

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR.

Facultad de Ingeniería Automotriz.

TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO EN MECANICA AUTOMOTRIZ.

Estudio para la construcción, diseño e implementación de un sistema de
suspensión electromagnética.

Juan David Saavedra Aldás.

Director: Ing. Miguel Granja.

2012

Quito, Ecuador

CERTIFICACIÓN

Yo, Juan David Saavedra Aldás declaro que soy el autor exclusivo de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal mía. Todos los efectos académicos y legales que se desprendan de la presente investigación serán de mi exclusiva responsabilidad.

Juan David Saavedra Aldás.

CI: 171454413-5

Yo, Miguel Granja, declaro que, en lo que yo personalmente conozco, el señor, Juan David Saavedra Aldás, es el autor exclusivo de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal suya.

Ing. Miguel Granja.

Director

AGRADECIMIENTO

Naturalmente para llegar a este punto de mi vida debí contar con la bendición divina de nuestro señor y por supuesto corrí con la suerte de tener en lo que a mí respecta los mejores padres (Pedro Saavedra y Glamis Aldás), quienes siempre me han brindado su afecto y apoyo durante cada etapa de mi vida, aun cuando no he contado con su presencia físicamente hablando debido a las circunstancias de la vida y nuestras decisiones. Mis hermanos (Javier Saavedra y Verónica Saavedra), han sido impulso fundamental para poder alcanzar las metas anheladas pues de sus bocas nunca faltaron palabras de apoyo y de sus brazos siempre recibí la fortaleza en momentos de debilidad.

Personas que recibieron a un extraño como inquilino en su casa y al pasar el tiempo despidieron de su hogar a un hijo y hermano más, personas que abrieron no solo las puertas de su casa sino las de su corazón (Gustavo Espín, Olga Aguirre e hijos).

A las personas que he mencionado les tengo mucha gratitud pues cada uno de ellos ha aportado de uno u otro modo con los aspectos relacionados a este proyecto, de la misma manera presento mi respeto y agradecimiento a cada uno de los docentes de la UIDE quienes sin egoísmo, con mucha apertura y confianza han depositado en mí sus conocimientos técnicos así como su guía en cuanto a valores humanos, mismos que fundidos como uno solo forman la base fundamental que conforma el perfil de quien a mi modo de ver tiene el derecho y el honor de poder ser un Ingeniero de la Universidad Internacional del Ecuador.

DEDICATORIA

Bien la verdad es que escribir una dedicatoria es un predicamento cuando alrededor de uno se tiene a muchas personas de buen corazón y sinceras que se han presentado como un respaldo indispensable para seguir luchando y seguir siempre para adelante.

Realmente esta dedicatoria va dirigida no solo a una persona o dos, sino que quiero hacerla general porque cuando se hacen las cosas de buena fe, es más satisfactorio llevarse los honores dentro del corazón que presentarlos al resto como muestra de bondad y de cierto modo tratando de sobresalir ante los demás, la vida me ha enseñado a ser humilde y sencillo y es por ello que he llegado hasta aquí y espero subir aún más.

Dedico mi esfuerzo, en especial, a todos aquellos que luchan cada día de sus vidas por lograr sus metas aunque la vida les presente dificultades y sientan que no hay salida, pues es de esos momentos de los que uno se fortalece y aprende que con optimismo, esfuerzo, constancia y mucha fe se puede alcanzar las estrellas más lejanas que podamos imaginar.

A todos ellos les dedico este trabajo y les digo, “jamás dejen de luchar por lo que anhelan y dediquen sus vidas a no perjudicar a su prójimo, por el contrario cada vez que las sea posible brinden una mano amiga, pues Dios a la vuelta de la esquina les mostrara muchas manos amigas predispuestas para ayudarlos”.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1

<u>ANTECEDENTES</u>	1
1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1.1. <u>Justificación teórica</u>	1
1.1.2. <u>Justificación metodológica</u>	1
1.1.3. <u>Justificación práctica</u>	1
1.1.4. <u>Justificación temporal</u>	1
1.1.5. <u>Justificación geográfica</u>	1
1.1.6. <u>Justificación del contenido</u>	1
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.2.1. <u>Objetivo General</u>	2
1.2.2. <u>Objetivos Específicos</u>	2
1.2.2.1. Objetivo específico 1	2
1.2.2.2 Objetivo específico 2	2
1.2.2.3 Objetivo específico 3	3
1.3 IMPORTANCIA	2
1.4. EL MAGNETISMO	3
1.4.1. <u>El imán</u>	3
1.4.1.1. Tipos de imán	4

1.4.1.1.1. <i>Imanes naturales</i>	4
1.4.1.1.2. <i>Imanes permanentes</i>	4
1.4.1.1.3. <i>Imanes temporales o electroimanes</i>	4
1.5. MATERIALES MAGNÉTICOS	4
1.5.1. <u>Clasificación de materiales magnéticos</u>	5
1.6. FÍSICA DEL MAGNETISMO	6
1.6.1 <u>Campos y fuerzas magnéticas</u>	6
1.6.1.1. Atracción magnética	7
1.6.1.2. Repulsión magnética	7
1.7. RELACIÓN ENTRE CAMPOS MAGNÉTICOS Y ELÉCTRICOS	8
1.7.1 <u>Teoría electromagnética</u>	8
1.7.1.1 El electroimán	9
1.8. FÍSICA DEL ELECTROMAGNETISMO	9
1.8.1. <u>Regla de la mano derecha</u>	10
1.8.2. <u>Fuerzas sobre los materiales ferromagnéticos</u>	10
1.8.3. <u>Leyes físicas</u>	12
1.8.3.1. Ley de ampere	12
1.8.3.2. Ley de Faraday	13

CAPITULO 2

<u>SISTEMAS DE SUSPENSIÓN</u>	15
2.1. TIPOS DE SUSPENSIÓN	15
2.2. CLASIFICACIÓN	15
2.2.1. <u>Suspensión convencional</u>	15
2.2.2. <u>Suspensión neumática</u>	17
2.2.3. <u>Suspensión hidroneumática</u>	18
2.2.4. <u>Suspensión Bose</u>	20
2.2.5. <u>Análisis comparativo</u>	23
2.2.5.1. Suspensión convencional	23
2.2.5.2. Suspensión Neumática	23
2.2.5.3. Sistema de suspensión hidroneumática	23
2.2.5.4. Suspensión Bose	24

CAPITULO 3

<u>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</u>	25
3.1. CÁLCULO DE FUERZAS MAGNÉTICAS	25
3.1.1. <u>Cálculo y diseño</u>	29
3.1.1.1. Ejercicios	29
3.1.1.1.1 <i>Ejercicio 01</i>	29
3.1.1.1.2 <i>Ejercicio 02</i>	31

3.1.1.1.3 <i>Ejercicio 03</i>	32
3.1.1.1.4 <i>Ejercicio 04</i>	34
3.1.1.1.5 <i>Ejercicio 05</i>	36
3.1.1.1.6 <i>Ejercicio 06</i>	37
3.1.1.1.7 <i>Ejercicio 07</i>	39
3.1.1.1.8 <i>Ejercicio 08</i>	40
3.1.1.1.9 <i>Ejercicio 09</i>	42
3.1.1.2. Ensayos	44
3.1.1.3 Resultado de los ensayos	48
3.1.1.4 Núcleos	48
3.1.1.4.1 <i>Cilindro hueco</i>	48
3.1.1.4.2 <i>Cilindro macizo</i>	48
3.1.1.4.3 <i>Carrete</i>	48
3.1.1.4.4 <i>Cilindro macizo con placas plásticas</i>	48
3.2. CIRCUITO ELECTRICO	49
3.2.1 <u>Diagrama y cálculo del circuito</u>	49
3.2.2 <u>Transformador</u>	50
3.2.3 <u>Puente Rectificador</u>	50
3.2.4 <u>Selector (interruptor)</u>	51
3.2.5 <u>Fusible</u>	51
3.2.6 <u>Electroimanes</u>	51

3.3. CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA	52
3.3.1. <u>Corte y doblado de material</u>	52
3.3.2. <u>Torneado de piezas</u>	52
3.3.3. <u>Pintura de estructura</u>	52
3.4. FABRICACIÓN DE SUSPENSIÓN	53
3.4.1. <u>Torneado de núcleos</u>	53
3.4.2. <u>Embobinado de núcleos</u>	53
3.4.3. <u>Ensamble de elementos de suspensión</u>	54
3.5. ENSAMBLADO DE ELEMENTOS	54
3.5.1. <u>Acoplamiento de piezas</u>	55

CAPITULO 4

<u>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO</u>	57
4.1. PRUEBAS	57
4.1.1. <u>Resultados de las pruebas</u>	57
4.1.2. <u>Ventajas y Desventajas</u>	58
4.1.2.1. Desventajas de los sistemas de suspensión actuales	58
4.1.2.2. Ventajas del sistema de suspensión electromagnética	59
4.1.2.3. Desventaja del sistema de suspensión electromagnética	59
4.1.2.4. Ejercicio de aplicación	60

CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1. Líneas de campo magnético	3
Figura 1.2. Dipolos magnéticos	6
Figura 1.3. Campo magnético	6
Figura 1.4. Atracción magnética	7
Figura 1.5. Repulsión magnética	7
Figura 1.6. Relación electromagnética	8
Figura 1.7. Electroimán	9
Figura 1.8. Regla de la mano derecha	10
Figura 1.9. Corriente y campo magnético	12
Figura 1.10. Solenoides	13
Figura 1.11. Fuerza electromotriz	14
Figura 2.1. Resortes	16
Figura 2.2. Amortiguadores	16
Figura 2.3. Amortiguador neumático	17
Figura 2.4. Electroválvula	18
Figura 2.5. Acumulador de presión hidroneumático	19
Figura 2.6. Unidad hidroneumática	20
Figura 2.7. Prueba de conducción	20
Figura 2.8. Suspensión Bose	21

Figura 2.9. Motor lineal Tubular	22
Figura 3.1. Electroimán	47
Figura 3.2. Transformador	50
Figura 3.3. Diodos	51
Figura 3.4. Construcción de electroimán	53
Figura 3.5. Electroimán terminado	54
Figura 3.6. Electroimanes	55
Figura 3.7. Suspensión	55
Figura 3.8. Estructura	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de materiales	5
Tabla 3.1. Calibre de cables AWG	27
Tabla 3.2. Inducción magnética sobre los materiales	28
Tabla 3.3. Datos de ensayo 1	44
Tabla 3.4. Datos de ensayo 2	44
Tabla 3.5. Datos de ensayo 3	45
Tabla 3.6. Datos de ensayo 4	45
Tabla 3.7. Datos de ensayo 5	45
Tabla 3.8. Datos de ensayo 6	46
Tabla 3.9. Datos de ensayo 7	46
Tabla 3.10. Datos de ensayo 8	47

ANEXOS

<u>Anexo 1. Diagrama de circuito</u>	66
<u>Anexo 2. Maqueta (Modelo)</u>	67
<u>Anexo 3. Estructura</u>	68
<u>Anexo 4. Suspensión</u>	69
<u>Anexo 5. Electroimanes</u>	70
<u>Anexo 6. Conjunto de suspensión</u>	71
<u>Anexo 7. Planos (Vistas)</u>	72

S I N T E S I S

El presente trabajo presenta una manera alternativa de un sistema de suspensión que se basa el principio físico del electromagnetismo.

El mencionado sistema aprovecha la repulsión magnética para suspender o levitar un peso de magnitud N dependiendo del voltaje de alimentación que reciban los electroimanes. La fuerza o la capacidad de levantar un peso de los electroimanes pueden variarse con circuito eléctrico de control, dicho circuito varía la tensión de alimentación logrando de esta manera aumentar o disminuir la fuerza de los electroimanes, así como la altura de la suspensión.

La aplicación del sistema de suspensión electromagnética supone una serie de ventajas en su aplicación, debido a que se disminuiría por mucho los costos de mantenimiento, pues al no existir una conexión mecánica no hay fatiga de los elementos de suspensión.

La flotación que se consigue con la repulsión magnética proporciona un gran confort y reduce vibraciones.

En el contenido del presente proyecto se explican los principios de funcionamiento de los fenómenos electromagnéticos, así como un poco de historia y reconocimiento de los grandes pensadores y científicos que presentaron los primeros estudios sobre esta rama de la física. Se presenta una serie de ejercicios de aplicación resueltos que proporcionan una ayuda didáctica para un mejor entendimiento del diseño y funcionamiento de los electroimanes.

FORMULARIO DE RESUMEN DE TESIS

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRAFICO DE TESIS

FACULTAD DE INGENIERIA AUTOMOTRIZ

ESCUELA DE MECÁNICA AUTOMOTRIZ

TÍTULO: Estudio para la construcción, diseño e implementación de un sistema de suspensión electromagnética en maqueta.

AUTOR(ES): Juan David Saavedra Aldás

DIRECTOR: Ing. Miguel Granja

ENTIDAD QUE AUSPICIO LA TESIS:

FINANCIAMIENTO: SI NO: **PREGADO:** **POSGRADO:**

FECHA DE ENTREGA DE TESIS: 24 01 2012
 Día **Mes** **Año**

GRADO ACADÉMICO OBTENIDO: Ingeniero Automotriz

No. Págs. 94 **No. Ref. Bibliográfica:** 15 **No. Anexos:** 7 **No. Planos:** 3

RESUMEN:

El presente trabajo presenta una manera alternativa de un sistema de suspensión que se basa el principio físico del electromagnetismo.

El mencionado sistema aprovecha la repulsión magnética para suspender o levitar un peso de magnitud N dependiendo del voltaje de alimentación que reciban los electroimanes. La fuerza o la capacidad de levantar un peso de los electroimanes

pueden variarse con circuito eléctrico de control, dicho circuito varía la tensión de alimentación logrando de esta manera aumentar o disminuir la fuerza de los electroimanes, así como la altura de la suspensión.

La aplicación del sistema de suspensión electromagnética supone una serie de ventajas en su aplicación, debido a que se disminuiría por mucho los costos de mantenimiento, pues al no existir una conexión mecánica no hay fatiga de los elementos de suspensión.

La flotación que se consigue con la repulsión magnética proporciona un gran confort y reduce vibraciones.

En el contenido del presente proyecto se explican los principios de funcionamiento de los fenómenos electromagnéticos, así como un poco de historia y reconocimiento de los grandes pensadores y científicos que presentaron los primeros estudios sobre esta rama de la física. Se presenta una serie de ejercicios de aplicación resueltos que proporcionan una ayuda didáctica para un mejor entendimiento del diseño y funcionamiento de los electroimanes.

En cuanto al aporte del presente proyecto, debo decir que ha fomentado en mi un espíritu de lucha y persistencia, así como también me ha llevado a enfocarme mucho en la investigación y autoeducación.

Adicionalmente mi proyecto brinda un aporte tecnológico que puede ser parte significativa de la optimización y uso de nuevas ideas en cuanto al desarrollo e investigación de sistemas que salen de la línea común de producción, rompe paradigmas y muestra que hay mucho por conocer y crear.

Recomiendo se retome mi trabajo y se estudie formas de obtener la energía suficiente para sustentar el sistema de forma autónoma logrando de este modo un sistema totalmente aplicable a la industria automotriz y que se dirija bajo la línea de producción de sistemas verdes, es decir siempre pensando en un desarrollo tecnológico sustentable, responsable y consiente con el medio ambiente.

PALABRAS CLAVES:

- 1.- Magnetismo
- 2.- Imán
- 3.- Electromagnetismo
- 4.- Electroimán
- 5.- Transformador
- 6.- Bobina
- 7.- Suspensión
- 8.- Muelle
- 9.- Amortiguador

MATERIA PRINCIPAL: 1. Física Aplicada

MATERIA SECUNDARIA: 1. Electricidad

TRADUCCIÓN AL INGLÉS

TITLE: Electromagnetic Suspension System. Study, design and implementation

ABSTRACT:

This paper present an alternative way of a suspension system which is based the physical principle of electromagnetism.

