



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA  
DE SUSPENSIÓN MAGNÉTICA APLICADO A UN VEHÍCULO A  
ESCALA PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ  
DE LA ESPOCH”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta Tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTOR: ROBIN LEONARDO RAMOS OCAÑA**

**DIRECTOR: ING. JAVIER WILSON VILLAGRAN CÁCERES**

**Riobamba-Ecuador**

**2019**

**©2019, Robin Leonardo Ramos Ocaña**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Robin Leonardo Ramos Ocaña, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor/autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 17 de diciembre de 2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Robin Leonardo Ramos Ocaña', with a large, sweeping flourish underneath.

Robin Leonardo Ramos Ocaña

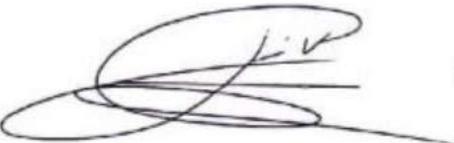
172240942-0

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo propuesta tecnológica, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE SUSPENSIÓN MAGNÉTICA APLICADO A UN VEHÍCULO A ESCALA PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ DE LA ESPOCH, realizado por el señor: ROBIN LEONARDO RAMOS OCAÑA, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. José Pérez Fiallos <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2019-12-17
Ing. Javier Wilson Villagrán Cáceres <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN</b>		2019-12-17
Ing. Juan Carlos Castelo Valdivieso <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>		2019-12-17

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación está dedicado a mis padres Leonardo y Rocío que supieron inculcarme valores de respeto, responsabilidad, carácter y amor, gracias a su apoyo puedo llegar a esta meta.

A mis hermanas Emilia y Samia que me dieron cariño incondicional en todos mis años fuera de casa. A mis tíos Washington, Susana, Gladys y Juan Ramón, mis primos Erik, Ricardo, Shawny, Dennys, Ivanna y Fabricio que supieron darme un hogar fuera de mi ciudad. A toda mi familia que hacen de mí una mejor persona. Pero especialmente a mi fallecido primo Samir que con su carácter y humildad siempre me acompañará.

Al final quiero dedicar esta tesis a Juan Pablo, Daniel y María José, por apoyarme a la distancia, a Steven y todos los amigos que me han acompañado en los últimos años de esta meta.

Robin

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la facultad de Mecánica, a las autoridades y personal de la Escuela de Ingeniería Automotriz, al director y asesor de mi trabajo de titulación Javier Villagrán y Juan Carlos Castelo por ayudarme en esta propuesta tecnológica innovadora.

Robin

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Problema .....	1
1.3. Justificación .....	2
1.4. Objetivo General.....	4
1.5. Objetivos Específicos .....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Suspensión del Vehículo: Generalidades.....	5
2.1.1. <i>Estabilidad. Reacción de vehículo durante el manejo.</i> .....	6
2.1.2. <i>Confort. Percepción de vibraciones en el pasajero</i> .....	6
2.2. Elementos de Sistema de Suspensión.....	7
2.3. Sistema de Amortiguación.....	8
2.3.1. <i>Amortiguador Electromagnético</i> .....	8
2.4. Clasificación de suspensiones .....	9
2.4.1. <i>Suspensión pasiva</i> .....	9
2.4.2. <i>Suspensión activa</i> .....	10
2.4.3. <i>Suspensión semi – activa</i> .....	11
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>12</b>
3.1. Selección de tipo de suspensión magnética .....	13
3.2. Magnitudes de la Electricidad.....	14
3.2.1. <i>Campo eléctrico E</i> .....	14

3.2.2.	<i>Fuerza electromotriz V</i> .....	14
3.2.3.	<i>Intensidad de corriente eléctrica I y Densidad de corriente eléctrica J</i> .....	15
3.2.4.	<i>Resistencia eléctrica R</i> .....	15
3.3.	<b>Magnitudes del Magnetismo</b> .....	16
3.3.1.	<i>Campo magnético H</i> .....	16
3.3.2.	<i>Fuerza magnetomotriz F</i> .....	16
3.3.3.	<i>Flujo magnético <math>\Phi</math> y Densidad de campo magnético B</i> .....	17
3.3.4.	<i>Permeabilidad magnética e histéresis</i> .....	18
3.3.5.	<i>Fuerza de Lorentz</i> .....	19
3.4.	<b>Ley de Faraday</b> .....	19
3.5.	<b>Ley de Ampere</b> .....	20
3.6.	<b>Electromagnetismo</b> .....	20
3.6.1.	<i>Inductancia y Reluctancia</i> .....	21
3.7.	<b>Deducción de fórmulas</b> .....	21
3.7.1.	<i>Ley de Faraday generalizada para un inductor simple</i> .....	21
3.7.2.	<i>Ley de Ampere generalizada para un inductor simple</i> .....	22
3.7.3.	<i>Cálculo de inductancia de inductor simple</i> .....	23
3.7.4.	<i>Circuito magnético de inductor con espacio de aire</i> .....	24
3.7.5.	<i>Fuerza de tracción generada por un electroimán</i> .....	26
3.7.6.	<i>Linealización de ecuaciones no lineales</i> .....	28
3.8.	<b>Modelación matemática de suspensión magnética</b> .....	29
3.8.1.	<i>Concepto Amortiguación convencional</i> .....	29
3.8.2.	<i>Concepto de Amortiguación electromagnética</i> .....	30
3.8.2.1.	<i>Circuito magnético de Amortiguación electromagnética</i> .....	31
3.8.3.	<i>Modelo matemático del prototipo</i> .....	32
3.8.4.	<i>Diagramas en SIMULINK</i> .....	33
4.	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO</b> .....	36
4.1.	<b>Diseño del prototipo esquemático suspensión magnética</b> .....	36
4.1.1.	<i>Selección y modificación de amortiguadores a escala</i> .....	36

4.1.2.	<i>Diseño de elementos mecánicos</i> .....	37
4.1.3.	<i>Diseño actuador electromagnético</i> .....	39
4.2.	<b>Construcción del prototipo esquemático de suspensión magnética</b> .....	39
4.2.1.	<i>Construcción de elementos mecánicos</i> .....	39
4.2.2.	<i>Caja porta proyectos</i> .....	41
4.2.3.	<i>Construcción de bobina electromagnética</i> .....	41
4.2.4.	<i>Sistema de control de amortiguador electromagnético</i> .....	42
4.2.4.1.	<i>Circuito de control de corriente</i> .....	42
4.2.4.2.	<i>Arduino y sensores para obtención de datos</i> .....	44
4.2.4.3.	<i>Oscilador</i> .....	46
4.3.	<b>Prueba 1</b> .....	47
4.3.1.	<i>Prueba 1 MP1 a 1A</i> .....	47
4.3.2.	<i>Prueba 1 MP1 a 2A</i> .....	48
4.4.	<b>Prueba 2</b> .....	48
4.4.1.	<i>Masa suspendida MP21</i> .....	48
4.4.2.	<i>Masa suspendida MP22</i> .....	49
4.5.	<b>Prueba en Simulink de prototipo</b> .....	49
4.6.	<b>Prueba en Simulink en condiciones reales</b> .....	52
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	54
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	56
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
	<b>ANEXO</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-4:</b>	Constantes de rigidez y amortiguación.....	37
<b>Tabla 2-4:</b>	Constantes de masa.....	41
<b>Tabla 3-4:</b>	Características y constantes del Electroimán.....	42
<b>Tabla 4-4:</b>	Constantes Prueba 1 .....	47
<b>Tabla 5-4:</b>	Constantes Prueba 2 .....	48
<b>Tabla 6-4:</b>	Constantes Masa suspendida <i>MP21</i> .....	48
<b>Tabla 7-4:</b>	Constantes Masa suspendida <i>MP22</i> .....	49
<b>Tabla 8-4:</b>	Constantes Prueba en Simulink de prototipo.....	49
<b>Tabla 9-4:</b>	Constantes mecánicas Prueba en Simulink condiciones reales .....	52
<b>Tabla 10-4:</b>	Constantes electromagnéticas Prueba en Simulink condiciones reales .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b>	Brazos de suspensión .....	7
<b>Figura 2-2:</b>	Motor electromagnético lineal tubular .....	9
<b>Figura 1-4:</b>	Amortiguador a escala ECX0979 .....	36
<b>Figura 2-4:</b>	Amortiguador a escala ECX1069 .....	36
<b>Figura 3-4:</b>	Base superior y roscado para riel base inferior .....	39
<b>Figura 4-4:</b>	Ensamble soporte superior e inferior, bujes y rieles .....	40
<b>Figura 5-4:</b>	Riel y roscado inferior .....	40
<b>Figura 6-4:</b>	Base inferior y conexión de amortiguador ECX0979 .....	40
<b>Figura 7-4:</b>	Pesas para masa suspendida .....	40
<b>Figura 8-4:</b>	Parte frontal caja porta proyectos .....	41
<b>Figura 9-4:</b>	Elementos dentro de caja porta proyectos .....	41
<b>Figura 10-4:</b>	Circuito electromagnético .....	42
<b>Figura 11-4:</b>	Fuente conmutada 12v DC 8A .....	42
<b>Figura 12-4:</b>	Step Up DC-DC 20A 12-83v .....	42
<b>Figura 13-4:</b>	Motor Controller 20A 9 - 60v .....	43
<b>Figura 14-4:</b>	Voltímetro – Amperímetro .....	43
<b>Figura 15-4:</b>	Sensor ultrasónico HC-SR04 .....	44
<b>Figura 16-4:</b>	Sensor SHARP GP2Y0A21 .....	45
<b>Figura 17-4:</b>	LCD .....	45
<b>Figura 18-4:</b>	Motor lineal .....	46
<b>Figura 19-4:</b>	Flasher de dos pines .....	46

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b>	Ejes del automóvil y oscilaciones.....	6
<b>Gráfico 2-2:</b>	Esquema suspensión pasiva.....	10
<b>Gráfico 3-2:</b>	Esquema suspensión activa .....	10
<b>Gráfico 4-2:</b>	Esquema suspensión semi – activa.....	11
<b>Gráfico 1-3:</b>	Diagrama de flujo metodología de diseño experimental .....	12
<b>Gráfico 2-3:</b>	Campo Magnético .....	16
<b>Gráfico 3-3:</b>	Flujo Magnético .....	17
<b>Gráfico 4-3:</b>	Histéresis de un campo magnético .....	19
<b>Gráfico 5-3:</b>	Autoinductancia.....	20
<b>Gráfico 6-3:</b>	Relación de las ecuaciones del electromagnetismo .....	20
<b>Gráfico 7-3:</b>	Inductor Simple .....	21
<b>Gráfico 8-3:</b>	Inductor con espacio de aire.....	24
<b>Gráfico 9-3:</b>	Analogía circuito magnético.....	25
<b>Gráfico 10-3:</b>	Circuito RL.....	26
<b>Gráfico 11-3:</b>	Ciclo Histéresis.....	27
<b>Gráfico 12-3:</b>	Esquema suspensión.....	29
<b>Gráfico 13-3:</b>	DCL suspensión convencional .....	30
<b>Gráfico 14-3:</b>	Esquema concepto de suspensión magnética .....	30
<b>Gráfico 15-3:</b>	DLC Concepto de suspensión magnética .....	30
<b>Gráfico 16-3:</b>	Circuito RL.....	31
<b>Gráfico 17-3:</b>	Circuito magnético de Amortiguación electromagnética .....	31
<b>Gráfico 18-3:</b>	Circuito eléctrico análogo a circuito magnético de Amortiguación magnética.....	31
<b>Gráfico 19-3:</b>	Esquema prototipo de suspensión magnética .....	32
<b>Gráfico 20-3:</b>	Diagramas de cuerpo libre (DCL) Prototipo .....	32
<b>Gráfico 21-3:</b>	Circuito RL con carga R.....	32
<b>Gráfico 22-3:</b>	Diagrama suspensión convencional en Simulink.....	33
<b>Gráfico 23-3:</b>	Diagrama concepto suspensión magnética en Simulink.....	34
<b>Gráfico 24-3:</b>	Diagrama prototipo suspensión magnética en Simulink .....	35
<b>Gráfico 1-4:</b>	Amortiguadores con cambio de resortes .....	37
<b>Gráfico 2-4:</b>	CAD prototipo esquemático suspensión magnética .....	38
<b>Gráfico 3-4:</b>	CAD Sistema de suspensión con caja .....	38
<b>Gráfico 4-4:</b>	CAD Circuito magnético.....	38
<b>Gráfico 5-4:</b>	CAD Electroimán.....	39
<b>Gráfico 6-4:</b>	Circuito de control de corriente del inductor.....	43

<b>Gráfico 7-4:</b>	Triangulación sensor SHARP GP2Y0A21.....	44
<b>Gráfico 8-4:</b>	Circuito de conexión de Arduino con Sensores y LCD.....	46
<b>Gráfico 9-4:</b>	Circuito Oscilador .....	46
<b>Gráfico 10-4:</b>	Resultados Prueba 1 <i>MP1</i> a 1A.....	47
<b>Gráfico 11-4:</b>	Resultados Prueba 1 <i>MP1</i> a 2A.....	47
<b>Gráfico 12-4:</b>	Resultados Masa suspendida <i>MP21</i> .....	49
<b>Gráfico 13-4:</b>	Resultados Masa suspendida <i>MP22</i> .....	49
<b>Gráfico 14-4:</b>	Resultados de modelo Simulink Prototipo a 1A.....	51
<b>Gráfico 15-4:</b>	Curva prototipo a 2A.....	51
<b>Gráfico 16-4:</b>	Resultados de modelo Simulink con constantes reales a 2A.....	53

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

**ANEXO B:** DATASHEET SENSOR DE ULTRASÓNICO HC-SR04

**ANEXO C:** DATASHEET SENSOR INFRARROJO SHARP 2Y0A21

**ANEXO D:** PLANOS DE PROTOTIPO

## RESUMEN

El objetivo de esta propuesta tecnológica fue construir un prototipo de un sistema de suspensión magnética esquemática, el cual se diseñó a partir del modelo matemático desarrollado, con base en los principios teóricos de electromagnetismo aplicado en sus componentes, donde se comprobó la viabilidad del proyecto para futuras investigaciones y un prototipo para el avance de suspensiones tecnológicas en el campo automotriz. Se realizó investigación de diferentes sistemas de suspensiones dentro del magnetismo, en donde se seleccionó la suspensión de fricción seca o levitación magnética por la nula investigación en el Ecuador. Para formar el modelo matemático, se aplicó varios conceptos de la teoría de electromagnetismo y suspensiones de vehículos, para el desarrollo de las ecuaciones adecuadas y aplicarlas en el proceso de formación del esquema de control y las ecuaciones que rigen su comportamiento. Luego de varias pruebas y simulaciones en Simulink se formó el modelo matemático y esquema adecuado para su posterior construcción. Se seleccionó materiales para maquinar, módulos electrónicos, actuadores, entre otros elementos, a partir de los cuales se formaron las piezas y se ensambló el prototipo esquemático. Se realizó prueba de funcionamiento adecuando de los elementos mecánicos y electrónicos. Se procedió a la obtención de datos de comportamiento del sistema de suspensión con sensores medidores de distancia infrarrojo y de ultrasonido, en varias pruebas diferenciando y comparando el comportamiento de suspensión magnética con una suspensión convencional. Se concluyó que el prototipo es ineficiente, pero la aplicación de fenómenos magnéticos para amortiguar vibraciones es muy viable. Se recomienda realizar otros prototipos y modelos matemáticos con base en actuadores magnéticos lineales o rotativos y sistemas de control más eficientes.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA AUTOMOTRIZ>, <TÉCNICAS Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <SISTEMA DE SUSPENSIÓN>, <PERTURBACIONES>, <ELECTROMAGNETISMO>, <MODELO MATEMÁTICO>, <SENSOR INFRARROJO Y ULTRASONIDO>, <VIABILIDAD>, <ACTUADOR LINEAL>.

**REVISADO**

**10 FEB 2020**

*Ing. Jhonatan Parreño Uquillas, MBA*  
(ANALISTA DE BIBLIOTECA)

## ABSTRACT

The objective of this technological proposal was to build a prototype of a schematic magnetic suspension system, which was designed from the mathematical model developed, based on the theoretical principles of electromagnetism applying in its components, where the feasibility of the project was tested for future research and a prototype for the advancement of technological suspensions in the automotive field. Research was carried out on different suspension systems within magnetism, where dry friction suspension or magnetic levitation was selected by null research in Ecuador. To form the mathematical model, several concepts of the theory of electromagnetism and vehicle suspensions were applied, to develop the appropriate equations and apply them in the process of forming the control scheme and the equations that govern its behavior. After several tests and simulations in Simulink, the mathematical model and scheme suitable for further construction was formed. Materials for machining, electronic modules, actuators, among other elements were selected, from which the parts were formed and the schematic prototype was assembled. Proper functioning test of the mechanical and electronic elements was performed. We proceeded to obtain data on the behavior of the suspension system with infrared distance and ultrasound distance sensors, in several differentiated tests and compared the behavior of magnetic suspension with a conventional suspension. It was concluded that the prototype is inefficient, but the application of magnetic phenomena to dampen vibrations is very viable. It is recommended to make other prototypes and mathematical models based on linear or rotary magnetic actuators and more efficient control systems.

**KEYWORDS:** <AUTOMOTIVE ENGINEERING>, <ENGINEERING TECHNIQUES AND SCIENCES>, <SUSPENSION SYSTEM>, <PERTURBATIONS>, <ELECTROMAGNETISM>, <MATHEMATICAL MODEL>, <ULTRASOUND AND INFRARUATOR SENSOR>, <VIABILITY>, <LINEAR ACTUATOR>.



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En Ecuador se han dado estudios de investigación dentro del magnetismo como principio de funcionamiento, entre algunos proyectos relevantes se tiene: “Plataforma didáctica de levitación magnética” (García, 2014, p.1), “sistema de levitación magnética (*Maglev*)” (Guevara et al, 2011, p.1), sistemas de levitación magnética con control PID (Guijarro et al, 2015, p.1), “levitación magnética controlado mediante MATLAB” (Páez et al, 2005, p.1). También investigaciones que trabajan con los fluidos reológicos (Pazmiño, 2018, p.1) y (Félix Herrán, 2006, pp.1-3), componente activo a ser controlado dentro de los amortiguadores magneto – reológicos.

