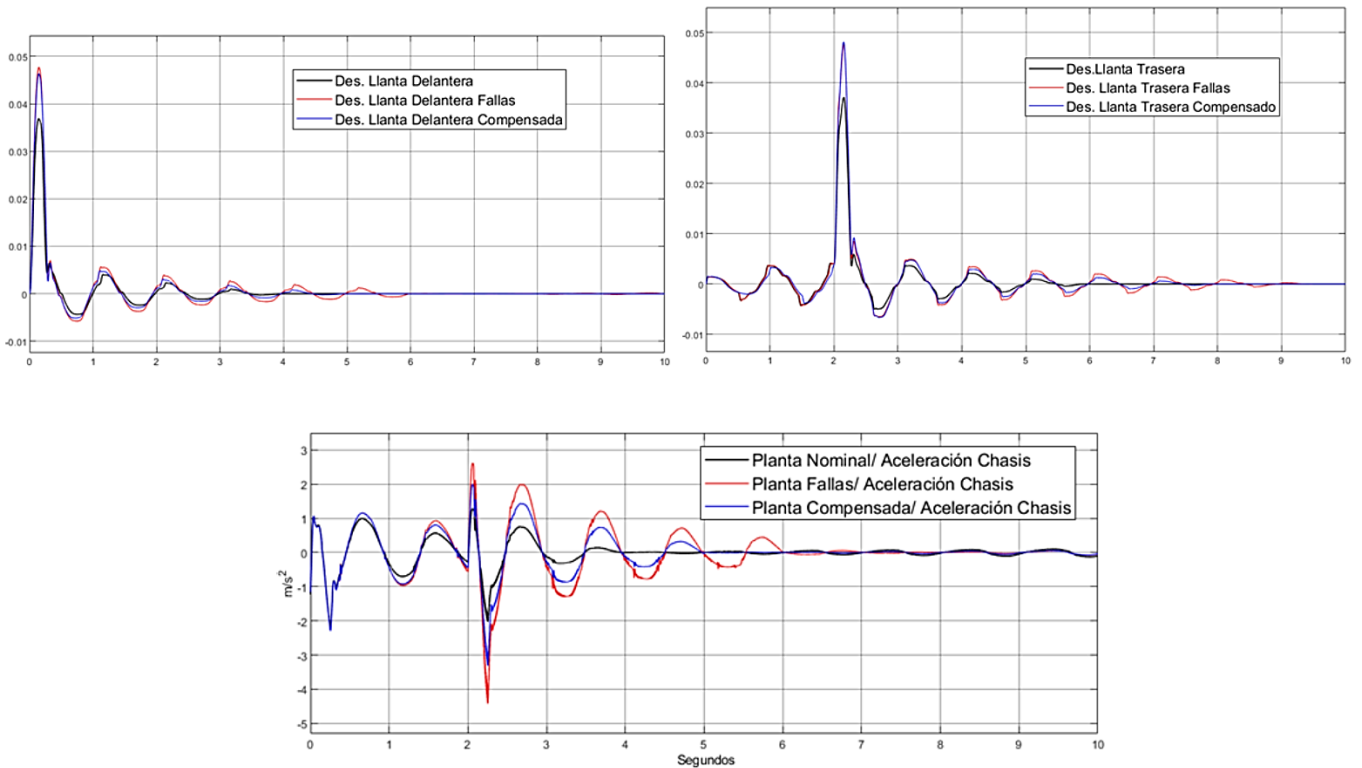
Con el objetivo de evaluar el desempeño del control tolerante a fallas, se presentarán gráficas resultado de la simulación para cada escenario de falla frente a una entrada de bache y camino no pavimentado, para observar la dinámica del modelo nominal, con fallas y compensado. Posteriormente se listarán los valores de la aceleración ponderada y el nivel de confort de acuerdo a la norma, para cada uno de los modelos mencionados.

## 5.1 Escenario de fallas bajo un bache.

### 5.1.1 Falla Incipiente.

5.1.1.1 .Falla Incipiente en amortiguador delantero.

Figura 5-2: *Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Delantera*

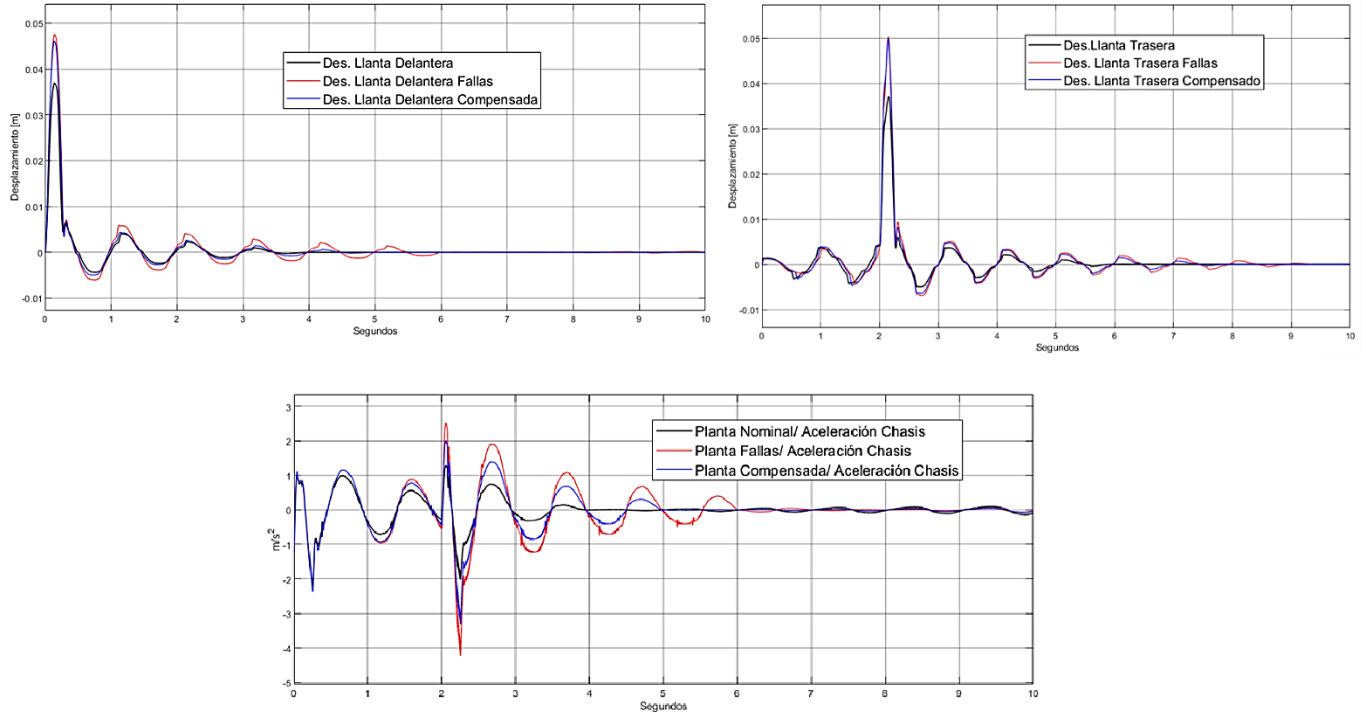


Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2012	No incomfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.3633	Un poco incomfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.2829	No incomfortable