System takes the magnetic repulsion to suspend or levitate a weight of magnitude N depending on the operating voltage receiving electromagnets. The strength or the ability to lift a weight of electromagnets can vary with electrical circuit control, circuit that varies the voltage thereby increases or decreases the strength of electromagnets, as well as the height of the suspension.

Implementation of electromagnetic suspension system involves a number of advantages in its application, since it would diminish much maintenance costs, because there are no elements of suspension fatigue in the absence of a mechanical connection.

Floating achieved with magnetic repulsion provides great comfort and reduces vibration.

The content of this draft explains the principles of operation of the electromagnetic phenomena, as well as a little of history and recognition of the great thinkers and scientists who presented the first studies on this branch of physics. Present a series of solved application exercises that provide a didactic aid for a better understanding of the design and operation of electromagnets.

With regard to the contribution of this project, have to say that it has encouraged in my fighting spirit and persistence, as well as me led to focus much on research and self-education.

In addition my project provides a technological contribution that can be a significant part of the optimization and use of new ideas on the development and

research of system that leave the common production line, breaks paradigms and show that there is much to learn and create.

Recommend resumed my work and look into ways to obtain sufficient energy to sustain the system in an autonomous way achieving in this way a system totally applicable to the automotive industry and you refer under the production line of green systems. That is always thinking about technological development sustainable, responsible and consents to the environment.

KEYS WORDS:

1. - Magnetism
2. - Magnet
3. - Electromagnetism
4. - Electromagnet
5. - Transformer
6. - Coil
7. - Suspension
8. - Sprig
9. - Shock Absorber

FIRMAS:

.....
DIRECTOR

.....
GRADUADO

DESARROLLO

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1.1. Justificación teórica.- En la investigación es necesario referirse a conceptos fundamentales referentes al electromagnetismo, fuerza de campos magnéticos, cálculo de fuerzas y cálculo de circuitos magnéticos.

1.1.2. Justificación metodológica.- La investigación se desarrolla con el cálculo de fuerzas de campos magnéticos y la modificación de distintas variables por cuanto demanda de la utilización de métodos teóricos y empíricos como el “análisis-síntesis” y el “experimento” respectivamente.

1.1.3. Justificación práctica.- El desgaste mecánico de los sistemas de suspensión se diezmará debido a que el sistema electromagnético propuesto evita el contacto, y crea flotación en los elementos del sistema.

1.1.4. Justificación temporal.- La investigación se desarrolló en lapso de tiempo de setenta y dos semanas.

1.1.5. Justificación geográfica.- La investigación se ha desarrollado en las Islas Galápagos que es mi lugar de residencia.

1.1.6. Justificación del contenido.- El contenido es referente al diseño, construcción de la maqueta, elementos y materiales magnéticos pues el electromagnetismo es el concepto fundamental y base del desarrollo del sistema en cuestión.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo General.

Determinar mediante una maqueta si un sistema de suspensión electromagnético representa mayor confort y menor costo de mantenimiento que los sistemas convencionales de suspensión.

1.2.2. Objetivos Específicos.

1.2.2.1. Objetivo específico 1.

Determinar si hay un mejor confort debido a la flotación en el sistema de suspensión electromagnético.

1.2.2.2 Objetivo específico 2.

Analizar si se reducen vibraciones y si esta reducción disminuye el desgaste de los elementos de suspensión.

1.2.2.3 Objetivo específico 3.

Controlar la fuerza de los electroimanes mediante un circuito electrónico sencillo.

1.3 IMPORTANCIA.

El presente proyecto tiene importancia y una potencial influencia en las tendencias de desarrollo tecnológico en el campo automotriz, pues en el mismo planteo un sistema alternativo con el cual se podría generar una serie de ventajas en relación a los sistemas de suspensión actuales. Sin Embargo los costos de la aplicación de los elementos necesarios para la producción de la propuesta son muy elevados y significarían que sólo el valor del sistema de suspensión sea similar al costo de todo un vehículo de gama media.

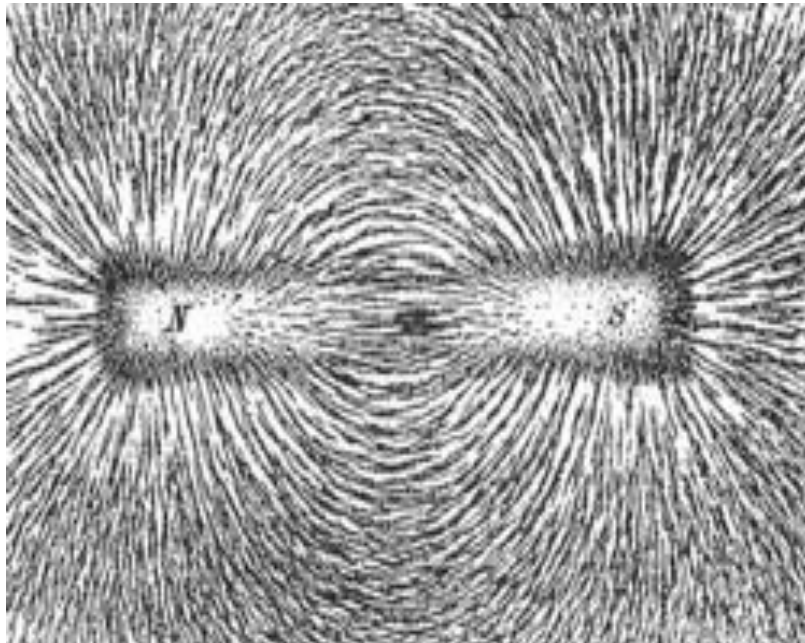


Figura 1.1. Líneas de campo magnético. Fuente: [wikipedia.org/wiki/electroimán](https://es.wikipedia.org/wiki/Electroim%C3%A1n)

1.4. EL MAGNETISMO

El magnetismo es un fenómeno físico que se presenta como la atracción o repulsión de ciertos materiales magnéticos.

1.4.1. El imán

Un imán o magneto es una porción de material férreo en el cual la mayoría de sus electrones se encuentran orientados en un solo sentido.

La cantidad de electrones orientados en el mismo sentido determinan la fuerza magnética de cada porción, es decir, mientras mayor sea la cantidad de electrones orientados hacia un mismo sentido mayor será su fuerza de atracción.

1.4.1.1. Tipos de imán

Existen diversas formas de clasificar los imanes, pues para clasificarlos se puede tomar en cuenta el material del cual está construido, su estado natural, y su tipo de funcionamiento. Sin embargo para nuestro estudio los clasificaremos tomando en cuenta su funcionamiento.

Conocemos actualmente tres tipos de imanes.

1.4.1.1.1. *Imanes naturales.*- La magnetita que se encuentra en forma natural en la tierra y puede observarse en pequeñas piedras que presentan atracción entre si.

1.4.1.1.2. *Imanes permanentes.*- Existen varios materiales con diferentes propiedades que nos permiten crear imanes permanentes pues una vez imantados conservan esa propiedad, estos pueden ser de aleaciones con carbón y actualmente se han desarrollado los denominados superimanes o imanes de neodimio desarrollados en base a aleación de distintos metales .

1.4.1.1.3. *Imanes temporales o electroimanes.*- De igual manera existen materiales como el hierro dulce (con un mínimo contenido de carbón) que mantiene esta propiedad únicamente mientras exista un campo eléctrico que lo atraviese.

1.5. MATERIALES MAGNÉTICOS

Entre todos los elementos conocidos existe una gran variedad de propiedades y ordenamiento de electrones así como distintas reacciones ante la presencia de un campo magnético. En la siguiente tabla presento una clasificación de dichos materiales.

1.5.1. Clasificación de materiales magnéticos

Tabla 1.1. Tipos de material. Fuente: Wikipedia

Tipo de Material	Características
No magnético	No afecta el paso de las líneas de Campo magnético. Ejemplo: el Vacío.
Diamagnético	Material débilmente magnético. Si se sitúa una barra magnética cerca de él, ésta lo repele. Ejemplo: Bismuto (Bi), Plata (Ag), Plomo (Pb), Agua.
Paramagnético	Presenta un magnetismo significativo. Atraído por la barra magnética. Ejemplo: Aire, Aluminio (Al), Paladio (Pd), Magneto Molecular.
Ferromagnético	Magnético por excelencia o fuertemente magnético. Atraído por la barra magnética. Paramagnético por encima de la temperatura de Curie (La temperatura de Curie del hierro metálico es aproximadamente unos 770 °C). Ejemplo: Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Acero suave.
Antiferromagnético	No magnético aún bajo acción de un campo magnético inducido. Ejemplo: Óxido de Manganeso (MnO ₂).
Ferrimagnético	Menor grado magnético que los materiales ferromagnéticos. Ejemplo: Ferrita de Hierro.
Superparamagnético	Materiales ferromagnéticos suspendidos en una matriz dieléctrica. Ejemplo: Materiales utilizados en cintas de audio y video.
Ferritas	Ferromagnético de baja conductividad eléctrica. Ejemplo: Utilizado como núcleo inductores para aplicaciones de corriente alterna.

1.6. FÍSICA DEL MAGNETISMO

Los imanes están constituidos por pequeñas partículas que didácticamente podríamos verlos como imanes diminutos conocidos como dipolos magnéticos, los cuales al orientarse hacia un mismo sentido suman sus fuerzas, generando así un campo magnético.

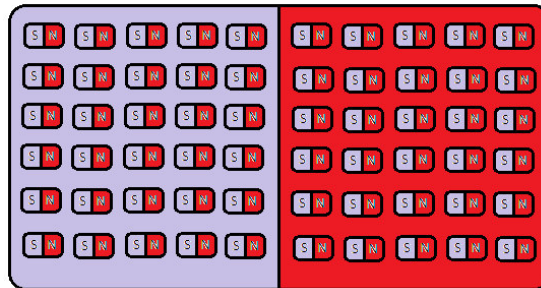


Figura 1.2. Dipolos magnéticos

1.6.1 Campos y fuerzas magnéticas

El campo magnético está definido como el área donde las líneas de fuerza fluyen desde el polo norte hacia el polo sur del imán.

Debido a que cada imán tiene su propio campo magnético, al acercar dos imanes estos campos actúan entre sí. Partiendo de esta interacción se define una regla que nos dice que los polos opuestos se atraen y los polos semejantes se repelen.

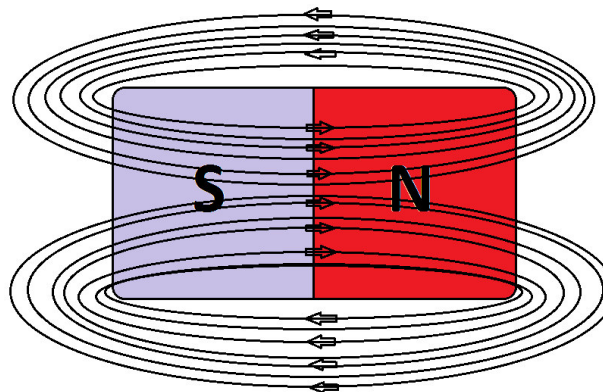


Figura 1.3. Campo magnético

1.6.1.1. Atracción magnética

Al acercar dos imanes entre sus polos opuestos estos se unen formando una sola pieza, así como estos dos imanes se hacen uno solo sus campos magnéticos se unen formando uno más grande.

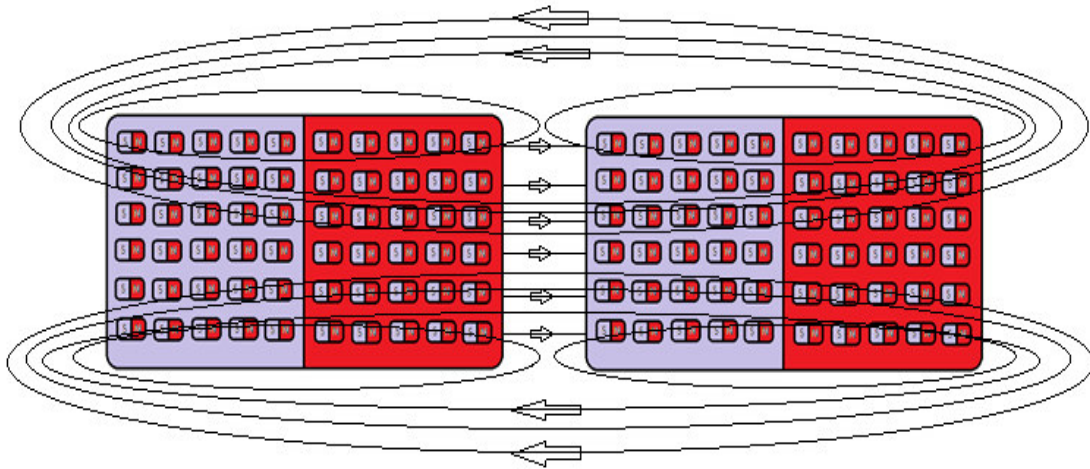


Figura 1.4. Atracción magnética

1.6.1.2. Repulsión magnética

Al acercar dos imanes entre sus polos semejantes estos no se pueden unir debido a que las líneas de campo de cada uno empujan en sentido del otro.

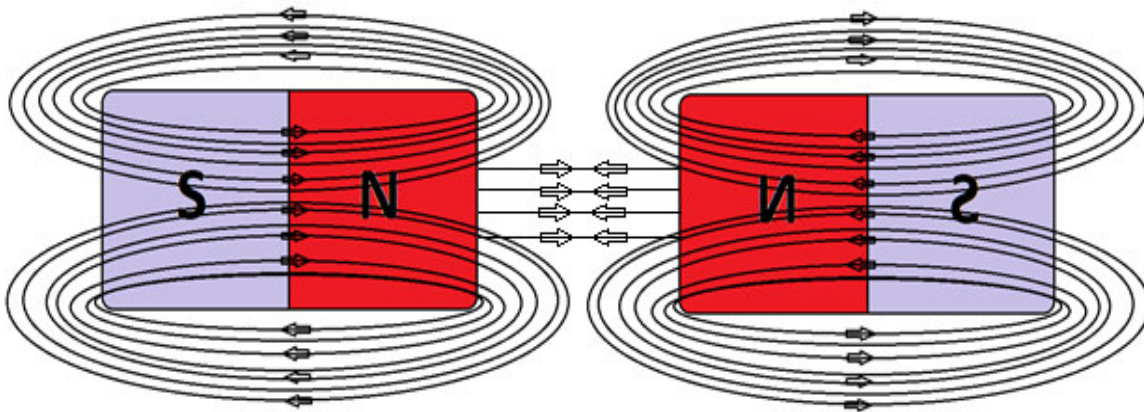


Figura 1.5. Repulsión magnética

1.7 RELACIÓN ENTRE CAMPOS MAGNÉTICOS Y ELÉCTRICOS



Figura 1.6. Relación electromagnética. Fuente: wikipedia.org/wiki/electromagnetismo (Jorge Mendoza D.)

La relación que existe entre las perturbaciones magnéticas y eléctricas en un principio se estudiaron independientemente, pero en la actualidad los dos fenómenos unidos conforman la base de funcionamiento de miles de artefactos de uso cotidiano.

Esta relación dice que un conductor que se mueve en un campo magnético corta las líneas de fuerza y se induce en él una corriente eléctrica, este estudio unificado es el electromagnetismo.

1.7.1 Teoría electromagnética

En un principio se estudiaron los fenómenos magnético y eléctrico de forma separada, pero después de un tiempo se fueron relacionando y fue James Clerk Maxwell quien los unificó en una sola teoría electromagnética.

Es bien conocido hoy en día que al cortar o desviar un campo magnético, en el conductor que realiza dicho corte se genera una diferencia de potencial, es decir se induce una corriente eléctrica, esto lo descubrió Michael Faraday.

Ahora de manera inversa si hacemos circular una corriente eléctrica a través de un conductor, alrededor de éste se crea un campo magnético. Es este el principio de funcionamiento de un electroimán y en el que basaremos el desarrollo del presente capítulo.

1.7.1.1 El electroimán

Estructuralmente es un núcleo de hierro dulce con un bobinado en su cuerpo debidamente aislado. Un electroimán es un imán no permanente, es decir que conserva fuerza magnética únicamente mientras por su bobinado circule corriente eléctrica.

