



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL  
“DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN AMORTIGUADOR  
MAGNÉTICO SECO”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTA:**

**TORRES TORIBIO NORMANDO**

**DIRECTOR:**

**DR. FRANCISCO ANTONIO GODÍNEZ ROJANO**



México, D.F., 2016

## **Agradecimientos**

Se agradece a la Universidad Nacional Autónoma de México, al Instituto de Ingeniería, al taller, por su apoyo en la fabricación de la mayoría de las piezas que conforman el presente trabajo.

Agradezco al Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano por su gran apoyo en la elaboración de esta tesis así como en la parte experimental.

También se agradece al Dr. Alberto Caballero Ruiz, del CCADET, por su aporte en la parte de instrumentación del banco de pruebas.

Sobre todo, agradezco a mis padres por todo el apoyo que me han dado a lo largo de mis estudios y por su comprensión.

## Resumen

En el presente trabajo, se diseñó y construyó un amortiguador magnético seco. La respuesta dinámica del amortiguador se estudió con ayuda de un banco de pruebas, el cual también fue diseñado y construido. Este banco contiene dispositivos de medición que permiten la captura de datos de fuerza y desplazamiento que a su vez son enviados a un ordenador portátil para su posterior análisis. Con estos datos se crearon una serie de gráficas de fuerza vs. tiempo y desplazamiento vs. tiempo; así como gráficas de histéresis que indican la disipación de energía del amortiguador. Los resultados preliminares muestran una tendencia apenas creciente de la disipación de energía del amortiguador al aumentar la frecuencia de excitación; aunque cabe señalar, que los datos muestran gran dispersión haciendo necesaria la realización de más experimentos para en un futuro llegar a una conclusión contundente.

Se realizaron también diferentes diseños de ruedas amortiguadas para bicicletas. La propuesta final, consiste en un arreglo de amortiguadores magnéticos secos que hacen las veces de “rayos amortiguados” sirviendo de soporte y unión entre el rin y la masa de la rueda. La fabricación del prototipo basado en el diseño final se encuentra en sus primeras etapas.

# ÍNDICE

Introducción.....	1
Definición del problema.....	1
Justificación .....	2
Objetivos .....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos particulares .....	2
I. Antecedentes .....	4
I.1. Sistemas de suspensión .....	4
I.2. Elementos para almacenar energía: Resortes.....	4
I.3. Elementos para disipar energía: Amortiguadores .....	5
I.3.1 Tipos de amortiguadores .....	5
I.4. Imanes permanentes .....	9
I.4.1. Fuerzas de atracción y/o repulsión entre imanes. ....	9
I.4.2. Corrientes de Eddy .....	10
II. ARREGLO DE AMORTIGUADORES MAGNÉTICOS SECOS.....	12
II.1. Idea Principal. ....	12
II.2. Lluvia de ideas. ....	16
II.3. Análisis para decidir la propuesta final.....	24
II.4. Propuesta Final.....	28
III. Caracterización experimental de amortiguadores .....	30
III.1. Resultados y análisis. ....	34
IV. Aplicación de amortiguadores magnéticos en una rueda con suspensión para bicicletas.....	51
V. Conclusiones y recomendaciones .....	57
Referencias .....	59
Apéndice.....	61

## INTRODUCCIÓN

Las funciones principales de los sistemas de suspensión son atenuar vibraciones y reducir el efecto de cargas de choque. En particular, el sistema de suspensión de un automóvil tiene como función principal aislar a la estructura y a los ocupantes de las vibraciones y los choques generados por las irregularidades del camino [1]. El sistema de suspensión consiste de todos los elementos que proporcionan la conexión entre los neumáticos y la carrocería del vehículo. Un sistema de suspensión básico consta de dos elementos: un resorte y un amortiguador. El primero se encarga de almacenar y restituir energía, en cambio, el amortiguador tiene la función de disipar energía.

Vale la pena señalar que las vibraciones mecánicas pueden ser útiles y agradables como en aplicaciones terapéuticas y masajes, pero al mismo tiempo pueden ser desagradables y dañinas ya que pueden conducir tanto a daños físicos que alteren la salud de las personas como a fallas estructurales en diversas máquinas reduciendo su eficiencia. Por ejemplo, las vibraciones en un automóvil pueden provocar molestias al conductor y eventualmente la falla de componentes electrónicos y/o mecánicos.

Por lo tanto, se requiere una forma de controlar o minimizar las vibraciones para evitar daños tanto a personas como a diversas máquinas y dispositivos.

### Definición del problema

Comúnmente, los sistemas de suspensión de todo tipo de vehículos, utilizan amortiguadores cuyo principio de funcionamiento se basa en la disipación viscosa producida por la fricción entre una estructura y el medio fluido que la rodea.

Los problemas que tienen los amortiguadores que utilizan fluidos son fugas de aceite o gas debido a fallas en los retenedores (empaques). En cuanto al resorte el principal problema es la pérdida de rigidez elástica por envejecimiento. Estas dos dificultades disminuyen la vida útil y el desempeño del sistema de suspensión.

El trabajo aquí presentado estudia una alternativa a los sistemas convencionales de suspensión. La idea consiste en sustituir el amortiguador viscoso y el resorte por un arreglo de imanes permanentes dentro de un tubo dentro de material conductor.

La solución que se propone en esta tesis es un amortiguador magnético seco, que utiliza imanes de neodimio en un sistema cilindro-émbolo aprovechando por un lado la repulsión entre campos magnéticos para emular la parte elasticidad del resorte; y por otro lado la generación de corrientes de *Eddy* para emular la parte viscosa de un fluido, aunado a esto, también se aprovechará la disipación de calor por fricción de Coulomb.

Se espera que el sistema de suspensión magnética tenga más ventajas con respecto a los sistemas convencionales, alargando la vida útil y aminorando los costos de mantenimiento.

## **Justificación**

La pérdida de elasticidad en un resorte es significativa comparada con la duración de las propiedades de un imán para generar fuerzas de repulsión. Estos resortes son ampliamente usados para sistemas de suspensión así como los amortiguadores de aceite.

La relevancia del proyecto que se expone en esta tesis, está en el estudio y uso de los imanes permanentes como sistemas de suspensión, los cuales presentan menores pérdidas de propiedades a largo plazo, con dos principios distintos; corrientes de Eddy y las fuerzas de repulsión magnéticas.

El uso de imanes permanentes en sistemas de suspensión intuitivamente, sería mejor con respecto a las suspensiones convencionales, gracias a principios electromagnéticos que no representan contacto entre elementos mecánicos.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar y caracterizar dinámicamente un sistema magnético de suspensión.

### **Objetivos particulares**

- a) Construir un prototipo de un sistema de suspensión magnético.
- b) Realizar pruebas preliminares para medir el desempeño dinámico del prototipo.
- c) Diseñar y construir un sistema de suspensión magnética para bicicletas.

En el capítulo 1 se da una breve explicación sobre los sistemas de suspensión así como el funcionamiento de los amortiguadores y los resortes en base a su clasificación. En éste mismo capítulo se explican también los principios de funcionamiento presentes en un amortiguador magnético seco.

En el capítulo 2 se presentan diseños de amortiguadores magnéticos secos, que permitan tolerancias a fuerzas máximas de 200 N. A partir de esta lluvia de ideas, se

hace una selección de la mejor propuesta tomando en consideración diversos criterios como el costo de fabricación y las características de desempeño.

En el capítulo 3 se dará a conocer el desarrollo de la caracterización dinámica usando para ello un banco de pruebas. También se muestran los resultados experimentales y una breve discusión de los mismos.

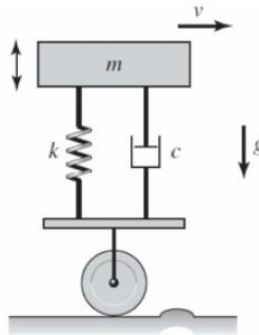
En el capítulo 4, se plantean diferentes diseños de ruedas amortiguadas para bicicleta. Dichas propuestas se desarrollaron en paralelo con las diferentes propuestas de amortiguadores.