Pero específicamente dentro del automovilismo en temas de suspensiones no se tiene mucha investigación. Existe diferentes tipos de suspensiones exploradas, respecto amortiguadores neumáticos (Narváez Morales et al, 2011, p.1) o hidráulicos, en base a sistemas con principio magnético tenemos amortiguadores electro-reológicos (Tulcanaza, 2017, p.1), “de respuesta variable con el campo eléctrico aplicado” (Hurel et al, 2013, p.1), y amortiguadores magneto – reológicos (Proaño et al, 2011, p.1) y (Sánchez, 2006, p.1), cambia su funcionamiento variando el campo magnético aplicado en el material activo (fluido magneto-reológico) y respecto a amortiguadores de fricción seca llamados también de levitación magnética o electromagnéticos, (Saavedra, 2012, p.1). La finalidad del dominio de este fenómeno unido a un control computacional da como resultado final sistemas de suspensiones semi – activas.

En estudios automotrices enfocados a suspensiones magnéticas con base en levitación en el país solo hay en existencia la investigación, “Estudio para la construcción, diseño e implementación de un sistema de suspensión electromagnética” (Saavedra, 2012, p.1), direccionado netamente al estudio de campos magnéticos con distintas muestras de bobinas, pero no se implementan dentro un prototipo de sistema de suspensión automotriz.

### 1.2. Problema

La suspensión convencional del vehículo se sujeta a dos configuraciones, puede ser: suspensión dura de gran estabilidad, pero bajo confort y suspensión blanda para un alto confort, pero baja estabilidad. La suspensión magnética, con un control electrónico efectivo y un correcto diseño, puede aplicar los dos conceptos mientras las suspensiones convencionales no tiene esta posibilidad.

En el país, se ha desarrollado prototipos de sistemas de suspensiones que implementan diferentes tipos de amortiguadores magnéticos electro-reológicos y magneto-reológicos, sin embargo principios de levitación magnética estudiados (Saavedra, 2012, p.1), no han sido integrados en prototipos de sistemas de suspensión automotriz, es decir, no se han iniciado estudios que

relacionen los dispositivos magnéticos al trabajar en conjunto con otros elementos de la suspensión de un vehículo (resortes, mesas, barras estabilizadoras, entre otros).

En la carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH, hay varios módulos usados como herramienta didáctica para los estudiantes, entre sus equipos no incluyen alguno orientado a suspensiones magnéticas que ayude a los estudiantes en su comprensión y posterior desarrollo de sistemas más elaborados.

Respecto a la parte ambiental, los recambios de piezas de suspensiones comunes, generan un impacto, aunque este tipo de mantenimiento no sea muy seguido, el desgaste de sus componentes es notable. A diferencia de las piezas en suspensiones magnéticas que por su principio de funcionamiento tienen una vida útil más prolongada.

### 1.3. **Justificación**

La función del sistema de suspensión del vehículo es adherir el neumático al pavimento y evitar la transmisión de vibraciones al habitáculo, este sistema se desarrolla en base a las variables de confort y estabilidad, las cuales normalmente son inversamente proporcionales. Para sistemas de suspensión de vehículos convencionales (suspensiones pasivas), varía dependiendo de la finalidad de uso del automóvil, es decir, un vehículo con gran confort, pero con baja estabilidad o uno con gran estabilidad disminuyendo el confort para los pasajeros. (Chacón, 2009, pp.5-14)

Con la aplicación de sistemas de suspensiones activas y semi – activas, se permite controlar los elementos que componen la suspensión, al adaptar la amortiguación a las irregularidades del camino a transitar con el vehículo, variando las características de confort y estabilidad (suspensiones inteligentes), lo cual no es posible en una suspensión pasiva por incluir elementos fabricados con características estáticas, es decir, diseños dentro de los parámetros de confort o de estabilidad. (Félix Herrán, 2006, pp.1-3) y (Alamo Viera, 2015, pp.14-24)

Esta propuesta tecnológica busca el análisis, diseño y construcción de un prototipo inicial básico a escala de una suspensión esquemática para el control de amortiguación que incluye componentes magnéticos y la relación con los otros elementos del sistema de suspensión (sensores, resortes, bases, entre otros).

Sistemas elaborados por grandes industrias demuestran que tiene una respuesta veloz para ejercer su función a diferencia de una suspensión pasiva, por las características del magnetismo: rápida reacción a un control electrónico, mover objetos con precisión, tolerar cargas, amortiguar vibraciones, evitar contactos mecánicos (fricción). Aunque varios de estos sistemas ya circulan comercialmente en el mundo, esta tecnología tiene poco desarrollado en el Ecuador.

La base de funcionamiento de estos sistemas es el uso de campos magnéticos que tienden a cambiar su efecto por medio de los campos eléctricos dependiendo de la corriente eléctrica aplicada y características del dispositivo magnético, estos campos electromagnéticos actualmente se aplican en fluidos magneto-reológicos o electro-reológicos que cambia su viscosidad definiendo características del amortiguador dependiendo de la situación de manejo y carretera, o sistemas que solo usan la repulsión y atracción, efectos de los campos magnéticos, un ejemplo claro es la levitación magnética tecnología que se aprecia en macro – proyectos, entre los más notables se puede citar al tren *Maglev*. Este aplica dispositivos electromagnéticos repelidos entre si generando una distancia o levitación. Este sistema ha sido poco estudiado en suspensiones de los vehículos, aprovecha esta levitación para amortiguar vibraciones y en gran medida costos de mantenimiento por el contacto físico casi nulo, dependiendo del mecanismo a implementar.

La industria automotriz realiza investigaciones para mejorar el funcionamiento de estos sistemas, varias de estas industrias, incorporan suspensiones magnéticas a sus vehículos de alta gama desde hace pocos años. Las propiedades de estos amortiguadores magneto-reológicos, electro-reológicos, y de levitación magnética también llamados de fricción seca, ayuda al control para mejorar la estabilidad y confort simultáneamente, sistemas semi – activos. (Félix Herrán, 2006, pp.1-3).

Este fenómeno (magnetismo) es un elemento amigable con el medio ambiente, por sus características, tienen una gran durabilidad y facilidad en el momento de su mantenimiento, es decir, disminuyen los desechos por la larga vida útil de sus componentes.

#### 1.4. **Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de un sistema de suspensión magnética esquemática a partir del modelo matemático analizando, comprendiendo y aplicando los principios del electromagnetismo en sus componentes, para el desarrollo tecnológico de suspensiones de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH y comprobar la viabilidad del proyecto para futuras investigaciones.

#### 1.5. **Objetivos Específicos**

- Investigar los diferentes tipos de sistemas de suspensión magnética de última generación, con trabajos elaborados dentro y fuera del país, para realizar la selección del sistema adecuado para la investigación.
- Comprender los principios del electromagnetismo con estudio y análisis para aplicar y desarrollar el modelo matemático de funcionamiento del prototipo de suspensión magnética a construir.
- Aplicar el modelo matemático en el prototipo esquemático del sistema de suspensión magnética, con la introducción de datos y constantes de funcionamiento real para proyectar el diseño y posterior construcción.
- Construir un prototipo a escala esquemático del sistema de suspensión magnética, maquinando y ensamblando los elementos antes diseñados, para las pruebas posteriores.
- Relacionar el funcionamiento del sistema, comparando sus resultados teóricos y físicos, con datos de suspensiones convencionales para comprobar la factibilidad del proyecto, del modelo matemático y plantear un posterior diseño del sistema más elaborado.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Suspensión del Vehículo: Generalidades

La carretera o calzada por la que circulan los vehículos, presentan imperfecciones o irregularidades que generan perturbaciones produciendo inestabilidad en el automotor. Los sistemas de suspensión del vehículo son diseñados para enfrentar las consecuencias de estas perturbaciones. Entre sus funciones más importantes tenemos:

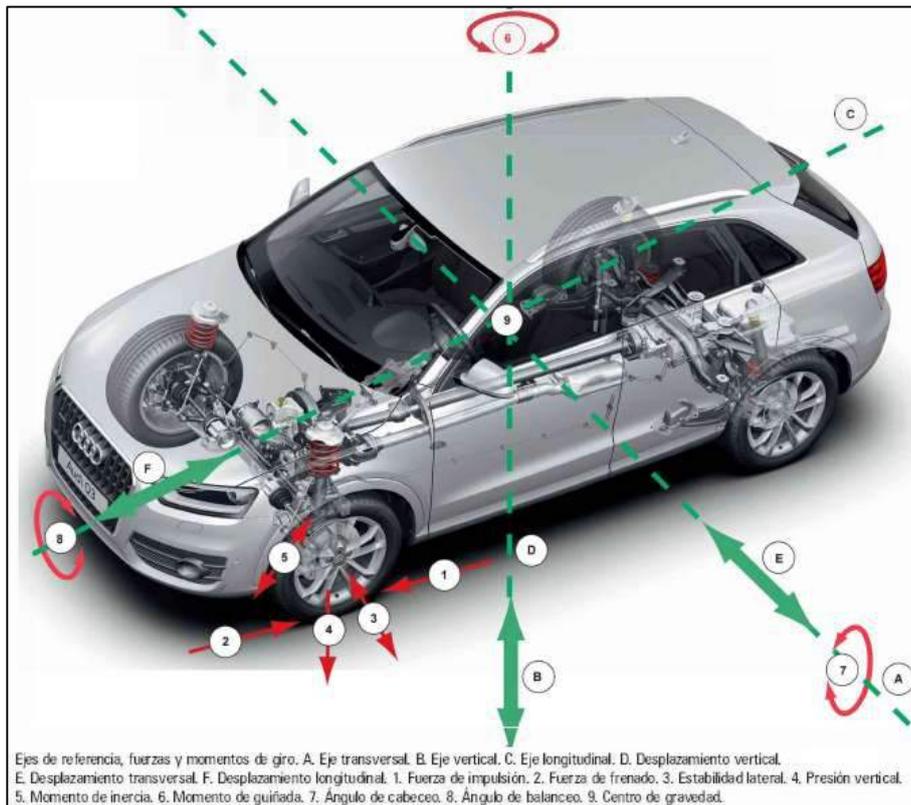
- Conservar una continua adherencia de los neumáticos con el asfalto y absorber fuerzas (longitudinales, transversales y verticales) contribuyendo con la estabilidad y control del vehículo.
- Absorber vibraciones para aislar el compartimiento y mejorar las condiciones para los pasajeros durante el desplazamiento del automotor disminuyendo fatiga, aumentar niveles de concentración del conductor, y un confort adecuado.
- Sostener la masa suspendida del vehículo (habitáculo, motor, pasajeros, entre otros).

Para las cuales el sistema debe tener cualidades de elasticidad, amortiguación y robustez para soportar las funciones a cumplir. (Águeda Casado et al, 2018, p.284-303).

**Masa suspendida:** El peso de todos los elementos se encuentran en el chasis o bastidor (dependiendo del tipo de vehículo) se les otorga el nombre de Masa suspendida estos pueden ser motor, habitáculo, caja de cambios, tren de potencia, carga, pasajeros, entre otros.

**Masa no suspendida:** En cambio los elementos cuyo peso estén directamente relacionados a estar en contacto con el suelo se les da el nombre de Masa no suspendida y son los neumáticos, resortes rodamientos, entre otros.

Las fuerzas constantes que actúan durante el manejo del vehículo se generan por acciones como aceleración, frenado, giros en la dirección en curvas, declives o subidas en el carretero, entre otras, modificando la dinámica del vehículo y su comportamiento. Estas fuerzas se explican a partir de los ejes imaginarios que atraviesan el centro de gravedad del automóvil, se puede notar en el *gráfico 1-1*. (Águeda Casado et al, 2018, p.284-303).



**Gráfico 1-2:** Ejes del automóvil y oscilaciones

Fuente: (Águeda Casado et al, 2018, p.310-328)

Según lo descrito anteriormente, se puede notar que el vehículo tiene seis grados de libertad, 3 grados de libertad en los ejes cartesianos o también antes descritos (vertical, transversal o longitudinal) y 3 grados de libertad más en los momentos de cada eje, esto proyecta un análisis complicado, por esa razón esta investigación se centrará en el movimiento vertical o eje z.

#### 2.1.1. ***Estabilidad. Reacción de vehículo durante el manejo.***

La estabilidad del vehículo va relacionada a las perturbaciones externas que existen durante el manejo, pueden ser vientos laterales, dirección de conducción, anomalías que presente el carretero, frenado, aceleración, entre otros. Con el nivel de perturbación presentada en el momento de la conducción, se puede controlar las oscilaciones consecuentes y obtener un manejo adecuado del vehículo. En esencia, la estabilidad va relacionada a obtener la mejor condición de manejo, indirectamente del confort del conductor.

#### 2.1.2. ***Confort. Percepción de vibraciones en el pasajero***

El confort se relaciona directamente a los periodos de oscilación transmitidos la masa suspendida del vehículo que contiene a los pasajeros. Las oscilaciones se pueden controlar directamente al variar el resorte de la suspensión o también el amortiguador.

Referente a la norma ISO hay parámetros para los pasajeros en relación al confort, esta norma ha sido adoptada en el Ecuador por el INEN con el nombre: “Vibración mecánica y choque evaluación de la exposición de los seres humanos a la vibración en todo el cuerpo. Parte 1. Requisitos generales (ISO 2631-1:1997, IDT”, (INEN NTE-ISO 2631-1, 2014, p.2-3), en el 2014. La cual busca los límites de tolerancia de resonancia de diferentes partes del cuerpo, después de recibir las perturbaciones externas del vehículo.

## 2.2. Elementos de Sistema de Suspensión

Generalmente los sistemas de suspensión incluyen ciertos elementos comunes, que varían dependiendo del tipo de suspensión. (Águeda Casado et al, 2018, p.284-303). Entre los más comunes están:

- Elementos elásticos (muelles, ballestas y barras de torsión)
- Barras estabilizadoras
- Barras transversales
- Tirantes de reacción
- Brazos de suspensión
- Mangueta
- Rótula y Silemblock



**Figura 1-2:** Brazos de suspensión  
**Fuente:** (Águeda Casado et al, 2018, p.284-303)

### 2.3. Sistema de Amortiguación

El sistema de suspensión se encarga de mantener los neumáticos en el carretero pero como consecuencia transmite las perturbaciones hasta el habitáculo, que no permiten un manejo adecuado, el sistema de amortiguación se compone de un mecanismo interno independiente del sistema de suspensión pero lo complementa, sus funciones al controlar vibraciones producidas por fuerzas verticales, longitudinales, y transversales, garantizando buena manejabilidad y equilibrio durante la conducción, y evitar el deterioro anticipado de neumáticos, frenos y otros sistemas que están adjuntos en el vehículo, también disminuye el agotamiento del conductor. Este se encuentra montado entre la carrocería y el neumático. (Águeda Casado et al, 2018, p.284-303). Existen varios tipos de amortiguadores en el mercado, entre los más comunes y sujetos de investigación de este trabajo están:

- Amortiguador Bitubo
- Amortiguador Monotubo
- Amortiguador reológico (Magneto-reológico o Electro-reológico)
- Amortiguador por fricción seca o electromagnético.
- Entre otros.

Cada uno de estos amortiguadores son seleccionados de acuerdo al tipo de suspensión en el que vaya a funcionar. Los amortiguadores reológicos tienen como principio de control el magnetismo, pero siguen agregando en su composición fluido a diferencia del amortiguador electromagnético, el cual tiene fricción de elementos casi nula dependiendo del diseño del mecanismo de funcionamiento.

#### 2.3.1. *Amortiguador Electromagnético*

Consta de 4 elementos fundamentales: amplificadores de potencia, instrucciones de control o algoritmos, velocidad de procesamiento y motores electromagnéticos lineales. (Saavedra, 2012, p.23).

Con ayuda de sensores se obtiene información enviada a la unidad de control que determina las acciones a realizarse. Seguido estas instrucciones se exportan a la unidad de amplificación para la configuración del motor electromagnético lineal. Este motor amortigua las oscilaciones de acuerdo al control, desplazando la barra central. El mecanismo puede cambiar de acuerdo a la configuración y aplicación de la amortiguación. (Saavedra, 2012, p.23).



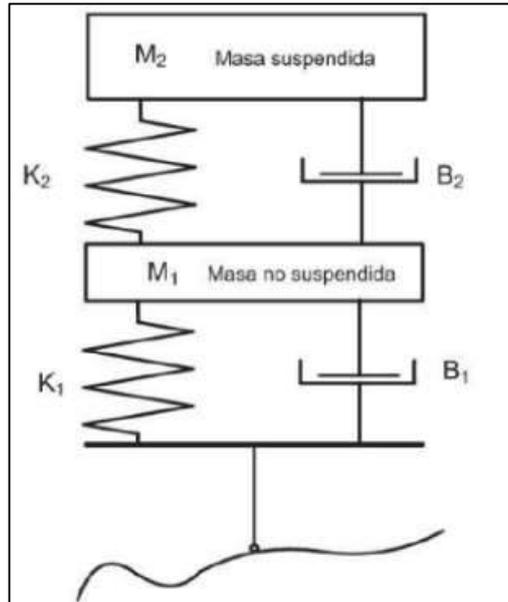
**Figura 2-2:** Motor electromagnético lineal tubular  
Fuente: (Saavedra, 2012, p.23).

## 2.4. Clasificación de suspensiones

Se pueden clasificar por su geometría o según el sistema de control. Para propósito de la investigación solo se utilizara la última clasificación descrita, dentro de esta tenemos tres tipos de suspensión: control pasivo, es decir sus parámetros son previamente ya establecidos y no se pueden cambiar aplicando energía externa, suspensión activa, la cual en su sistema contiene un dispositivo que permite cambiar los parámetros de amortiguación aplicándose energía mecánica, suspensión semi – activa la cual no cuenta con un dispositivo externo, pero puede variar de acuerdo a las necesidades de amortiguación sin la aplicación de energía mecánica. (Hurel et al, 2017, pp.1-4).