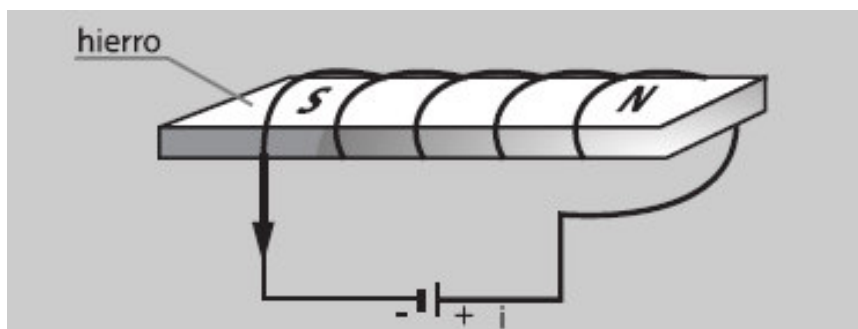


Figura 1.7. Electroimán. Fuente: wikipedia.org/wiki/electromagnetismo (Jorge Mendoza D.)

“Descubierto por William Sturgeon en 1825. El primer electroimán era una herradura envuelta por una bobina. Sturgeon logró levantar 4 kg con una herradura de 200 g embobinado por el que hizo circular la corriente de una batería.” (Fuente: wikipedia.org/wiki/Electroimán)

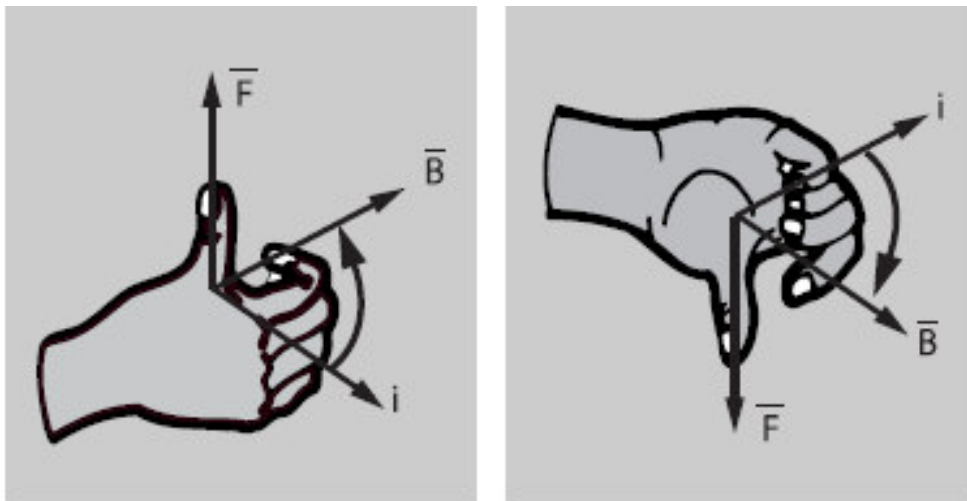
1.8 FÍSICA DEL ELECTROMAGNETISMO

Para entender cómo funciona un electroimán debemos tomar como punto de partida las líneas de flujo magnético, sus fuerzas, sus variaciones, las relaciones y leyes que definen la eficiencia, las pérdidas de potencia, etc.

1.8.1 Regla de la mano derecha

El campo magnético que se genera alrededor de un conductor por el cual circula una corriente eléctrica es siempre perpendicular al flujo de corriente. Gráfica y didácticamente se explica este fenómeno mediante la regla de la mano derecha.

En la siguiente gráfica se describe dicha regla:



La corriente (I) fluyendo por un cable produce un campo magnético (B) en torno a él. El campo se orienta según la regla de la mano derecha.

Si los dedos de la mano derecha se cierran en torno a la dirección de la corriente que circula por la bobina, el pulgar indica la dirección del campo dentro de la misma. El lado del imán del que salen las líneas de campo se define como «polo norte».

Figura 1.8. Regla de la mano derecha. Fuente: Jorge Mendoza D.

1.8.2 Fuerzas sobre los materiales ferromagnéticos

La fuerza de un electroimán, se puede calcular de la siguiente manera.

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_o}$$

- F = fuerza en newtons;
- B = campo magnético en teslas;
- A = área de las caras de los polos en m^2 ;
- μ_o = permeabilidad magnética. $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ constante.

Ahora.

$$B = \frac{\mu NI}{L}$$

- N = número de vueltas del cable en torno al electroimán;
- I = corriente en amperios;
- L = longitud del circuito magnético.

Sustituyendo, se obtiene:

$$F = \frac{\mu N^2 I^2 A}{2L^2}$$

Son tan fuertes que se usan para levantar contenedores de más de 25 Toneladas.

“Para construir un electroimán fuerte, se prefiere un circuito magnético corto con una gran superficie. La mayoría de los materiales ferromagnéticos se saturan sobre 1 a 2 teslas. Esto sucede a una intensidad de campo de $H \approx 787$ amperios×vueltas/metro. Los electroimanes industriales usados para levantar peso se diseñan con las caras de ambos polos en un lado (el inferior). Eso confina las líneas de campo para maximizar el campo magnético. Es como un cilindro dentro de otro”. (Fuente: wikipedia.org/wiki/Electroimán)

1.8.3 Leyes físicas

1.8.3.1 Ley de Ampere

Esta ley nos permite calcular los campos magnéticos que se generan alrededor de un conductor en función de la corriente que circula por dicho conductor.

Dicha ley se enuncia de la siguiente forma:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

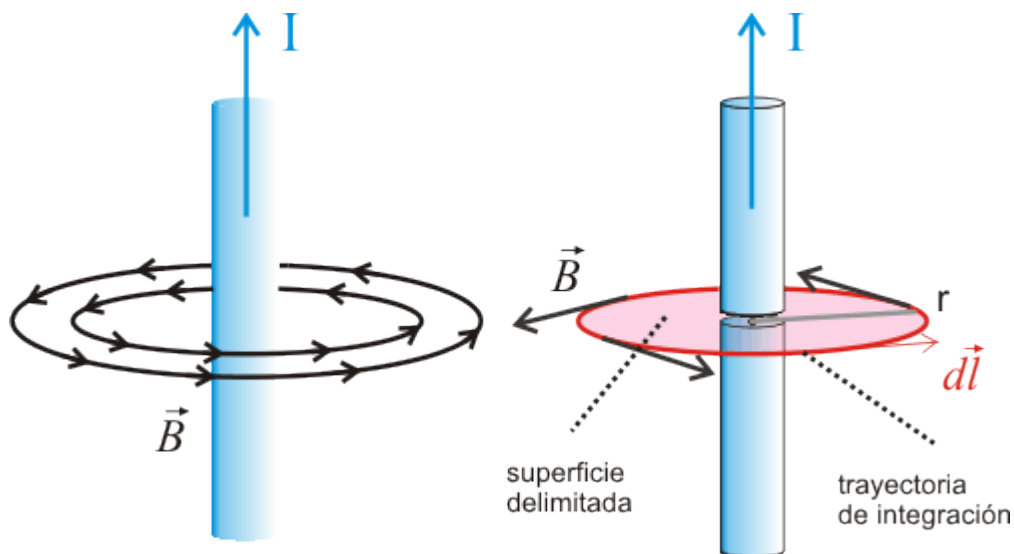
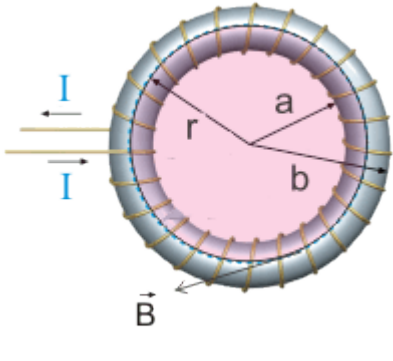
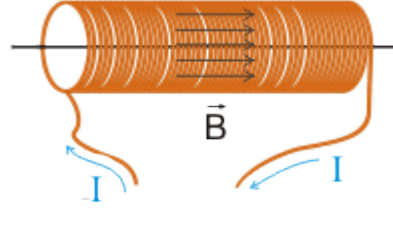


Figura 1.9. Corriente y campo magnético. Fuente: Wikipedia

De donde podemos deducir que el campo es menor mientras más se aleja del centro del conductor. Así mismo si la corriente es mayor el campo es mayor.

Una aplicación de esta ley la podemos apreciar en la siguiente gráfica un solenoide lineal y toroide.

Toroide circular	Solenoides ideal*
	
$r > a \text{ y } r < b; \quad B = 0$ $a > r > b; \quad B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}$	$B = \mu_0 n I$

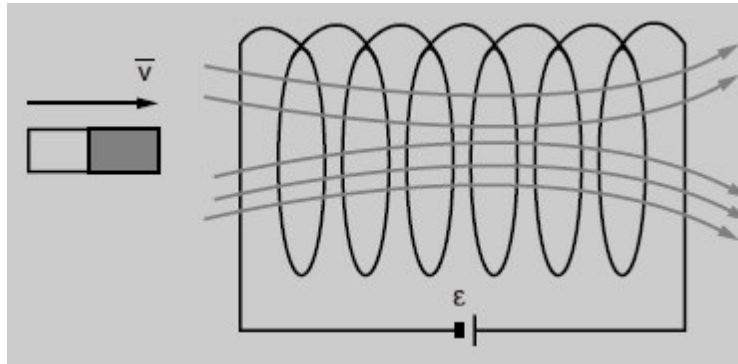
(*)Un solenoide ideal es una bobina de longitud grande cuyas espiras están muy juntas. En la expresión del campo magnético que crea, n es el número de espiras por unidad de longitud.

Figura 1.10. Solenoides. Fuente: Wikipedia

De lo expresado en el cuadro determinamos que el campo depende directamente de la longitud y número de espiras que conforman el embobinado.

1.8.3.2 Ley de Faraday

La ley de Faraday dice que la fuerza electromotriz (fem) inducida en un circuito eléctrico cerrado es proporcional al cambio de flujo del campo magnético y al número de espiras del bobinado.



N : número de espiras

Δt : intervalo de tiempo

ε = fuerza electromotriz inducida

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\Delta\phi = \phi_f - \phi_i$$

Figura 1.11. Fuerza electromotriz. Fuente: wikipedia.org/wiki/electromagnetismo

(Jorge Mendoza D.)

La ecuación anterior explica la relación de campos magnéticos y eléctricos, así como el funcionamiento de los generadores y motores eléctricos.

CAPITULO 2

SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

En la búsqueda de mayor seguridad y mejor confort a través de los años se han desarrollado distintos tipos de sistemas de suspensión, sistemas que se han ido mejorando con la aplicación de nuevas tecnologías, mismos que presento a continuación.

2.1. TIPOS DE SUSPENSIÓN

Todos los tipos de sistemas de suspensión tienen la misma misión, que es la de mantener los neumáticos pegados al asfalto y brindar comodidad, esto se logra al conectar la carrocería y los neumáticos por medio de elementos elásticos.

Dicha elasticidad se logra con la combinación de un resorte y un amortiguador, el primero es en si el medio elástico y el amortiguador cumple la función de disminuir tanto como sea posible las oscilaciones del resorte.

Existen varias formas de clasificar los sistemas de suspensión de acuerdo al tipo de conexión, al tipo de resorte, si son rígidas o independientes, etc., pero para nuestro interés a continuación presento una clasificación de sistemas de suspensión diferente.

2.2. CLASIFICACIÓN

2.2.1. Suspensión convencional

En un sistema de suspensión convencional encontramos dos elementos principales que son los resortes y los amortiguadores, estos dos en conjunto con una serie de piezas de sujeción conforman el sistema de suspensión convencional.

RESORTE. Estos pueden ser muelles helicoidales, ballestas, barra de torsión, y son los comúnmente usados en los autos gama baja y media que se producen en masa actualmente alrededor de todo el mundo.



Figura 2.1. Resortes. Fuente: km77.com

AMORTIGUADOR. Estos pueden ser de aceite o de gas.

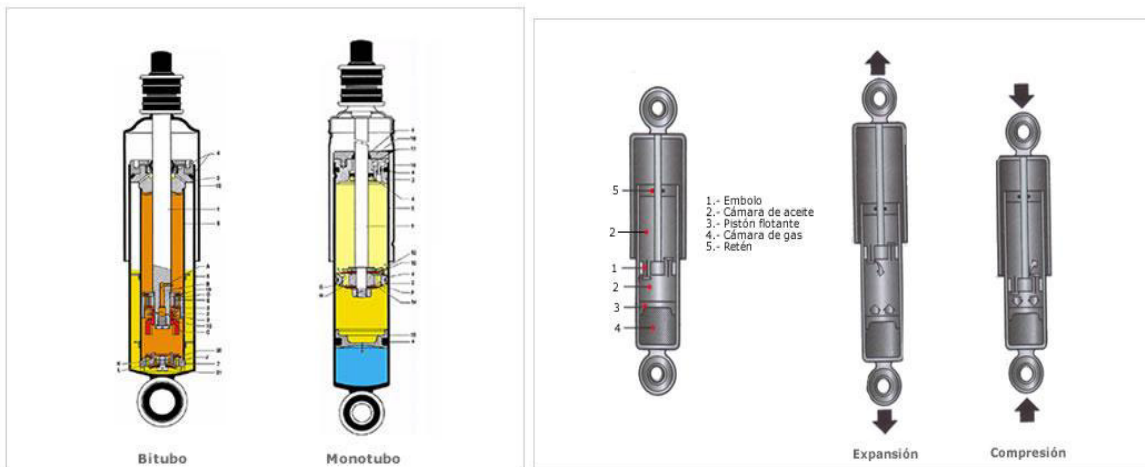


Figura 2.2. Amortiguadores. Fuente: km77.com

Estos amortiguadores se componen internamente de un conjunto de válvulas direccionales que permiten un flujo de aceite restringido entre la cámara superior e inferior, logrando así disminuir las oscilaciones del resorte complementando el sistema de suspensión.

2.2.2. Suspensión neumática

Aquí se reemplaza el muelle de metal del sistema convencional por un cojín de aire que nos permite variar la rigidez del mismo otorgando mayor control y confort.

Este sistema obviamente es más complejo y requiere de elementos de control electrónico que permitan mantener una suspensión ajustable y dinámica.

La gran diferencia está dada por el conjunto “brazo telescópico muelle amortiguador”.

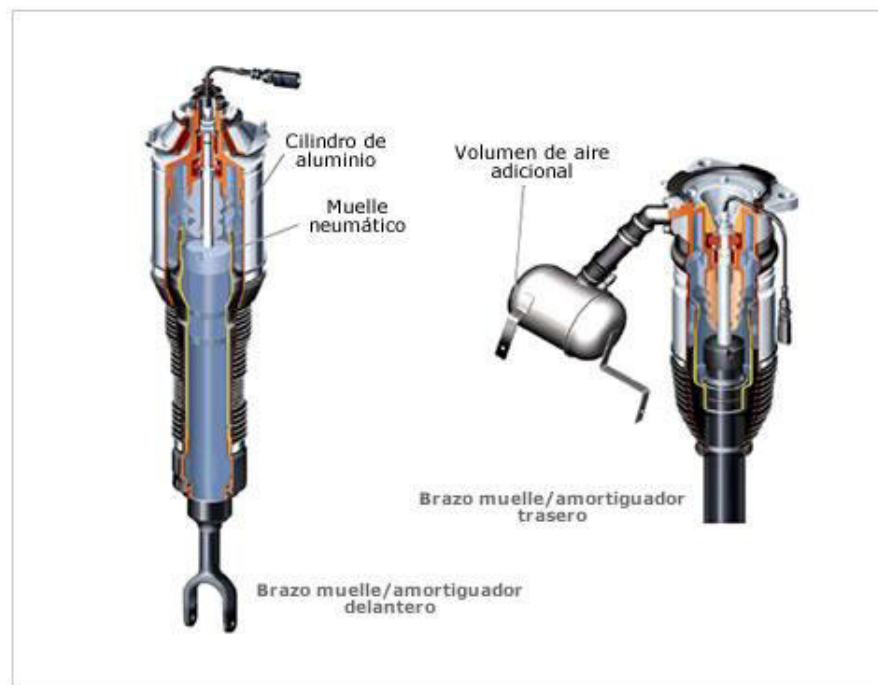


Figura 2.3. Amortiguador neumático. Fuente: km77.com

Este sistema utiliza como medio elástico aire comprimido dentro de un cojín que hace las veces del muelle helicoidal de acero del sistema convencional, y que además permite variar la altura del vehículo con respecto al suelo.