Finalmente, en el capítulo 5 se dan algunas conclusiones y recomendaciones para trabajo a futuro.

## I. ANTECEDENTES

### I.1. Sistemas de suspensión

Como se mencionó, el sistema de suspensión está formado por dos elementos; uno se encarga de almacenar energía (por ejemplo un resorte mecánico) y otro se encarga de disipar energía (por ejemplo un amortiguador de aceite, cuyo funcionamiento se basa en la disipación viscosa). La figura 1 muestra el esquema de un sistema de suspensión convencional constituido por un resorte y un amortiguador conectados en paralelo.



**Figura 1.** Masa suspendida de valor  $m$  por un arreglo de amortiguador de constante viscosa  $c$  y un resorte de constante elástica  $k$  en paralelo. [2].

### I.2. Elementos para almacenar energía: Resortes

Existen algunos tipos de resortes como los de tracción, compresión, tracción-compresión y torsión.

*Resortes de tracción:* Estos resortes soportan únicamente fuerzas que sometan al resorte a tracción (ver figura 2a).

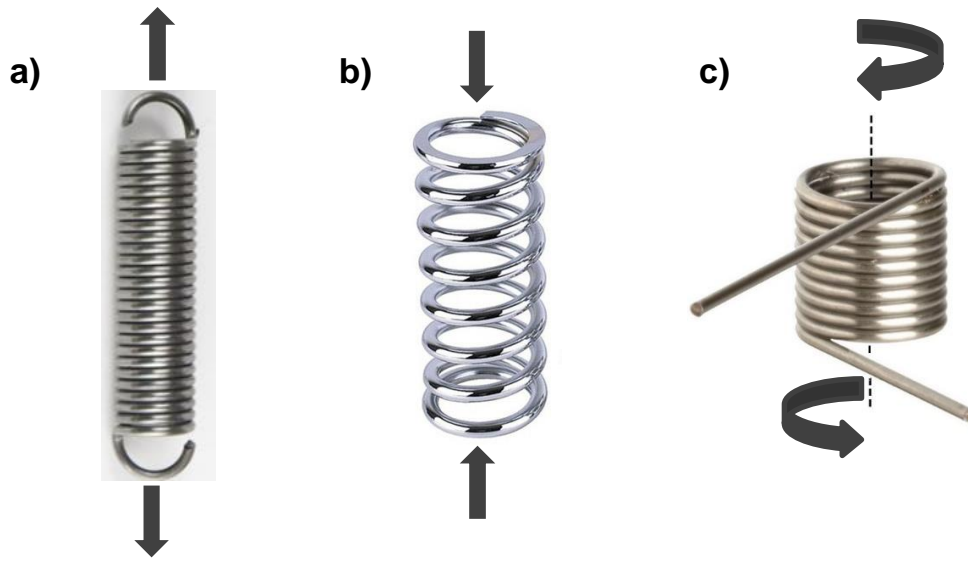
*Resortes a compresión:* Estos resortes, por el contrario a los de tracción, resisten únicamente esfuerzos a compresión (Figura 2b).

*Resorte de tracción-compresión:* Este tipo de resortes toleran fuerzas tanto a compresión como a tracción, aunque realmente las tolerancias en estas sollicitaciones son menores que en los dos tipos de resortes anteriores.

*Resortes de torsión:* Estos resortes están sometidos a fuerzas de torsión, donde los extremos del resorte funcionan como brazo de palanca (figura 2c).



[5]



**Figura 2.** a) Foto de resorte de tracción [3]. b) Foto de resorte a compresión [4]. c) Foto de resorte de torsión [5]; las flechas se utilizan para representar fuerzas y torques a los que se somete cada tipo de resorte.

### **I.3. Elementos para disipar energía: Amortiguadores**

El funcionamiento del amortiguador está dado por la circulación de un fluido a través de válvulas internas, las cuales generan resistencia al pasar el fluido. En esta forma es como se controlan las vibraciones no deseadas.

#### **I.3.1 Tipos de amortiguadores**

En función del fluido que se utilice o del sentido de trabajo es como se clasifican los amortiguadores. A continuación se explica brevemente cada uno [6].

##### **I.3.1.1 Por el sentido de trabajo**

###### **a) Amortiguador de simple efecto**

Los de simple efecto se refieren a amortiguadores que sólo absorben y disipan energía en un solo sentido. El sentido puede ser de expansión o compresión, pero no ambos ya que si es de expansión, no amortigua a compresión y viceversa.

## b) Doble efecto

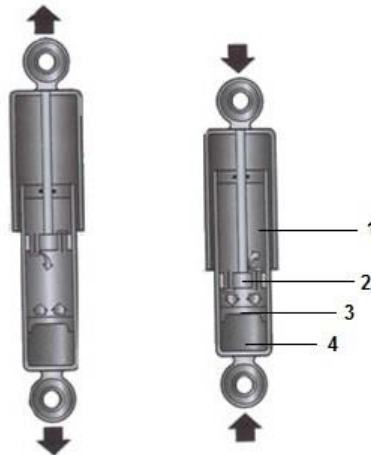
Los de doble efecto se refieren a amortiguadores que absorben y disipan energía en dos direcciones, es decir, que se encuentran anclados a la base y a la masa suspendida por lo que actúan cuando hay compresión y tracción.

## I.3.1.2 Por el fluido de trabajo

Los amortiguadores se clasifican a continuación por el tipo de funcionamiento del material que absorbe la energía [6].

## a) Amortiguador de gas

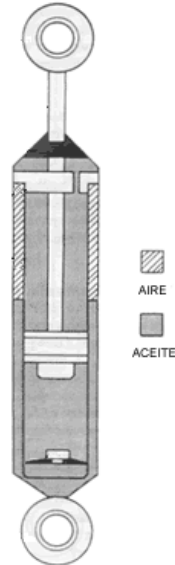
El amortiguador de gas funciona a partir del movimiento de un pistón en un tubo que contiene aceite, y en uno de sus extremos, contiene una cantidad en menor proporción, de nitrógeno a presión en la parte inferior (ver figura 3). La separación entre ambos fluidos es debida a otro pistón flotante.



**Figura 3.** Esquema de funcionamiento de un amortiguador de gas: 1) Cámara de aceite. 2) Pistón de trabajo. 3) Pistón flotante. 4) Cámara de nitrógeno [7].

### b) Amortiguador hidráulico

El amortiguador hidráulico funciona por el movimiento de un aceite de la recámara principal del cilindro, atravesando el émbolo por pequeños conductos hacia otra recámara de almacenamiento mostrado en la figura 4. En la recámara principal del cilindro se encuentra un resorte el cual regresa el embolo a su posición inicial después de alguna sollicitación de carga. Este tipo de amortiguadores también funcionan para transformar la energía cinética del fluido (es decir el movimiento) en energía calorífica.