### 2.4.1. *Suspensión pasiva*

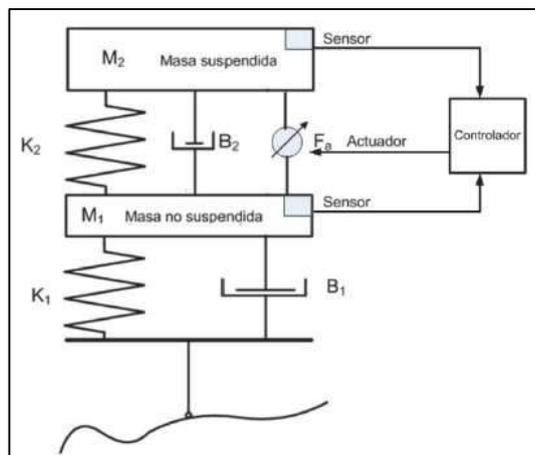
También llamada convencional, en este tipo de suspensión los elementos que la componen ya tienen un parámetro de fabricación y características aplicado y no cambia durante su funcionamiento, es decir, para un vehículo en específico (turismo, todoterreno, competición), los elementos que componen su sistema de suspensión ya deben estar configurados para el tipo de manejo al que va a ser aplicado. El gráfico 21-1 se encuentra el esquema general, describe dos masas, masa no suspendida del neumático y masa suspendida del chasis ( $M_1$  y  $M_2$ , respectivamente), constante de elasticidad del neumático y constante de elasticidad del muelle ( $K_1$  y  $K_2$ , respectivamente), coeficiente de amortiguación del neumático y del amortiguador de la suspensión ( $B_1$  y  $B_2$ , respectivamente). (Hurel et al, 2017, pp.1-4).



**Gráfico 2-2:** Esquema suspensión pasiva  
 Fuente: (Hurel et al, 2017, pp.1-4).

#### 2.4.2. *Suspensión activa*

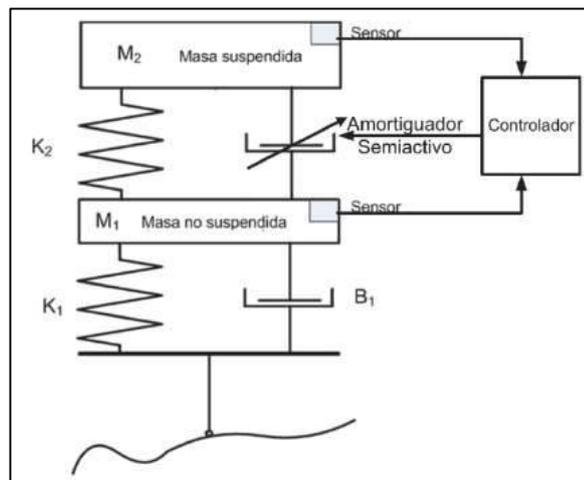
A través de sensores, este sistema determina las condiciones de la suspensión, con los parámetros establecidos de amortiguación, el controlador manipula el dispositivo o actuador (generalmente neumático, hidráulico) que establece las condiciones de funcionamiento de la suspensión al aplicarse energía externa en este. Este tipo de control puede realizarse en el elemento elástico y amortiguador, como también en la presión de neumáticos activos. El esquema general para este tipo de suspensión se observa en el gráfico 22-1 los mismos elementos de una suspensión pasiva a diferencia de la inclusión de actuador, el controlador ( $F_a$ ) y los sensores. (Hurel, y otros, 2017). En este tipo de suspensiones se debe determinar con anterioridad el tipo de manejo que se va a realizar (deportivo, normal o confortable).



**Gráfico 3-2:** Esquema suspensión activa  
 Fuente: (Hurel et al, 2017, pp.1-4).

### 2.4.3. *Suspensión semi – activa*

La suspensión semi – activa posee amortiguadores donde su coeficiente se controla externamente. Estos elementos activos se muestran en bajas frecuencias, los elementos pasivos como muelles se muestran en altas frecuencias. Este tipo de suspensión se regula automáticamente cuando el controlador determine la estrategia a tomar. En el grafico 23-1 se observa el esquema de suspensión semi – activo la diferencia con el controlador activo, es la inclusión de un elemento propio del sistema de suspensión controlado directamente (amortiguador semi – activo). (Hurel, y otros, 2017).



**Gráfico 4-2:** Esquema suspensión semi – activa  
Fuente: (Hurel et al, 2017, pp.1-4).

Generalmente estas suspensiones se pueden clasificar de acuerdo al fluido que incluyen en el amortiguador:

- Suspensión hidroneumática controlada electrónicamente. Hidractiva e Hidractiva II: su actuador es un conjunto en forma de esfera muelle – amortiguador semi – activo, (Águeda Casado et al, 2018, p.310-328). Suspensión neumática con control electrónico: su actuador es una balona semi – activa de goma reforzada que reemplaza al muelle. (Águeda Casado et al, 2018, p.310-328).
- Suspensiones con amortiguadores magneto – reológicos y electro – reológicos. Contienen fluidos reológicos que cambian su densidad al aplicarse un campo magnético o regulando el voltaje aplicado directamente, respectivamente.
- Suspensiones con amortiguadores de fricción seca, electromagnéticos o también llamados servo – controlados. (Hurel et al, 2017, pp.1-4).



### 3.1. Selección de tipo de suspensión magnética

Las variables de confort y estabilidad son inversamente proporcionales en sistemas convencionales, pero en los sistemas semi – activos, se puede relacionar las dos sin tener que perder la una con el uso de la otra, estos y el control de estos recurre en algoritmos muy desarrollados que aplican estrategias de control automático de sistemas no – lineales, materiales inteligentes, entre otros.

Los sistemas semi – activos, con respecto a un principio de funcionamiento con fenómenos magnéticos, tenemos sistemas de suspensión magnética: electro – reológicos y magneto – reológicos que tienen como base el control de un fluido reológico variando parámetros que puede ser por campos eléctricos o campos magnéticos, respectivamente.

También existen varios estudios realizados dentro del país, estos diseños, aunque varían en sus parámetros de construcción, presenta resultados notables que explican los beneficios en comparación a las suspensiones convencionales de los vehículos, incluso sin control de sistemas no – lineales.

Pero no se puede reproducir fielmente la característica de fricción nula de los fenómenos magnéticos por los fluidos reológicos utilizados en estos, lo cual recurre a largo plazo en mantenimiento, recambio de piezas, entre otros.

El sistema de suspensión magnética con amortiguadores de fricción seca o electromagnética, sus elementos hacen uso de principios magnéticos aplicados directamente a la amortiguación a diferencia de los que contienen fluidos reológicos, emplean motores electromagnéticos o servo – controlados.

Existen ya en el mercado internacional, en principio con la tecnología de BOSE (la más representativa en varios años) que fue adquirida por ClearMotion la cual la desarrollo más a profundidad incluso para este año marcas como BMW o Tesla incluirán en sus vehículos de alta gama este tipo de suspensión, gracias a sus beneficios idealmente estos elementos no tienen mantenimiento.

La tecnología de suspensiones magnéticas con amortiguadores de fricción seca son los menos desarrollados en el país, a parte de los estudios realizados en otros campos, no se han empleado amortiguadores electromagnéticos incluidos en sistemas de suspensión de vehículo por lo que se tomará este como tema de desarrollo para la presente investigación.

El proyecto se centrará en un sistema de suspensión esquemático básico de dos grados de libertad para el eje vertical. Se realizará un control manual de la corriente aplicada al electroimán, no se

usará lazo cerrado para controlar esta. Se realizará toma de datos mediante el sensor infrarrojo y ultrasónico analizando las vibraciones a distinto nivel de intensidad de corriente.

### 3.2. **Magnitudes de la Electricidad**

La electricidad es un fenómeno natural que podemos encontrar en nuestro ambiente como en rayos, estática, al frotar objetos, entre otros. Este fenómeno también se puede generar artificialmente y al hacer uso de este hay aplicaciones en iluminación, funcionamiento de electrodomésticos, y varias más. Los conceptos básicos de la electricidad se inician en el movimiento de cargas que contienen los átomos de los elementos conductores al aplicarse una fuente que genere fuerza electromotriz. La interacción de cargas dentro de un conductor eléctrico compone diferentes conceptos que deben ser mencionados para el entendimiento básico del electromagnetismo.

#### 3.2.1. **Campo eléctrico $\vec{E}$**

Es una región de espacio llamado campo vectorial donde interactúan cargas eléctricas, cuando se aplica una fuente las cargas fluyen, dependiendo del material o espacio, varían su comportamiento que se pueden describir con la ley de Coulomb. Con el uso de materiales conductores donde su superficie es continua, la interacción de cargas se simplifica. Su unidad es el voltio por metro ( $v/m$ ).

La ley de Gauss para campos eléctricos, describe que para producir un campo eléctrico es necesario la interacción de cargas  $q$ . Integralmente se describe:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \tag{1}$$

Donde,

$\epsilon_0$ , permeabilidad del material o medio en el que ocurre el fenómeno.

#### 3.2.2. **Fuerza electromotriz $\vec{V}$**

Dentro de un circuito eléctrico, las cargas eléctricas van de un potencial alto a un potencial bajo, es decir de positivo a negativo produciendo una corriente eléctrica, por naturaleza las cargas tienden a un potencial o voltaje estable parando el flujo de la corriente, la parte denominada fuente es la encargada de generar una situación inestable y la diferencia de potencial sea permanente mientras funcione la fuente, esta acción de inestabilidad es la fuerza electromotriz, en otras

palabras es el trabajo  $\vec{W}$  por unidad de carga  $\vec{q}$  en la fuente. Generalmente su simbología es  $\varepsilon$ , pero en este trabajo se utilizará  $\vec{V}$ . La unidad es el Julio por Culombio, es decir, voltaje (V).

$$\varepsilon = \vec{V} = \frac{d\vec{W}}{d\vec{q}} \quad (2)$$

### 3.2.3. **Intensidad de corriente eléctrica $\vec{I}$ y Densidad de corriente eléctrica $\vec{J}$**

La corriente eléctrica  $\vec{I}$  o caudal de corriente eléctrica es la cantidad de cargas que circula por un conductor en un tiempo determinado. Su unidad es Culombio por tiempo, es decir, Amperio (A). la densidad de corriente eléctrica  $\vec{J}$  es la corriente eléctrica que circula por unidad de superficie. Su unidad es Amperio por metro cuadrado ( $A/m^2$ ). (Okdirio, 2018)

$$\vec{I} = \frac{d\vec{q}}{dt} = \int_S \vec{J} dS \quad (3)$$

### 3.2.4. **Resistencia eléctrica R**

Dependiendo del material, este tendrá una cierta oposición al flujo de la corriente eléctrica, convirtiéndose en una carga, se mide en ohmios ( $\Omega$ ). La ley de ohm es una fórmula que relaciona la corriente eléctrica  $\vec{I}$ , la fuerza electromotriz o voltaje  $\vec{V}$ , y la resistencia  $\Omega$ , es muy utilizada en circuitos para cálculos de magnitudes.

$$\vec{V} = R * \vec{I} \quad (4)$$

Otra ley formulada por Ohm, la relación entre el campo eléctrico y la densidad de corriente eléctrica

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \quad (5)$$

Donde  $\sigma$  es la constante que depende del material por donde circula la corriente eléctrica.

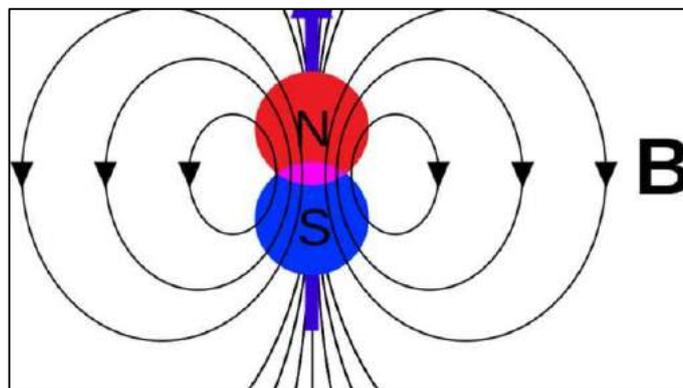
### 3.3. Magnitudes del Magnetismo

En la naturaleza existe materiales con fuerza para atraer y repeler otros, este fenómeno se llama magnetismo, se puede presentar de manera natural (imanes permanentes) como en la magnetita los cuales no pierden sus propiedades magnéticas con el tiempo o imanes artificiales generados a partir de campos eléctricos. El imán tiene dos polos, un polo norte y un polo sur, donde las fuerzas magnéticas son más notables. Hay diferentes tipos de materiales clasificados en función de la respuesta al fenómeno del magnetismo, son:

- Ferromagnéticos: Gran fuerza de atracción. Estos materiales se constituyen de momentos magnéticos internos de diferente orientación, que se alinean en presencia de otro campo magnético, transformándose a su vez en un imán.
- Paramagnéticos: Débilmente atraídos por campos magnéticos.
- Diamagnéticos: Débilmente repelidos por campos magnéticos

#### 3.3.1. Campo magnético $\vec{H}$

También llamado intensidad de campo magnético. Es una región de espacio representada por vectores de fuerza que simboliza el flujo de las líneas del campo magnético que circula, por tanto, se puede referenciar al campo vectorial magnético en un punto como un vector  $\vec{H}$ , análoga con al campo eléctrico  $\vec{E}$ . Se mide en Amperios vuelta por metro ( $Av/m$ ).



**Gráfico 2-3:** Campo Magnético  
Fuente: (Okdirio, 2018)

#### 3.3.2. Fuerza magnetomotriz $\vec{F}$

Análoga a la Fuerza electromotriz o llamado también voltaje, la fuerza magnetomotriz es la fuerza necesaria, es decir la fuente, para generar un flujo de campo magnético entre dos puntos de circulación  $l$ . Se representa con la integral.

$$\vec{F} = \int \vec{H} * d\vec{l}$$

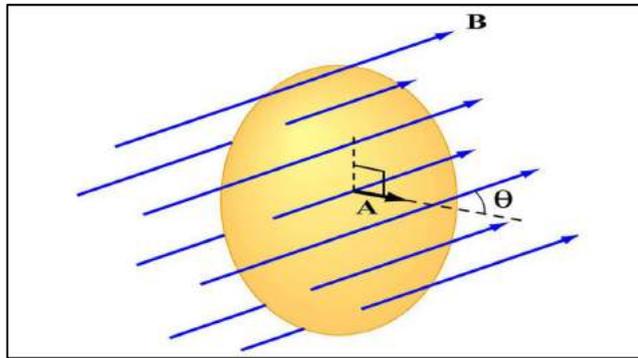
(6)

### 3.3.3. Flujo magnético $\Phi$ y Densidad de campo magnético $\vec{B}$

El flujo magnético representa la cantidad de líneas de en un campo magnético al pasar por una superficie  $S$  se representa con la letra  $\Phi$  y su unidad es el Webber. Análoga a la corriente eléctrica  $\vec{i}$ .

$$\vec{\Phi} = \int_S \vec{B} * d\vec{S}$$

(7)



**Gráfico 3-3:** Flujo Magnético  
Fuente: (Imagnetshop, 2017)

La densidad de campo magnético  $\vec{B}$ , representa la concentración de líneas de intensidad de campo magnético que fluyen dentro de una sección de determinado material (este depende de su permeabilidad magnética), cuanto más alejadas estén las líneas el campo magnético  $\vec{B}$  será menor, pero mientras más cercanas estén  $\vec{B}$  va a ser mayor. Se mide en Tesla ( $T = Wb/m^2$ ). En analogía esta magnitud se compara con la densidad de corriente eléctrica  $\vec{j}$ .

A diferencia de los campos eléctricos (donde hay cargas eléctricas positivas y negativas), no existen cargas magnéticas o monopolos, esta afirmación se da a partir de la ley de Gauss para campos magnéticos. Donde explica que todos los campos magnéticos deben cerrarse sobre sí mismo. Por esa razón cuando se fractura un imán los nuevos trozos adquieren nuevos polos norte y sur. Integralmente se expresa:

$$\oint_S \vec{B} * d\vec{S} = 0$$

(8)

### 3.3.4. *Permeabilidad magnética e histéresis*

Cada material contiene momentos magnéticos internos o también llamados dipolos magnéticos internos, los cuales varían de dependiendo del material. La permeabilidad magnética relaciona la densidad de campo magnético  $B$  y la intensidad de campo magnético  $H$  producido por la excitación de los momentos magnéticos internos. Relacionando así el magnetismo con las características físicas del material. Considerando que la permeabilidad relativa del material  $\mu_r$  es lineal se deduce,

$$\mu = \mu_r * \mu_0 = \frac{B}{H} \quad (9)$$

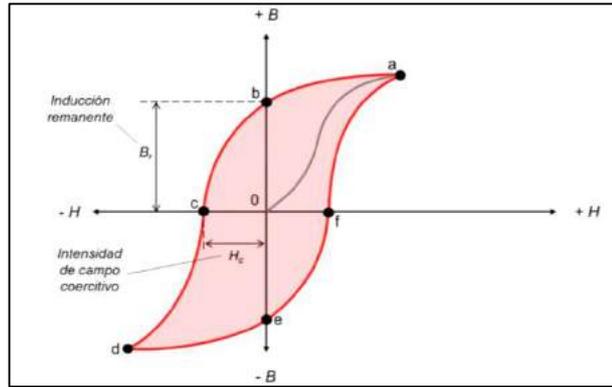
Donde,

$\mu_0$ , es la permeabilidad del vacío igual a  $4\pi * 10^{-7}$

$\mu_r$ , es la permeabilidad relativa del material

Cada material dependiendo de su permeabilidad magnética describe una curva que relaciona el campo magnético con la densidad de campo magnético, esta curva se cierra en un ciclo describiendo el comportamiento del material a la variación de la corriente.