Tabla 5-2: **Nivel Confort Falla Incipiente Delantera.**

## 5.1.1.2 Falla Incipiente Amortiguador Trasero.

Figura 5-3: *Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Trasera*

Nota: Fuente Autor

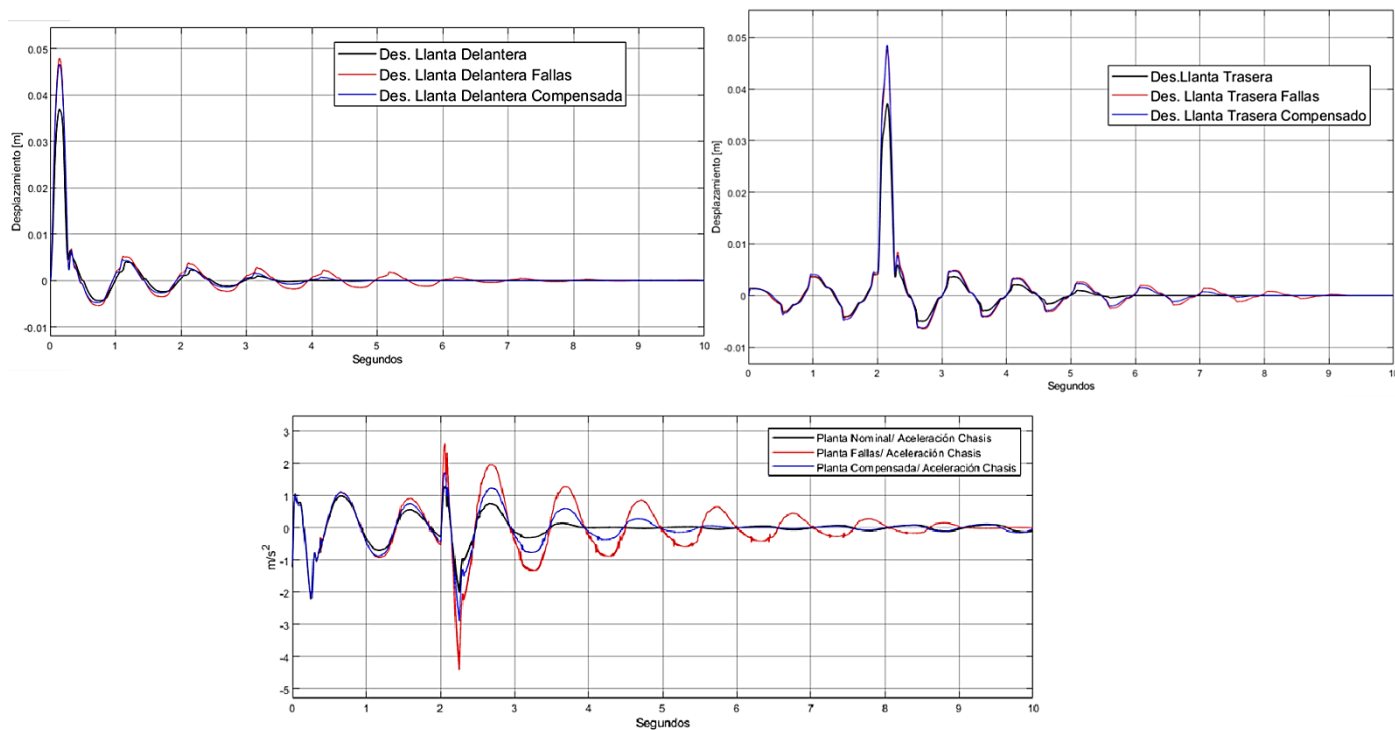
	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2012	No incófortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.3638	Un poco incófortable
<b>Planta Compensada</b>	0.2932	No incófortable

Tabla 5-3: **Nivel Confort Falla Incipiente Trasera**

## 5.1.2 Falla Moderada.

### 5.1.2.1 Falla Moderada Amortiguador Delantero.

Figura 5-4: *Comportamiento Dinámico Falla Moderada Delantera*



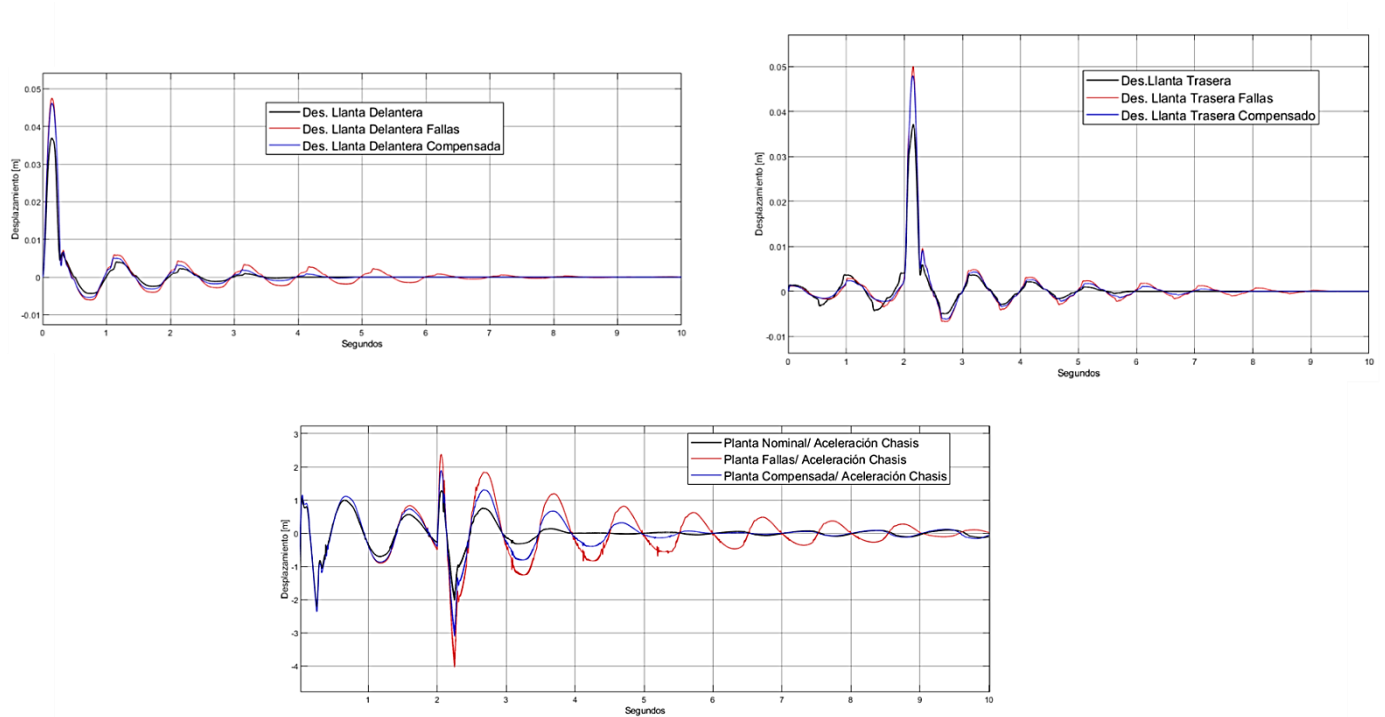
Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2012	No incomfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.3792	Un poco incomfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.2559	No incomfortable

Tabla 5-4: **Nivel Confort Falla Moderada Delantera**

## 5.1.2.2 Falla Moderada Amortiguador Trasero.

Figura 5-5: Comportamiento Dinámico Falla Moderada Trasera



Nota: Fuente Autor

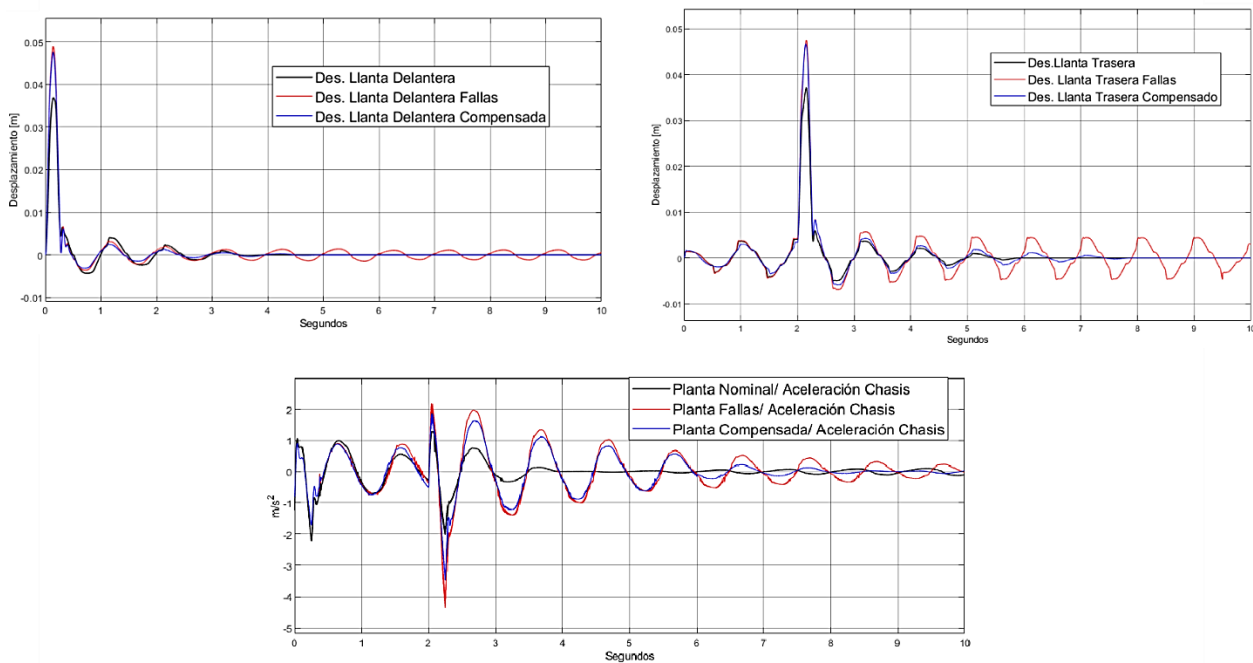
	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2012	No incomfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.3651	Un poco incomfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.2859	No incomfortable