**Figura 4.** Esquema de amortiguador hidráulico [8].

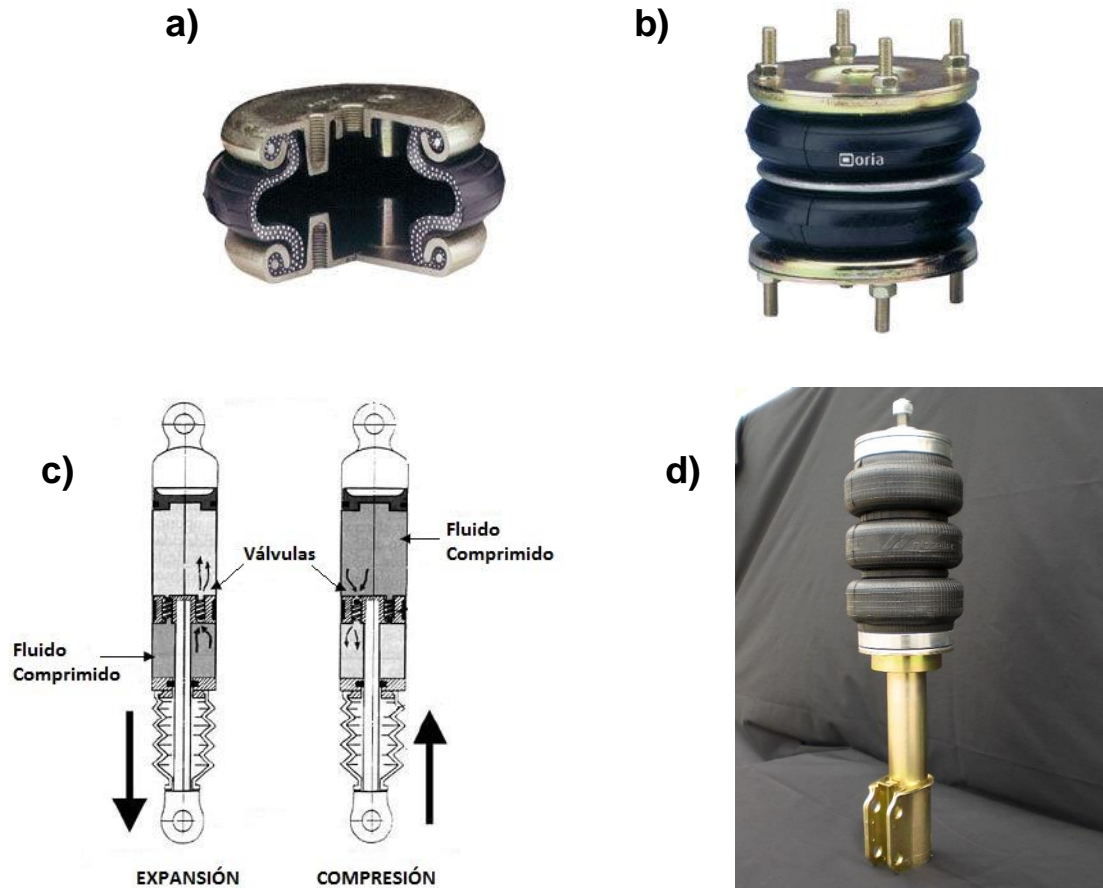
Este tipo de amortiguadores se usa cuando se quiere reducir controladamente la velocidad del movimiento producido por una fuerza.

### c) Amortiguador neumático

Este tipo de amortiguadores funcionan con aire como fluido de trabajo sometido a presión variable. En lugar de utilizar un resorte, se usa un fuelle de aire.

El amortiguador neumático tiene gran capacidad de absorber vibraciones gracias a la autoregulación que posee [9].

Las figuras 5a y 5b muestran imágenes de los fuelles neumáticos que conforman el amortiguador neumático. En las figuras 5c y 5d, se aprecian esquema y una fotografía de los amortiguadores neumáticos respectivamente.



**Figura 5.** a) Foto de un cilindro neumático seccionado. b) Foto de un cilindro neumático de doble efecto [10]. c) Esquema de un amortiguador neumático [11]. d) Foto de amortiguador neumático [12].

#### b) Amortiguadores magnetoreológicos

Los amortiguadores magnetoreológicos son dispositivos que funcionan con fluidos magnéticos cuya reología puede ser controlada mediante estímulos magnéticos.

El fluido magnético tiene partículas magnéticas finamente divididas, mezcladas en un fluido portador como el aceite.

Su principal utilidad es proveer una fuerza como respuesta rápida, que contrarreste los efectos de alguna vibración [13].

En la imagen 6 se muestra el esquema de un amortiguador magnetoreológico para asiento en vehículos de viajes largos y de transporte pesado.

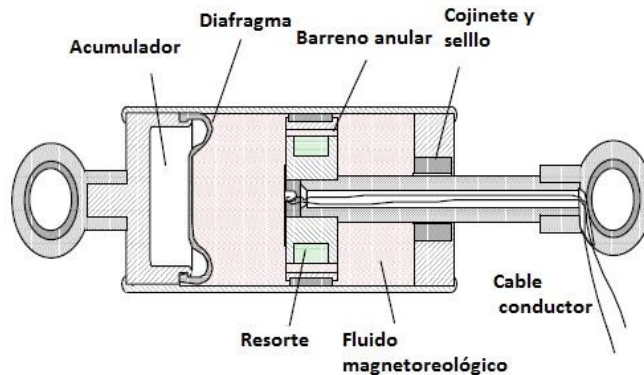


Figura 6. Esquema de un amortiguador magnetoreológico [13].

## I.4. Imanes permanentes

Un imán permanente es un material ferromagnético que ha sido magnetizado por algún campo magnético fuerte.

Estos imanes tienen un polo norte y un polo sur, donde sí se acercan polos contrarios (es decir norte y sur) se atraen, pero si se intenta juntar polos iguales (norte con norte o sur con sur) se repelen.

Existe una variedad de tipos de imanes de acuerdo a los materiales de los que están hechos. Por ejemplo, los imanes temporales están hechos de hierro dulce y tienen una atracción magnética de poca duración.

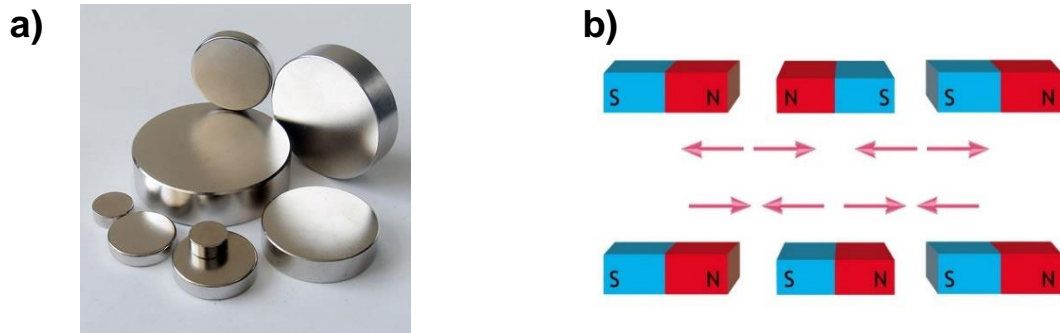
Por otra parte, los imanes de alnico son imanes que se componen de aluminio, níquel y cobalto.

Los imanes de neodimio son un tipo de imanes de tierras raras, formados por hierro, neodimio y boro. Estos imanes son los más utilizados en la industria debido a su alta fuerza de atracción/repulsión (ver figura 7a).

### I.4.1. Fuerzas de atracción y/o repulsión entre imanes.

Los imanes permanentes poseen dos polos: el polo norte magnético y el polo sur magnético ilustrados en la figura 7b de color rojo y color azul respectivamente.

Existen líneas de campo magnético, las cuales salen del polo norte magnético del imán, y entran por el polo sur magnético del mismo.



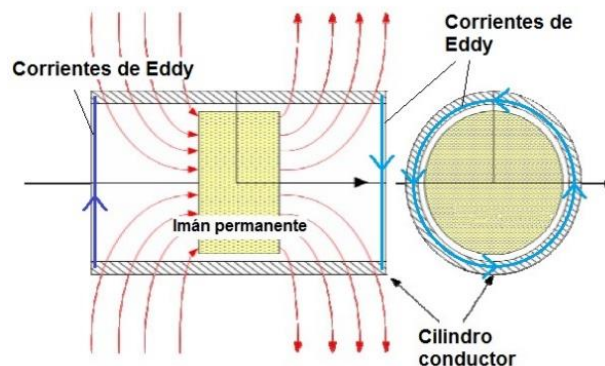
**Figura 7.** a) Foto de imanes permanentes de neodimio [14]. b) Esquema de polaridad en imanes permanentes [15].