El amortiguador es en teoría igual a uno convencional, pero con la variante de que en éste se han incorporado electroválvulas que permiten mediante un control electrónico de las mismas una amortiguación más suave o más rígida.

En el gráfico 2.3 se muestra un esquema del funcionamiento de un amortiguador neumático, y su conjunto para variar la altura y la rigidez de la suspensión.

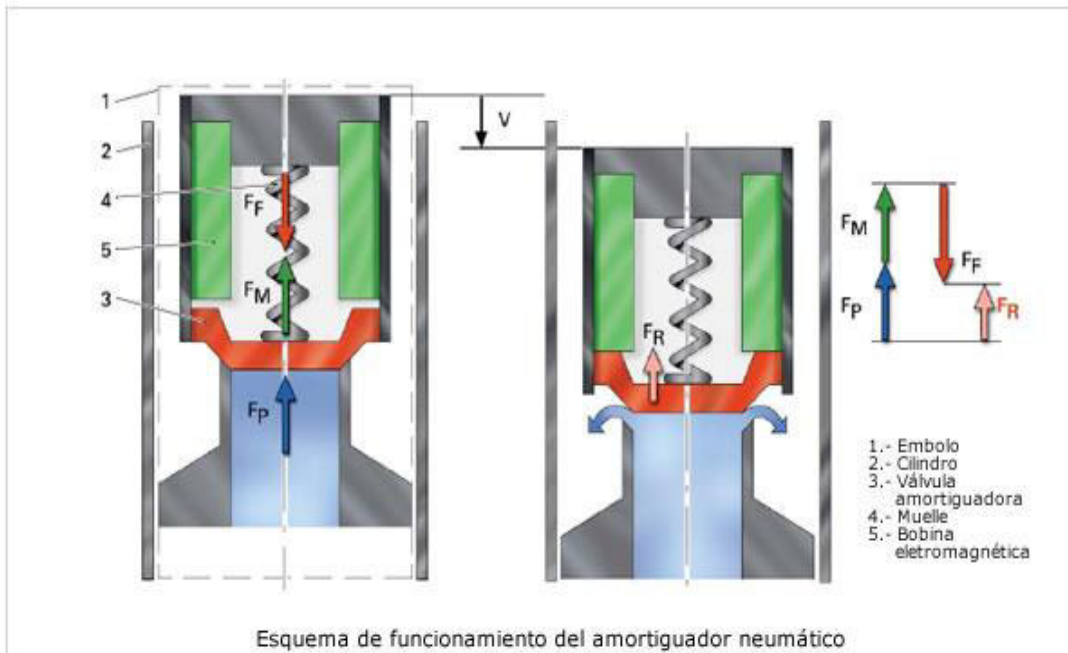


Figura 2.4. Electroválvula. Fuente: km77.com

Obviamente el aire comprimido necesario para el funcionamiento del sistema lo proporciona un compresor de aire, un conjunto de válvulas y por supuesto un acumulador de presión que son controlados y sincronizados electrónicamente por una unidad de control, misma que recibe señales de distintos sensores para lograr su cometido.

2.2.3. Suspensión hidroneumática

Claramente como su nombre lo indica este sistema crea una combinación de sistema neumático con uno hidráulico.

En este caso la parte neumática del sistema no es mas que un gas (nitrógeno) confinado en un recipiente, en el cual se aprovecha la propiedad física del gas para ser comprimido proporcionando de esta manera un medio elástico que reemplaza al muelle helicoidal o ballesta de acero.

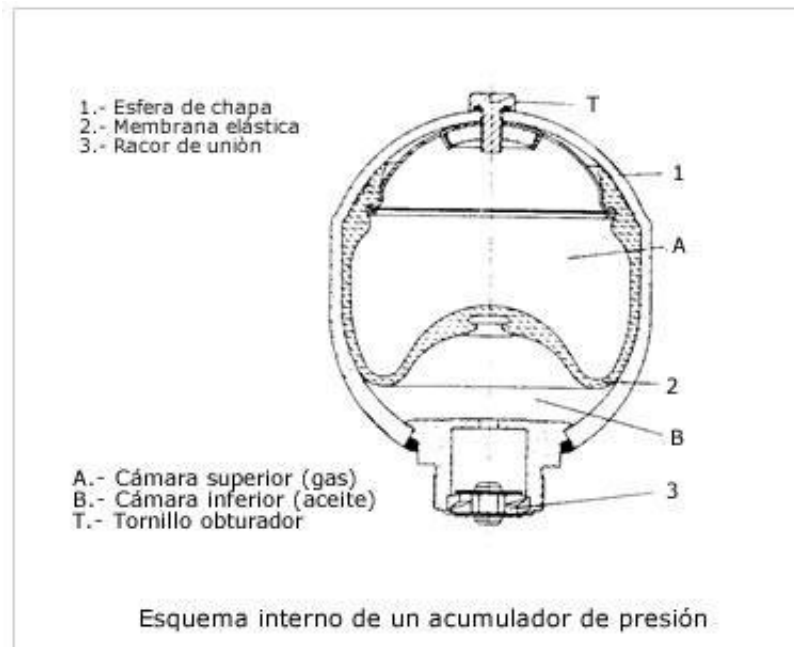


Figura 2.5. Acumulador de presión hidroneumático. Fuente: km77.com

El medio en el que se encuentra confinado el gas es una esfera de suspensión dentro de la cual existe una membrana flexible que divide al gas del sistema hidráulico.

La parte hidráulica del sistema es la gran variante aquí pues en un solo conjunto encontramos la antes mencionada esfera de suspensión y el amortiguador de suspensión junto con el cilindro.

Ahora a que me refiero con la variante, es que en este caso tenemos un circuito hidráulico de presión mismo que cuenta con una bomba y un conjunto de válvulas y elementos de control y seguridad. Todos estos elementos trabajando en conjunto logran mantener la altura del vehículo casi invariable al pasar por baches o protuberancias en la calzada, pues la presión de aceite acumulada y el dinamismo del circuito permiten compensar de inmediato dichas irregularidades.

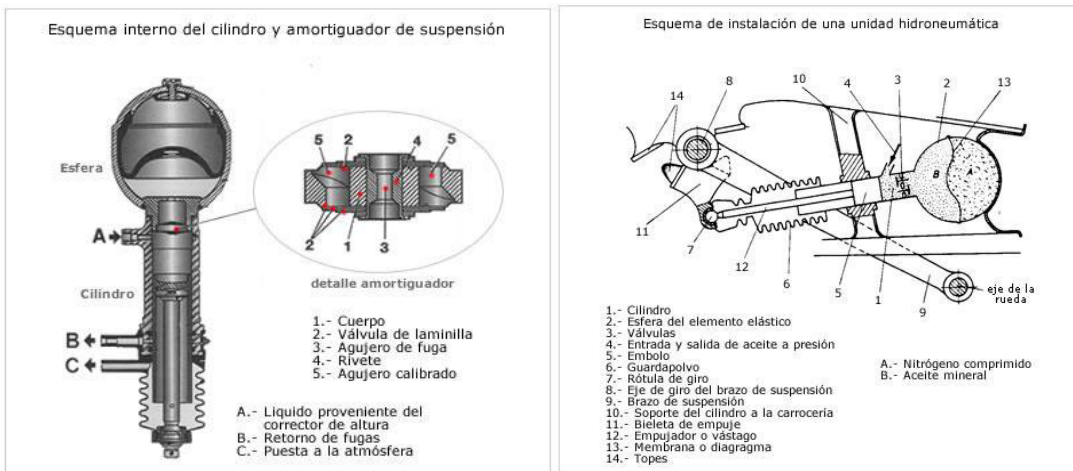


Figura 2.6. Unidad hidroneumática. Fuente: km77.com

2.2.4. Suspensión Bose

Bose ha desarrollado un sistema de suspensión dinámico, que conforma una combinación de elementos nunca antes instalados en sistemas de suspensión.

Como es de conocimiento general de los aficionados al mundo automotriz Bose es una marca de producción de sistema de audio, sin embargo durante veinticinco años han dedicado sus recursos a la investigación de un sistema de suspensión que sea lo suficientemente rápido como para volver imperceptibles las irregularidades de los caminos y a las vez brindar una total seguridad de conducción.



Figura 2.7. Prueba de conducción. Fuente: bose.com

El funcionamiento del sistema se basa en cuatro elementos: motores electromagnéticos lineales, amplificadores de potencia, algoritmos de control y velocidad de cómputo. La sumatoria coordinada de estos elementos conforma la base fundamental del sistema.

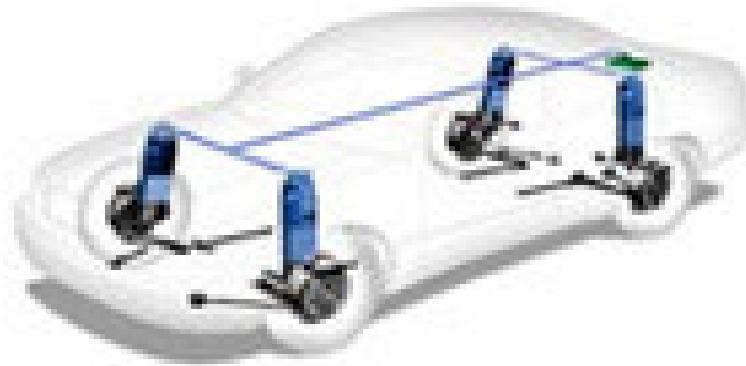


Figura 2.8. Suspensión Bose. Fuente: bose.com

El motor electromagnético lineal es el encargado de extenderse o retraerse de acuerdo a las necesidades y con la rapidez suficiente como para mantener la carrocería casi inmóvil. Este elemento recibe las señales enviadas por el módulo electrónico de control.

El mencionado elemento se compone de una barra cilíndrica interna formada por una serie de imanes permanentes ordenados con sus polos alternados, y rodeando la barra se encuentra una serie de bobinas dispuestas de tal forma que al ser activadas por un módulo electrónico de control desplazan bidireccionalmente la barra central de acuerdo a lo que se desee y al instante.



Figura 2.9. Motor Lineal Tubular. Fuente: mecmo.com

La mayor parte del peso del vehículo se encuentra soportado por resortes, y la función específica del motor eléctrico lineal es la de controlar las oscilaciones y variar la rigidez del sistema de modo que se comporte de la mejor manera ante cualquier irregularidad en el camino, así como controlar la inclinación del vehículo en las curvas y en las frenadas y arranques.

El segundo elemento a tratar es el amplificador de potencia que se encarga de proporcionar la energía eléctrica necesaria para el motor y tiene la característica de ser regenerativo es decir, que brinda corriente al motor electromagnético y que permite el flujo de corriente en sentido opuesto en determinado momento, con lo que el sistema demanda menos energía del vehículo.

Y por último el control del sistema, dicho control se lo realiza por medio de los algoritmos que se han desarrollado y se encuentran en el módulo electrónico de control, este módulo de acuerdo a las señales recibidas por los sensores determina la acción que deben tomar los motores instalados en cada rueda.

Los datos que el módulo electrónico de control debe analizar y procesar son la altura del sistema de suspensión, la velocidad del vehículo, etc. Adicionalmente el sistema cuenta con acelerómetros que ayudan a mejorar el tiempo de reacción. Gracias a esta perfecta combinación de tecnología Bose ha logrado brindar confort y seguridad al mismo tiempo y conjugado en un mismo vehículo.

2.2.5. Análisis comparativo

A continuación un análisis comparativo entre los distintos sistemas de suspensión.

Sistema	Desgaste	Dinamismo	Complejidad	Costo	Mantenimiento
Convencional	Muy propenso	XXXXXX	Poco complejo	Barato	Periódico
Neumática	Propenso	Dinámico	Complejo	Costoso	Periódico
Hidroneumática	Propenso	Dinámico	Complejo	Costoso	Periódico
Bose	Poco propenso	Muy dinámico	Muy complejo	Muy costoso	XXXXXX

2.2.5.1. Suspensión convencional.- Este tipo de suspensión es muy propenso al desgaste debido a que el resorte tiende a deformarse con el tiempo y su amortiguador sufre el desgaste de los retenedores y pierde aceite echándose a perder de esta manera la eficiencia de amortiguamiento. No es una suspensión dinámica por cuanto la rigidez del sistema es constante y no permite variaciones de altura. Este sistema es sencillo pues no cuenta con muchos elementos y no necesita de ningún tipo de control, hecho que permite que su aplicación no sea costosa, sin embargo necesita de un mantenimiento periódico.

2.2.5.2. Suspensión Neumática.- Aquí encontramos un sistema propenso al desgaste por cuanto no tiene un espiral o ballesta, sino un cojín de aire comprimido, pero su amortiguador está constituido por un conjunto de electroválvulas que pueden sufrir desgaste y perder hermeticidad. El dinamismo de esta suspensión es posible gracias a que cuenta con un módulo de control electrónico que permite variar la rigidez y la altura del sistema, sin embargo el mismo hecho de contar con un control electrónico y un conjunto “brazo telescópico muelle amortiguador” lo hace complejo y costoso. El sistema requiere de mantenimiento pero en menor frecuencia que un sistema convencional.

2.2.5.3. Sistema de suspensión hidroneumática.- El sistema es propenso al desgaste debido a que cuenta con una gran cantidad de elementos que pueden fatigarse, ya sean los retenedores y válvulas o la membrana de la cámara de acumulación de presión, la bomba hidráulica etc. Presenta un gran dinamismo pues el control electrónico de los elementos permiten un control sobre cada ruda pudiendo variar la altura, la inclinación y la rigidez del sistema, pero así mismo presenta un complejo conjunto de componentes pues se cuenta con un circuito hidráulico de alta presión y un circuito electrónico que permita el control de electroválvulas que dirijan el aceite hidráulico a cada rueda para su óptimo funcionamiento, lo que representa a su vez un alto costo en su construcción. En cuanto al mantenimiento se debe principalmente recargar con nitrógeno la cámara del acumulador de presión pues el gas tiende escapar de forma natural, debiendo darse un mantenimiento regular.

2.2.5.4. Suspensión Bose.- Este sistema es poco propenso al desgaste, sin embargo con el tiempo las fuerzas y la fricción que debe soportar el motor eléctrico lineal pueden derivarse en un juego excesivo entre el pistón y el cilindro del mismo requiriendo posteriormente de un cambio. Este tipo de sistema se presenta muy dinámico debido a que su tiempo de reacción es instantáneo, pues el control es netamente electrónico haciendo casi imperceptible las irregularidades del camino, así como la posibilidad de variar la inclinación del vehículo incluso en una curva. El gran dinamismo del sistema lo hace así mismo muy complejo pues el control electrónico lo realiza un módulo de control electrónico por medio de una serie de sensores que le permiten controlar cada motor instalado en cada una de las ruedas del vehículo, sin embargo toda esta complejidad lo hace muy muy costoso en su construcción e instalación.

CAPITULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

3.1. CÁLCULO DE FUERZAS MAGNÉTICAS

En el presente proceso de desarrollo, me parece importante realizar una serie de cálculos referentes a las fuerzas magnéticas, pues de este modo podré llegar a un diseño óptimo del sistema.

Para realizar dichos cálculos es necesario contar con las fórmulas, unidades y conversiones aplicables a este proyecto, mismas que presento a continuación:

Resistencia de un conductor.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

- $\rho = 1,70 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$.
- $l =$ longitud (m).
- $S =$ sección (m^2)

Intensidad de corriente.

$$I = V/R$$

- $I =$ corriente (A).
- $V =$ tensión (V).
- $R =$ resistencia (Ω).