Tabla 5-5: Nivel Confort Falla Moderada Trasera

### 5.1.3 Falla Severa.

#### 5.1.3.1 Falla Severa Amortiguador Delantero.

Figura 5-6: Comportamiento Dinámico Falla Severa Delantera



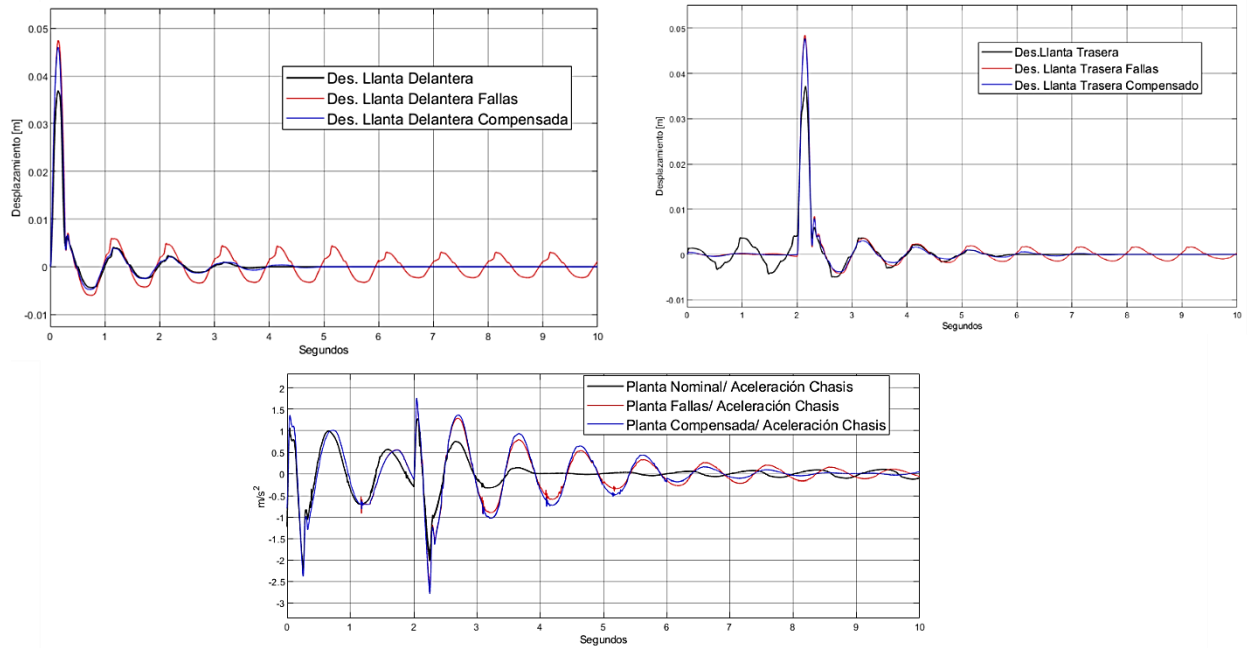
Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2012	No incomfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.4276	Un poco incomfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.3284	Un poco incomfortable

Tabla 5-6: Nivel Confort Falla Severa Delantera

## 5.1.3.2 Falla Severa Amortiguador Trasero

Figura 5-7: Comportamiento Dinámico Falla Severa Trasera



Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2012	No incófortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.4091	Un poco incófortable
<b>Planta Compensada</b>	0.3390	Un poco incófortable

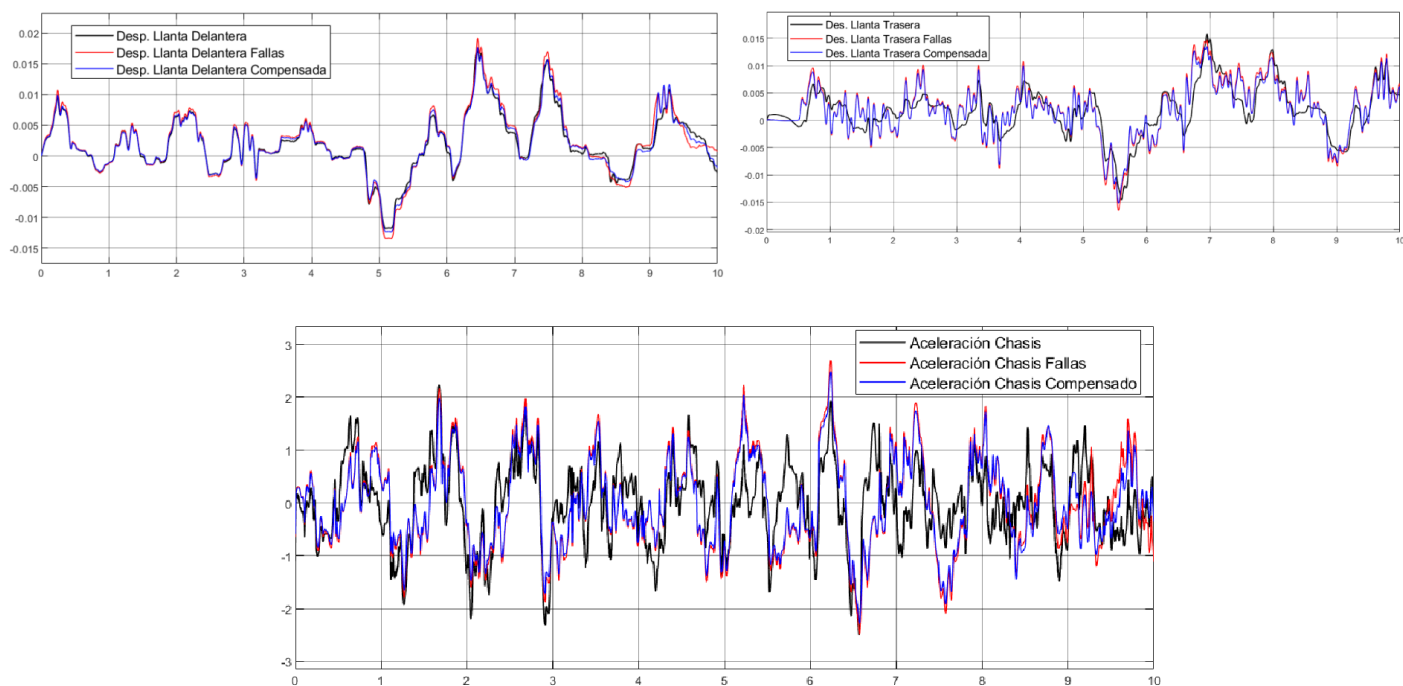
Tabla 5-7: Nivel Confort Falla Severa Trasera

## 5.2 Escenario de Fallas Camino No Pavimentado.

### 5.2.1 Falla Incipiente.

#### 5.2.1.1 Falla Incipiente Amortiguador Delantero

Figura 5-8: *Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Delantera*

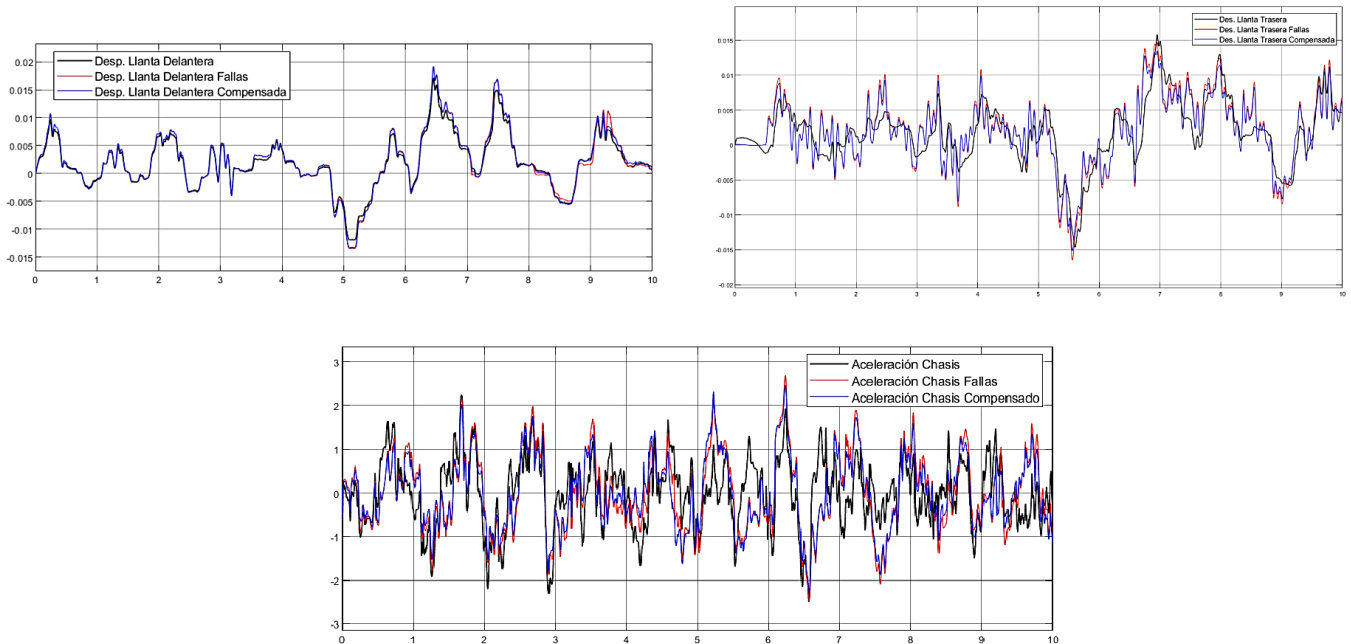


Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2859	No incomfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.3848	Un poco incomfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.3089	No incomfortable