Las líneas de flujo magnético, al interactuar entre sí, generan fuerzas de atracción o repulsión según sea el caso y su dirección se determina sencillamente al conocer cuál es el polo norte y el polo sur, pues las líneas salen del polo norte y entran al polo sur del imán.

El flujo magnético es el encargado de caracterizar el campo magnético generado en cada polo de misma magnitud pero carga contraria.

#### 1.4.2. Corrientes de Eddy

Las corrientes de Eddy se producen cuando un conductor es atravesado por un campo magnético en movimiento; por ejemplo, el proveniente de algún imán. En el interior del conductor se inducen estas corrientes (ver figura 8).



**Figura 8.** Esquema de las corrientes de Foucault a través de un conductor metálico cilíndrico, debido al movimiento de un imán permanente [16].

El nombre de éste fenómeno es debido a su descubridor, el físico francés León Foucault en el año de 1851. El término “eddy” traducido al español significa torbellino o remolino, por lo que también suelen llamarse *Eddy currents* o “corrientes de Eddy”.

El efecto de las corrientes de Foucault es un aumento de temperatura por el efecto Joule, o en otras palabras, hay disipación de energía. En base a la aplicación que se establezca, podrá ser o no de utilidad.

En muchos casos las corrientes de Eddy son de poca utilidad, ya que se traducen en pérdidas de energía no deseadas. Sin embargo para este proyecto, las corrientes de Eddy son importantes, ya que lo que se pretende es disipar energía en el sistema de imanes permanentes.

Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado, o más alta la conductividad del metal (material del conductor), o la rapidez con que se desplaza alguno de las dos partes (el campo magnético y/o el conductor), serán mayores las corrientes de Eddy.

## II. ARREGLO DE AMORTIGUADORES MAGNÉTICOS SECOS

### II.1. Idea Principal.

La idea principal que se propone en esta tesis, es el diseño de un amortiguador cuyo funcionamiento se basará en dos principios electromagnéticos: corrientes de Eddy y fuerzas de repulsión magnéticas.

Teniendo en cuenta los principios de funcionamiento de los elementos amortiguador y resorte de un sistema mecánico, podemos hacer la analogía con elementos electromagnéticos que conforman el amortiguador magnético seco.

#### Principio de corrientes de *Eddy*.

Las corrientes de *Eddy* se forman cuando un material conductor, es atravesado por un campo magnético en movimiento.

Cabe señalar que este efecto puede aumentar o disminuir, dependiendo de tres factores; la conductividad del material conductor, la magnitud del campo magnético, y/o su velocidad.

En la figura 9 se muestra el principio de funcionamiento de las corrientes de *Eddy*, donde las líneas punteadas en color rojo, representan el campo magnético del imán.

El campo magnético al atravesar el cilindro de material conductor genera las corrientes de *Eddy*, que están representadas por un punto (si el sentido de la corriente sale perpendicular al plano de la hoja) y una cruz (si el sentido de la corriente entra perpendicular al plano de la hoja).

Las líneas en color azul formando una circunferencia indican la regla de la mano derecha para corroborar el sentido. Las líneas rectas en color azul, indican la atracción magnética del imán con otros. Sin embargo, para la presente tesis, los imanes estarán trabajando a repulsión.

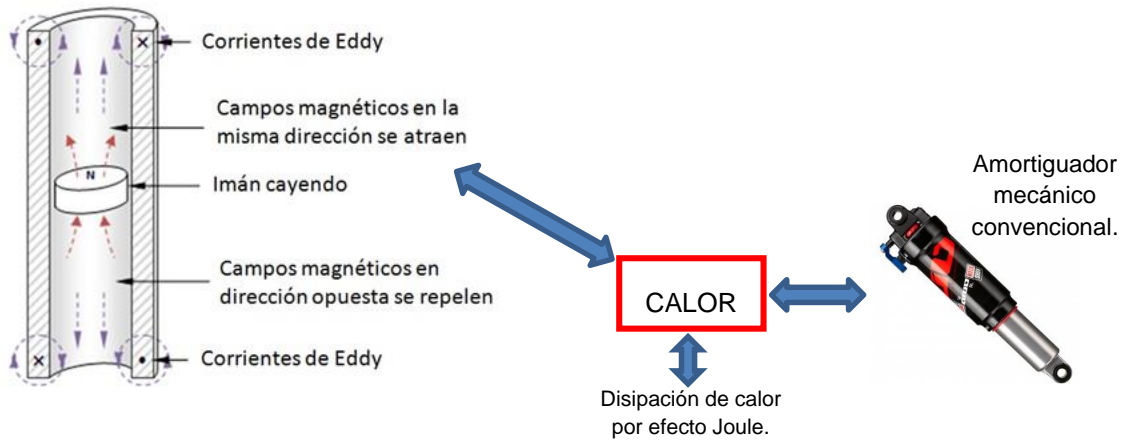
El fenómeno de las corrientes de Eddy generará energía en forma de calor en el transcurso de la oscilación de los imanes permanentes dentro del cilindro.

Esta energía generada será disipada al exterior de igual forma que en un amortiguador convencional al presentarse la fricción viscosa y la compresión del fluido.

Las corrientes de Eddy producen disipación de energía en forma de calor debido al efecto Joule. Este efecto es análogo a la disipación térmica debida a la fricción viscosa

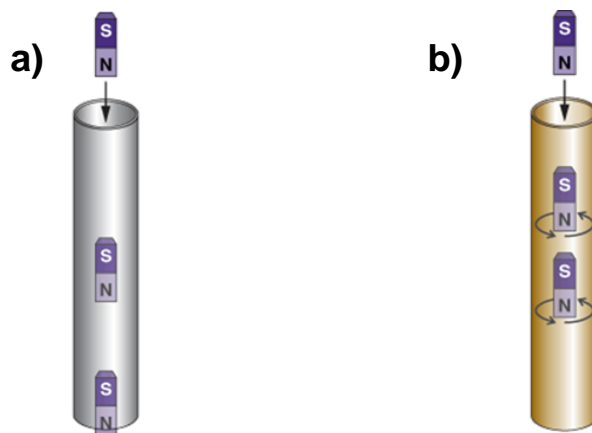


que hay en un amortiguador, entre un fluido y un sólido. En la figura 9 se muestra esta analogía.



**Figura 9.** Esquema del arreglo de un imán permanente cayendo por un tubo de material conductor que alberga las corrientes de Eddy, así como su analogía con un amortiguador convencional.

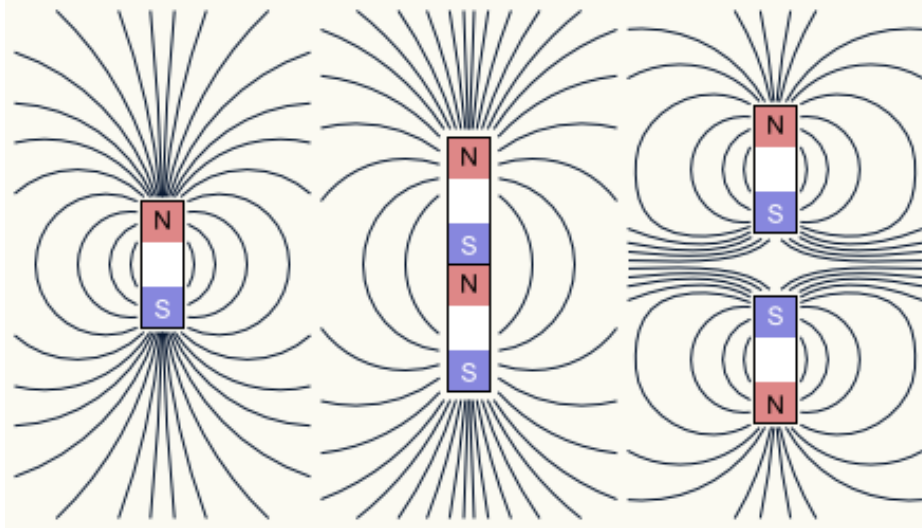
En la figura 10a se representa un imán cayendo a través de un tubo de material no conductor, por lo que no existen las corrientes de Eddy en dicho sistema. En la figura 10b se observa un tubo de material conductor (cobre) a través del cual, se deja caer un imán; en este caso si se generan las corrientes de Eddy, disminuyendo la velocidad de caída del imán permanente.