Cuando en un material ferromagnético se produce un campo magnético, llega a su punto de saturación donde todos los dipolos internos tienen la dirección del campo magnético, pero al retirar la intensidad de corriente que genera el campo, los momentos magnéticos internos no vuelven a su estado original, quedando así un remanente de campo magnético, al invertir la corriente se elimina este remanente, quedando así una intensidad de campo coercitivo (común en los imanes permanentes para evitar que campos externos afecten su campo interno), al seguir aumentando la intensidad de corriente negativa, el campo magnético saturado se invierte y de igual manera al quitar esta corriente, queda un remanente campo magnético negativo, se cambia de nuevo la corriente obteniendo un campo coercitivo y cierra el ciclo al llegar al punto de saturación de campo magnético positivo. Se concluye que a medida que se carga y descarga el núcleo no adquiere su estado original, sino que sigue un ciclo llamado Histéresis.



**Gráfico 4-3:** Histéresis de un campo magnético  
Fuente: (Mederos, 2015)

### 3.3.5. Fuerza de Lorentz

Cuando una carga  $q$  se mantiene inmóvil dentro de un campo magnético esta no genera ninguna fuerza, pero cuando esta se desplaza con una velocidad  $\vec{V}e$  dentro de un campo magnético  $\vec{B}$ , se genera una fuerza  $\vec{f}$  que es perpendicular al plano de los vectores  $\vec{V}$  y  $\vec{B}$ . La dirección de la fuerza se puede obtener con la regla de la mano derecha, dependiendo si la carga es positiva o negativa.

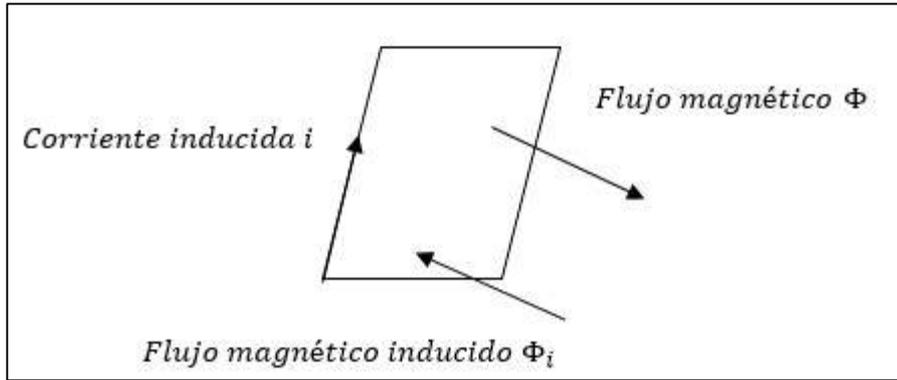
$$\vec{f} = q * (\vec{V}e \times \vec{B}) \tag{10}$$

### 3.4. Ley de Faraday

Esta ley describe la relación entre campos magnéticos y eléctricos, cuando un campo magnético cambia en razón del tiempo este activa el campo eléctrico cerrándolo. Integralmente se expresa de esta manera:

$$\vec{v} = \oint \vec{E} * d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} * d\vec{S} \tag{11}$$

El signo negativo nos explica la aplicación de la ley de Lenz, el fenómeno de la autoinducción, nos dice que la variación de flujo magnético produce una corriente inducida la cual a su vez produce un flujo magnético que se opone a la variación inicial.



**Gráfico 5-3:** Autoinductancia  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

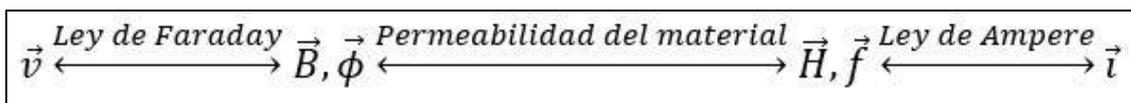
### 3.5. Ley de Ampere

Esta ley describe como una corriente eléctrica que varía en el tiempo activa un campo magnético cerrándolo, a medida que se incremente la corriente eléctrica el campo magnético se incrementa, formando imanes artificiales o electroimanes. Esta ley fue reformulada por Maxwell e integralmente se describe:

$$\vec{\tau} = \oint \vec{B} * d\vec{l} = \mu_0 * \int_S \vec{J} * d\vec{S} + \mu_0 * \epsilon_0 * \int_S \vec{E} * d\vec{S} \quad (12)$$

### 3.6. Electromagnetismo

El electromagnetismo son un conjunto de fenómenos que relacionan las cargas eléctricas con los campos magnéticos, las Ecuaciones de Maxwell describen como las cargas afectan a los campos magnéticos y así mismos y la ecuación de la fuerza de Lorentz describe como los campos magnéticos afectan a las cargas. Las ecuaciones de Maxwell se resumen en cuatro: la ley de Gauss para campos eléctricos, la ley de Gauss para campos magnéticos, la ley de Faraday y la ley de Ampere reformulada por Maxwell. Para este caso se aplican ecuaciones ya desarrolladas dejando de lado la matemática compleja original de las leyes antes expuestas, la manera básica de relación de las ecuaciones se muestra mediante en el grafico 28-1.



**Gráfico 6-3:** Relación de las ecuaciones del electromagnetismo  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

El actuador que utiliza estos principios son las bobinas, son elementos por donde circula una corriente eléctrica, y puede almacenar esta energía en campos magnéticos. Estos elementos se componen de un conductor enrollado, cada vuelta se llama espira y gracias al fenómeno del campo eléctrico, cuando circula una corriente por este elemento se genera un campo magnético. Otro

componente de la bobina es el núcleo, puede ser de diferentes materiales, habitualmente se utiliza materiales ferromagnéticos, que ayudan a incrementar el campo magnético de la bobina.

### 3.6.1. **Inductancia y Reluctancia**

La inductancia  $L$  es la relación que existe entre el flujo magnético  $\phi$  y la intensidad de corriente  $i$  de un circuito con  $N$  espiras, se mide en Henrio (H), matemáticamente se expresa:

$$L = N \frac{\phi}{i} \quad (13)$$

La reluctancia  $Re$  es la resistencia al paso del flujo de líneas de campo magnético a través de un material y para un circuito magnético constante y uniforme, se mide en Amperio vuelta por Webber (Av/Webber) expresa como:

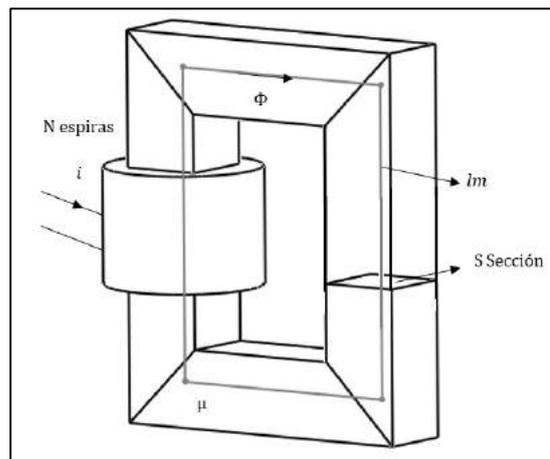
$$Re = \frac{lm}{\mu * S} \quad (14)$$

Análogo a la ley de ohm, se puede representar esta ley con conceptos de magnetismo,

$$F = \Phi * Re \quad (15)$$

### 3.7. **Deducción de fórmulas**

#### 3.7.1. **Ley de Faraday generalizada para un inductor simple**



**Gráfico 7-3: Inductor Simple**  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Derivando la Ecuación 7 se tiene,

$$\frac{d\vec{\Phi}}{dt} = \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} * d\vec{S}$$

(16)

Al Reemplazar la Ecuación 16 en la Ecuación 11 se tiene,

$$\vec{v}_{por\ espira} = \frac{d\vec{\Phi}}{dt}$$

(17)

De la Ecuación 7, suponiendo que la superficie es perpendicular al flujo magnético y constante, la ecuación se expresar como:

$$\Phi = B * S$$

(18)

Al Reemplazar la Ecuación 18 en la Ecuación 17 y multiplicando por  $N$  espiras del inductor se tiene,

$$v_{neto} = \vec{v}_{por\ espira} * N = v = N * S * \frac{dB}{dt}$$

(19)

### 3.7.2. *Ley de Ampere generalizada para un inductor simple*

Reemplazando la Ecuación 9 en la Ecuación 12 se tiene,

$$\oint \vec{H} * d\vec{l} = \vec{I}$$

(20)

Donde,

$\vec{I}$ , corriente neta del inductor

Suponiendo en la Ecuación 20 un campo magnético uniforme y dado que el inductor simple tiene  $N$  espiras cada una con corriente  $i$ , la corriente neta  $I$  resulta  $N * i$ , entonces,

$$I = N * i = H * l_m$$

(21)

### 3.7.3. *Cálculo de inductancia de inductor simple*

Reemplazando Ecuación 9 en Ecuación 19 se tiene,

$$v = N * S * \mu * \frac{dH}{dt} \quad (22)$$

Y reemplazando Ecuación 21 en Ecuación 22,

$$v = \frac{\mu * N^2 * S}{l_m} * \frac{di}{dt} \quad (23)$$

De la Ecuación 13 despejando y derivando se tiene,

$$L * \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (24)$$

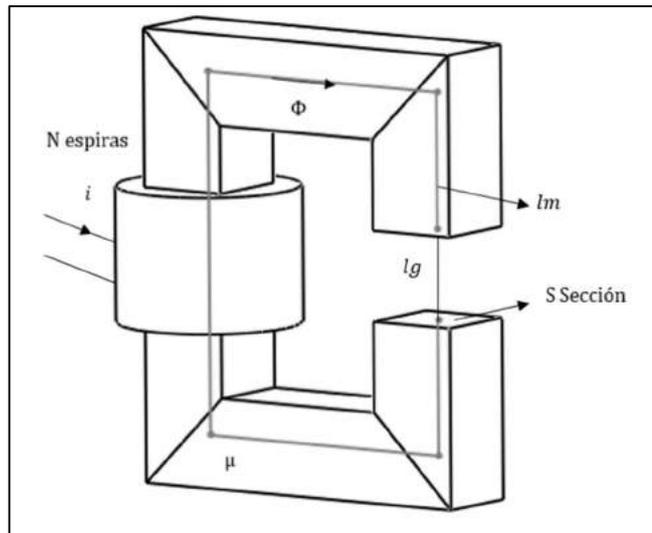
Al multiplicar la Ecuación 17 por  $N$  y reemplazar en Ecuación 24 se tiene,

$$v = L * \frac{di}{dt} \quad (25)$$

Igualando Ecuación 23 y Ecuación 25, y despejando  $L$  para un inductor simple se tiene,

$$L = \frac{\mu * N^2 * S}{l_m} \quad (26)$$

3.7.4. *Circuito magnético de inductor con espacio de aire*



**Gráfico 8-3:** Inductor con espacio de aire  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Integrando la Ecuación 6, considerando la sección uniforme del material,

$$F = H * l \tag{27}$$

Se iguala la Ecuación 27 con Ecuación 21,

$$F = N * i$$

Dependiendo del material donde circule el flujo magnético, la fuerza magnetomotriz será diferente, por tanto,

$$F_l + F_g = N * i \tag{28}$$

Donde,

$F_l$ , Fuerza magnetomotriz en la distancia  $l_m$

$F_g$ , Fuerza magnetomotriz en la distancia  $l_g$

Reemplazando Ecuación 15 en Ecuación 28 y agrupando,

$$N * i = \Phi * (Re_l + Re_g) \tag{29}$$

Donde,

$Re_l$ , Reluctancia en la distancia  $l_m$

$Re_g$ , Reluctancia en la distancia  $lg$

Ecuación 14 en términos de inductor con espacio de aire,

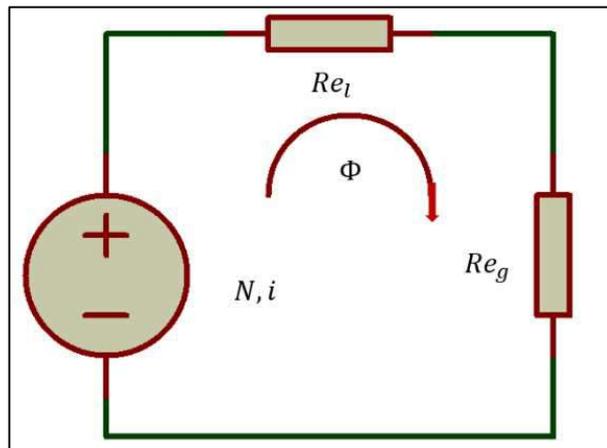
$$Re_l = \frac{lm}{\mu * S} \tag{30}$$

$$Re_g = \frac{lg}{\mu * S} \tag{31}$$

Donde,

$S$ , Superficie transversal del material del núcleo y del espacio de aire donde circula el flujo electromagnético

Análogamente a un circuito eléctrico, los circuitos magnéticos se representan,



**Gráfico 9-3:** Analogía circuito magnético con circuito eléctrico  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Multiplica Ecuación 17 por  $N$ ,

$$v = v_{neto} = \vec{v}_{por\ espira} * N = N * \frac{d\Phi}{dt} \tag{32}$$

Despejando de Ecuación 29, el flujo magnético y reemplazando en Ecuación 32 e igualando con Ecuación 25,

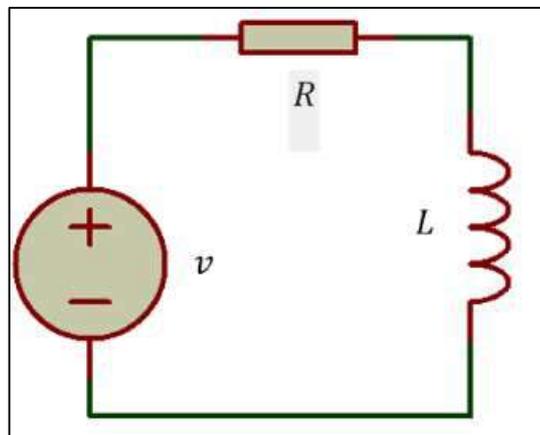
$$v = \frac{N^2}{Re_l + Re_g} * \frac{di}{dt} = L * \frac{di}{dt} \tag{33}$$

Donde al despejar  $L$ ,

$$L = \frac{N^2}{Re_l + Re_g} \quad (34)$$

Para la deducción de la inductancia, no se utiliza la parte no lineal, se consideró como parámetro constante. La inductancia del circuito magnético varía dependiendo de la variación de material por el que circule el flujo magnético. Correspondiente a un circuito magnético diferente, se debe aumentar las reluctancias de acuerdo a los espacios de aire y materiales diferentes que se añadan al circuito.

### 3.7.5. Fuerza de tracción generada por un electroimán



**Gráfico 10-3:** Circuito RL  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Considerando un circuito RL,

$$v = v_R + v_L \quad (35)$$

Reemplazando ley de Ohm Ecuación 4 en  $v_R$  y Ecuación 32 en  $v_L$ ,

$$v = R * i + N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (36)$$

Se multiplica Ecuación 36 por  $i$ , donde  $v * i = Potencia consumida = P$

$$P = v * i = R * i^2 + N * i * \frac{d\Phi}{dt} \quad (37)$$

La potencia también se define como el trabajo  $dW$  realizado en una cantidad de tiempo  $dt$ ,

$$P = \frac{dW}{dt}$$

(38)

Se multiplica la Ecuación 37 por un  $dt$  resulta  $dW$ ,

$$dW = P * dt = R * i^2 * dt + N * i * d\Phi = dW_R + dW_m$$

(39)

Donde  $dW_R = R * i^2 * dt$  es la energía de la resistencia característica del bobinado, y  $dW_m = N * i * d\Phi$  es la energía del fenómeno magnético.