Tabla 5-8: **Nivel Confort Falla Incipiente Delantera.**

## 5.2.1.2 Falla Incipiente Amortiguador Trasero

Figura 5-9: *Comportamiento Dinámico Falla Incipiente Trasera*

Nota: Fuente Autor

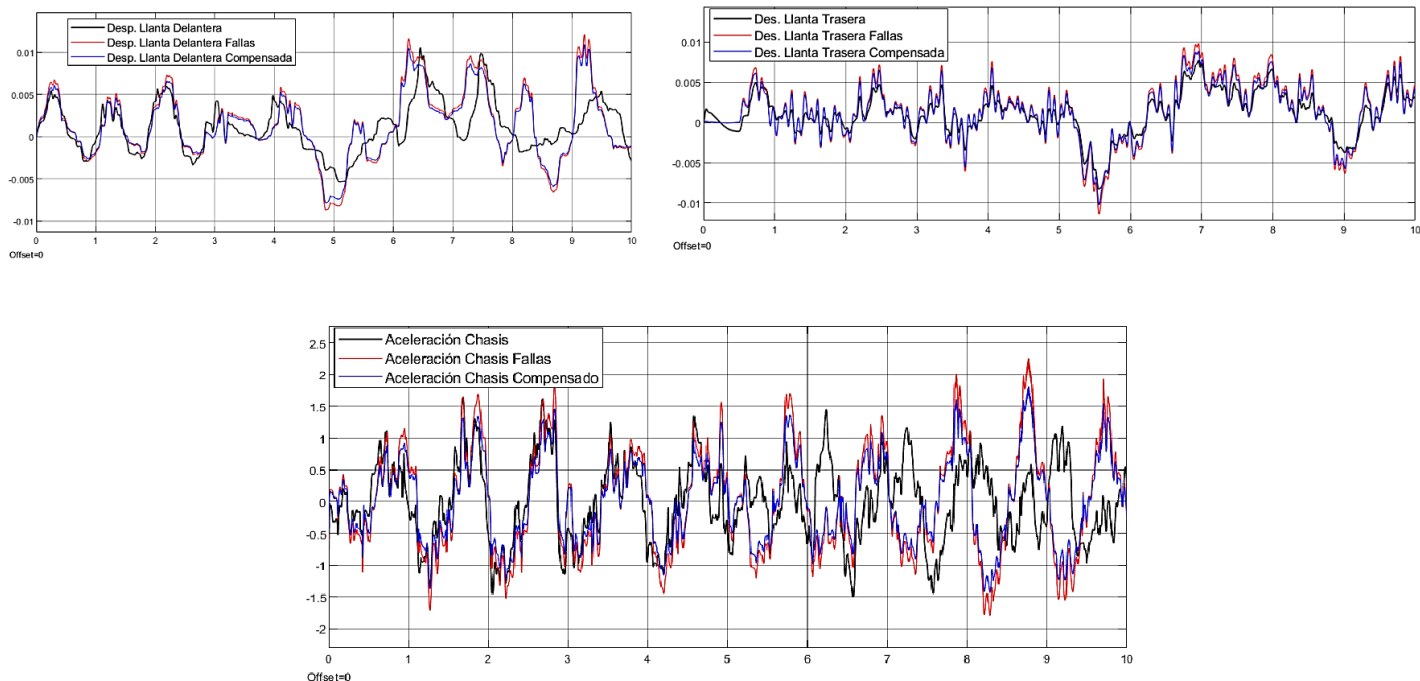
	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2859	No incomfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.3759	Un poco incomfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.3035	No incomfortable

Tabla 5-9: **Nivel Confort Falla Incipiente Trasera.**

## 5.2.2 Falla Moderada.

### 5.2.2.1 Falla Moderada Amortiguador Delantero

Figura 5-10: *Comportamiento Dinámico Falla Moderada Delantera*

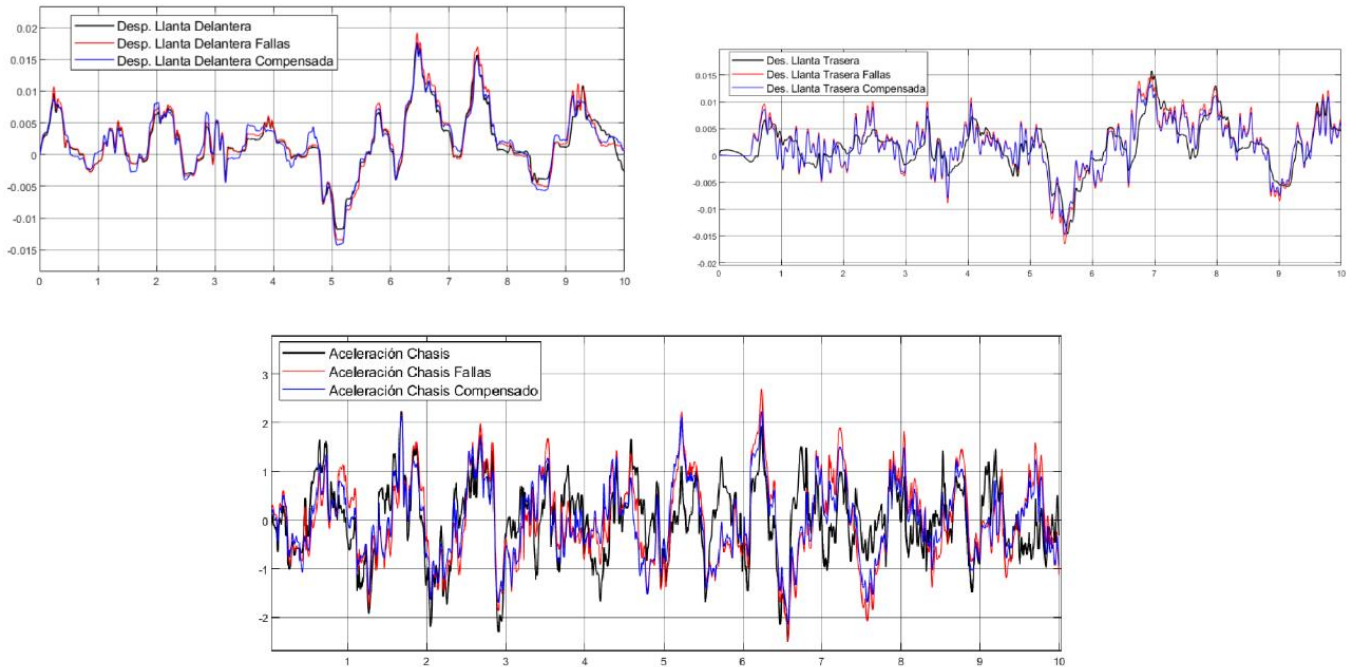


Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2859	No inconfortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.5129	Relativamente inconfortable
<b>Planta Compensada</b>	0.3878	Un poco inconfortable