Campo magnético.

$$B = \frac{\mu NI}{L}$$

- N = número de vueltas del cable en torno al electroimán;
- I = corriente en amperios;
- L = longitud del circuito magnético.

Fuerza magnética.

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_o}$$

- F = fuerza en newtons;
- B = campo magnético en teslas;
- A = área de las caras de los polos en m^2 ;
- μ_o = permeabilidad magnética. $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ constante.

Unidades.

Henry. $H = \frac{m^2 Kg}{s^2 A^2}$

Tesla. $T = \frac{kg}{As^2}$

Newton. $N = \frac{Kgm}{s^2}$

Conversión.

1N= 9.8Kgf

Tabla AWG

Tabla 3.1. Calibre de cables AWG. Fuente: eléctricas.com

A.W.G.	Diámetro (m)	Sección (m ²)	(Ω/1 km)
#1	7,35E-03	4,24E-05	
#2	6,54E-03	3,36E-05	
#3	5,83E-03	2,67E-05	
#4	5,19E-03	2,11E-05	
#5	4,62E-03	1,68E-05	
#6	4,12E-03	1,33E-05	
#7	3,67E-03	1,05E-05	
#8	3,26E-03	8,37E-06	
#9	2,91E-03	6,63E-06	
#10	2,59E-03	5,26E-06	32.772
#11	2,31E-03	4,17E-06	41.339
#12	2,05E-03	3,31E-06	5.210
#13	1,83E-03	2,62E-06	6.572
#14	1,63E-03	2,08E-06	8.284
#15	1,45E-03	1,65E-06	10.45
#16	1,29E-03	1,31E-06	13.18
#17	1,15E-03	1,04E-06	16.614
#18	1,02E-03	8,24E-07	20.948
#19	9,12E-04	6,53E-07	26.414
#20	8,12E-04	5,18E-07	33.301
#21	7,23E-04	4,11E-07	41.995
#22	6,44E-04	3,26E-07	52.953
#23	5,73E-04	2,58E-07	66.798
#24	5,11E-04	2,05E-07	84.219
#25	4,55E-04	1,63E-07	106.201
#26	4,05E-04	1,29E-07	133.891
#27	3,61E-04	1,02E-07	168.865
#28	3,21E-04	8,09E-08	212.927
#29	2,86E-04	6,42E-08	268.471
#30	2,55E-04	5,11E-08	338.583
#31	2,27E-04	4,05E-08	426.837
#32	2,02E-04	3,20E-08	538.386
#33	1,80E-04	2,54E-08	678.806
#34	1,60E-04	2,01E-08	833
#35	1,43E-04	1,61E-08	1.085.958
#36	1,27E-04	1,27E-08	1.360.892
#37	1,13E-04	1,00E-08	1.680.118
#38	1,01E-04	8,01E-09	2.127.953
#39	9,00E-05	6,36E-09	2.781.496
#40	8,00E-05	5,03E-09	3.543.307

Tabla 3.2. Inducción magnética sobre los materiales.
 Fuente: usuarios.multimania.es/udtecnologia/UD/MagnitudesMagneticas.pdf

Amperios-vueltas por cm. (Av/cm) de distintos materiales

Inducción (Teslas)	Acero fundido	Fundición de hierro ordinaria	Chapa mag. ordinaria	Chapa mag. extra superior
0,1	0,7	2	0,45	0,8
0,2	0,9	4,5	0,5	1
0,3	1	8	0,6	1,25
0,4	1,2	13	0,7	1,45
0,5	1,4	20	0,9	1,6
0,6	1,7	28	1,3	1,8
0,7	2,2	40	1,7	2
0,8	2,7	55	2,3	2,5
0,9	3,2	80	3,3	3,1
1	4	110	4,7	4
1,1	5	150	6,3	5
1,2	6,2	200	8	7
1,3	8,5	-	10,5	12
1,4	12	-	13,5	23
1,5	20	-	18	40
1,6	35	-	35	80
1,7	65	-	62	140
1,8	100	-	90	240
1,9	160	-	170	-
2	250	-	300	-

3.1.1. Cálculo y diseño

En los siguientes ejercicios presento datos con distintas magnitudes, una vez observados los resultados sabré cuáles son las variables de mayor influencia en el resultado final, es decir, en la fuerza del electroimán.

3.1.1.1 Ejercicios

3.1.1.1.1 Ejercicio 01

Datos:

D núcleo = 0,04m

L núcleo = 0,02m

N = 200 espiras

D cable = 0,0005m

l cable = ?

R cable = ?

I circuito = ?

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 200 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,126\text{m}$$

Entonces. 200 espiras x 0,126m = 25,2m

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2 \pi / 4 = (0,0005\text{m})^2 \times \pi / 4 = 1,96 \times 10^{-7} \text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (25,2\text{m} / 1,96 \times 10^{-7} \text{m}^2) = 2,19 \Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v} / 2,19 \Omega = 5,48\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 200 \times 5,48\text{A}) / 0,02\text{m} = 0,0688 \text{kg/s}^2\text{A} = 0,069\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético y se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2 \pi / 4 = (0,04\text{m})^2 \pi / 4 = 1,26 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (4,76 \times 10^{-3} \text{kg}^2/\text{s}^4\text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 = 4,78 \text{kgm/s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 4,78 \times 9,8 = 46,84\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 46 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.2 Ejercicio 02

Datos:

$$D \text{ núcleo} = 0,04\text{m}$$

$$L \text{ núcleo} = 0,04\text{m}$$

$$N = 637 \text{ espiras}$$

$$D \text{ cable} = 0,000644\text{m}$$

$$l \text{ cable} = ?$$

$$R \text{ cable} = ?$$

$$I \text{ circuito} = ?$$

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 637 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,1256\text{m}$$

$$\text{Entonces. } 637 \text{ espiras} \times 0,1256\text{m} = 80,0072\text{m}$$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,000644\text{m})^2 \times \pi/4 = 3,26 \times 10^{-7} \text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{m} (80,0072\text{m}/3,26 \times 10^{-7} \text{m}^2) = 4,18 \Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v}/4,18 \Omega = 2,87\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2 \text{A}^2 \times 637 \times 2,87\text{A})/0,04\text{m} = 0,0575 \text{kg/s}^2 \text{A} = 0,0575\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2 \pi/4 = (0,04\text{m})^2 \pi/4 = 1,26 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (3,31 \times 10^{-3} \text{kg}^2/\text{s}^4 \text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2 \text{A}^2 = 3,3041 \text{kgm/s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 3,3041 \times 9,8 = 32,38\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 33 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.3 Ejercicio 03

Datos:

$$D \text{ núcleo} = 0,04\text{m}$$

$$L \text{ núcleo} = 0,02\text{m}$$

$$N = 263 \text{ espiras}$$

$$D \text{ cable} = 0,000812\text{m}$$

$$l \text{ cable} = ?$$

$$R \text{ cable} = ?$$

$$I \text{ circuito} = ?$$

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 263 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,126\text{m}$$

$$\text{Entonces. } 263 \text{ espiras} \times 0,1256\text{m} = 33,0328\text{m}$$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,000812\text{m})^2 \times \pi/4 = 5,18 \times 10^{-7} \text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (33,0328\text{m}/5,18 \times 10^{-7} \text{m}^2) = 1,08 \Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v}/ 2,19 \Omega = 11,06\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 263 \times 11,06\text{A})/0,02\text{m} = 0,1828 \text{kg/s}^2\text{A} = 0,1828\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,04\text{m})^2\pi/4 = 1,26 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$F = B^2A/2\mu = (3.34 \times 10^{-2} \text{kg}^2/\text{s}^4 \text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg}/\text{s}^2 \text{A}^2 = 33,4 \text{kgm}/\text{s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 33,4 \times 9,8 = 327,36\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 327 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.4 *Ejercicio 04*

Datos:

D núcleo = 0,04m

L núcleo = 0,04m

N = 184 espiras

D cable = 0,00129m

l cable = ?

R cable = ?

I circuito = ?

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 184 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,126\text{m}$$

Entonces. $184 \text{ espiras} \times 0,126\text{m} = 23,1104\text{m}$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,00129\text{m})^2 \times \pi/4 = 1,31 \times 10^{-6}\text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (23,1104\text{m}/1,31 \times 10^{-6}\text{m}^2) = 0,3\Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v}/ 2,19\Omega = 39,90\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 184 \times 39,90\text{A})/0,04\text{m} = 0,2306\text{kg/s}^2\text{A} = 0,2306\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,04\text{m})^2\pi/4 = 1,256 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (5.32 \times 10^{-2} \text{kg}^2/\text{s}^4 \text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg}/\text{s}^2\text{A}^2 = 53,1951 \text{kgm}/\text{s}^2 = \text{N}$$

$1N = 9,8\text{kgf}$, entonces $53,1951 \times 9,8 = 521,31\text{kg}$.

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 521 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.5 *Ejercicio 05*

Datos:

D núcleo = 0,04m

L núcleo = 0,04m

N = 184 espiras

D cable = 0,00129m

l cable = ?

R cable = ?

I circuito = ?

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 184 espiras en el núcleo.

$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,126\text{m}$

Entonces. $184 \text{ espiras} \times 0,126\text{m} = 23,1104\text{m}$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,00129\text{m})^2 \times \pi/4 = 1,31 \times 10^{-6} \text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (23,1104\text{m}/1,31 \times 10^{-6} \text{m}^2) = 0,3 \Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v} / 2,19 \Omega = 39,90\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2 \text{A}^2 \times 184 \times 39,90\text{A}) / 0,02\text{m} = 0,4613 \text{kg/s}^2 \text{A} = 0,4613\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,04\text{m})^2\pi/4 = 1,256 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (2,13 \times 10^{-1} \text{kg}^2/\text{s}^4 \text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2 \text{A}^2 = 212,7803 \text{kgm/s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 212,7803 \times 9,8 = 2085,25\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 2085 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.6 *Ejercicio 06*

Datos:

D núcleo = 0,04m

$$L \text{ núcleo} = 0,02\text{m}$$

$$N = 598 \text{ espiras}$$

$$D \text{ cable} = 0,000812\text{m}$$

$$l \text{ cable} = ?$$

$$R \text{ cable} = ?$$

$$I \text{ circuito} = ?$$

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 200 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,126\text{m}$$

$$\text{Entonces. } 2598 \text{ espiras} \times 0,126\text{m} = 75,1088\text{m}$$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,000812\text{m})^2 \times \pi/4 = 5,18 \times 10^{-7} \text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (75,1088\text{m}/5,18 \times 10^{-7} \text{m}^2) = 2,47\Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v}/2,47\Omega = 4,86\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 598 \times 4,86\text{A})/0,02\text{m} = 0,1828 \text{kg/s}^2\text{A} = 0,1828\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,04\text{m})^2\pi/4 = 1,26 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$F = B^2A/2\mu = (3.34 \times 10^{-2} \text{kg}^2/\text{s}^4 \text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg}/\text{s}^2 \text{A}^2 = 33,41 \text{kgm}/\text{s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 4,78 \times 9,8 = 327,36\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 327 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.7 Ejercicio 07

Datos:

$$D \text{ núcleo} = 0,06\text{m}$$

$$L \text{ núcleo} = 0,01\text{m}$$

$$N = 399 \text{ espiras}$$

$$D \text{ cable} = 0,000812\text{m}$$

$$l \text{ cable} = ?$$

$$R \text{ cable} = ?$$

$$I \text{ circuito} = ?$$

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 399 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,06\text{m} \times \pi = 0,1884\text{m}$$

Entonces. $399 \text{ espiras} \times 0,1884\text{m} = 75,1716\text{m}$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,000812\text{m})^2 \times \pi/4 = 5,18 \times 10^{-7} \text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (75,1716\text{m}/5,18 \times 10^{-7} \text{m}^2) = 2,47\Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v}/2,19\Omega = 4,86\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 399 \times 4,86\text{A})/0,02\text{m} = 0,2437\text{kg/s}^2\text{A} = 0,2437\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,06\text{m})^2\pi/4 = 2,83 \times 10^{-3} \times 2 = 5,65 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (5.94 \times 10^{-2} \text{kg}^2/\text{s}^4 \text{A}^2 \times 5,65 \times 10^{-3} \text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 = 133,6155 \text{kgm/s}^2 = \text{N}$$

$1\text{N} = 9,8\text{kgf}$, entonces $133,62 \times 9,8 = 1309.43\text{kg}$.

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 1309 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.8 Ejercicio 08

Datos:

$$D \text{ núcleo} = 0,04\text{m}$$

$$L \text{ núcleo} = 0,02\text{m}$$

$$N = 200 \text{ espiras}$$

$$D \text{ cable} = 0,00129\text{m}$$

$$l \text{ cable} = ?$$

$$R \text{ cable} = ?$$

$$I \text{ circuito} = ?$$

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 200 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,04\text{m} \times \pi = 0,126\text{m}$$

$$\text{Entonces. } 200 \text{ espiras} \times 0,126\text{m} = 25,12\text{m}$$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,00129\text{m})^2 \times \pi/4 = 1,31 \times 10^{-6}\text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (25,12\text{m}/1,31 \times 10^{-6}\text{m}^2) = 0,33\Omega$$

$$I = V/R = 12\text{V} / 2,19\Omega = 36,71\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 200 \times 36,71\text{A}) / 0,02\text{m} = 0,4613\text{kg/s}^2\text{A} = 0,4613\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,04\text{m})^2\pi/4 = 1,26 \times 10^{-3} \times 2 = 2,52 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (2,13 \times 10^{-1} \text{kg}^2/\text{s}^4\text{A}^2 \times 2,52 \times 10^{-3}\text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 = 212,78 \text{kgm/s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 212,78 \times 9,8 = 2085,25\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 2085 kilogramos aproximadamente.

3.1.1.1.9 Ejercicio 09

Datos:

$$D \text{ núcleo} = 0,06\text{m}$$

$$L \text{ núcleo} = 0,01\text{m}$$

$$N = 133 \text{ espiras}$$

$$D \text{ cable} = 0,00129\text{m}$$

$$I \text{ cable} = ?$$

$$R \text{ cable} = ?$$

I circuito = ?

Primero debo calcular el cable necesario para embobinar 133 espiras en el núcleo.

$$P = D\pi = 0,06\text{m} \times \pi = 0,1884\text{m}$$

$$\text{Entonces. } 133 \text{ espiras} \times 0,1884\text{m} = 25,057\text{m}$$

Debo calcular la sección del cable.

$$S = D^2\pi/4 = (0,00129\text{m})^2 \times \pi/4 = 1,31 \times 10^{-6}\text{m}^2$$

Ahora puedo conocer el valor de resistencia y corriente.

$$R = \rho l/s = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m} (25,057\text{m}/1,31 \times 10^{-6}\text{m}^2) = 0,33\Omega$$

$$I = V/R = 12\text{v}/2,19\Omega = 36,80\text{A}$$

Campo magnético.

$$B = \mu NI/L = (4\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 \times 133 \times 36,80\text{A})/0,01\text{m} = 0,6150\text{kg/s}^2\text{A} = 0,6150\text{T}$$

Es conveniente calcular el campo magnético siempre puesto que el núcleo que es de un material ferromagnético se satura entre 1 a 2 Tesla, por cuanto crear un campo mayor sería innecesario.

$$A = D^2\pi/4 = (0,06\text{m})^2\pi/4 = 2,83 \times 10^{-3} \times 2 = 5,65 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

$$F = B^2 A / 2\mu = (3,78 \times 10^{-1} \text{kg}^2/\text{s}^4\text{A}^2 \times 5,65 \times 10^{-3}\text{m}^2) / 8\pi \times 10^{-7} \text{mkg/s}^2\text{A}^2 = 851,1213 \text{kgm/s}^2 = \text{N}$$

$$1\text{N} = 9,8\text{kgf}, \text{ entonces } 851,1213 \times 9,8 = 8340,99\text{kg}.$$

Un electroimán con las características presentadas en los datos es capaz de levantar 8341 kilogramos aproximadamente.

Los datos obtenidos en estos ejercicios propuestos son netamente teóricos y no sabré que tanto se ajustan a la realidad sino hasta realizar ensayos y comparar los datos obtenidos.