Reemplazando Ecuación 21 y Ecuación 18 derivada ( $d\Phi = S * dB$ ) en  $dW_m$

$$dW_m = H * lm * S * dB$$

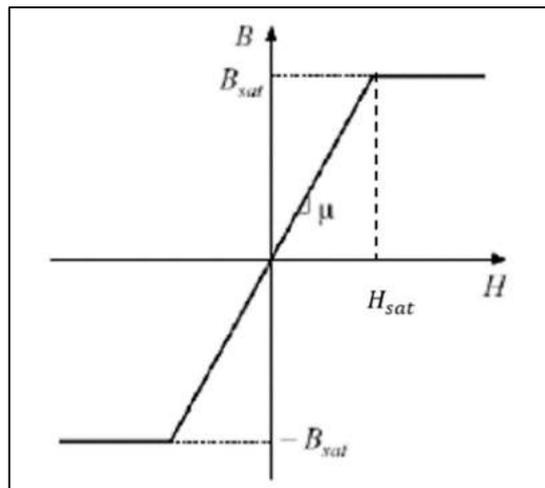
(40)

Despejando Ecuación 40,

$$d\left(\frac{W_m}{lm * S}\right) = HdB$$

(41)

Integrando Ecuación 42 para el ciclo de histéresis en el aire,



**Gráfico 11-3:** Ciclo Histéresis  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

$$\frac{W_m}{lm * S} = \frac{B_{sat} * H_{sat}}{2} = \frac{B * H}{2}$$

(42)

De Ecuación 9, despejando  $H = \frac{B}{\mu_0}$  reemplazando en Ecuación 42,

$$W_m = lm * S * \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (43)$$

El trabajo analizado de la parte magnética es la distancia en el espacio de aire o entrehierro se representa con  $x = lm$ , trabajo también resulta a la fuerza por distancia  $W_m = fm * x$  derivando la ecuación  $dW_m = fm * dx$ , despejando  $fm$ , igualando y resolviendo la derivada con Ecuación 43,

$$fm = \frac{d}{dx} \left( lm * S * \frac{B^2}{2\mu_0} \right) = \frac{d}{dx} \left( x * S * \frac{B^2}{2\mu_0} \right) = \frac{B^2 * S}{2\mu_0} \quad (44)$$

De Ecuación 9, despejando  $B = H * \mu_0$  reemplazando en Ecuación 44,

$$fm = \frac{\mu_0 * H^2 * S}{2} \quad (45)$$

De Ecuación 21, despejando  $H = \frac{N*i}{lm} = \frac{N*i}{x}$  reemplazando en Ecuación 45,

$$fm = \frac{\mu_0 * N^2 * S}{2} \left( \frac{i}{x} \right)^2 \quad (46)$$

Donde,  $Km = \frac{\mu_0 * N^2 * S}{2}$  constante magnética del electroimán.

$$fm = Km * \left( \frac{i}{x} \right)^2 \quad (47)$$

### 3.7.6. *Linealización de ecuaciones no lineales*

Dada la Ecuación 47, una ecuación no lineal, es necesario linealizar dentro de los parámetros y constantes del electroimán del prototipo para obtener el modelo matemático.

$$fm(i, x) = Km * \left( \frac{i}{x} \right)^2$$

Aplicando serie de Taylor,

$$fm(\Delta i, \Delta x) = fm(i_0, x_0) + \frac{\partial fm(i_0, x_0)}{\partial x} * (x - x_0) + \frac{\partial fm(i_0, x_0)}{\partial i} * (i - i_0)$$

$$fm(i, x) = 2 * Km * \frac{i_0}{x_0^2} * i - 2 * Km * \frac{i_0^2}{x_0^3} * x$$

$$fm(i, x) = K_i * i - K_x * x$$

(48)

$$K_i = 2 * Km * \frac{i_0}{x_0^2}$$

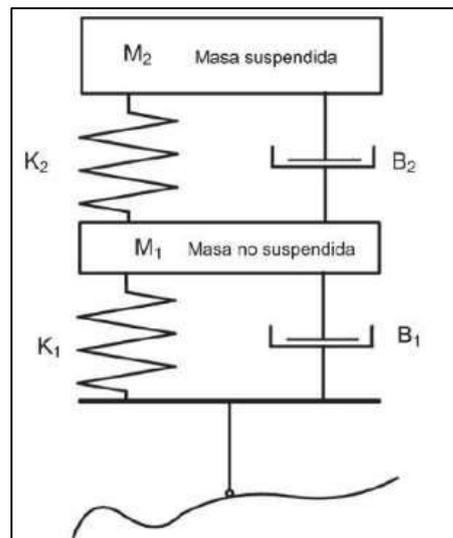
(49)

$$K_x = 2 * Km * \frac{i_0^2}{x_0^3}$$

(50)

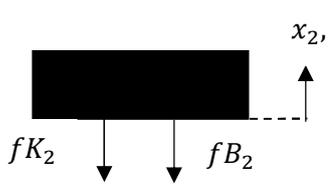
### 3.8. Modelación matemática de suspensión magnética

#### 3.8.1. Concepto Amortiguación convencional

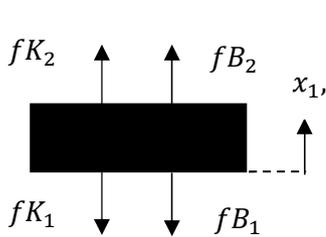


**Gráfico 12-3:** Esquema suspensión convencional o pasiva

Fuente: (Hurel et al, 2017, pp.1-4)



$$\begin{aligned}
 -fK_2 - fB_2 &= M_2 * a_2 \\
 -K_2(x_2 - x_1) - B_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= M_2 * \ddot{x}_2
 \end{aligned}
 \tag{51}$$



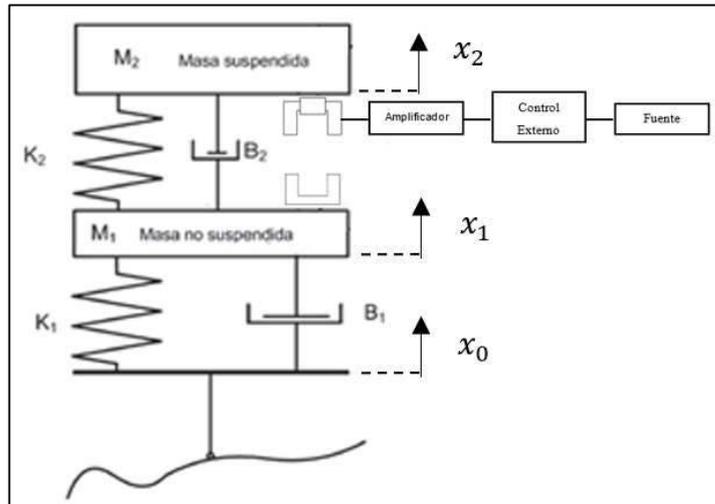
$$\begin{aligned}
 fK_2 - fK_1 + fB_2 - fB_1 &= M_1 * a_1 \\
 K_2(x_2 - x_1) - K_1(x_1 - x_0) + B_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - B_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) &= M_1 * \ddot{x}_1
 \end{aligned}
 \tag{52}$$

**Gráfico 13-3:** DCL suspensión convencional

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

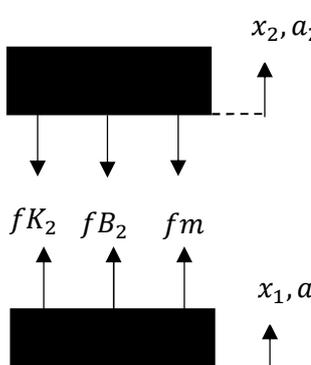
3.8.2.

**Concepto de Amortiguación electromagnética**



**Gráfico 14-3:** Esquema concepto de suspensión magnética

Realizado por: (Ramos, R, 2019)



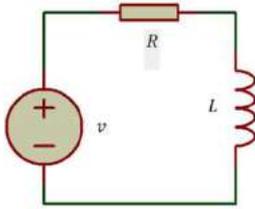
$$\begin{aligned}
 -fm(i, x) - fK_2 - fB_2 &= M_2 * a_2 \\
 -(K_i * i - K_x * x) - K_2(x_2 - x_1) - B_2\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt}\right) &= M_2 * \frac{d^2x_2}{dt^2} \\
 fm(i, x) + fK_2 - fK_1 + fB_2 - fB_1 &= M_1 * a_1
 \end{aligned}
 \tag{53}$$

**Gráfico 15-3:** Concepto de suspensión magnética

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

$$(K_i * i - K_x * x) + K_2(x_2 - x_1) - K_1(x_1 - x_0) + B_2 \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - B_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right)$$

$$= M_1 * \frac{d^2x_1}{dt^2}$$



$$x = x_2 - x_1$$

$$v = v_R + v_L$$

$$v = R * i + L * \frac{di}{dt}$$

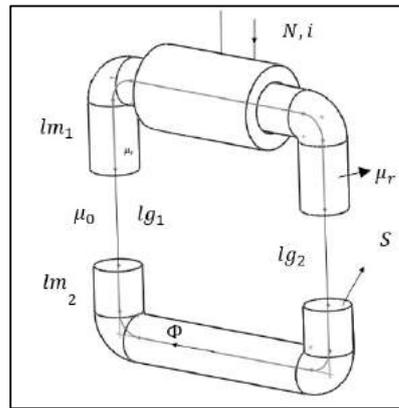
**Gráfico 16-3:** Circuito RL  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

(54)

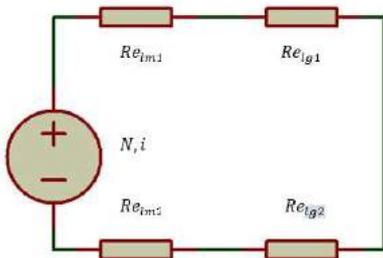
(55)

(56)

### 3.8.2.1. Circuito magnético de Amortiguación electromagnética



**Gráfico 17-3:** Circuito magnético de Amortiguación electromagnética  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



$$Re_{lm1} = \frac{lm1}{\mu * S}; Re_{lm2} = \frac{lm2}{\mu * S};$$

$$Re_{lg1} = \frac{lg1}{\mu_0 * S}; Re_{lg2} = \frac{lg2}{\mu_0 * S}$$

**Gráfico 18-3:** Circuito eléctrico análogo a circuito magnético de Amortiguación magnética  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

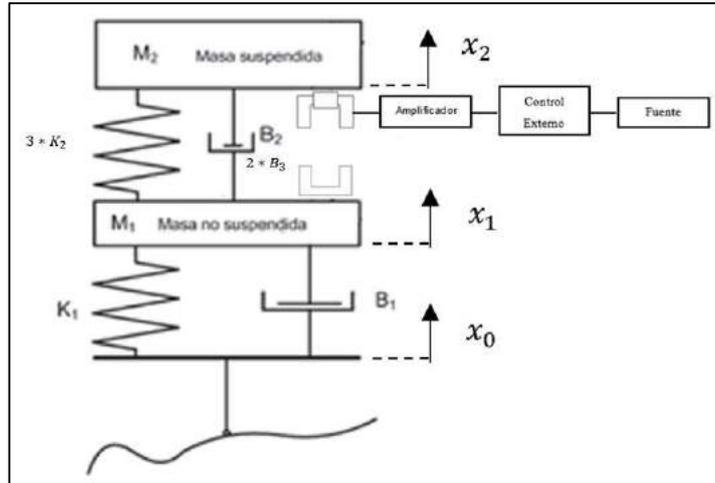
$$L = \frac{N^2}{Re_{lm1} + Re_{lm2} + Re_{lg1} + Re_{lg2}}$$

$$= \frac{N^2 * \mu * S}{lm1 + lm2 + lg1 + lg2}$$

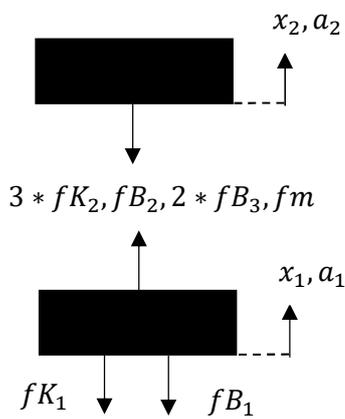
(57)

(58)

3.8.3. **Modelo matemático del prototipo**



**Gráfico 19-3:** Esquema prototipo de suspensión magnética  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Gráfico 20-3:** Diagramas de cuerpo libre (DCL) Prototipo  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

$$-fm(i, x) - 3 * fK_2 - fB_2 - 2 * fB_3 = M_2 * a_2$$

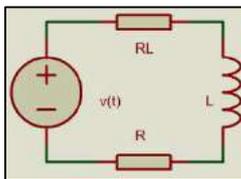
$$-(K_i * i - K_x * x) - 3 * K_2(x_2 - x_1) - (B_2 + 2 * B_3) \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) = M_2 * \frac{d^2 x_2}{dt^2}$$

(59)

$$fm(i, x) + 3 * fK_2 + fB_2 + 2 * fB_3 - fK_1 - fB_1 = M_1 * a_1$$

$$(K_i * i - K_x * x) + 3 * K_2(x_2 - x_1) + (B_2 + 2 * B_3) \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - K_1(x_1 - x_0) - B_1 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right) = M_1 * \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$

(60)



**Gráfico 21-3:** Circuito RL con carga R  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

$$x = x_2 - x_1$$

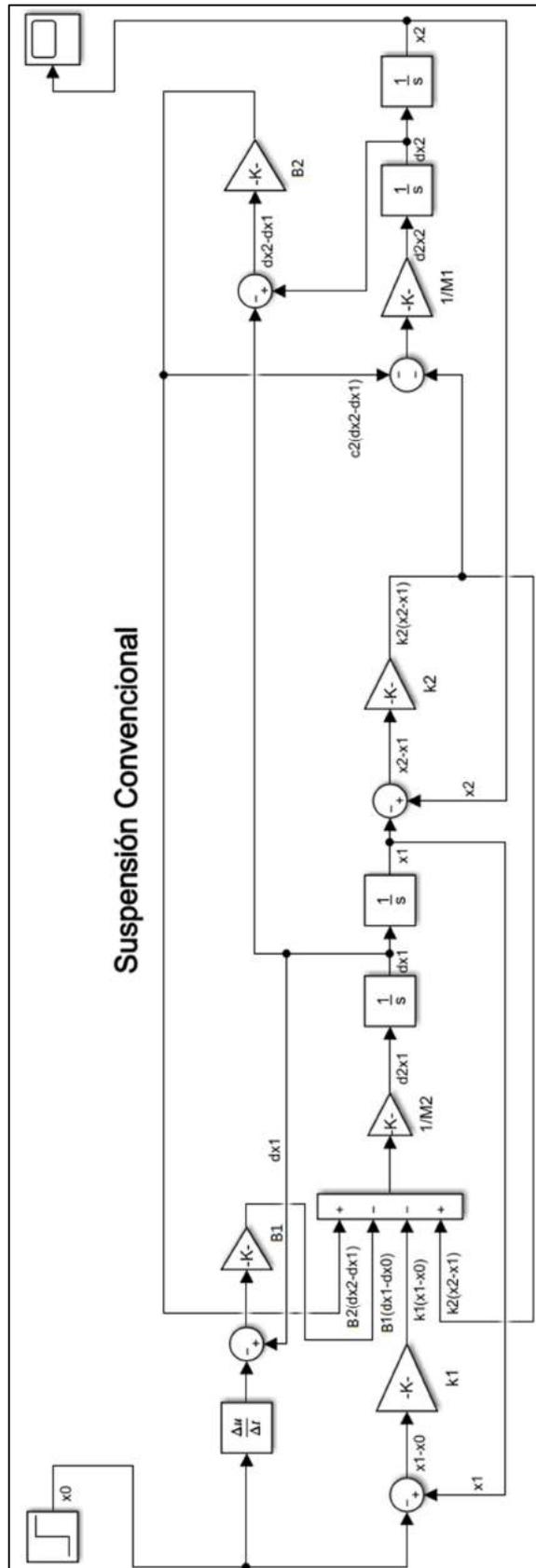
(61)

$$v = v_R + v_{RL} + v_L = R * i + RL * i + L * \frac{di}{dt}$$

(62)

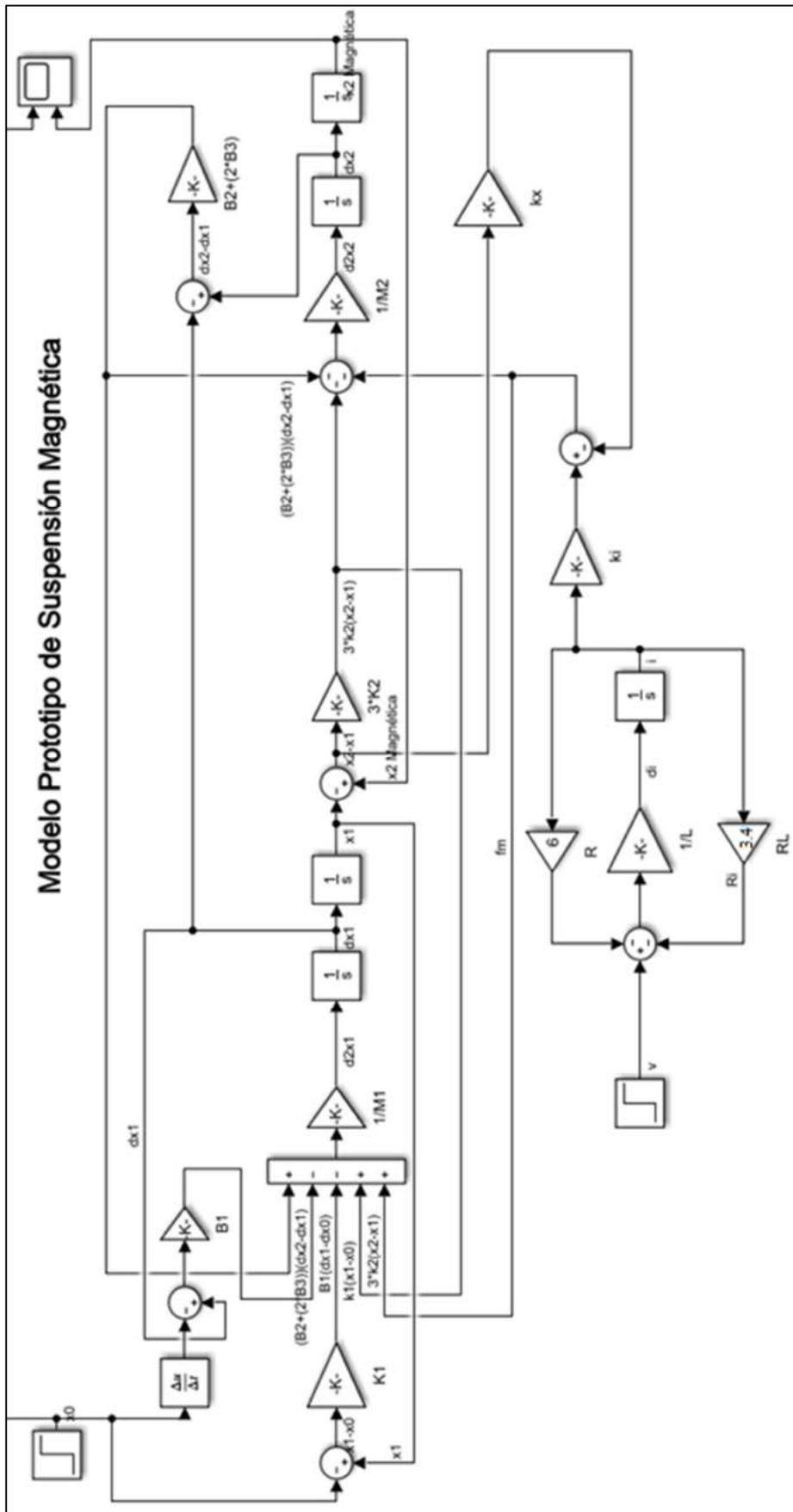
La parte magnética es similar a la sección anterior descrita.