**Figura 10.** a) Un imán se deja caer por un tubo de plástico, donde no se generan corrientes de Eddy. b) Un tubo de cobre que por el contrario, al ser de material conductor, genera las corrientes de Eddy.

### Principio de fuerzas de repulsión magnética.

La fuerza de repulsión entre dos imanes se da cuando el sentido de los polos magnéticos es igual, es decir; que las líneas de fuerza de los polos magnéticos son de sentido contrario, por lo que tienden a repelerse. Cuando se juntan dos imanes con polos distintos, estos se atraerán debido a que las líneas de los campos magnéticos se alinean y forman un nuevo campo magnético (ver figura 11).



**Figura 11.** Esquema de los campos magnéticos entre dos imanes permanentes y su comportamiento en diferentes arreglos [17].

La fuerza de repulsión debida a polos iguales, es la analogía al funcionamiento de un elemento resorte. Cuanto más cerca estén los imanes permanentes en polos iguales, habrá una mayor fuerza de repulsión y se almacenará más energía. Esta energía será restituida de forma similar a como lo hace un resorte mecánico.

En la figura 12 se muestra la similitud que hay entre las fuerzas de repulsión magnética y la capacidad de deformación elástica en un resorte para restituir energía, con ayuda de sus respectivas gráficas de comportamiento de fuerza contra desplazamiento. El comportamiento de la fuerza de restitución elástica en función del desplazamiento de un resorte no lineal (duro) a compresión se caracteriza por una curva como la que se muestra en la figura 12c.

La relación funcional entre la fuerza y el desplazamiento se puede expresar como  $F_e = k x^n$  (donde  $k$  y  $n$  son constantes positivas). Por otro lado, la fuerza de

restitución magnética producida por dos imanes cilíndricos iguales y colineales trabajando a repulsión se podría calcular a partir de [18]:

$$F \approx -\frac{1}{2}\pi K_d R^4 \left[ \frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2t)^2} - \frac{2}{(x+t)^2} \right]$$

Donde:

$F$ : Es la fuerza entre los dos imanes cilíndricos.

$K_d$ : Es la constante de energía magnetostática

$R$ : es el radio del imán cilíndrico.

$x$ : es la distancia entre los dos imanes.

$t$ : es la altura del imán cilíndrico.

Para obtener la constante  $K_d$  se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$K_d = \frac{\mu_0 M^2}{2}$$

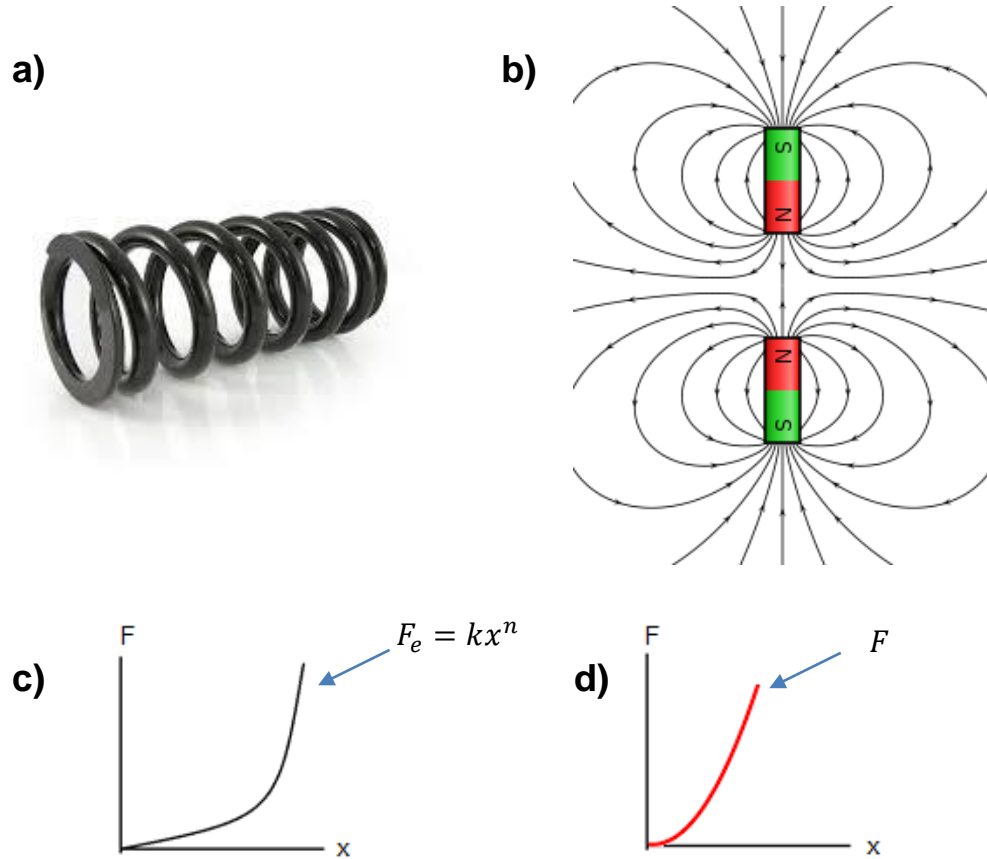
Donde:

$\mu_0$ : es la permeabilidad magnética en el vacío cuyo valor es de  $4\pi \times 10^{-7} [\text{N/A}^2]$ .

$M$ : es la magnetización del imán.

Sin embargo de especificaciones del fabricante, se obtiene directamente la constante  $K_d$  con un valor de  $52 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$ .

La figura 12d muestra una curva típica del comportamiento de la fuerza de repulsión entre imanes dependiendo de la cercanía en la que se encuentren. Lo interesante, es que las curvas c) y d) son similares, aunque la fuerza de restitución es de naturaleza diferente.