Tabla 5-10: **Nivel Confort Falla Moderada Delantera**

## 5.2.2.2 Falla Moderada Amortiguador Trasero

Figura 5-11: *Comportamiento Dinámico Falla Moderada Trasera*

Nota: Fuente Autor

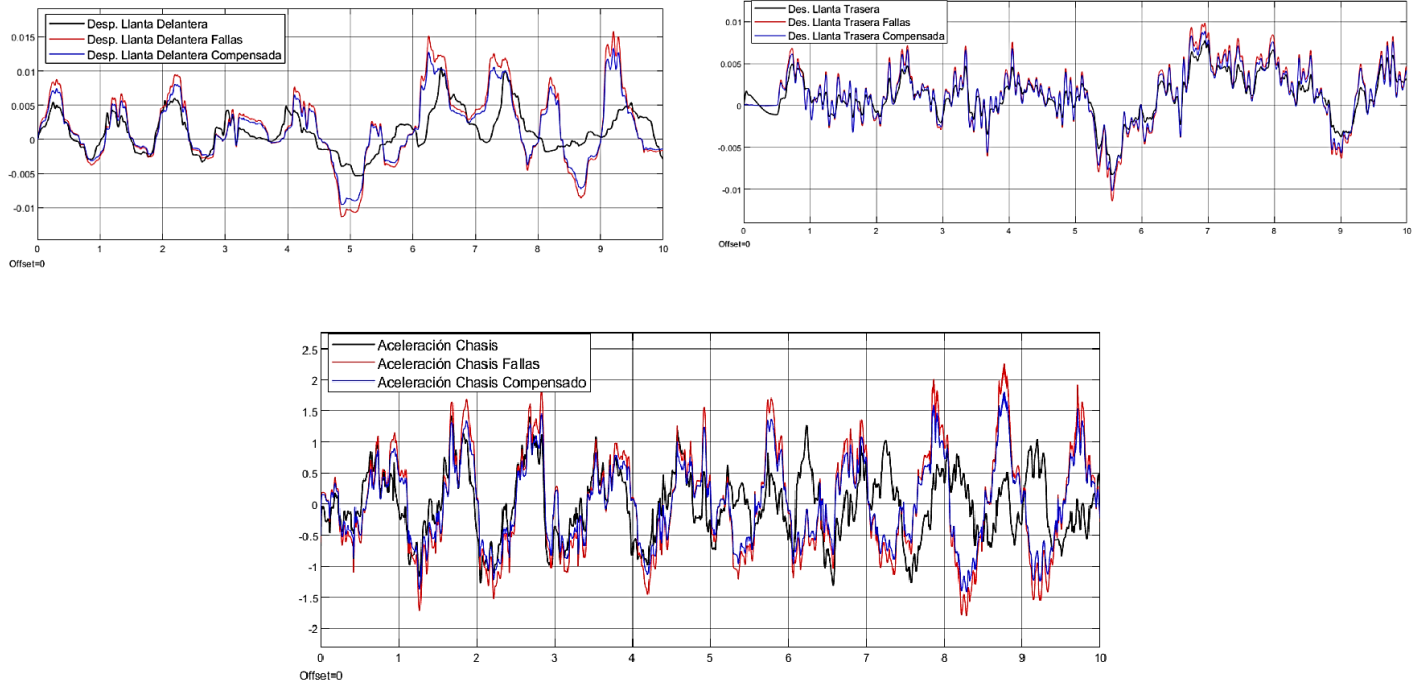
	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2859	No incófortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.5506	Relativamente incófortable
<b>Planta Compensada</b>	0.3088	Un poco incófortable

Tabla 5-11: **Nivel Confort Falla Moderada Trasera**

## 5.2.3 Falla Severa.

### 5.2.3.1 Falla Severa Amortiguador Delantero

Figura 5-12: *Comportamiento Dinámico Falla Severa Delantera*



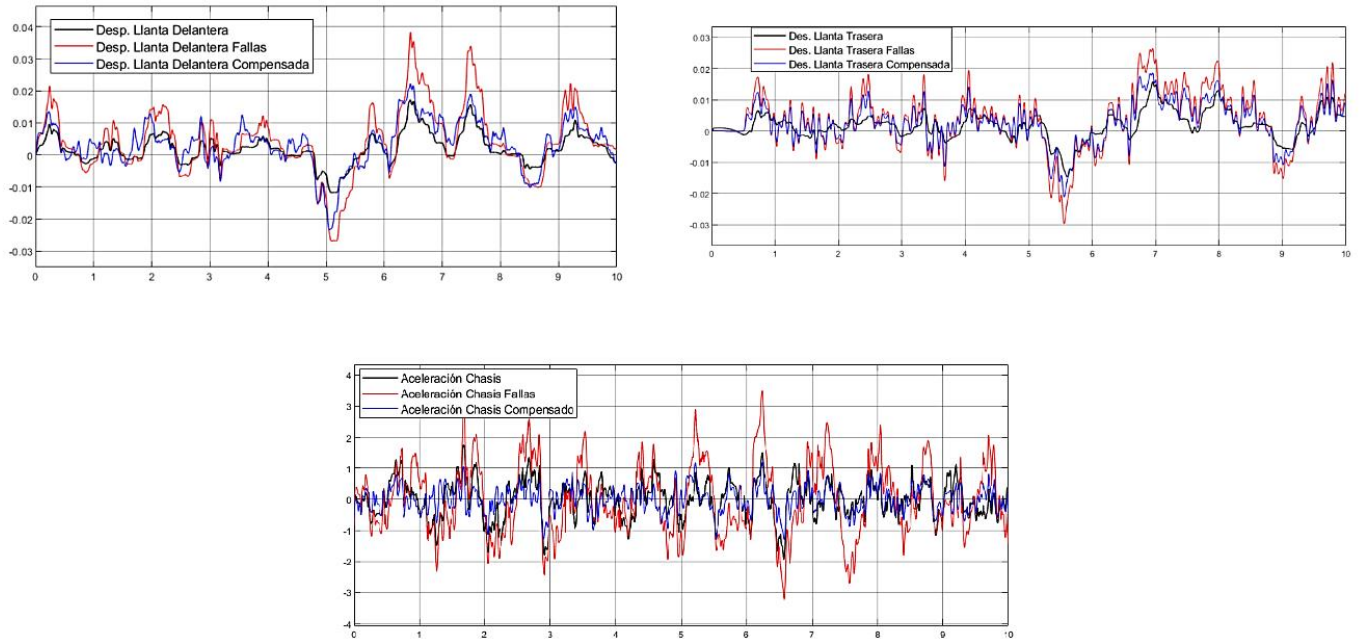
Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2859	No incófortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.8548	Incófortable
<b>Planta Compensada</b>	0.5415	Relativamente incófortable

Tabla 5-12: **Nivel Confort Falla Severa Delantera**

## 5.2.3.2 Falla Severa Amortiguador Trasero

Figura 5-13: Comportamiento Dinámico Falla Severa Trasera



Nota: Fuente Autor

	<b>Aceleración RMS</b>	<b>Nivel de Confort ISO 2631</b>
<b>Planta Nominal</b>	0.2859	No incófortable
<b>Planta con Fallas</b>	0.8373	Incófortable
<b>Planta Compensada</b>	0.5815	Relativamente incófortable

Tabla 5-13: Nivel Confort Falla Severa Trasera

## 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Se desarrolló y validó un modelo dinámico no lineal de medio sistema de suspensión semi-activa, respecto modelos previamente desarrollados. Para simular las no linealidades y ciclos de histéresis del amortiguador se parametrizó el modelo usando datos documentados en la literatura con un error medio menor a 0.2 en comparación a un modelo real comercial. Este modelo fue usado para simular el comportamiento del sistema de amortiguación frente a entradas de perfil de camino ISO 8608 y un bache en el entorno Matlab-Simulink.
- Se diseñó, modeló y puso a prueba un sistema que detecta y diagnostica fallas propuestas, mediante la extracción de características a residuales y el entrenamiento de redes neuronales. La capacidad de detección y diagnóstico iniciales son fundamentales para mantener el confort y la seguridad del pasajero aún en situaciones de falla.
- Mediante la implementación una estrategia tolerante a fallas, compuesto de redes neuronales NARMA L2 y Multilayer Perceptron, las primeras entrenadas para el control de los amortiguadores, y las MLP para la reconfiguración y compensación del sistema, el sistema mejora el nivel de confort de acuerdo a los niveles contenidos en la norma ISO 2631, en presencia de fallas incipientes y moderadas en el amortiguador.

- Este estudio significa un avance en el campo de la dinámica y control de sistemas automotrices tolerantes a fallos tanto para la investigación de la Universidad Industrial de Santander, como para la industria. Su aporte radica en la exploración del desarrollo del sistema de control tolerante a fallos aplicado a amortiguadores magnetorreológicos en medio modelo de suspensión.