3.8.4. *Diagramas en SIMULINK*



**Gráfico 22-3:** Diagrama suspensión convencional en Simulink  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)





**Gráfico 24-3:** Diagrama prototipo suspensión magnética en Simulink  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)

## 4. GESTIÓN DEL PROYECTO

### 4.1. Diseño del prototipo esquemático suspensión magnética

Mediante el uso de Herramientas CAD (Diseño asistido por computadora), se pueden simular entornos geométricos para adaptar el prototipo al propósito del diseño. Se utiliza el software SolidWorks, el diseño se compone de partes que simulan el comportamiento de un sistema de suspensión de dos grados de libertad, se hará uso de amortiguadores de vehículos a escala para simular el comportamiento del neumático y la amortiguación, contiene un electroimán que se podrá activar y desactivar manualmente.

#### 4.1.1. Selección y modificación de amortiguadores a escala

Para simular la condición del neumático se usó un amortiguador ECX0979, el cual ira acoplado a un generador de oscilaciones, de esta manera se simula las condiciones de transmisión de vibración por la interacción del suelo con el neumático.



**Figura 1-4:** Amortiguador a escala ECX0979

Fuente: (Horizon Hobby, 2016)

Para la parte de amortiguación se utiliza 3 amortiguadores a escala ECX1069, son menos robustos y resortes de rigidez menor en comparación a ECX0979, a partir de estos elementos se diseñó prototipo esquemático.



**Figura 2-4:** Amortiguador a escala ECX1069

Fuente: (Horizon Hobby, 2016)

Cada amortiguador se reemplazó los resortes, al ECX1069 tienen acoplado resortes de más baja rigidez, y a ECX0979 se acopló un resorte de mayor rigidez similar la condición de un neumático escalado.



**Gráfico 1-4:** Amortiguadores con cambio de resortes  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

**Tabla 1-4:** Constantes de rigidez y amortiguación

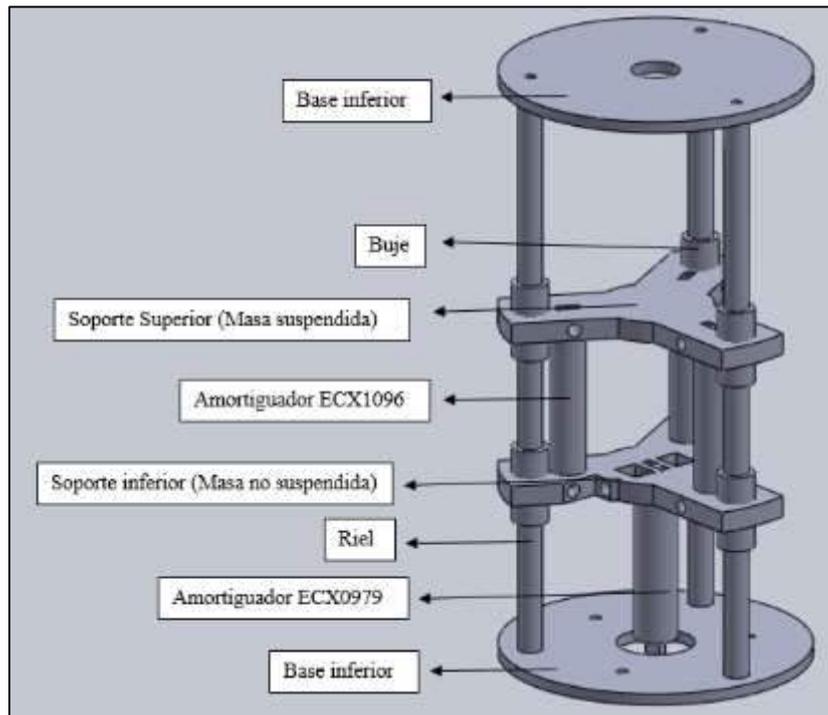
Constante de rigidez resorte $K_1$	1956.032 N/m
Constante de rigidez resorte $K_2$	64.884 N/m
Constante de rigidez resorte (Original) $K_3$	493.116 N/m
Constante de amortiguador $B_1$	55.539 N * s/m
Constante de amortiguador $B_2$	85.154 N * s/m
Amortiguador $B_2$ sin aceite $B_3$	9.603 N * s/m

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

#### 4.1.2. *Diseño de elementos mecánicos*

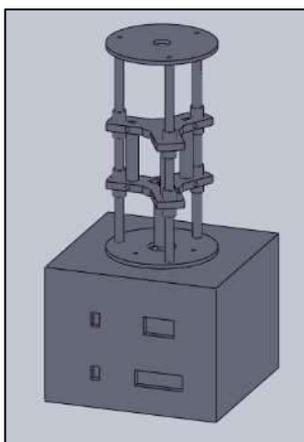
A partir de los amortiguadores seleccionados, el diseño del prototipo contiene tres rieles por donde se desplazan dos soportes que están acopladas a los rieles con bujes. Un soporte, la masa no suspendida, acoplada al oscilador por medio del amortiguador ECX0979 para simular la condición del neumático, el otro soporte se relaciona a la masa suspendida acoplada a la masa no suspendida por medio de tres amortiguadores ECX1069.

Los rieles están enlazados con dos bases, en la base inferior los rieles se acoplan mediante roscado, y en la parte superior se fijan con pernos M5.

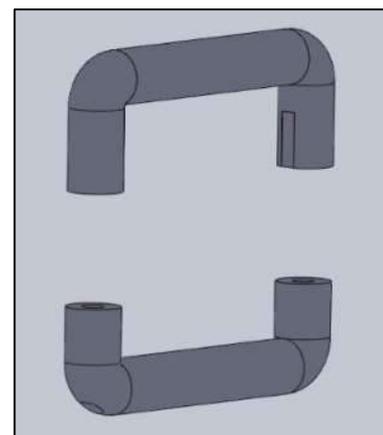


**Gráfico 2-4:** CAD prototipo esquemático suspensión magnética  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Cada soporte tiene ranuras de acople para los amortiguadores fijados con pernos M5. Para generar las oscilaciones se utiliza un motor lineal DC de seguros de vehículos acoplado al amortiguador ECX0979, para su funcionamiento se utiliza un flasher que se acciona momentáneamente y se desconecta para simular condiciones de caída después de llegar a un bache en el carretero. Los circuitos de control están contenidos en una caja porta proyectos la cual acopla en su parte superior al sistema de suspensión.



**Gráfico 3-4:** CAD Sistema de suspensión con caja  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)

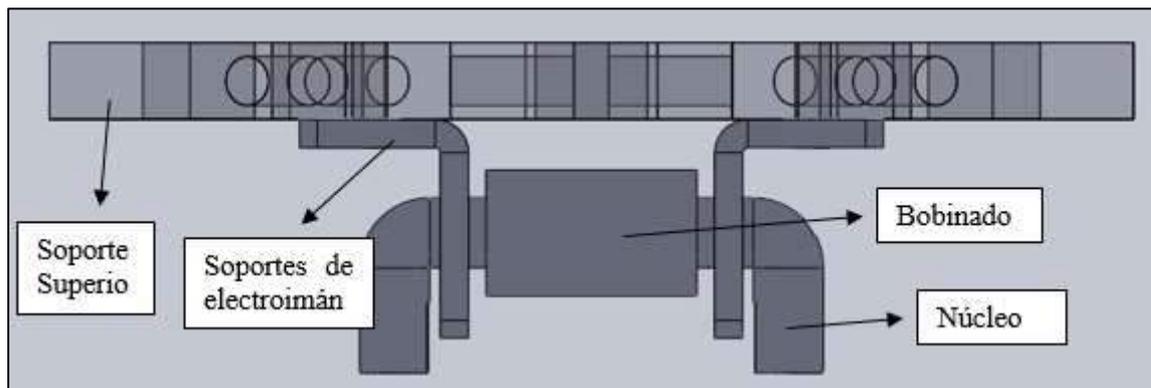


**Gráfico 4-4:** CAD Circuito magnético  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)

#### 4.1.3. *Diseño actuador electromagnético*

Para el actuador electromagnético, se utiliza como núcleo Acero 1020 de diámetro 10mm, el circuito magnético se compone de dos partes, dos piezas de acero se doblan en forma de U, una se acopla al soporte inferior y la otra al soporte superior, dejando un espacio de aire entre las piezas.

La pieza superior se añade un bobinado con cable AWG 24, y se acopla mediante al soporte superior con dos soportes más pequeños.



**Gráfico 5-4:** CAD Electroimán

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

El bobinado está conectado a un circuito magnético donde se puede regular la corriente de circulación de 0 a 3A para controlar el campo magnético y en consecuencia reducción de picos de oscilación en la masa suspendida.

#### 4.2. *Construcción del prototipo esquemático de suspensión magnética*

##### 4.2.1. *Construcción de elementos mecánicos*

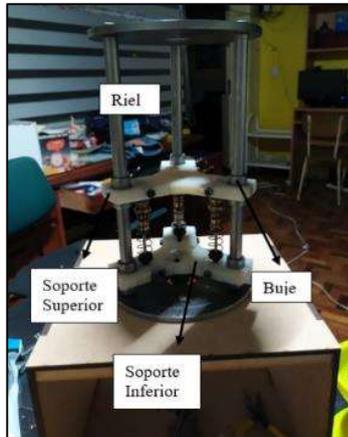
En primer lugar, se mecanizan las bases superior e inferior, estos elementos serán los encargados de alinear los rieles, por lo que se fabrican a la par. En la base inferior, se realizan roscas internas para acoplar los rieles.



**Figura 3-4:** Base superior y roscado para riel base inferior

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Con el torno se mecaniza los rieles por las cuales se desplazarán los bujes. En un extremo se realiza la rosca externa a cada riel, para acoplar a la base inferior. En el otro extremo se perfora y se realiza roscas internas para acoplar la base superior con pernos M5.



**Figura 4-4:** Ensamble soporte superior e inferior, bujes y rieles  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Figura 5-4:** Riel y roscado inferior  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Los 6 bujes dispuestos para cada soporte en su diámetro interior tienen una diferencia de 3 décimas de milímetro con los rieles asegurando un deslizamiento con mínimo rozamiento, y su diámetro exterior con mínima diferencia para acoplarse mediante ajuste a los soportes. Es necesario extrema precisión, como los soportes se acoplan en tres rieles, una mínima desviación puede provocar rozamiento que perjudica al funcionamiento del sistema de suspensión

Los soportes son fabricados de Grilon, material no ferromagnético, los campos magnéticos generados en el electroimán no deben transmitirse a través de los soportes hacia los rieles por los bujes, pondrían modificar el deslizamiento de los soportes y como consecuencia un trabajo erróneo del sistema. Estos se mecanizan a la par igual que las bases para evitar desviaciones, solo uno se diferencia en el acople central para el amortiguador ECX0979, las ranuras para el amortiguador ECX1096 son las mismas en ambos soportes.



**Figura 6-4:** Base inferior y conexión de amortiguador ECX0979  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Figura 7-4:** Pesas para masa suspendida  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

El propósito de acoplar por rosca los rieles a la base inferior, es que al girar los rieles se puede ir modificando la posición de los rieles con los bujes de los soportes, se puede buscar un ajuste ideal para que el desplazamiento tenga un casi nulo rozamiento, después del ensamble.

Como el peso de la masa suspendida es mucho mayor a la masa no suspendida, se agregó elementos que incrementen el peso del soporte superior.

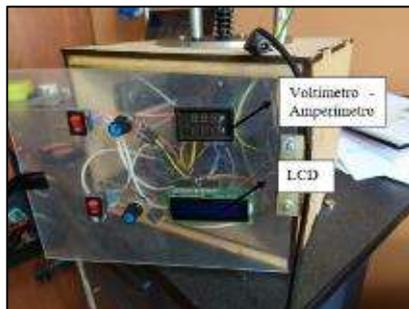
**Tabla 2-4:** Constantes de masa

Masa no suspendida $M_1$	0.3405 Kg
Masa suspendida $M_2$	0.3395 Kg
Pesa adicional $M_3$	0.1885 Kg

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

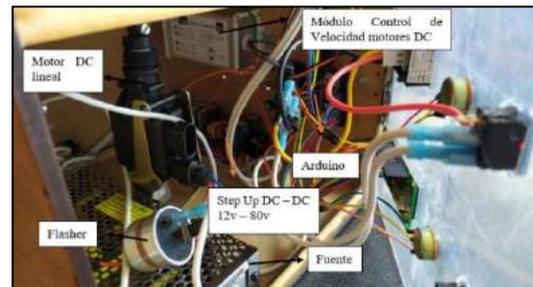
#### 4.2.2. *Caja porta proyectos*

La caja tiene dimensiones de 250x260x205, se realizó de madera, excepto la parte frontal fabricada con acrílico que contiene los elementos de control y medición (interruptores, amperímetro – voltímetro y LCD), en su parte posterior se encuentran elemento de conexión como cable de poder, elemento de protección (fusible), e interruptor general, en la parte superior se acopla el prototipo de suspensión magnética y una abertura para salida de cables de conexión al prototipo.



**Figura 8-4:** Parte frontal caja porta proyectos

Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Figura 9-4:** Elementos dentro de caja porta proyectos

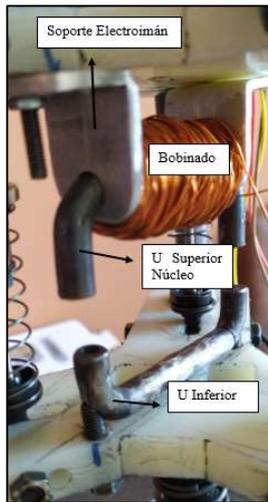
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

En el interior de la caja se almacena la fuente, sistemas de control de energía para el electroimán, el oscilador compuesto principalmente por el motor DC lineal de seguros de carro, acoplado y alineado con el amortiguador ECX0979. Y el sistema de obtención de datos con ARDUINO.

#### 4.2.3. *Construcción de bobina electromagnética*

Se mecaniza el acero en torno dejándolo en un diámetro externo de 10mm y un largo de 100mm cada una, luego de tomar las medidas, se calienta la parte el acero y con un tubo doblar el elemento, realizando el mismo procedimiento para finalizar con las dos U. Se perfora una de las dos U en sus dos extremos para acoplar en el soporte inferior, de igual manera se perfora este elemento y se ajusta con pernos M4

Los soportes del electroimán para acoplar en el soporte superior se realizan con aluminio para que no haya pérdidas del campo magnético. En el momento de perforar el soporte superior se verifica que la U superior e inferior estén alineadas correctamente. Luego se quitan los excesos en cada U para evitar que se peguen durante las oscilaciones. Por último, se realiza el bobinado el electroimán. El núcleo tiene una permeabilidad de relativa de 2000. (Teoría Electromagnética, 2019)



**Figura 10-4:** Circuito electromagnético  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

**Tabla 3-4:** Características y constantes del Electroimán

Permeabilidad relativa del núcleo, $\mu_r$	2000
Numero de vueltas, $N$	750
Permeabilidad del aire, $\mu_0$	$4\pi * 10^{-7} T * m/A$
Área sección transversal del núcleo, $S$	$5.0265 * 10^{-5} m^2$
Longitud de circuito magnético, $lm$	0.182 m

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

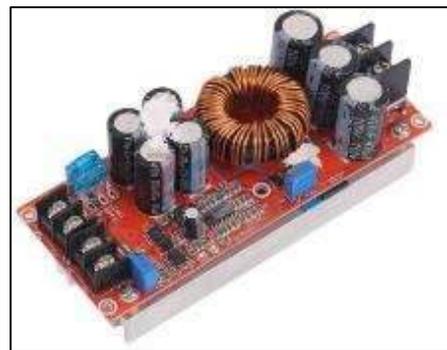
#### 4.2.4. Sistema de control de amortiguador electromagnético

##### 4.2.4.1. Circuito de control de corriente

Como fuente del circuito se utiliza una fuente conmutada de entrada 120v AC y dos salidas de 12v DC, que puede suministrar hasta 8A.



**Figura 11-4:** Fuente conmutada 12v DC 8A  
Fuente: (Aliexpress, 2015)



**Figura 12-4:** Step Up DC-DC 20A 12-83v  
Fuente: (Aliexpress, 2015)

Para la etapa de amplificación de voltaje se utiliza el Step Up DC-DC 20A 12-83v. Para el control de corriente que circula por el electroimán se hace uso del módulo controlador de velocidad de motores DC, el control se realiza por medio de un potenciómetro de 100K. El módulo controla hasta 20A y entre 9 a 60v en corriente continua.



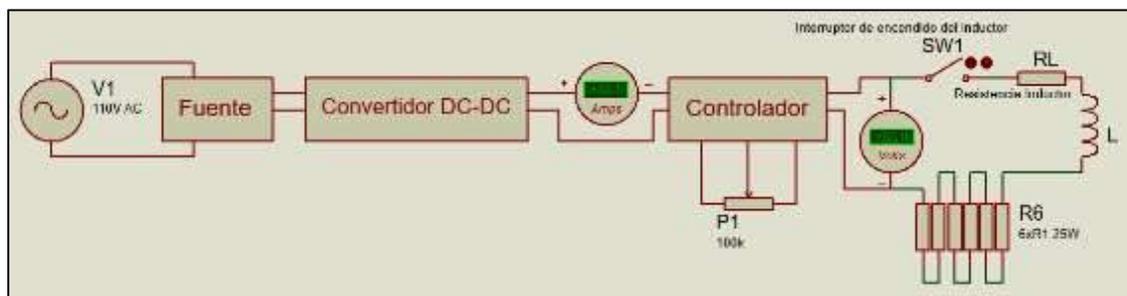
**Figura 13-4:** Motor Controller 20A 9 - 60v  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Figura 14-4:** Voltímetro – Amperímetro  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Para medición de corriente y voltaje se usa un amperímetro – voltímetro, el amperímetro está conectado a la salida del convertidor DC – DC, y el voltímetro toma mediciones a la salida del controlador.

El circuito se conforma de tres etapas, la primera la fuente, se usa una de las salidas de 12v DC que ingresan en el Step Up (etapa de conversión DC – DC) donde se va a regular la salida a 32v DC, el voltaje ingresa en el Motor Controller, el cual a su salida tiene un circuito RL, que también tiene seis resistencias de potencia de  $1\Omega$  y 25W para evitar cortocircuitos. El circuito se activa con el interruptor integrado.