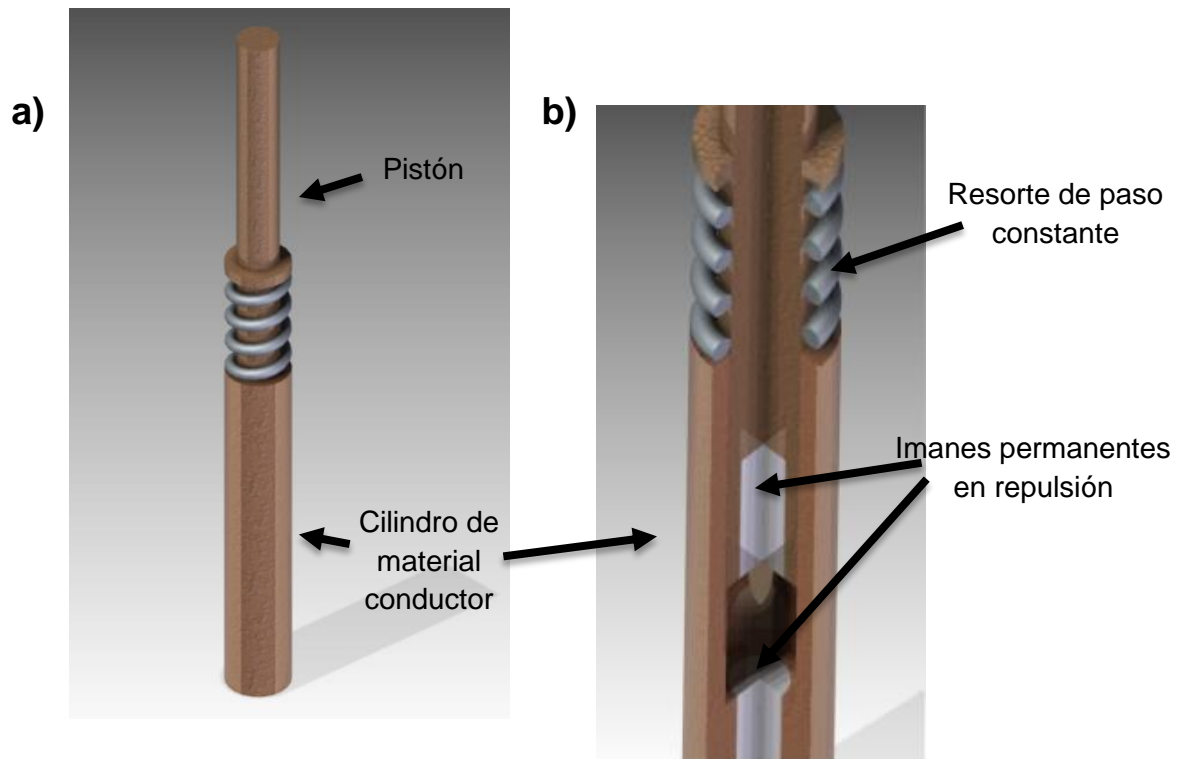


**Figura 12.** Analogía entre las fuerzas de repulsión magnética y la fuerza de un resorte mecánico. a) Un resorte que trabaja compresión, el cual a través de la deformación elástica, es capaz de restituir energía. b) Se observa en el esquema, las líneas de fuerza de dos imanes en repulsión, es decir; con polos magnéticos iguales. En las gráficas c) y d) se muestra esquemáticamente el comportamiento de la fuerza en función del desplazamiento correspondiente al resorte y el amortiguador, respectivamente.

## II.2. Lluvia de ideas.

a) El primer concepto es una suspensión a base de un par de imanes permanentes en un arreglo con sus polos magnéticos iguales para tener una fuerza de repulsión. Estos imanes están dentro de un cilindro de material conductor.

Por otro lado se tiene un resorte de paso constante para aumentar la rigidez global del arreglo. En la figura 13 se aprecian los primeros bocetos hechos en computadora de la suspensión propuesta.

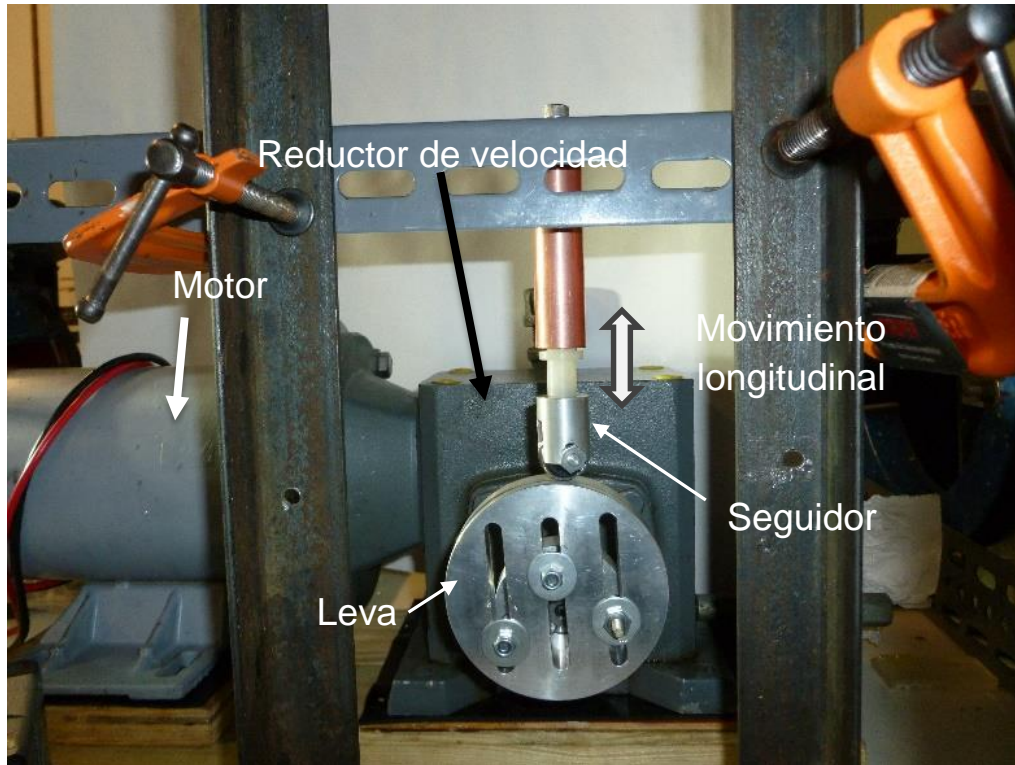


**Figura 13.** Diseños en Solid Edge de la primera propuesta de suspensión. a) Sistema de suspensión completo. b) Suspensión seccionada con un par de imanes permanentes dentro de un tubo de material conductor.

Este primer prototipo se fabricó; el cilindro principal está hecho de cobre en cuya base interna se fija un imán permanente de neodimio, el pistón está hecho de plástico y en este elemento se fija otro imán.

Posteriormente se midió la fuerza de compresión máxima que el prototipo era capaz de tolerar usando una báscula; el resultado fue una fuerza muy baja, alrededor de 100 gramos.

También se hicieron pruebas cinemáticas con un motor, un reductor y una leva, para poder producir el movimiento longitudinal del pistón; ver figura 14.

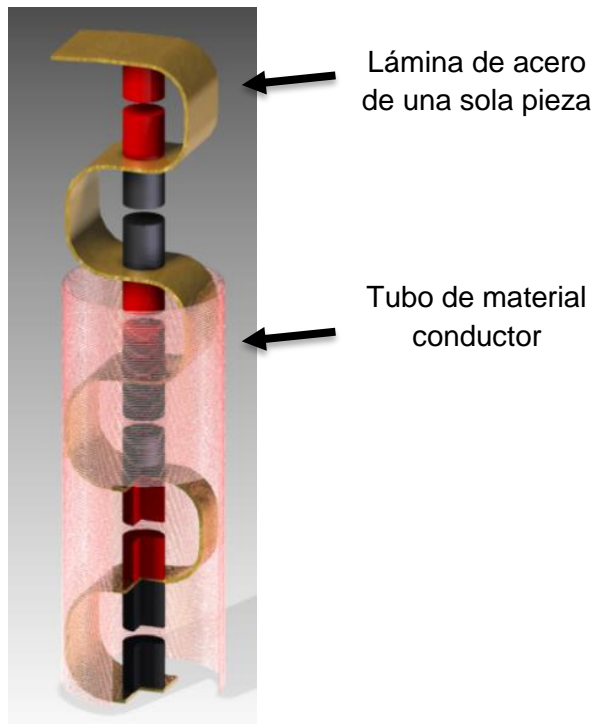


**Figura 14.** Pruebas de movimiento del primer prototipo.

Como se mencionó con antelación, la medición de las magnitudes de fuerza a compresión arrojó valores muy bajos sugiriendo un rediseño o el planteamiento de una nueva propuesta.

b) El segundo concepto es un sistema de suspensión con un arreglo de imanes permanentes en polos iguales para su repulsión. Se proponen 6 pares de imanes permanentes en un mismo sistema de suspensión para obtener mayor magnitud de fuerza a compresión.

Estos pares de imanes están unidos por una lámina de metal acerado, formando curvas en forma de "S". Este arreglo se introduce en un cilindro de material conductor como se muestra en la figura 15.