3.1.1.2. Ensayos

A continuación presento una serie de tablas con los datos obtenidos en los ensayos de diferentes electroimanes, con varios calibres de cable, diámetro y forma de núcleo.

Tabla 3.3. Datos ensayo 1

DATOS			
D núcleo	0,042	Cable enrr.	23m
L núcleo	0,04	Corriente	15A
N espiras	175	Res. Multi.	0,8 ohm
D cable	0,001291	Fuerza	73,31lb.
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 6.2, la fuerza real obtenida es de un 30% menor, es decir, durante las pruebas éste solo fue capaz de levantar 50lb aproximadamente.

Tabla 3.4. Datos de ensayo 2

DATOS			
D núcleo	0,042	Cable enrr.	33m
L núcleo	0,02	Corriente	8,57A
N espiras	251	Res. Multi.	1,4 ohm
D cable	0,000812	Fuerza	196,98lb.
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 6.3, la fuerza real obtenida es de un 55% menor, es decir, durante las pruebas éste solo fue capaz de levantar 85lb aproximadamente.

Tabla 3.5. Datos de ensayo 3

DATOS			
D núcleo	0,04	Cable enr.	33m
L núcleo	0,04	Corriente	4,8A
N espiras	251	Res. Multi.	2,5 ohm
D cable	0,000644	Fuerza	15,44lb.
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 6.4, la fuerza real obtenida es de un 6% menor, es decir, durante las pruebas éste solo fue capaz de levantar 14lb aproximadamente.

Tabla 3.6. Datos de ensayo 4

DATOS			
D núcleo	0,04	Cable enr.	80,0072m
L núcleo	0,04	Corriente	2,87A
N espiras	637	Res. Multi.	4,18 ohm
D cable	0,000644	Fuerza	18lb
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 6.5, la fuerza real obtenida es de un 10% menor, es decir, durante las pruebas éste solo fue capaz de levantar 16lb aproximadamente.

Tabla 3.7. Datos de ensayo 5

DATOS			
D núcleo	0,04	Cable enr.	33,0328m
L núcleo	0,02	Corriente	11,06A
N espiras	263	Res. Multi.	1,08 ohm
D cable	0,000812	Fuerza	180lb
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 6.6, la fuerza real obtenida es de un 10% menor, es decir, durante las pruebas éste solo fue capaz de levantar 160lb aproximadamente.

Tabla 3.8. Datos de ensayo 6

DATOS			
D núcleo	0,04	Cable enr.	23,1104m
L núcleo	0,04	Corriente	39,90A
N espiras	184	Res. Multi.	0,3 ohm
D cable	0,00129	Fuerza	285lb
Voltaje	12		

En este ensayo no logré verificar la fuerza real del electroimán, pues lo probé con máximo de 180lb.

Realizar pruebas con mayor peso se dificulta tomando en cuenta la limitación de equipo y herramientas para efectuar las mencionadas pruebas.

Tabla 3.9. Datos de ensayo 7

DATOS	Hecho y probado(se calienta)		
D núcleo	0,04	Cable enr.	75,1088m
L núcleo	0,02	Corriente	4,86A
N espiras	598	Res. Multi.	2,47 ohm
D cable	0,000812	Fuerza	180lb
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 6.8, la fuerza real obtenida es de un 20% menor, es decir, durante las pruebas éste solo fue capaz de levantar 145lb aproximadamente.

Tabla 3.10. Datos de ensayo 8

DATOS			
D núcleo	0,016	Cable enr.	41m
L núcleo	0,02	Corriente	1A
N espiras	800	Res. Multi.	12ohm
D cable	0,000644	Fuerza	5lb.
Voltaje	12		

Una vez construido un electroimán con las especificaciones de la tabla 3.10, la fuerza real obtenida es igual a la teórica, pues durante las pruebas éste fue capaz de levantar 5lb aproximadamente.

Tomando en cuenta los datos obtenido en los ensayos he decido aplicar para la maqueta un conjunto de electroimanes con las características de la tabla 3.9, pues didácticamente son los más apropiados, aunque en otros ensayos conseguí imanes muy fuertes su consumo de corriente resultó ser muy alto y el peso de los mismos no permite la levitación deseada para la aplicación de estos en el sistema propuesto.

A continuación presento un par de fotografías del primero de los ocho electroimanes que utilizaré en la maqueta.



Figura 3.1. Electroimán. Fuente: Fotografía propia

3.1.1.3. Resultado de los ensayos

Después de haber investigado, analizado y aplicado la teoría electromagnética, y después de realizar ejercicios para entender las variantes que mayormente influyen en la fuerza de un electroimán y posterior comparación de los mencionados ejercicios con su aplicación en los ensayos debo mencionar que entre el cálculo teórico y las mediciones físicas de los electroimanes existe una brecha considerable en cuanto a valores de resistencia, consumo de corriente y fuerza de aplicación. Adicionalmente optimizar la levitación resulta muy difícil debido a que al construir un electroimán mas fuerte incrementa su peso y su consumo de corriente, entrando así en círculo que no permite lograr mayor eficiencia de los electroimanes.

3.1.1.4. Núcleos

Un factor importante en el diseño es la forma del núcleo pues durante los ensayos probé varias formas:

3.1.1.4.1 *Cilindro hueco.*- El orificio en el medio del núcleo disminuye el material ferromagnético y la forma cilíndrica no permite embobinar el cable con seguridad.

3.1.1.4.2 *Cilindro macizo.*- Concentra el campo magnético, sin embargo, no permite embobinar el cable con seguridad y dificulta la sujeción.

3.1.1.4.3 *Carrete.*- Esta forma brinda seguridad para enrollar el cable, pero es demasiado pesado en relación a la fuerza del electroimán.

3.1.1.4.4 *Cilindro macizo con placas plásticas.*- Al combinar un cilindro macizo y un par de placas plásticas para darle forma de carrete, conseguí concentrar el campo magnético y enrollar con seguridad el cable.

Al final comprendí que el núcleo apropiado es un cilindro macizo para concentrar el campo magnético en el centro y placas plásticas para sostener el cable, pues cuando realicé los carretes metálicos el campo se repartía en toda la superficie de la cara del carrete y perdía concentración, a demás eran muy pesados dificultando así la levitación.

3.2. CIRCUITO ELÉCTRICO

Para poder mantener en funcionamiento y variar la fuerza de los electroimanes que conforman el sistema de suspensión, es necesario contar un circuito eléctrico que proporcione la energía necesaria. Debido al alto consumo de corriente es costoso crear un circuito de control dinámico, es decir, un circuito que pueda variar automáticamente la fuerza de los electroimanes debido a que los elementos electrónicos que podrían hacer esa función tienen un costo muy elevado.

3.2.1 Diagrama y cálculo del circuito

Cuento con una fuente que me proporcionará tensión y cuento con un variador de voltaje, sin embargo debo verificar el consumo de corriente con el valor de tensión más alto, pues de acuerdo a la mayor cantidad de corriente determinaré el calibre del cable a utilizar y la corriente que debe soportar los elementos del circuito.

He conectado los electroimanes proporcionando la mayor tensión y medí con un amperímetro una corriente máxima de 45A

Una vez que conozco el amperaje máximo de funcionamiento debo mantener un rango de seguridad que para el efecto será de un 10% por lo que todo el circuito deberá ser capaz de soportar 50 Amperios.

El diagrama del circuito de control de los electroimanes con el cual puedo variar la tensión, logrando así cambiar la altura y la capacidad para soportar pesos de distintos valores se puede apreciar en el Anexo 1.

El circuito cuenta con las siguientes partes principales:

- Transformador
- Puente rectificador
- Variador de voltaje
- Fusible
- Electroimanes

3.2.2 Transformador

El transformador es un conjunto de embobinados que aprovecha el principio de inducción electromagnética para transformar o variar el potencial, es decir, el voltaje de la fuente original.

En el caso práctico del presente proyecto tomaré como fuente inicial de alimentación la energía de la red doméstica (110VAC), y el transformador que utilizaré proporciona un voltaje de salida de hasta 50VAC.



Figura 3.2. Transformador. Fuente: Fotografía propia

3.2.3 Puente Rectificador

Ahora bien, como el transformador solo varía el voltaje y no el tipo de corriente, necesito utilizar un conjunto de diodos para construir un puente rectificador de onda completa o bien conseguir un puente rectificador ya construido que me permita convertir la corriente alterna que proporciona la red doméstica en corriente continua.

Es necesario convertir la corriente de AC a DC, porque la corriente alterna presenta una onda sinusoidal que alterna entre positivo y negativo a una frecuencia determinada lo que provocaría que los electroimanes vibren a esa frecuencia, siendo este un efecto no deseado para el proyecto.

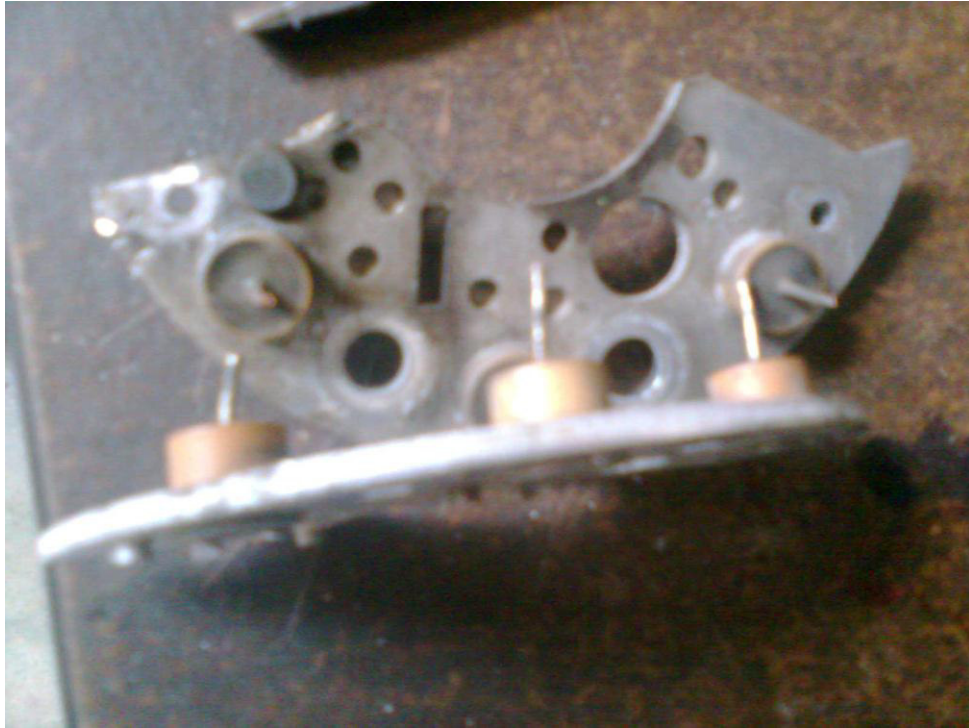


Figura 3.3. Diodos. Fuente: Fotografía propia

3.2.4 Variador de voltaje

Este variador de voltaje permite variar la tensión que proporciona el transformador, para así poder variar la fuerza de los electroimanes, cambiando así su capacidad para soportar peso y su altura.

3.2.5 Fusible

El fusible tiene la función de evitar daños en el circuito provocado por cualquier eventualidad.

3.2.6 Electroimanes

Los electroimanes son los encargados de crear la fuerza de repulsión necesaria para cumplir la función de suspensión.

3.3. CONSTRUCCIÓN DE LA MAQUETA

Antes de iniciar la fabricación de la estructura, el primer paso es el diseño.

En el diseño debo tomar en cuenta que el material utilizado sea lo suficientemente fuerte como para que la estructura se soporte y tratar de que sea lo mas liviano posible.

Pensando en lograr lo antes mencionado, la estructura se compone casi en su totalidad de aluminio.

Por supuesto he realizado el diseño de la maqueta en AutoCad. Anexo 2

3.3.1 Corte y doblado de material

Una vez realizado el diseño en AutoCad conozco las dimensiones de cada parte y puedo realizar los cortes y dobleces necesarios para la posterior soldadura y ensamblaje de cada parte.

3.3.2. Torneado de piezas

De acuerdo al diseño que he desarrollado, necesito realizar en torno la construcción de un bocín para eje de rotación de la palanca de empuje que simulara las irregularidades de un camino.

3.3.3 Pintura de estructura

Para el proceso de pintura, el primer paso es la preparación de la superficie, es decir, obtener un material libre de polvo y grasa. Posteriormente aplicaré pintura con acabado brillante. Anexo 3

3.4. FABRICACIÓN DE SUSPENSIÓN

En la fabricación de la suspensión como se muestra en el diseño he optado por un sistema de dos mesas, una superior y una inferior donde los electroimanes se sujetan. Anexo 4

3.4.1. Torneado de núcleos

Las distintas formas y dimensiones de los núcleos las he realizado en torno pues de esta manera he logrado obtener una serie de núcleos de hierro dulce que permiten que sus moléculas se reordenen y ayuden a tener un buen flujo magnético mientras circula corriente por el bobinado, y pierde magnetismo cuando se corta la corriente.

3.4.2. Embobinado de núcleos

Después de haber realizado ensayos con varias dimensiones de núcleos y cables decidí aplicar a la maqueta electroimanes con un núcleo macizo de hierro de 12mm de diámetro y una longitud de 20mm y un embobinado con 41m de cable esmaltado No. AWG 22.



Figura 3.4. Construcción de electroimán. Fuente: Fotografía propia

Aquí unas fotografías de la construcción de los electroimanes, primero tengo el núcleo al cual le adhiero un par de discos plásticos roscados para sujetarlos.



Figura 3.5 Electroimán terminado. Fuente: Fotografía propia

Seguidamente enrolló la totalidad del cable y el producto terminado puede apreciarse en el gráfico 3.5, conforme el modelado en autocad. Anexo 5

3.4.3. Ensamble de elementos de suspensión

Los elementos de la suspensión de la maqueta son la mesa inferior de suspensión con un conjunto de 4 electroimanes inferiores y la mesa superior con un conjunto de 4 electroimanes superiores que van acoplados a la estructura de soporte en la maqueta. Anexo 6.

3.5. ENSAMBLADO DE ELEMENTOS

El ensamblado consiste básicamente en unir el conjunto de electroimanes y ubicar el tendido de cables de conexión de los electroimanes, así como el transformador y el resto de elementos del circuito de control.

3.5.1 Acoplamiento de piezas

A continuación presento una serie de fotografías que muestran el proceso de construcción y ensamblaje de cada pieza que conforma la maqueta, así como una breve explicación de cada una de las mismas:

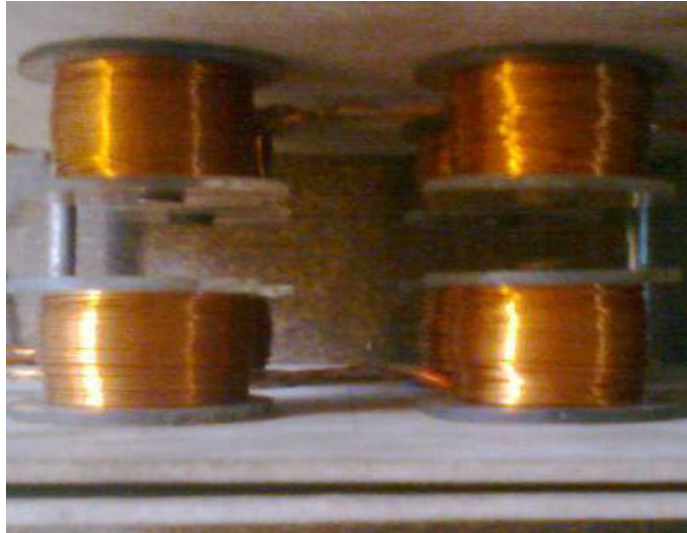


Figura 3.6. Electroimanes. Fuente: Fotografía propia

Como se aprecia en el gráfico 3.6, se encuentra acoplado formando un elemento la mesa inferior y superior del sistema de sujeción de los electroimanes.