**Gráfico 6-4:** Circuito de control de corriente del inductor  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

#### 4.2.4.2. Arduino y sensores para obtención de datos

Mediante el uso de Arduino y su interfaz, se programa dos diferentes sensores para la obtención de datos de comportamiento y oscilación de la masa suspendida. El primer es el sensor ultrasónico HC-SR04, su funcionamiento consiste en emitir sonido ultrasónico (cable Trigger) y captar el eco (cable Echo) al rebotar con el objeto, tiene dos cables adicionales de alimentación. Para la medición de distancia se utiliza la ecuación básica,

$$Ve = \frac{di}{t} \quad (63)$$

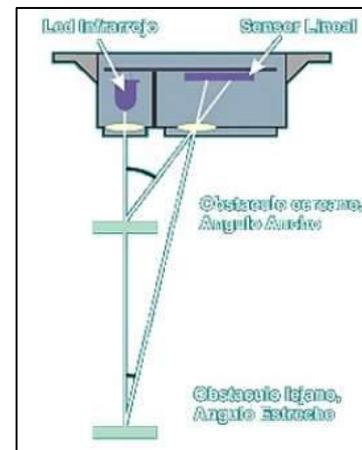
Donde la velocidad es igual a la velocidad del sonido  $340 \frac{m}{s} = 0.34 \frac{mm}{\mu s}$ , también se multiplica por dos la distancia por el recorrido del eco, entonces reformulado la ecuación,

$$d(mm) = 0.34 * t(\mu s) \quad (64)$$

Después Arduino toma mediciones cada cierto rango de tiempo, generalmente se debe aplicar un tiempo mayor a  $70 \mu s$ , por las limitaciones del sensor.



**Figura 15-4:** Sensor ultrasónico HC-SR04  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Gráfico 7-4:** Triangulación sensor SHARP GP2Y0A21  
Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2016)

El segundo es el sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21, sensor capaz de medir distancia, a partir un diodo emisor y un diodo receptor, con la obtención del dato se triangula la posición.

La onda de salida del sensor dependiendo de la distancia no es lineal, para tener datos de medición se recomienda medir distancias a partir de los  $10 \text{ cm}$ . Tiene tres cables dos de alimentación y una salida analógica para la obtención de la señal.



**Figura 16-4:** Sensor SHARP GP2Y0A21  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Figura 17-4:** LCD  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Para el rango de funcionamiento óptimo se rige por la formula,

$$z = a * d^b \tag{65}$$

Donde,

$z$ , distancia medida

$a, b$ , constantes del sensor para la conversión a distancia en cm

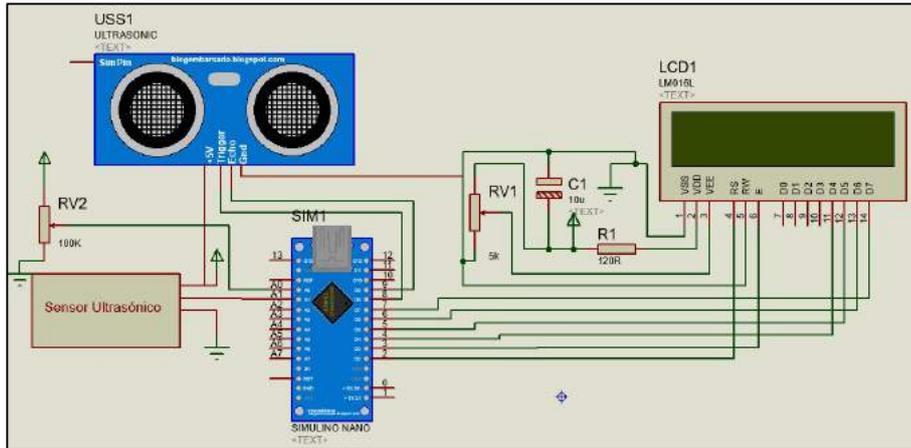
$d$ , valor de referencia del sensor en relación a la distancia

Se toma dos puntos de referencia midiendo la distancia manualmente y relacionando con el dato leído por el Arduino, tenemos  $z_1 = 15.1 \text{ cm}, d_1 = 351$  y  $z_2 = 49.9 \text{ cm}, d_2 = 128$ , reemplazando los datos en la ecuación se obtiene las constantes  $a = 175730.4235$  y  $b = -1.20624$ .

$$z = 175730.4235 * d^{-1.20624} \tag{66}$$

Incluyendo la Ecuación 64 y Ecuación 66, se incluyen dentro del algoritmo de control de Arduino para la obtención de datos y curvas.

Se dará uso también a un LCD para mostrar el control de tiempo de muestras y distancia de los sensores. Se utiliza el Arduino Nano para procesamiento de datos, control de sensores y LCD. Se alimenta externamente para no forzar la alimentación desde el computador.



**Gráfico 8-4:** Circuito de conexión de Arduino con Sensores y LCD  
**Realizado por:** (Ramos, R, 2019)

#### 4.2.4.3. Oscilador

Para generar perturbaciones en el sistema de suspensión magnética se hace uso de un motor lineal, este actuador se utiliza inicialmente para subir y bajar los seguros de los vehículos, usando esa acción se acopla al amortiguador ECX0979 por donde se transmitirá la vibración.

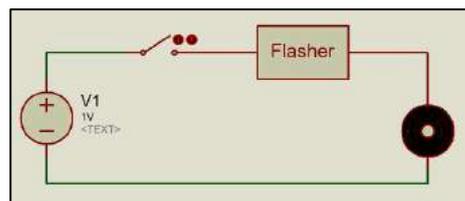


**Figura 18-4:** Motor lineal  
**Realizado por:** (Ramos, R, 2019)



**Figura 19-4:** Flasher de dos pines  
**Realizado por:** (Ramos, R, 2019)

Para accionar y desconectar (producir oscilaciones) el motor se hace uso de un flasher de dos pines, con ayuda de un interruptor se activa o desactiva el circuito, este esta alimentado por la segunda salida de 12v DC de la fuente.



**Gráfico 9-4:** Circuito Oscilador  
**Realizado por:** (Ramos, R, 2019)

4.3. Prueba 1

**Tabla 4-4:** Constantes Prueba 1

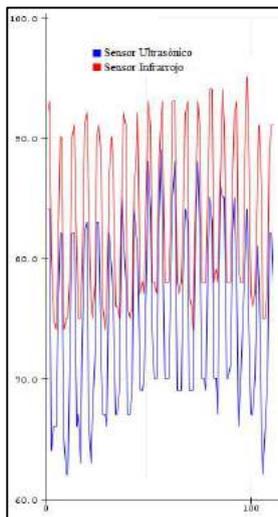
Constante de rigidez resorte $K_1$	1956.032 N/m
Constante de rigidez resorte $K_{P1} = K_2$	64.884 N/m
Constante de amortiguador $B_1$	55.539 N * s/m
Constante de amortiguador $B_2$	85.154 N * s/m
Constante de amortiguador (Sin aceite) $B_3$	9.603 N * s/m
Masa no suspendida $M_1$	0.3405 Kg
Masa suspendida $M_2$	0.3395 Kg
Pesa adicional $M_3$	0.1885 Kg
Permeabilidad relativa del núcleo, $\mu_r$	2000
Numero de vueltas, $N$	750
Permeabilidad del aire, $\mu_o$	$4\pi * 10^{-7} T * m/A$
Área sección trasversal del núcleo, $S$	$5.0265 * 10^{-5} m^2$
Longitud de circuito acero, $lm$	0.182 m
Masa suspendida $M_{P1} = M_2 + M_3$	0528 Kg
Longitud de espacio de aire $lg_{P1}$	0.00695 m

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

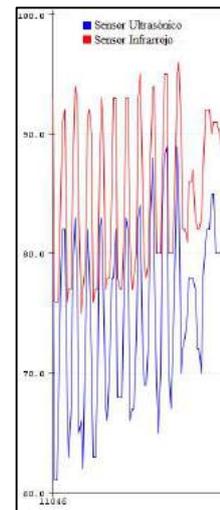
La prueba 1 se realizará iniciando el movimiento como suspensión convencional, luego se aumentará paulatinamente hasta el amperaje especificado. La toma de datos se da cada 100  $\mu s$ .

4.3.1. Prueba 1  $M_{P1}$  a 1A

En la curva descrita por los datos obtenidos podemos observar como a medida que se produce la oscilación en la masa suspendida existe solo amortiguación en un solo sentido, cuando la masa suspendida se desplaza hacia arriba, la amortiguación se debe a la atracción del bobinado por medio del entre hierro hacia la U inferior, en cambio cuando la masa suspendida se mueve hacia abajo, la atracción del actuador magnético produce una oscilación más larga, es decir no amortigua.



**Gráfico 10-4:** Resultados Prueba 1  $M_{P1}$  a 1A  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Gráfico 11-4:** Resultados Prueba 1  $M_{P1}$  a 2A  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

#### 4.3.2. Prueba 1 $M_{P1}$ a 2A

Para esta prueba se subió el amperaje paulatinamente observando que a medida que se incrementa la fuerza de atracción, existe más amortiguación en un solo sentido, en cambio cuando la masa suspendida desciende la atracción hace que se incremente la oscilación. Para las condiciones iniciales dadas para la prueba, el electroimán deja de ser eficiente alrededor de 1.8 A, debido a que la atracción es muy fuerte y sus contrapartes se adhieren por el campo magnético, dejando de amortiguar, y transmitiendo las vibraciones directamente de la masa no suspendida a la masa suspendida.

#### 4.4. Prueba 2

**Tabla 5-4:** Constantes Prueba 2

Constante de rigidez resorte $K_1$	1956.032 N/m
Constante de rigidez resorte $K_{P2} = K_3$	493.116 N/m
Constante de amortiguador $B_1$	55.539 N * s/m
Constante de amortiguador $B_2$	85.154 N * s/m
Amortiguador $B_2$ sin aceite $B_3$	9.603 N * s/m
Masa no suspendida $M_1$	0.3405 Kg
Masa suspendida $M_2$	0.3395 Kg
Pesa adicional $M_3$	0.1885 Kg
Permeabilidad relativa del núcleo, $\mu_r$	2000
Numero de vueltas, $N$	750
Permeabilidad del aire, $\mu_o$	$4\pi * 10^{-7} T * m/A$
Área sección transversal del núcleo, $S$	$5.0265 * 10^{-5} m^2$
Longitud de circuito magnético, $lm$	0.182 m

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

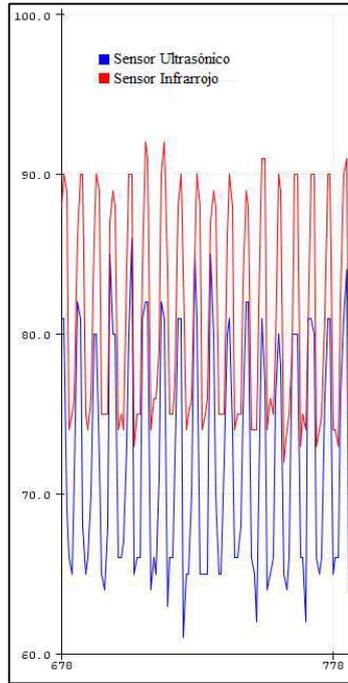
La prueba 2 se realizará variando la masa suspendida, variando el amperaje hasta observar resultados. La toma de datos se da cada 100  $\mu s$ .

##### 4.4.1. Masa suspendida $M_{P21}$

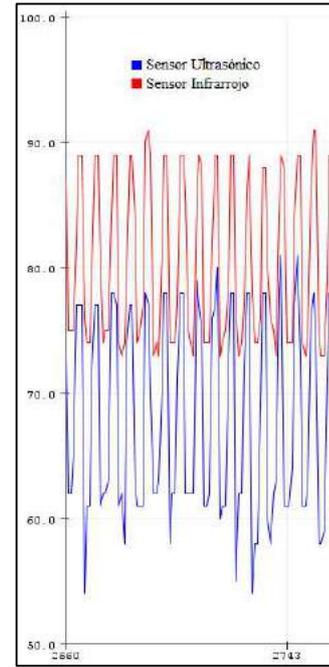
**Tabla 6-4:** Constantes Masa suspendida  $M_{P2}$

Masa suspendida $M_{P21} = M_2 + M_3$	0.528 Kg
Longitud de espacio de aire $lg_{P21}$	0.0105 m

Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Gráfico 12-4:** Resultados  
Masa suspendida  $M_{P21}$   
Realizado por: (Ramos, R, 2019)



**Gráfico 13-4:** Resultados  
Masa suspendida  $M_{P22}$   
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

#### 4.4.2. Masa suspendida $M_{P22}$

**Tabla 7-4:** Constantes Masa suspendida  $M_{P22}$

Masa suspendida $M_{P22} = M_2 + 2 * M_3$	0.7265 Kg
Longitud de espacio de aire $lg_{P22}$	0.0085 m

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Los resortes  $K_3$ , los cuales son originales del amortiguador, tienen una rigidez casi 8 veces mayor, no se puede observar amortiguación a medida que se sube el amperaje para aumentar el campo magnético, se llega a un punto donde las contra partes del electroimán se adhieren y no se puede subir más el amperaje para observar amortiguación. La fuerza del campo magnético a bajo amperaje no puede contrarrestar la fuerza en los resortes más rígidos.

#### 4.5. Prueba en Simulink de prototipo

Usando Simulink y observar el comportamiento del prototipo, se usa los datos de la Prueba 1, y se aplican constantes de corriente y voltaje referentes al prototipo.

**Tabla 8-4:** Constantes Prueba en Simulink de prototipo

Constante de rigidez resorte $K_1$	1956.032 N/m
Constante de rigidez resorte $K_2$	64.884 N/m
Constante de amortiguador $B_1$	55.539 N * s/m
Constante de amortiguador $B_2$	85.154 N * s/m
Constante de amortiguador (Sin aceite) $B_3$	9.603 N * s/m
Masa no suspendida $M_1$	0.3405 Kg
Masa suspendida $M_2 + M_3$	0.528 Kg

Permeabilidad relativa del núcleo, $\mu_r$	2000
Numero de vueltas, $N$	750
Permeabilidad del aire, $\mu_o$	$4\pi * 10^{-7} T * m/A$
Área sección trasversal del núcleo, $S$	$5.0265 * 10^{-5} m^2$
Longitud de circuito acero, $lm$	0.182 m
Longitud de espacio de aire $lg = x_0$	0.00695 m
Voltaje del circuito $v$	36.8 v
Corriente inicial $i_0$	1/1.5 A
Resistencia $R$	6 $\Omega$
Resistencia del inductor $RL$	3.4 $\Omega$
Constante $K_i$	0.7355/1.1033
Constante $K_x$	105.838/238.135
Constante magnética $Km$	$1.7765 * 10^{-5}$
Inductancia $L$	0.3627 H

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

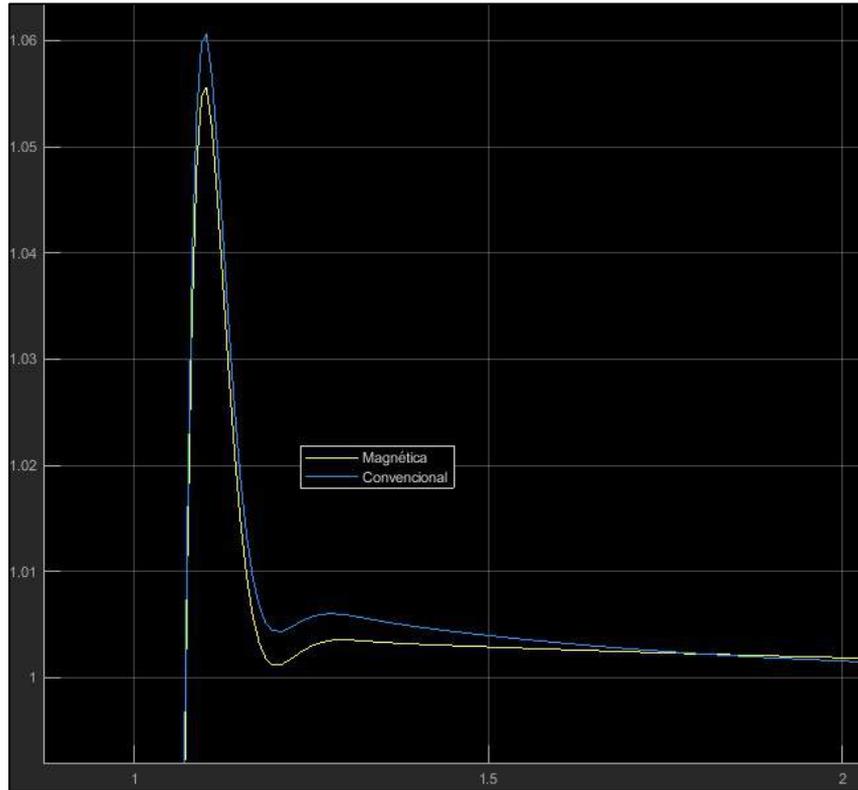
Aplicando las constantes antes dispuestas en las ecuaciones: Ecuación 59, Ecuación 60, Ecuación 61 y Ecuación 62 resultan en,

$$-(2.795 * i - 1528.298 * x) - 194.65 * (x_2 - x_1) - 104.36 * \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt}\right) = 0.528 \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad (67)$$

$$(2.795 * i - 1528.298 * x) + 194.65 * (x_2 - x_1) + 104.36 * \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt}\right) - 1956.032 * (x_1 - x_0) - 55.539 * \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt}\right) = 0.3405 * \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad (68)$$

$$x = x_2 - x_1; \quad (69)$$

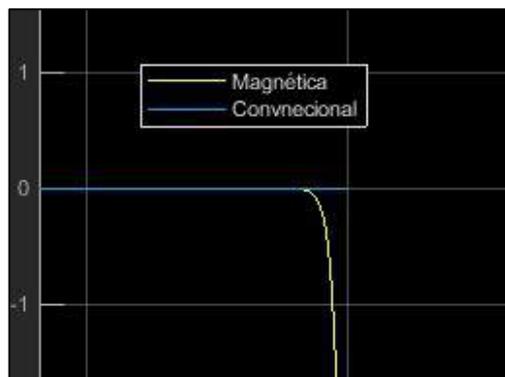
$$v = 6 * i + 3.4 * i + 0.3627 * \frac{di}{dt} \quad (70)$$



**Gráfico 14-4:** Resultados de modelo Simulink Prototipo a 1A  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Para la simulación se realiza pruebas a distintos amperajes iniciales, dependiendo de este dato, las constantes  $K_i$  y  $K_x$  cambian, igualmente que en el los datos obtenidos en el prototipo con Arduino, hay amortiguación cuando la masa suspendida asciende, pero cuando cambia de dirección y baja la distancia es mayor a la de una amortiguación convencional.