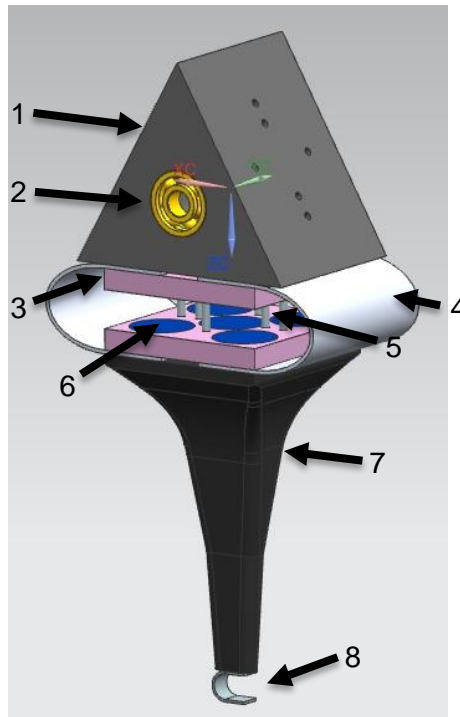
**Figura 15.** Arreglo de 6 pares de imanes permanentes montados en de acero.

El diseño era difícil de fabricar, era estructuralmente débil y tenía poca estabilidad.

c) En el tercer diseño se introdujeron mejoras para incrementar la fuerza que tolera la suspensión sometida a compresión. La estrategia es usar un mayor número de imanes con una geometría cilíndrica en que la altura sea menor o igual a la mitad del radio.

El objetivo en el diseño era obtener un amortiguador con mayor tolerancia de carga posible con relación a su peso.

La suspensión contiene diez imanes, la mitad de ellos en repulsión con la otra mitad, un par de placas de cobre en las que se fijan 5 imanes en cada una de ellas. Las placas están unidas por láminas de forma elíptica y su movimiento relativo está guiado por varillas que también brindan estabilidad al sistema (ver figura 16).



**Figura 16.** Tercer diseño de sistema de suspensión. 1) Masa. 2) Balero. 3) Placa de cobre. 4) Muelle superior. 5) Guías de aluminio. 6) Imanes permanentes de neodimio. 7) Rayo. 8) Muelle inferior.

El muelle inferior del brazo de la suspensión está formada por una lámina en forma de U para tener un efecto de restitución de fuerzas (ver figura 16), pero las láminas son demasiado delgadas para soportar un peso significativo (20 kilogramos deseables); así, el proceso de fabricación sería complicado y caro.

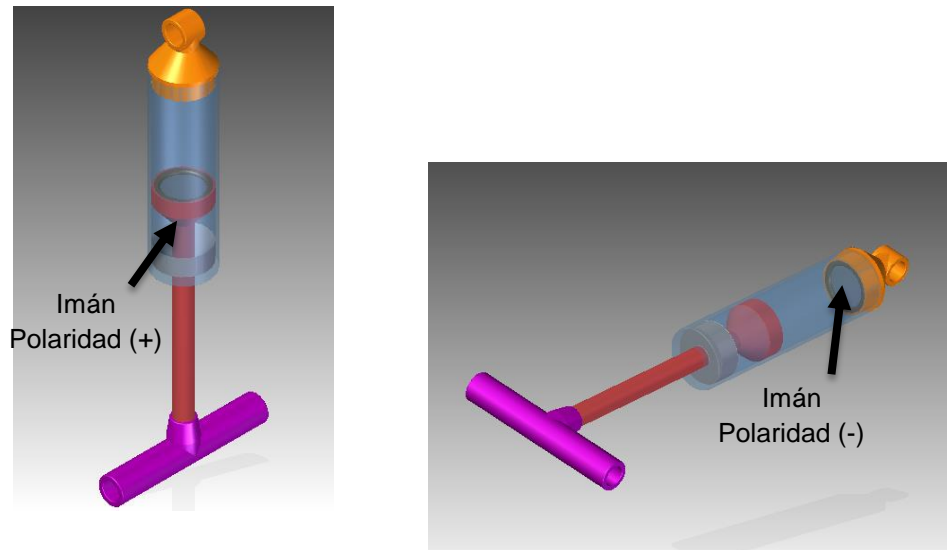
Otra complicación es mantener la dirección del movimiento de las placas con imanes. Esta tarea se le asignó a cuatro guías hechas de barras de aluminio delgadas, lo que provocaría deformaciones, así como probablemente, la falla de las mismas.

Se retomó el primer a) diseño de una suspensión con un par de imanes permanentes en su interior y un resorte por fuera.

d) En el cuarto diseño se contempla nuevamente un émbolo, en cuyo extremo se fija un imán permanente en repulsión con otro en el extremo de un cilindro (ver figura 17).

Es bien sabido que las fuerzas de repulsión entre imanes aumentan, si se incrementa el área en contraposición y el volumen de material; así se optó por usar imanes con mayor superficie.





**Figura 17.** Cuarto diseño con principios de funcionamiento únicamente electromagnéticos.

El uso de dos principios de funcionamiento magnéticos en este último diseño era algo favorable a diferencia de los diseños anteriores, debido a que no involucraba principios de funcionamiento mecánicos, tales como el resorte en el primer diseño y la lámina que destaca en los diseños b) y c).

Las uniones de ésta suspensión presentarían mejor estabilidad frente a los muelles (láminas) de los diseños anteriores.

A pesar de tener imanes con mayor área de repulsión, la fuerza seguía siendo baja.

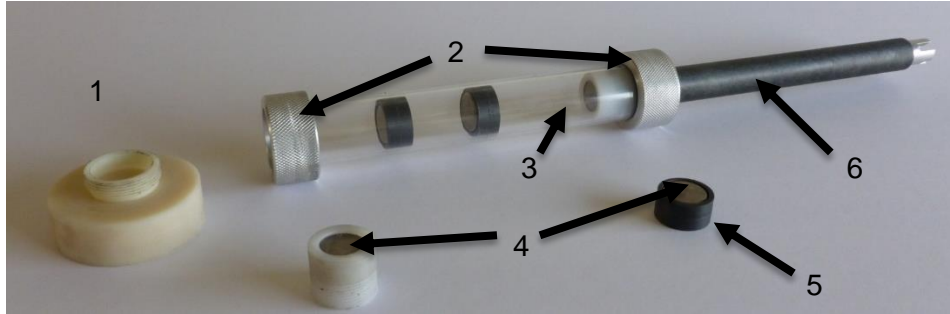
Para resolver esta dificultad se pensó sencillamente en agregar más imanes a este último diseño, lo que intuitivamente nos podría dar mayores fuerzas de repulsión.

e) En este diseño se agregaron 5 pares de imanes de los cuales, un par está fijo en la base del sistema de suspensión y otro par está sujeto en el émbolo (ver figura 18).

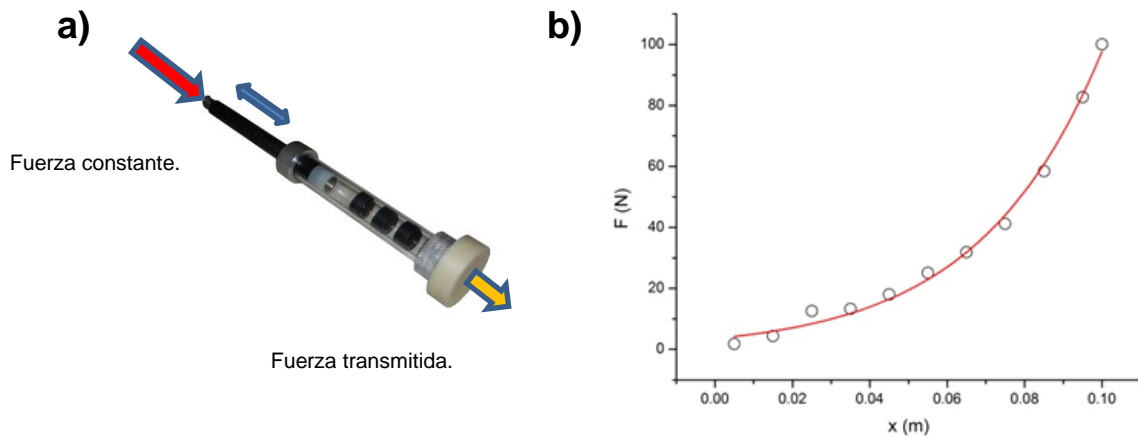
Los tres pares restantes están “flotando” dentro del tubo de plástico, debido a que están en repulsión magnética entre sí y también con los dos pares mencionados anteriormente.