Figura 3.7. Suspensión. Fuente: Fotografía propia

Una vez fijados los electroimanes superiores e inferiores, en sus mesas de suspensión, acoplamos las mismas a la estructura de soporte.



Figura 3.8. Estructura. Fuente: Fotografía propia

Aquí se aprecia el conjunto de suspensión, acoplado a la estructura que contiene los elementos internos, como el transformador, el rectificador, etc.

Ahora tengo terminada la maqueta. Anexo 7

CAPITULO 4

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1. PRUEBAS

Para las pruebas de funcionamiento he realizado primero una prueba individual por cada electroimán a fin de asegurar que cada uno opere sin problemas.

Finalmente activo todos los electroimanes consiguiendo que la mesa superior se encuentre suspendida gracias a la fuerza de repulsión entre los polos opuestos.

Ahora con la palanca posterior de la estructura realizo un movimiento vertical a fin de simular irregularidades que normalmente se encuentran en el camino, así como las fuerzas que se ejercen en las curvas, frenadas y arranques de un vehículo

4.1.1. Resultados de las pruebas

- Al inicio encendí el sistema y la mesa superior de suspensión levita sin problemas.
- Seguidamente adiciono peso a la mesa superior lo soporta sin problemas.
- En la siguiente prueba, al simular las irregularidades posibles de un camino he observado que la mesa superior no es estable y que las oscilaciones de la mesa inferior se transmiten a la superior.
- Durante la realización de las pruebas es apreciable que los electroimanes se calientan lo que no permite mantenerlos en funcionamiento durante mucho tiempo.
- Debido al alto consumo de corriente se hace muy difícil controlar los electroimanes de una manera dinámica y el puente rectificador se calienta dando señales de que trabaja al límite de su capacidad.

4.1.2. Ventajas y Desventajas

A continuación presento una serie de desventajas de los sistemas de suspensión que actualmente se fabrican.

4.1.2.1. Desventajas de los sistemas de suspensión actuales.

Los sistemas de suspensión se encuentran sujetos a desgastes mecánicos como los siguientes:

Sistemas convencionales

- Fatiga o rotura de espirales
- Fatiga o rotura de barras de torsión
- Fatiga o rotura de ballestas
- Amortiguadores gastados
- Amortiguadores reventados

Sistemas neumáticos e hidroneumáticos.

- Filtraciones o fugas de aceite o aire comprimido
- Desgaste de bomba hidráulica
- Desgaste de compresor
- Perforaciones en conductos y diafragmas

Sistema de suspensión Bose

Si bien este sistema de suspensión se basa en el principio electromagnético la disposición de sus elementos también sufren desgaste, pues cuenta con un motor eléctrico lineal que cuenta con un pistón y un cilindro.

- Desgaste de muelle
- Desgaste de pistón
- Pérdida de potencia debido al cabeceo del pistón en el cilindro
- Podría producirse un remordimiento del pistón cuando el desgaste sea excesivo.

4.1.2.2. Ventajas del sistema de suspensión electromagnética.

Las posibles ventajas que presentaría la aplicación del sistema de suspensión electromagnética que he propuesto: serían

- No existe ni amortiguador ni resorte por lo tanto no hay desgaste mecánico
- Al levitar el chasis se mejora el confort durante la conducción
- Reduciría costos de mantenimiento

4.1.2.3. Desventaja del sistema de suspensión electromagnética.

El sistema que presento tiene el potencial de brindar una serie de ventajas, sin embargo no puedo dejar de lado la dificultad del control de los electroimanes y una desventaja que podría ser inclusive una limitante para la aplicación, y es que para lograr levantar unos 800kg que es el peso promedio de un compacto se necesita de mucha energía.

Y es justamente esa parte de la aplicación la que amerita un mayor desarrollo e investigación. Pues los sistemas de suspensión sustentan el peso de un vehículo con resortes, mientras que el sistema que propongo prescinde de los mismos con la finalidad de levitar. Sin embargo durante el desarrollo del presente trabajo se han hecho evidentes muchas limitantes.

Adicionalmente el costo del posible equipamiento con el que debería contar un vehículo que soporte una aplicación del sistema propuesto sería muy alto y reduciría el espacio del habitáculo. Otro factor desfavorable sería que la instalación del sistema generaría una adición de peso al vehículo.

Otro factor negativo importante es que a mayor distancia entre los electroimanes disminuye la fuerza de repulsión lo condiciona y limita la altura y el recorrido del sistema.

4.1.2.4. Ejercicio de aplicación

Presento a continuación un ejercicio para determinar si en base a las dimensiones y peso de un vehículo es factible la aplicación de un electroimán y fuente de energía.

Requiero construir un electroimán capaz de generara un esfuerzo de tracción de 500kg con una tensión de 12 voltios.

Para la construcción del circuito magnético aplicaré un campo de 1.2T con el cual se llega al punto de saturación de un núcleo de hierro.

Entonces la sección debe ser la siguiente.

$$A = 2\mu F/B^2 = 8\pi \times 10^{-7} \times 500 \times 9.81 / (1,2)^2 = 0,0123276 / 1.44 = 0,00856\text{m}^2 = 85,6 \text{ cm}^2$$

Ahora debo conocer el diámetro

$$D = \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{4 \times 85,6 / \pi} = 18.5 \text{ cm. Redondeando } 19\text{cm.}$$

Conozco el diámetro interno, y debo tener un diámetro externo que aloje al conductor por lo que el diámetro externo y la longitud del núcleo será de 25cm y 10cm respectivamente. Estas dimensiones en base al espacio que puede ocuparse dentro de un vehículo de serie.

Bien ahora que conozco la dimensión del núcleo y en base al campo, determino a continuación el diámetro medio

$$D_m = D_{ex} + D_{in} / 2 = 25 + 19 / 2 = 22\text{cm} \text{ después determino la longitud media de cada espira}$$

$$L_m = D_m \times \pi = 69\text{cm.}$$

A continuación calculamos los Amperios vuelta necesario para el circuito magnético

$$\Theta = H \times L = 200\text{Av/cm} \times 69\text{cm} = 13800\text{Av}$$

Tengo ya los datos necesarios para calcular la sección del cable.

$V = R \times I$ y $R = \rho \times l_m / s$, si reemplazamos tenemos $V = \rho \times l_m / s \times I$, de donde $N \times I = \Theta$, entonces $V = \rho \times l_m / s \times \Theta$, si despejamos obtenemos

$$S = \rho \times l_m \times \Theta / V$$

Como el cable es de cobre tenemos que $\rho = 0.02 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$

$$S = 0,02 \times 0,69 \times 13800 / 12 = 15,9 \text{mm}^2$$

El cable comercial mas aproximado es el AWG # 5 con una sección de $16,77 \text{mm}^2$ y un diámetro de $4,62 \text{mm}$

Obtenido esto debo conocer las capas y las espiras por capas. El diámetro del cable es de $0,46 \text{cm}$. La altura del núcleo es de 10cm , entonces

$$\text{Número de espiras por capa} = 10 / 0,46 = 21 \text{ vueltas}$$

De la misma manera

$$\text{Número de capas} = 6 / 0,46 = 13 \text{ capas}$$

Ahora el total de espiras es

$$\text{Numero de capas} \times \text{número de espiras} = 273 \text{ espiras,}$$

Siguiendo con el cálculo

$$I = \Theta / N = 13800 \text{Av} / 273 \text{v} = 51 \text{ A}$$

Así tenemos una densidad de corriente de

$$\delta = I / s = 51 \text{A} / 16,77 \text{mm}^2 = 3 \text{ A/mm}^2$$

Adicionalmente puedo conocer la longitud del cable

$$L = N \times l_m = 273 \times 0,69 \text{m} = 188,37 \text{m}$$

Y su peso

149kg por cada km de cable AWG # 5. Entonces

$$188,37\text{m} \times 149 \text{ Kg} / 1000\text{m} = 28\text{Kg}.$$

Tomando en cuenta que para que el sistema se aplique a un vehículo debemos contar con 8 electroimanes lo que significa un consumo de corriente de 408A.

El peso de cada núcleo se puede calcular de la siguiente manera

$$V = S \times L = 85,6 \times 10 = 856\text{cm}^3 = 8,56 \times 10^{-04}\text{m}^3$$

$$m = D \times V = 7874 \text{ kg/m}^3 \times 8,56 \times 10^{-04}\text{m}^3 = 6,74\text{kg}$$

$$W = m \times g = 6,74 \text{ Kg} \times 9,81\text{m/s}^2 = 66 \text{ N}$$

Si sumamos el peso del núcleo con el del cable y multiplicamos por la cantidad de electroimanes tenemos

$$(28 + 6,7) \times 8 = 277\text{Kg}.$$

Tomando en cuenta que el consumo aproximado de corriente sería de 408 A y el peso adicional de 277kg.

Se hace evidente que el costo para la implementación del sistema sería muy elevado y el peso extra desfavorecería totalmente el rendimiento del vehículo.

Otro factor a considerar es que el campo magnético producido puede afectar el funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

Debemos tomar en cuenta que mientras mas distancia hay entre los electroimanes el campo magnético disminuye afectando así la fuerza de repulsión, limitando así la altura de la suspensión.

Conclusiones

- Al final no he podido cumplir con el principal objetivo del proyecto, pues el consumo de corriente de los electroimanes es muy elevado como para poder controlarlos con un circuito que proporcione una suspensión dinámica y que se ajuste a las distintas irregularidades de un camino limitado por el altísimo costo. Así como a las distintas fuerza que debe soportar un sistema de suspensión durante la conducción por lo que su aplicación es poco probable por el momento pues necesita de un mayor desarrollo y de una inversión muy considerable.
- Después de concluir con la construcción y las pruebas de funcionamiento de la maqueta he podido observar que este tipo de sistema tiene el potencial de presentar una gran ventaja en relación a los sistemas convencionales de suspensión, debido a que reduce vibraciones que se transmiten hacia la carrocería. La aplicación del sistema significa una reducción en la cantidad de piezas expuestas a un desgaste mecánico. No obstante demanda de peso adicional y de un alto costo.
- El control de altura y dureza o fuerza del sistema de electroimanes lo he realizado con un circuito eléctrico sencillo y didáctico que nos permite variar la tensión de alimentación, pero debido a la alta demanda de corriente el sistema no puede operar por lapsos prolongados.

Recomendaciones

Posterior a la investigación, aplicación y realización del presente trabajo de Tesis de Grado, recomiendo se retome mi trabajo y se estudie formas de obtener la energía suficiente para sustentar el sistema de forma autónoma logrando de este modo un sistema aplicable a la industria automotriz y que se dirija bajo la línea de producción de sistemas verdes, es decir siempre pensando en un desarrollo tecnológico sustentable, responsable y consiente con el medio ambiente.

Bibliografía

ALONSO y FINN, *Física elemental*, Edit. Addison – Wesley Interamericana, 1995

ALVARENGA y MÁXIMA, *Física General*, México, Edit. Harla, 1979

FEYNMAN, Richard, *Feynman lectures on Physics Volume 2*. Addison Wesley Interamericana, 1972

MENDOZA D., Jorge. *Magnetismo II*, wikipedia.org/wiki/electromagnetismo

RODRÍGUEZ DANTA, Marcelo. *Campos electromagnéticos*, Universidad de Sevilla, Manuales universitarios, 1996.

TIPPENS. *Fundamentos de Física I, II*, Edit. Mc Graw Hill, 1997

VILLAMIZAR, Armando. *Física*, Bogotá, Quórum Ediciones, 2007

WANGSNESS, R. K. *Campos electromagnéticos*, Edit. Limusa, S.A. México, 1983

WILSON, *Física*, Edit. Prentice Hall, México, 2003

www.bose.com

www.electricas.com

www.km77.com

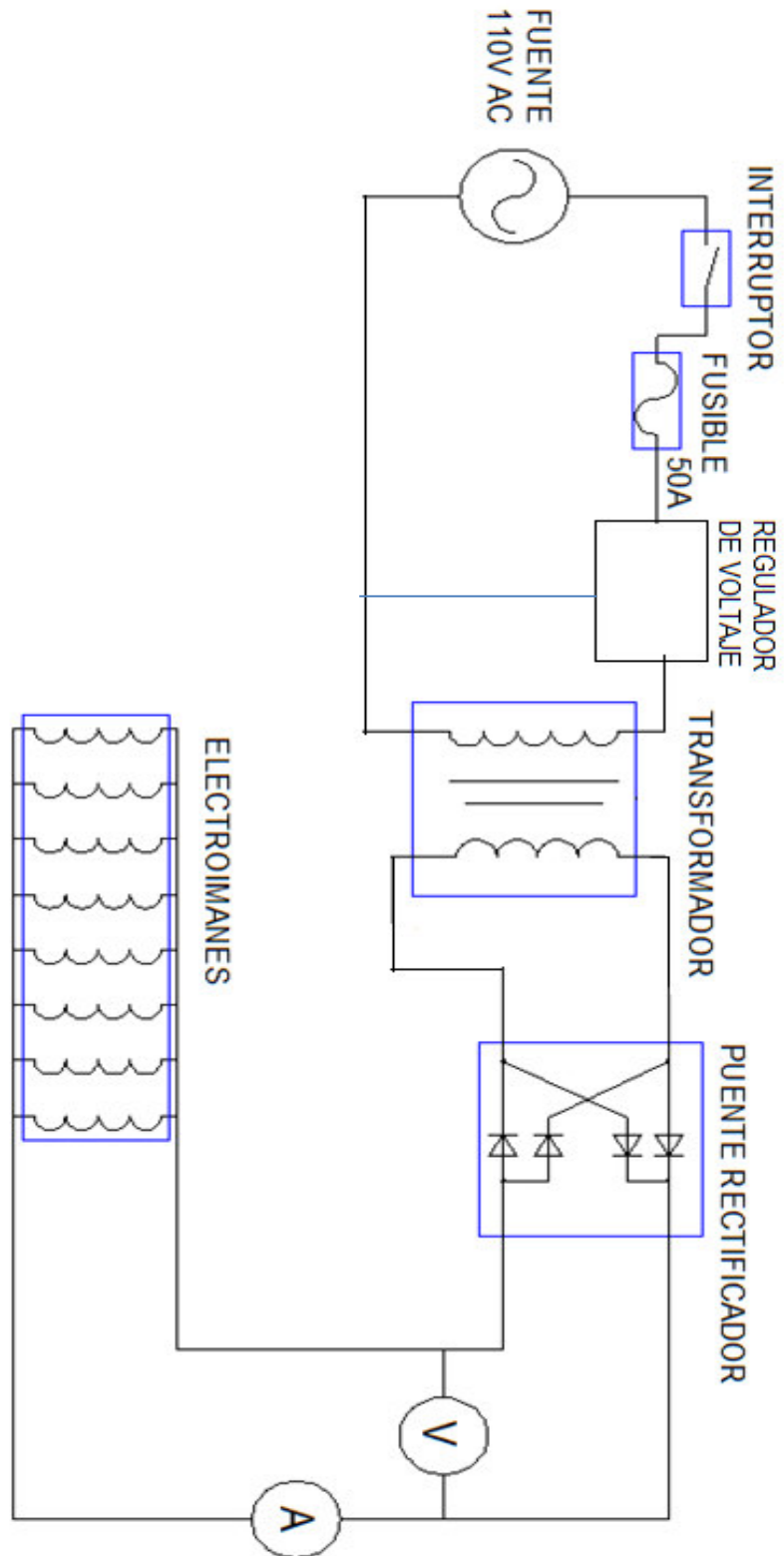
www.mecmod.com

www.usuarios.multimania.es

www.wikipedia.com

Anexo 1

Diagrama de circuito



Anexo 2

Maqueta (Modelo)