# **Anexo A: Datos Entrenamiento Redes Neuronales**



89,87301	4,28653	0,71382	1,49233	0,71709	1,04305	0,86650	1,00767
92,44695	3,46768	0,43243	0,90799	0,75428	0,87587	0,53423	0,58057
93,75811	2,80703	0,46282	0,98408	0,46064	0,58192	0,47357	0,47183
93,83331	2,77744	0,54661	1,01012	0,38360	0,64055	0,35626	0,45211
93,42078	2,92179	0,52188	0,75732	0,64859	0,79237	0,43367	0,50359
92,66507	3,50853	0,59479	0,95039	0,51140	0,90519	0,39522	0,46940
92,78802	3,38699	0,51959	1,00413	0,64273	0,65241	0,45840	0,54773
93,44871	2,62958	0,45098	1,11049	0,57858	0,68994	0,47628	0,61543
93,55318	2,59573	0,48849	1,03212	0,52439	0,72440	0,45704	0,62464
93,06929	2,92401	0,63769	1,12229	0,60353	0,76243	0,32519	0,55556
91,32438	3,75473	0,62682	1,36992	0,80737	0,96117	0,59186	0,56375
93,15201	3,03379	0,46955	1,02457	0,55965	0,71616	0,41901	0,62525
94,20734	2,07554	0,39152	0,97595	0,59933	0,61425	0,45952	0,67656
92,45801	3,59928	0,52232	0,95303	0,60272	0,73300	0,41148	0,72018
93,07500	3,28892	0,51946	0,93350	0,61962	0,67968	0,37074	0,51308
93,85458	2,43751	0,47901	0,99528	0,54411	0,75959	0,43598	0,49395
92,78174	2,83862	0,62886	0,91754	0,52000	1,02172	0,58382	0,70770
91,28460	3,09275	0,70041	1,48085	0,80588	1,06815	0,67078	0,89657
91,37354	3,11698	0,83358	1,28950	0,79524	0,74876	0,80136	1,04103
92,11476	3,61756	0,52300	1,08981	0,58746	0,80445	0,64688	0,61610
92,50937	3,17922	0,58837	1,07224	0,57768	0,95201	0,51793	0,60318
92,39272	3,21622	0,56221	1,12104	0,54431	0,79420	0,63781	0,73149
93,81175	2,89228	0,42724	0,80310	0,51076	0,53990	0,46549	0,54949
92,56070	3,39822	0,53947	0,88035	0,65288	0,77698	0,53282	0,65858
91,31713	3,47781	0,75248	1,29009	0,67293	1,11290	0,71543	0,66123
91,99251	3,20162	0,79858	1,09648	0,64518	0,86281	0,57810	0,82472
92,71396	3,12512	0,57043	0,98744	0,52469	0,66063	0,54804	0,86970
92,44330	3,40127	0,58921	0,97484	0,52480	1,03278	0,50433	0,52947
95,52755	2,99435	0,25764	0,55096	0,18403	0,13110	0,14602	0,20835
96,36230	2,48583	0,15603	0,44523	0,17948	0,13271	0,12662	0,11181
91,68287	3,52622	0,70784	1,27239	0,61062	0,99863	0,63720	0,56423
91,99847	2,91634	0,54777	1,41009	0,63745	1,09850	0,75593	0,63544
97,03949	1,81662	0,16113	0,44459	0,11721	0,12767	0,12312	0,17018
96,77133	1,89761	0,18283	0,50316	0,15485	0,21232	0,13861	0,13930
96,18507	1,86596	0,28740	0,51104	0,26376	0,36041	0,24707	0,27929
93,09062	3,14138	0,57237	0,76577	0,53234	0,77538	0,45552	0,66662
92,06329	3,33639	0,81005	0,94504	0,61495	0,71617	0,68124	0,83287
93,05662	3,01288	0,43854	0,95007	0,51303	0,99298	0,55775	0,47812
94,22444	2,46158	0,53773	0,77558	0,38487	0,67705	0,44009	0,49866
94,60343	2,76704	0,43790	0,74223	0,34171	0,40420	0,30689	0,39660
96,04203	2,09078	0,28600	0,79304	0,15983	0,13296	0,20273	0,29263
99,64112	0,22378	0,02576	0,04178	0,01593	0,01630	0,01777	0,01756
97,90459	1,51862	0,10272	0,32479	0,02149	0,03481	0,05596	0,03703
97,64100	1,83416	0,09537	0,27277	0,02570	0,03701	0,05203	0,04196
98,54129	1,07365	0,07988	0,18821	0,02071	0,02376	0,04203	0,03047

FALLA SEVERA

99,04420	0,61218	0,05972	0,12258	0,02615	0,06562	0,04365	0,02591
99,90434	0,07355	0,00293	0,01438	0,00043	0,00099	0,00175	0,00163
99,90550	0,07326	0,00207	0,01542	0,00027	0,00072	0,00130	0,00144
99,90275	0,07593	0,00216	0,01469	0,00031	0,00101	0,00158	0,00157
99,89887	0,07704	0,00213	0,01685	0,00029	0,00138	0,00161	0,00183
99,90521	0,07127	0,00216	0,01736	0,00032	0,00087	0,00153	0,00127
99,58401	0,32768	0,00805	0,06105	0,00110	0,00528	0,00561	0,00722
99,59666	0,32477	0,00734	0,05500	0,00123	0,00350	0,00617	0,00534
99,60377	0,30427	0,00842	0,06389	0,00154	0,00504	0,00519	0,00788
99,55177	0,35787	0,01116	0,05774	0,00149	0,00476	0,00713	0,00808
99,58056	0,32913	0,01064	0,06013	0,00139	0,00447	0,00649	0,00719

FALLAS EN AMORTIGUADOR DELANTERO								
E 3.0	E 3.1	E 3.2	E 3.3	E 3.4	E 3.5	E 3.6	E 3.7	Escenario Falla
98,16221	1,07817	0,12791	0,25990	0,09165	0,07623	0,08792	0,11601	FALLA INCIPIENTE
98,09760	0,93421	0,14740	0,20695	0,13524	0,15905	0,13263	0,18693	
97,79826	1,22997	0,12072	0,32953	0,13022	0,15387	0,10494	0,13250	
97,89181	1,02124	0,16523	0,24208	0,15727	0,20091	0,14660	0,17486	
98,36721	1,00852	0,09915	0,21232	0,05940	0,06499	0,07842	0,10999	
98,32297	1,14052	0,09059	0,19975	0,05388	0,05863	0,05848	0,07519	
98,24303	1,21814	0,08534	0,24274	0,04269	0,05146	0,05593	0,06067	
98,49345	1,02558	0,07166	0,18322	0,05425	0,06503	0,06078	0,04603	
98,28042	0,90759	0,10323	0,27386	0,10438	0,09693	0,11804	0,11554	
99,81972	0,12085	0,00898	0,02237	0,00527	0,00729	0,00779	0,00773	
99,79504	0,13886	0,01058	0,02805	0,00548	0,00602	0,00762	0,00834	
99,77095	0,15388	0,01205	0,03149	0,00645	0,00893	0,00875	0,00749	
99,73989	0,15987	0,01505	0,04162	0,00982	0,01266	0,01110	0,01000	
99,75013	0,15049	0,01567	0,03809	0,00950	0,01443	0,01185	0,00985	
99,77454	0,14416	0,01486	0,03308	0,00647	0,00720	0,01001	0,00968	
99,72676	0,16827	0,01389	0,03936	0,01168	0,01591	0,01288	0,01125	
99,72422	0,16106	0,01550	0,04594	0,01103	0,01608	0,01324	0,01292	
99,75717	0,16391	0,01304	0,03147	0,00647	0,00768	0,00898	0,01129	
99,78762	0,13462	0,01217	0,03178	0,00676	0,00973	0,00916	0,00817	
99,78818	0,13291	0,01362	0,02967	0,00729	0,00876	0,01007	0,00951	
99,70095	0,21463	0,01459	0,02594	0,00785	0,01197	0,01123	0,01284	
99,54914	0,26592	0,02698	0,07156	0,01782	0,02314	0,02148	0,02396	
99,46383	0,34194	0,03171	0,06060	0,02013	0,02316	0,02336	0,03526	
99,42683	0,34992	0,03175	0,07433	0,02353	0,03766	0,03110	0,02489	
99,51972	0,29685	0,03450	0,05407	0,01772	0,01897	0,02295	0,03522	
99,56556	0,28679	0,02387	0,06194	0,01113	0,01679	0,01614	0,01778	
99,54575	0,30858	0,02374	0,05791	0,01265	0,01705	0,01871	0,01561	
99,63214	0,25073	0,01885	0,04980	0,00942	0,01440	0,01271	0,01195	