A medida que se incrementaba el amperaje inicial, la curva de amortiguación se pierde comprobando el funcionamiento del prototipo, cuando las contrapartes del electroimán se adhieren.



**Gráfico 15-4:** Curva prototipo a 2A  
 Realizado por: (Ramos, R, 2019)

#### 4.6. Prueba en Simulink en condiciones reales

**Tabla 9-4:** Constantes mecánicas Prueba en Simulink condiciones reales

Constante de rigidez resorte $K_1$	125000 N/m
Constante de rigidez resorte $K_2$	28000 N/m
Constante de amortiguador $B_1$	100 N * s/m
Constante de amortiguador $B_2$	2000 N * s/m
Masa no suspendida $M_1$	40 Kg
Masa suspendida $M_2$	250 Kg

Fuente: (Hurel et al, 2017, pp.1-4)

**Tabla 10-4:** Constantes electromagnéticas Prueba en Simulink condiciones reales

Permeabilidad relativa del núcleo, $\mu_r$	2000
Numero de vueltas, $N$	2000
Permeabilidad del aire, $\mu_o$	$4\pi * 10^{-7} T * m/A$
Área sección transversal del núcleo, $S$	0.1963 m <sup>2</sup>
Longitud de circuito acero, $lm$	0.2 m
Longitud de espacio de aire $lg = x_0$	0.1 m
Voltaje del circuito $v$	150 v
Corriente inicial $i_0$	1.5 A
Resistencia del inductor $RL$	100 $\Omega$
Constante $K_i$	2221.2
Constante $K_x$	12851.04
Constante magnética $Km$	0.4936
Inductancia $L$	25132.74 H

Realizado por: (Ramos, R, 2019)

Aplicando las constantes antes dispuestas en las ecuaciones: Ecuación 53, Ecuación 54, Ecuación 55 y Ecuación 56 las ecuaciones resultantes son,

$$-(2221.2 * i - 12851.04 * x) - 28000 * (x_2 - x_1) - 2000 * \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) = 250 * \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad (71)$$

$$(2221.2 * i - 12851.04 * x) + 28000 * (x_2 - x_1) - 125000 * (x_1 - x_0) + 2000 * \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - 100 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right) = 40 * \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad (72)$$

$$x = x_2 - x_1 \quad (73)$$

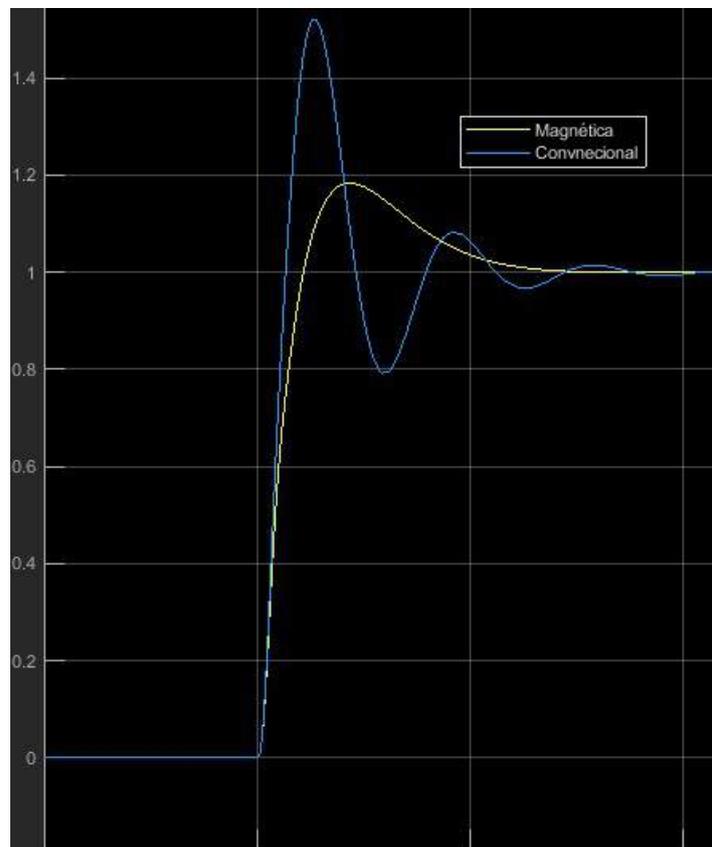
$$v = 100 * i + 25132.74 * \frac{di}{dt} \tag{74}$$

Y a la Ecuación 51 y Ecuación 52, de la amortiguación convencional, las cuales resultan con las constantes en,

$$-28000 * (x_2 - x_1) - 2000 * \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) = 250 * \frac{d^2 x_2}{dt^2} \tag{75}$$

$$28000 * (x_2 - x_1) - 125000 * (x_1 - x_0) + 2000 * \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - 100 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_0}{dt} \right) = 40 * \frac{d^2 x_1}{dt^2} \tag{76}$$

Con constantes reales la amortiguación magnética es mucho más eficiente que la convencional, hay reducción de oscilación en los dos sentidos, a diferencia de las curvas obtenidas con los datos del prototipo, es decir, dato a escala.



**Gráfico 16-4:** Resultados de modelo Simulink con constantes reales a 2A  
Realizado por: (Ramos, R, 2019)

## CONCLUSIONES

Existen algunos estudios en el país sobre las suspensiones magnéticas en base a aceites reológicos, la selección de una suspensión magnética de fricción seca o levitación magnética se debe al casi nulo estudio que hay en el país, y las ventajas respecto a los otros tipos de suspensiones como: mantenimiento casi nulo, no se usan aceites contaminantes, es decir, es más amigable con el medio ambiente, también la facilidad de control de los campos magnéticos, con base en esto se puede crear diseños de suspensiones no solo activas, sino también semi – activas dependiendo del modelo usado y a medida que el estudio avance en otros proyectos. Las suspensiones semi – activas logran relacionar dos polos opuestos de la suspensión y amortiguación de vibraciones, el confort y la estabilidad del vehículo.

El presente prototipo solo propone demostrar la factibilidad de uso de campos magnéticos para amortiguación de vibraciones en los vehículos, por esa razón los principios del electromagnetismo usados no comprenden toda la matemática compleja de la teoría, se obvió muchos parámetros, como el comportamiento del núcleo del electroimán, descrito en la curva de histéresis de este, también se usa secciones uniformes en los elementos, y campos magnéticos paralelos, para evitar más calculo. Muchas de las fórmulas descritas, serán eficientes solo en determinados casos de magnetismo.

Después de algunas simulaciones erróneas realizadas con varios modelos de suspensiones magnéticas, dada la complejidad y falta de información de suspensiones de fricción seca, se elaboró un modelo básico aplicando el principio de levitación usando los campos magnéticos que hay entre un electroimán, pasando por el entrehierro, hacia un elemento ferromagnético. Después de la simulación del modelo comparando con la suspensión convencional, los datos arrojados en Simulink, se observa con bajos amperajes se logra disminuir significativamente las vibraciones en la masa suspendida. Con los resultados obtenidos es factible la construcción del modelo para demostración.

La parte mecánica del prototipo esquemático de la suspensión, esta guiada por tres rieles por los que se desplazan dos soportes que simulan la masa suspendida y masa no suspendida de un sistema de amortiguación. Al inicio estos soportes se realizaron con acero, lo que provocó que el campo magnético se transmitiera por estos hacia los rieles, como consecuencia el desplazamiento no era óptimo. Se opto por un material no magnético (Grilón) para evitar la fuga de campo magnético. El prototipo se desarrolló a partir de amortiguadores de modelismo, que simulan las condiciones del neumático y de la suspensión convencional. Los resortes originales de los amortiguadores, tenían una rigidez muy elevada se reemplazaron por otros de rigidez menor. El acoplamiento del electroimán debe estar bien alineado con su contraparte para evitar pérdidas de campo magnético en el vacío.

Los resultados demuestran, de acuerdo al diseño, la amortiguación solo se realiza en un solo sentido, demostrando las bondades de los campos magnéticos como inhibidores de vibraciones. Pero el diseño del prototipo es ineficiente, al utilizar un amperaje muy elevado los elementos magnéticos se adhieren por la corta distancia del bobinado y su contraparte, por lo que no se puede utilizar toda la capacidad de la fuente. Por otro lado, los datos analizados del modelo en Simulink y los datos adquiridos por los sensores del prototipo, aseguran que es factible el uso del magnetismo en suspensiones de vehículos, es viable diseñar otro modelo, utilizando motores lineales para evitar la adherencia del actuador magnético descrito anteriormente, otro beneficio de este nuevo actuador es que se controla las vibraciones en ambos sentidos, se puede adquirir en el mercado, teniendo garantías de fabricación y mejor precisión. Añadiendo este elemento como actuador se puede realizar sistemas de control para suspensiones activas y semi – activas.

Los resultados obtenidos a través de Arduino, el sensor infrarrojo y el sensor de ultrasonido, no son muy eficientes, aunque se logra obtener el comportamiento del sistema de suspensión magnética para demostrar la factibilidad de los campos magnéticos, se observa perturbaciones generadas por ruido que ingresa en la toma de datos. Para una mayor precisión se necesita otro sistema de adquisición de información.

## **RECOMENDACIONES**

Construir modelos más eficientes, evitando las restricciones que se generan en el momento que el electroimán y la contraparte se adhieren. Se puede usar actuadores magnéticos que existen en el mercado, como motores servo – controlados lineales o rotativos. Con estos elementos se puede aplicar teorías de control automático para sistemas no lineales más eficientes como control PID, control borroso, control adaptativo, entre otros. Con el control más detallado, se puede aplicar conceptos de sistemas de suspensiones activas y semi – activas incluso añadiendo normas nacionales e internacionales.

Para realizar modelos más eficientes se debe tomar en cuenta todos los parámetros que influyen en el comportamiento del electromagnetismo del actuador aplicando una teoría más completa que abarque la mayoría de parámetros y para evitar errores de funcionamiento

Con la interacción de los campos magnéticos y eléctricos, se pueden diseñar modelos de recuperación de energía, es decir, transformar la energía potencial de las vibraciones transmitidas al vehículo en energía eléctrica que puede ser aprovechada para el uso del propio sistema de suspensión magnética, o en sistemas eléctricos del vehículo.

## BIBLIOGRAFÍA

**ÁGUEDA, Casado; et al. 2018.** *Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje*. 2ª ed. Madrid : Paraninfo, 2018, pp. 222-226.

**ÁGUEDA, Eduardo; et al. 2019.** *Sistemas de transmisión y frenado*. 2ª ed. Madrid : Paraninfo, 2019, pp. 222-226.

**ALAMO, Viera; & MARCOANTONIO, Víctor.** Modelación y control de un sistema de suspensión semiactiva con amortiguador magnetorreológico (Trabajo de titulación) (Tesis de postgrado). [En línea] Universidad de Piura. Piura: 2015, pp. 14-24. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/134>

**ALIEXPRESS.** Fuente conmutada 12v DC 8A y Step Up DC-DC 20A 12-83v. [En línea] 2015. [Consulta: 2019-11-25] Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/32617746384.html>.

**CHACÓN, Victor.** Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. Madrid: 2009. pp. 5-14. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10792>

**ELECTRO SCHEMATICS.** Datasheet HC-SR04. [En línea] 23 de 12 de 2016. [Consulta: 2019-12-01]. Disponible en: <https://www.electroschematics.com/hc-sr04-datasheet/>.

**FÉLIX HERRÁN, Luis Carlos.** Control de una suspensión semi-activa con un amortiguador magnetorreológico (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] Tecnológico de Monterrey. Monterrey: 2006. pp. 1-3. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: [https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/567616/DocsTec\\_4864.pdf?sequence=1](https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/567616/DocsTec_4864.pdf?sequence=1)

**GARCÍA, Alfonso.** Modelado analítico y control inteligente de un sistema de suspensión activa para un cuarto de vehículo (Trabajo de titulación) (Tesis Doctoral). [En línea] Universidad de Málaga. Málaga : 2013. pp. 1-3. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Jorge\\_Hurel/publication/281411123\\_Modelado\\_analitico\\_y\\_control\\_inteligente\\_de\\_un\\_sistema\\_de\\_suspension\\_activa\\_para\\_un\\_cuarto\\_de\\_vehiculo/links/55e60e7908aede0b5737662d/Modelado-analitico-y-control-inteligente-de-un-sistema-de-suspension-activa-para-un-cuarto-de-vehiculo.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Hurel/publication/281411123_Modelado_analitico_y_control_inteligente_de_un_sistema_de_suspension_activa_para_un_cuarto_de_vehiculo/links/55e60e7908aede0b5737662d/Modelado-analitico-y-control-inteligente-de-un-sistema-de-suspension-activa-para-un-cuarto-de-vehiculo.pdf)

**GARCÍA, Tamayo.** Construcción y Control Por Variables de Estado de Una Plataforma Didáctica de levitación Magnética (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] EPN. Quito : 2014. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7280>

**GUEVARA, Marco; & HERRERA, Bernard.** Diseño, Modelamiento, Simulación e Implementación de un Sistema de Levitación Magnética (Maglev) con un Grado de Libertad (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] Universidad de San Francisco de Quito. Quito: 2011. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/979>

**GUIJARRO, Javier; & VIVAR, Jissela.** Diseño e implementación de un levitador electromagnético basado en un control PID utilizando Labview (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] Universidad Politécnica Salesiana. Quito; 2015. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10425>

**HERRÁN, Luís; et al.** Modelo de una suspensión semi-activa con amortiguador magnetoreológico (Artículo Científico). [En línea] Tecnológico de Monterrey. Monterrey: 2006. pp. 1-4. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://amca.mx/memorias/amca2006/Art%C3%ADculos/A72AMCA06-050.pdf>

**HORIZON HOBBY.** Amortiguador a escala ECX0979 y ECX1069. [En línea] 2016. [Consulta: 2019-11-25] Disponible en: <https://www.horizonhobby.com/mega-bore-shock-set--front%3A-revenge-type-e-n-ecx0979>.

**HUREL, Jorge; et al.** Los sistemas de suspensión activa y semiactiva: una revisión (Artículo Científico). [En línea] ESPOL. Guayaquil: 2017. pp. 1-4. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791213000034>

**INEN NTE-ISO 2631-1. 2014.** *Vibración mecánica y choque evaluación de la exposición de los seres humanos a la vibración en todo el cuerpo. Parte 1: Requisitos generales (ISO 2631-1:1997, IDT.* 2014.

**MEDEROS, Javier.** Magnetismo 6 - Histéresis. [En línea] 05 de 04 de 2015. [Consulta: 2019-11-30]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=BL4F-Afugio>.

**NARVÁEZ MORALES, Julio César; & POMAQUERO VILLALOVOS, Mario Alberto.** Construcción e Implementación de un Sistema de Suspensión Neumática Inteligente en un Vehículo Tipo Automovil Mazda 323 (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] ESPOCH. Riobamba : 2011. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/939>

**NAYLAMP MECHATRONICS.** *Triangulación sensor SHARP GP2Y0A21* [blog]. 30 de 10 de 2016. [Consulta: 2019-11-26]. Disponible en: [https://naylampmechatronics.com/blog/55\\_tutorial-sensor-de-distancia-sharp.html](https://naylampmechatronics.com/blog/55_tutorial-sensor-de-distancia-sharp.html).

**Okdirio.** Intensidad y densidad de corriente eléctrica, campo magnético. [En línea] 15 de 07 de 2018. [Consulta: 2019-11-30]. Disponible en: <https://okdiario.com/ciencia/que-campo-magnetico-2611513>.

**PÁEZ, Joseph; et al.** Implementación de un sistema de levitación magnética controlado mediante MATLAB (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] ESPOL. Guayaquil : 2005. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/3093>

**PAZMIÑO, Katherine.** Obtención de microesferas de poli(estireno) con propiedades magnéticas (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] EPN. Quito: 2018. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19328>

**PROAÑO, Rubén; & DELGADO, José.** Estudio de los fluidos magnetoreológicos y su aplicación e implementación en el sistema de suspensión del vehículo Buggy fórmula FAU (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] ESPE. Latacunga: 2011. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/3809/1/T-ESPEL-0820.pdf>

**SAAVEDRA, Juan.** Estudio para la construcción, diseño e implementación de un sistema de suspensión electromagnética (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] Univesidad Internacional del Ecuador. Quito; 2012. pp. 1-23. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/742>

**SÁNCHEZ, Carola.** Montaje y prueba de resistencia de un actuador cilindrico trabajando con un fluido magnetorreologico casero (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] ESPOL. Guayaquil: 2006. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/13667>

**GLOBAL SHARP.** Datasheet Sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A21YK. [En línea] 2017, [Consulta: 2019-12-01]. Disponible en: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf).

**TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA.** Permeabilidad relativa acero 1020 [blog]. 10 de 03 de 2019. [Consulta: 2019-12-01]. Disponible en: <https://teorelectro2019.blogspot.com/2019/03/materiales-magneticos-y-permeabilidad.html>

**TULCANAZA, Jonathan Patricio.** Diseño y construcción de un sistema de amortiguador electromagnético para la suspensión de un automóvil (Trabajo de titulación) (Tesis de grado). [En línea] UTE. Quito: 2017. pp. 1. [Consulta: 2019-04-21]. Disponible en: <http://192.188.51.77/handle/123456789/14240>