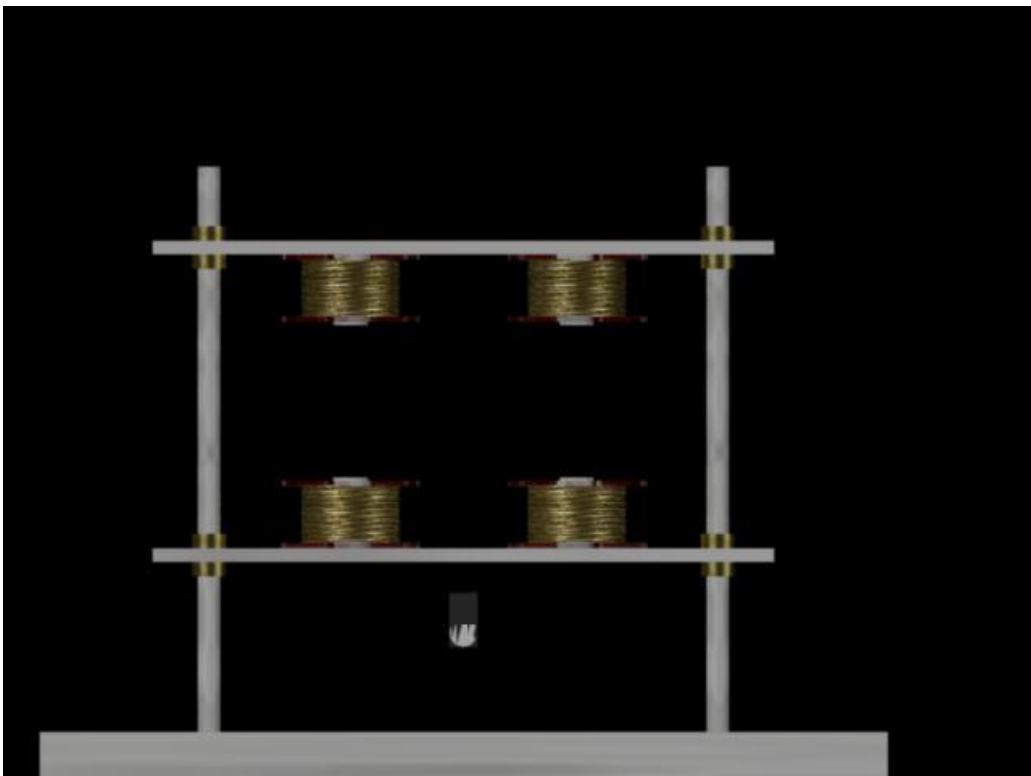
Anexo 3

Estructura



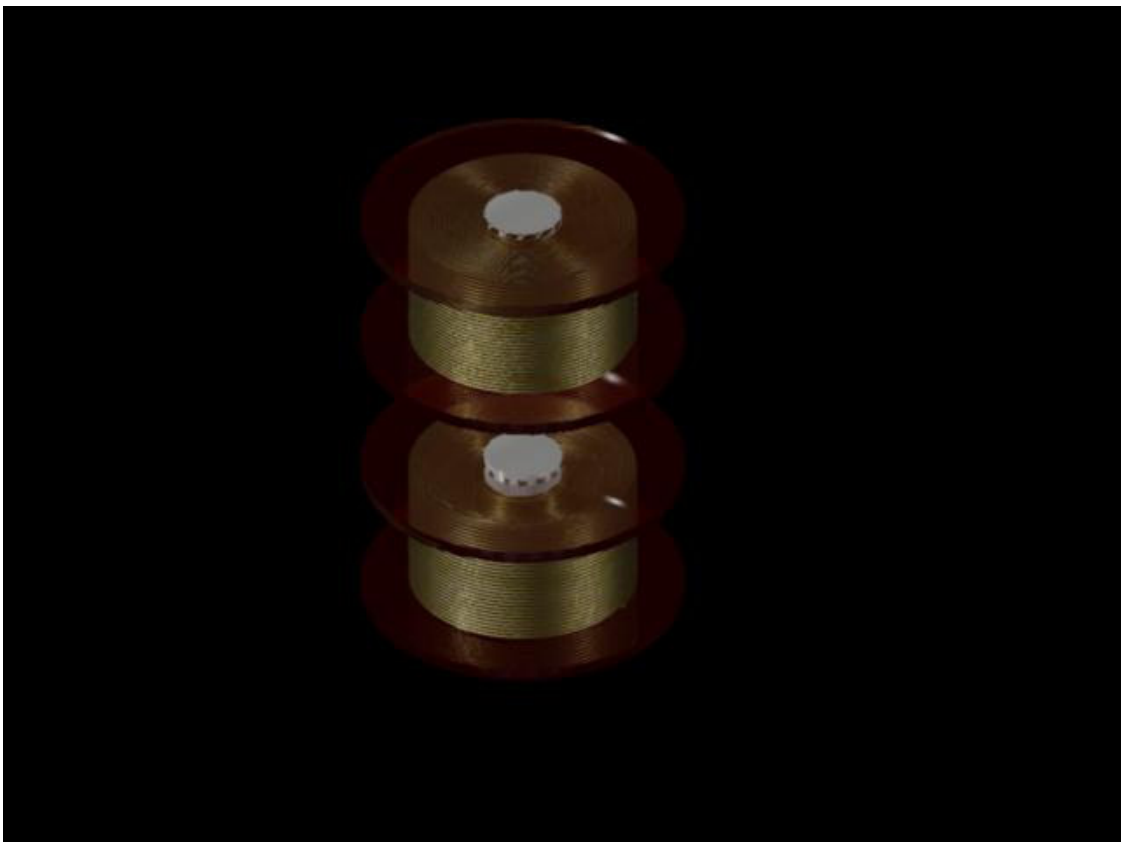
Anexo 4

Suspensión



Anexo 5

Electroimanes



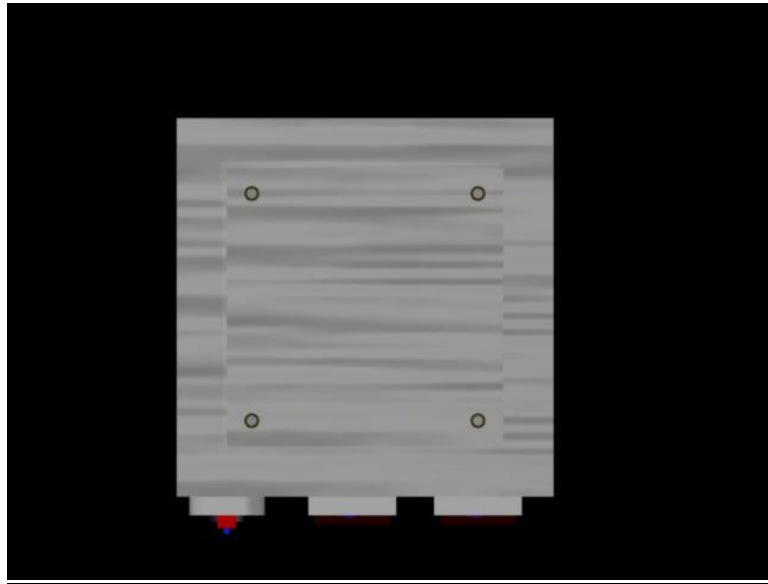
Anexo 6

Conjunto de suspensión

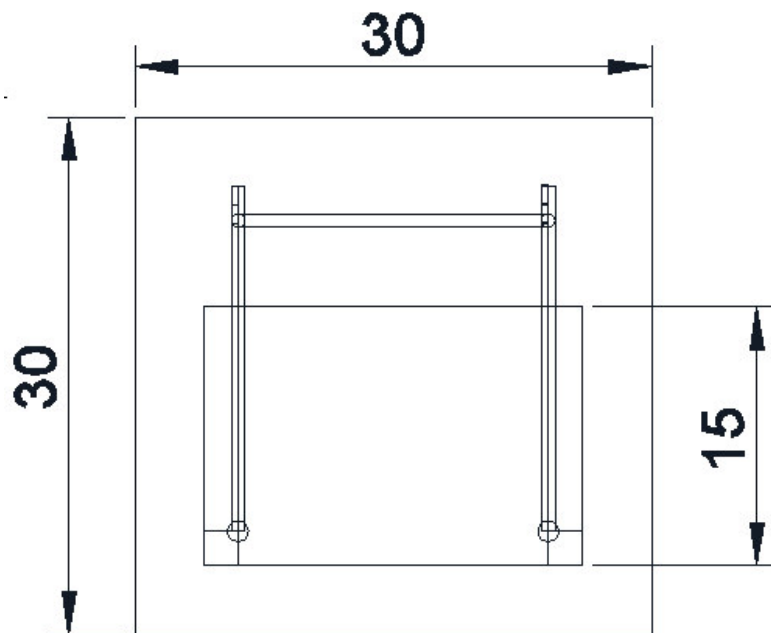


Anexo 7

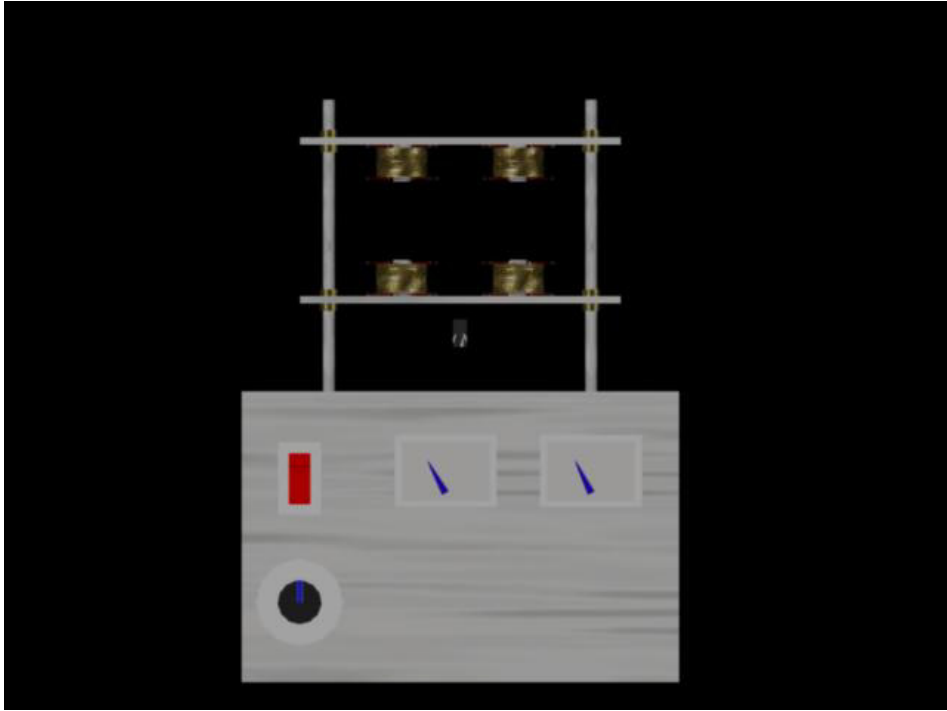
Planos (Vistas)



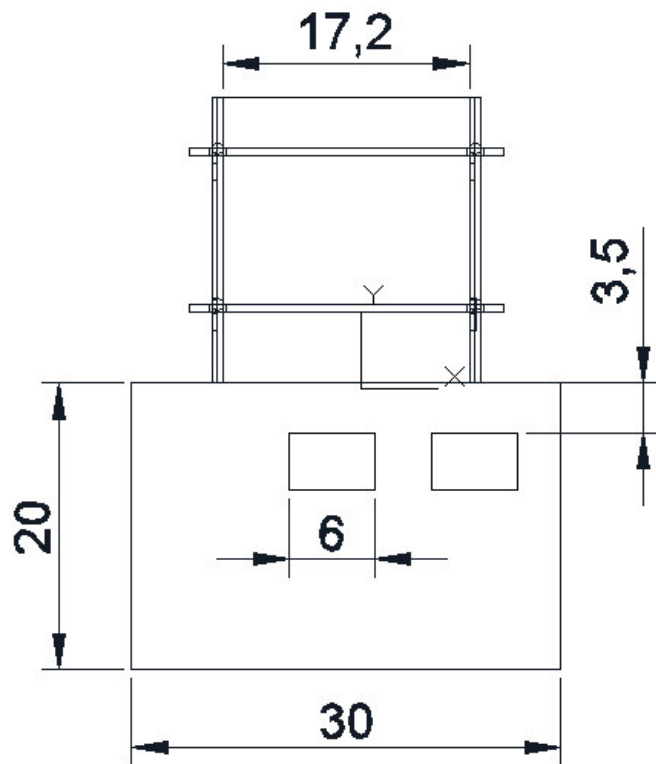
Vista superior.



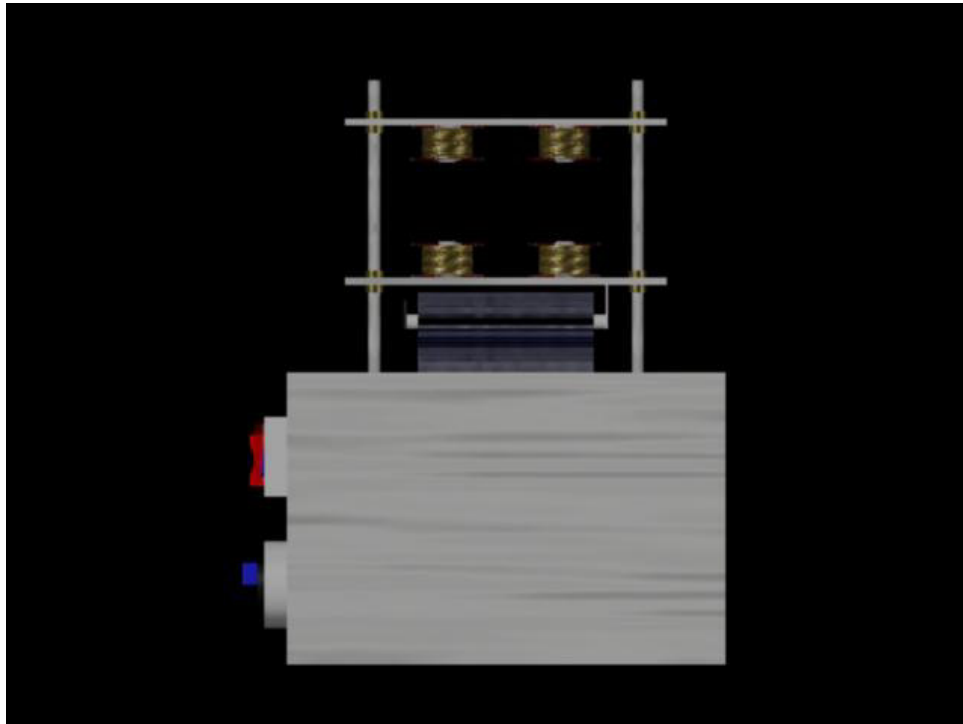
Vista Superior



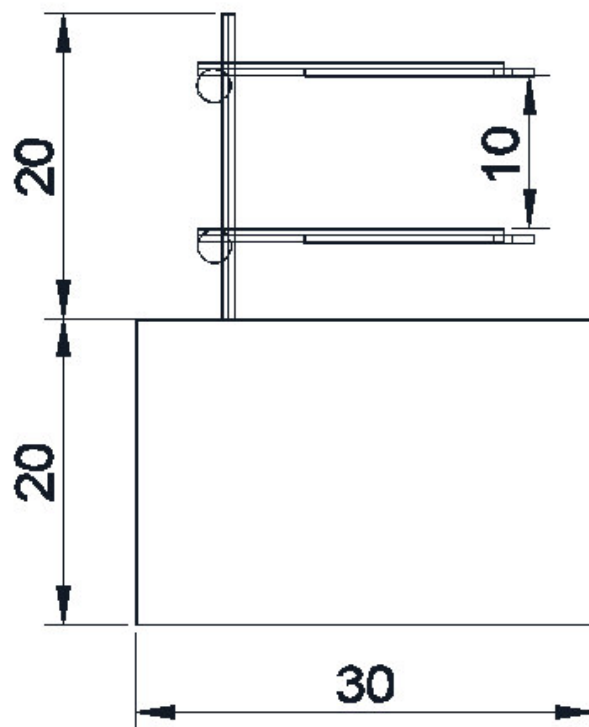
Vista Frontal



Vista Frontal



Vista Lateral Derecha.



Vista Lateral Izquierda