99,61695	0,26273	0,01919	0,04930	0,00916	0,01580	0,01326	0,01362
99,64043	0,24624	0,01703	0,04795	0,00843	0,01285	0,01471	0,01236
99,69597	0,20521	0,01626	0,04318	0,00731	0,01012	0,01117	0,01078
99,73008	0,17668	0,01527	0,04172	0,00667	0,00919	0,01087	0,00951
99,72853	0,18516	0,01478	0,03508	0,00676	0,00844	0,00960	0,01165
99,73288	0,18728	0,01287	0,03219	0,00723	0,01021	0,00967	0,00768
99,73990	0,15756	0,01535	0,04330	0,00901	0,01334	0,01284	0,00869
99,75467	0,16645	0,01091	0,03367	0,00596	0,00845	0,00952	0,01037
99,68396	0,20725	0,01696	0,04357	0,01036	0,00967	0,01314	0,01509
99,66782	0,21501	0,01826	0,04917	0,00967	0,01738	0,01218	0,01051
99,64553	0,24173	0,01785	0,04603	0,00925	0,01279	0,01367	0,01316
99,64437	0,22101	0,01762	0,05827	0,01175	0,01621	0,01713	0,01363
99,67077	0,21559	0,01559	0,05111	0,01009	0,01126	0,01245	0,01315
99,66771	0,20989	0,01793	0,05372	0,00911	0,01259	0,01363	0,01542
99,69873	0,18727	0,01428	0,05179	0,01000	0,01416	0,01268	0,01110
99,68078	0,21461	0,01591	0,04238	0,01033	0,01137	0,01217	0,01244
99,70974	0,18552	0,01542	0,04366	0,00916	0,01128	0,01225	0,01297
99,60293	0,26198	0,01834	0,05911	0,01007	0,01589	0,01704	0,01465
99,72181	0,18466	0,01341	0,03843	0,00943	0,01116	0,01050	0,01060
99,72693	0,17491	0,01505	0,03906	0,00950	0,00991	0,01191	0,01273
99,71300	0,18725	0,01548	0,04150	0,00852	0,01110	0,01144	0,01172
99,67550	0,20102	0,01810	0,05564	0,00945	0,01445	0,01367	0,01217
99,72110	0,17683	0,01330	0,04902	0,00766	0,00986	0,01076	0,01147
99,71250	0,18821	0,01372	0,04543	0,00814	0,01020	0,01078	0,01102
99,68530	0,20630	0,01647	0,04775	0,00891	0,01276	0,01228	0,01024
99,72391	0,18810	0,01267	0,03717	0,00882	0,00820	0,01001	0,01113
99,62820	0,25337	0,01642	0,05249	0,01067	0,01550	0,01299	0,01037
99,74268	0,17456	0,01203	0,03273	0,00750	0,00916	0,01028	0,01107
99,67384	0,21315	0,01639	0,04757	0,01102	0,01232	0,01353	0,01218
99,75871	0,15770	0,01235	0,03599	0,00762	0,01030	0,00919	0,00814
99,74776	0,17733	0,01265	0,02927	0,00606	0,00887	0,00999	0,00807
99,80266	0,12931	0,01188	0,02706	0,00661	0,00827	0,00807	0,00614
99,79935	0,13074	0,00993	0,02926	0,00542	0,00724	0,00882	0,00924
99,78135	0,14832	0,01124	0,02858	0,00605	0,00821	0,00845	0,00780
99,79017	0,14267	0,01033	0,02719	0,00603	0,00752	0,00806	0,00804
99,76391	0,16595	0,01093	0,02948	0,00692	0,00847	0,00721	0,00712
99,76245	0,16240	0,01203	0,02544	0,00695	0,00938	0,01060	0,01075
99,81979	0,11575	0,00934	0,02790	0,00576	0,00734	0,00687	0,00725
99,79911	0,13388	0,00886	0,02931	0,00529	0,00924	0,00814	0,00617
99,80258	0,13262	0,01113	0,02756	0,00556	0,00761	0,00657	0,00637
99,75801	0,16271	0,01331	0,03125	0,00647	0,00949	0,01010	0,00866
99,76696	0,15419	0,01263	0,03288	0,00616	0,01047	0,00930	0,00742
99,78796	0,14568	0,01040	0,02437	0,00600	0,00766	0,00847	0,00946
99,81891	0,11787	0,00970	0,02723	0,00557	0,00541	0,00795	0,00735
99,79452	0,13701	0,01098	0,02310	0,00580	0,00844	0,01083	0,00932

FALLA MODERADA

99,79290	0,14481	0,00905	0,02334	0,00611	0,00617	0,00824	0,00938	
99,79636	0,14238	0,00899	0,02481	0,00578	0,00698	0,00668	0,00802	
99,82353	0,11202	0,01133	0,02463	0,00500	0,00796	0,00805	0,00749	
99,80807	0,12907	0,01022	0,02426	0,00583	0,00729	0,00801	0,00726	
99,80822	0,12301	0,01075	0,02929	0,00618	0,00789	0,00794	0,00673	FALLA SEVERA
99,80259	0,13294	0,00932	0,02791	0,00631	0,00597	0,00772	0,00724	
99,81989	0,12071	0,01092	0,02291	0,00595	0,00702	0,00640	0,00621	
99,97427	0,01913	0,00069	0,00455	0,00010	0,00033	0,00042	0,00051	
99,97502	0,01887	0,00068	0,00412	0,00011	0,00032	0,00044	0,00044	
99,97500	0,01942	0,00070	0,00373	0,00009	0,00021	0,00047	0,00039	
99,97364	0,02023	0,00068	0,00428	0,00010	0,00026	0,00044	0,00037	
99,97549	0,01866	0,00061	0,00408	0,00009	0,00027	0,00045	0,00036	
99,97514	0,01892	0,00067	0,00403	0,00010	0,00024	0,00044	0,00045	
99,97592	0,01833	0,00062	0,00384	0,00009	0,00031	0,00042	0,00046	
99,97433	0,01948	0,00068	0,00427	0,00012	0,00026	0,00045	0,00040	
99,97572	0,01859	0,00071	0,00376	0,00011	0,00028	0,00042	0,00041	
99,97627	0,01841	0,00058	0,00352	0,00009	0,00032	0,00037	0,00043	
99,97628	0,01796	0,00063	0,00396	0,00010	0,00027	0,00041	0,00040	
99,97704	0,01775	0,00054	0,00359	0,00009	0,00023	0,00039	0,00037	
99,97902	0,01599	0,00048	0,00340	0,00010	0,00026	0,00035	0,00039	
99,97713	0,01811	0,00057	0,00317	0,00008	0,00020	0,00037	0,00037	
99,97897	0,01629	0,00051	0,00330	0,00008	0,00025	0,00033	0,00028	
99,97927	0,01539	0,00064	0,00370	0,00008	0,00022	0,00033	0,00036	
99,97861	0,01642	0,00054	0,00333	0,00009	0,00024	0,00034	0,00043	

## Bibliografía

- Ab Talib, M. H., Mat Darus, I. Z., Mohd Samin, P., Mohd Yatim, H., Ardani, M. I., Shaharuddin, N. M. R., & Hadi, M. S. (2021). Vibration control of semi-active suspension system using PID controller with advanced firefly algorithm and particle swarm optimization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(1), 1119–1137. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02158-w>
- Ahmadian, M., & Goncalves, F. D. (2004). A frequency analysis of semiactive control methods for vehicle application. *SAE Technical Papers*, 724. <https://doi.org/10.4271/2004-01-2098>
- Börner, M, Isermann, R., & Schmitt, M. (2002). A Sensor and Process Fault Detection System for Vehicle Suspension Systems. *SAE Technical Paper*.
- Börner, Marcus, Straky, H., Weispfenning, T., & Isermann, R. (2002). Model based fault detection of vehicle suspension and hydraulic brake systems. *Mechatronics*, 12(8), 999–1010. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(02\)00008-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0957-4158(02)00008-9)
- Borrás Pinilla, C., Sarmiento, J. L., & Ortiz, J. F. (2018). *Dynamic Model and Control Design for a Nonlinear Hydraulic Actuator*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2018-88320>
- Canale, M., Milanese, M., & Novara, C. (2006). Semi-active suspension control using “fast” model-predictive techniques. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 14(6), 1034–1046. <https://doi.org/10.1109/TCST.2006.880196>

- Chamseddine, A., Raharijaona, T., & Noura, H. (2006). Sliding Mode Control Applied to Active Suspension Using Nonlinear Full Vehicle and Actuator Dynamics. *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 3597–3602. <https://doi.org/10.1109/CDC.2006.376829>
- Cho, B.-K., Ryu, G., & Song, S. J. (2005). Control strategy of an active suspension for a half car model with preview information. *International Journal of Automotive Technology*, 6, 243–249.
- Crosby, M. J., and Karnopp, D. C. (1973). *The Active Damper—A New Concept for Shock and Vibration Control* (Forty-Third Shock and Vibration Bulletin).
- Ding, Z., Zhao, F., Qin, Y., & Tan, C. (2017). Adaptive neural network control for semi-active vehicle suspensions. *Journal of Vibroengineering*, 19(4), 2654–2669. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18045>
- Dodds, C. J., & Robson, J. D. (1973). The description of road surface roughness. *Journal of Sound and Vibration*, 31(2), 175–183. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80373-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80373-6)
- Dong, Xi, Yu, M., HUANG, S. L., Li, Z., & Chen, W. (2005). Half CAR Magnetorheological Suspension System Accounting for Nonlinearity and Time Delay. *International Journal of Modern Physics B - IJMPB*, 19, 1381–1387.
- Dong, Xiaomin, Yu, M., & Guan, Z. (2011). Adaptive Sliding Mode Fault-Tolerant Control for SemiActive Suspension Using Magnetorheological Dampers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures - J INTEL MAT SYST STRUCT*, 22, 1653–1660.
- Du, H., Yim Sze, K., & Lam, J. (2005). Semi-active  $H^\infty$  control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 283(3), 981–996. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.05.030>

- 
- Elattar, Y., Metwalli, S., & Rabie, M. (2016). *PDF VERSUS PID CONTROLLER FOR ACTIVE VEHICLE SUSPENSION*.
- Ersoy, M., Elbers, C., Vortmeyer, J., & Wegener, D. (2017). *Elektronische Systeme im Fahrwerk BT - Fahrwerkhandbuch: Grundlagen – Fahrdynamik – Fahrverhalten– Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren– Perspektiven* (M. Ersoy & S. Gies (eds.); pp. 793–876). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-15468-4\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-658-15468-4_16)
- Fang, T. Q., & Wei, Y. (2012). Research on Robust H8 Fault-Tolerant Control for Uncertain Suspension System with Time Delay. *2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering*, 1994–1997. <https://doi.org/10.1109/ICICEE.2012.530>
- Félix-Herrán, L. C., Mehdi, D., Rodríguez-Ortiz, J. J., Ramírez-Mendoza, R., & Soto, R. (2015). Takagi-Sugeno Fuzzy Model of a One-Half Semiactive Vehicle Suspension: Lateral Approach. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/396305>
- Feng, J. Z., Li, J., & Yu, F. (2003). GA-Based PID and Fuzzy logic control for active vehicle suspension system. *International Journal of Automotive Technology*, 4, 181–191.
- Fischer, D., & Isermann, R. (2004). Mechatronic semi-active and active vehicle suspensions. *Control Engineering Practice*, 12(11), 1353–1367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2003.08.003>
- For, T., By, T., Jansen, L. M., & Dyke, S. J. (2000). *S Emiactive C Ontrol S Strategies for Mr D Ampers : C Omparative S Tudy*. 126(August), 795–803.
- Gáspár, P., Szederkényi, G., Szabo, Z., & Bokor, J. (2008). The design of a two-level controller for suspension systems. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-*

*PapersOnline*), 17.

Giua, A., Melas, M., Seatzu, C., & Usai, G. (2004). Design of a predictive semiactive suspension system. *Vehicle System Dynamics*, 41(4), 277–300. <https://doi.org/10.1080/00423110412331315169>

Goenaga, B., Fuentes, L., & Mora, O. (2017). Evaluation of the methodologies used to generate random pavement profiles based on the power spectral density: An approach based on the international roughness index. *Ingenieria e Investigacion*, 37(1), 49–57. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n1.57277>

Gysen, B. L. J., Janssen, J. L. G., Paulides, J. J. H., & Lomonova, E. A. (2008). Design Aspects of an Active Electromagnetic Suspension System for Automotive Applications. *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.181>

Haffner, L., Kozek, M., & Shi, J. (2009). *Enhanced Method for Fault Detection and Diagnosis of Vehicle Sensors using Parity Equations*.

Hamed, M., Tesfa, B., Gu, F., & Ball, A. D. (2014). A study of the suspension system for the diagnosis of dynamic characteristics. *2014 20th International Conference on Automation and Computing*, 152–157.

Isermann, R. (2006). Fault-Diagnosis Systems. In *Fault-Diagnosis Systems*. <https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5>

Isermann, R., & Isermann, R. (2006). Supervision and fault management of processes — tasks and terminology. *Fault-Diagnosis Systems*, 13–30. [https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-30368-5_2)

Jia, F., Lei, Y., Guo, L., Lin, J., & Xing, S. (2018). A neural network constructed by deep learning technique and its application to intelligent fault diagnosis of machines. *Neurocomputing*, 272, 619–628.

- <https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2017.07.032>
- Jiang, J., & Yu, X. (2012). Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches. *Annual Reviews in Control*, 36(1), 60–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.03.005>
- Kaldas, M. M. S., Çalışkan, K., Henze, R., & Küçükay, F. (2013). Rule Optimized Fuzzy Logic Controller for Full Vehicle Semi-Active Suspension. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 6(1), 332–344. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0991>
- Kaldas, M. M. S., Çalışkan, K., Henze, R., & Küçükay, F. (2015). Triple-Control-Mode for Semi-Active Suspension System. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 8(1), 27–37. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0621>
- Kim, H., & Lee, H. (2011). Height and Leveling Control of Automotive Air Suspension System Using Sliding Mode Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(5), 2027–2041.
- Kim, J., & Lee, H. (2011). Sensor fault detection and isolation algorithm for a continuous damping control system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 225(10), 1347–1364. <https://doi.org/10.1177/0954407011404493>
- Kurczyk, S., & Pawełczyk, M. (2013). Fuzzy control for semi-active vehicle suspension. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 32(3), 217–226. <https://doi.org/10.1260/0263-0923.32.3.217>
- Lai, C. Y., & Liao, W. H. (2002). Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 8(4), 527–547. <https://doi.org/10.1177/107754602023712>
- Lenkutis, T., Čerškus, A., Šešok, N., Dzedzickis, A., & Bučinskis, V. (2021). Road

- Surface Profile Synthesis: Assessment of Suitability for Simulation. In *Symmetry* (Vol. 13, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/sym13010068>
- Lepine, J., Rouillard, V., & Sek, M. (2015). *Wavelet Transform to Index Road Vehicle Vibration Mixed Mode Signals* (Issue 56819, p. V001T01A003). <http://dx.doi.org/10.1115/NCAD2015-5909>
- Lunze, J., & Richter, J. H. (2008). Reconfigurable Fault-tolerant Control: A Tutorial Introduction. *European Journal of Control*, 14(5), 359–386. <https://doi.org/https://doi.org/10.3166/ejc.14.359-386>
- Müller, P. C., Popp, K., & Schiehlen, W. O. (2018). Covariance Analysis of Nonlinear Stochastic Guide Way-Vehicle-Systems. In *The Dynamics of Vehicles on roads and on tracks* (pp. 337–351). Routledge.
- Patton, R. J., Frank, P. M., & Clark, R. N. (2010). *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems* (1st ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
- Poussot-Vassal, C., Sename, O., Dugard, L., Gáspár, P., Szabó, Z., & Bokor, J. (2008). A new semi-active suspension control strategy through LPV technique. *Control Engineering Practice*, 16(12), 1519–1534. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.002>
- Rao, K. D. (2014). Modeling, Simulation and Control of Semi Active Suspension System for Automobiles under MATLAB Simulink using PID Controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(1), 827–831. <https://doi.org/https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00094>
- Rossi, C., & Lucente, G. (2004).  $H^\infty$  Control of Automotive Semi-Active Suspensions. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(22), 559–564. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)30402-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)30402-0)
- Soliman, A. (2004). A comparison of the performance and power requirements of

- three semi-active suspension control laws. In FISITA (Ed.), *World automotive congress*.
- Soliman, A. M. A., Abd Alla, S. A., El-Mashed, Y. A., & Hamid, M. S. A. (2006). Improvement of vehicle ride performance using a hydro-pneumatic active suspension system. *SAE Technical Papers*, 724. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1298>
- Spencer B, F., J., D. S., K., S. M., & D., C. J. (1997). Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), 230–238. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230))
- Stanway, R., Sproston, J. L., & Stevens, N. G. (1985). Non-Linear Identification of an Electro-Rheological Vibration Damper. *IFAC Proceedings Volumes*, 18(5), 195–200. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)60558-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)60558-5)
- Tyan, F., Hong, Y.-F., Tu, S.-H., & Jeng, W. (2009). 隨機路面之產生 Generation of Random Road Profiles. *Journal of Advanced Engineering*, 4.
- V. Bhandari S. C. Subramanian. (2010). Development of an electronically controlled pneumatic suspension for commercial vehicles. *2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICPCES.2010.5698711>
- Wang, D. H., & Liao, W. H. (2011). Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling. *Smart Materials and Structures*, 20(2), 23001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/2/023001>
- Wang, H., & Song, G. (2011). Fault detection and fault tolerant control of a smart base isolation system with magneto-rheological damper. *Smart Materials and Structures*, 20(8), 85015. <http://stacks.iop.org/0964-1726/20/i=8/a=085015>
- Xinjie, J., & Shengjin, L. (2009). Design of the fuzzy-PID controller for new vehicle

active suspension with electro-hydrostatic actuator. *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 3724–3727. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138898>

Yan, H., Qiao, J., Zhang, S., Zhao, T., & Wang, Z. (2018). The optimal control of semi-active suspension based on improved particle swarm optimization. *Mathematical Models in Engineering*, 4(3), 157–163. <https://doi.org/10.21595/mme.2018.20041>

Yetendje, A., Seron, M., & Dona, J. De. (2007). Diagnosis and actuator fault tolerant control in vehicle active suspension. *2007 Third International Conference on Information and Automation for Sustainability*, 153–158. <https://doi.org/10.1109/ICIAFS.2007.4544795>

Zhang, Y., & Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2), 229–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2008.03.008>

Zuo, L., & Nayfeh, S. A. (2003). *Low order continuous-time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings*. 265, 459–465. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01567-5](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01567-5)