Se fabricó este sistema de suspensión con un tubo de plástico, el cual tenía como objetivo, darnos una idea de la fuerza máxima que podría soportar un arreglo de mayor número de imanes.

El prototipo de esta propuesta, se caracterizó de forma estática, agregando cargas de distintas magnitudes y registrando estos datos contra el desplazamiento medido de tal forma que se obtiene una curva de fuerza contra desplazamiento como se aprecia en la figura 19b. En la figura 18 se observa el amortiguador.

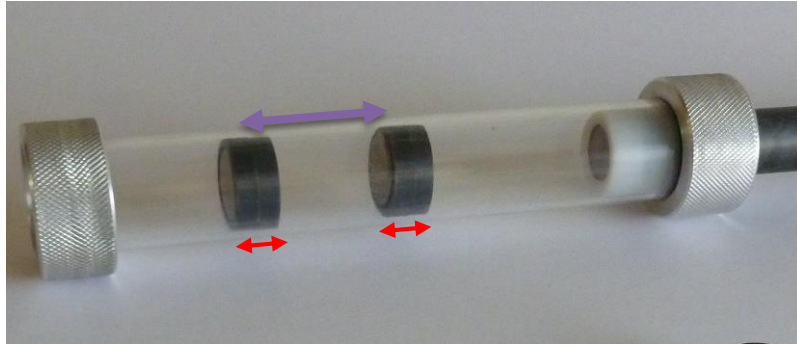


**Figura 18.** Diseño e) de la suspensión magnética seca. 1) Base. 2) Tapas de aluminio. 3) Tubo de plástico. 4) Imanes. 5) Camisa de teflón. 6) Émbolo.



**Figura 19.** a) Sistema de suspensión ensamblado, caracterizado de manera estática. b) Curva de fuerza contra desplazamiento de la caracterización estática.

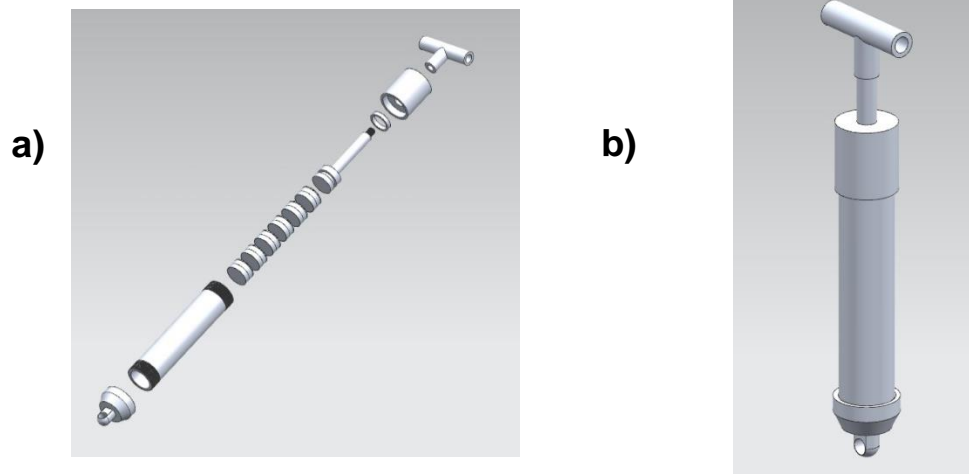
En este prototipo, al momento de encapsular los imanes se reconoció la presencia de otro principio más: la fricción de Coulomb. Esta fricción es debida al movimiento oscilatorio de las camisas en contacto con el cilindro de plástico. La fuerza con la que se mueven los imanes es contraria a la fuerza de fricción del cilindro. En la figura 20 se muestra la representación de la fricción de Coulomb (flechas rojas) y el movimiento oscilante de los imanes permanentes (flecha amarilla).



**Figura 20.** Esquema de la fricción de Coulomb debida al contacto de las camisas de teflón con el cilindro de plástico.

La propuesta f) del sistema de suspensión magnética contiene un mayor número de imanes; seis pares de imanes permanentes (cada par trabajando a repulsión) ver figura 21.

Tentativamente el mayor número de imanes conllevaría a un concepto donde las magnitudes de fuerzas sean mayores, respecto a los diseños anteriores, con una mejor estabilidad al momento de comprimir la suspensión, ya que las uniones son articulaciones firmes.



**Figura 21.** Diseño final de la suspensión magnética seca. a) Piezas de la suspensión magnética seca. b) Ensamble final de la suspensión magnética, para su posterior fabricación.

Cabe destacar que la suspensión funcionaría a compresión, involucrando los principios electromagnéticos de corrientes de *Eddy* y fuerzas de repulsión.

Sin embargo a tracción, habría corrientes de *Eddy*, lo que cumple con la función de amortiguador en su analogía, pero no existirían fuerzas que puedan restituir la energía sujeta a tracción, por lo que podría decirse que es un amortiguador de simple efecto.

### II.3. Análisis para decidir la propuesta final.

Los criterios u objetivos de diseño a tomar en cuenta en este caso son:

- SEGURIDAD: Fiabilidad, vida útil.
- COMERCIAL: Costo, disponibilidad.
- FUNCIONAMIENTO: Energía disipada, carga máxima, carrera máxima, peso, eficiencia.
- AMBIENTE: Vibración, contaminación, resistencia a la humedad y temperatura.
- MANUFACTURA: Número de piezas, precisión, disponibilidad de maquinaria, facilidad de ensamble.
- APLICACIÓN: Accesibilidad, desmontaje, mantenimiento.
- INSTALACIÓN: Facilidad de instalación.
- GEOMETRÍA: Dimensiones.

A continuación se muestran los porcentajes de satisfacción de un objetivo que se asignan de acuerdo al conocimiento, experiencia e intuición que tenga el diseñador.

100% - Objetivo satisfecho en todos los aspectos.

90% -Objetivo satisfecho en los aspectos importantes.

75% -Objetivo satisfecho en la mayoría de los aspectos.

50% - Punto medio entre la completa satisfacción y la no satisfacción.

25% -Objetivo satisfecho en algo, pero menos de la mitad de todos los aspectos.

La comparación se realiza con ayuda de una matriz de decisión [19], en la que aparecen distintos criterios y alternativas de diseño a evaluar; además de otros parámetros como los factores de peso que al igual que los porcentajes de satisfacción, su asignación depende del o los proyectistas.

Otros parámetros que hay que considerar son los siguientes:

Porcentaje total de satisfacción de objetivos =  $\sum w_i X_i$

Donde:

$w_i$  es el factor de peso dado a un objetivo  $O_i$

$X_i$  es el porcentaje de satisfacción de un objetivo  $O_i$

La suma de los factores de peso es igual a 1.

Debido a que el diseño e) es un prototipo del diseño en aluminio, se aclara que el el diseño que se está tomando en consideración es este último.

Objetivos $w$ Alternativas	$O_s$	$O_s$	$O_c$	$O_c$	$O_f$	$O_f$	$O_f$
	Fiabilidad	Vida útil	Costo	Disponibilidad	En. Disipada	Carga máx.	Carrera máx.
	0.03	0.09	0.05	0.03	0.1	0.1	0.03
Diseño a)	75	75	75	75	50	25	75
	2.25	6.75	3.75	2.25	5	2.5	2.25
Diseño b)	25	50	90	75	50	50	75
	0.75	4.5	4.5	2.25	5	5	2.25
Diseño c)	50	75	25	50	75	75	75
	1.5	6.75	1.25	1.5	7.5	7.5	2.25
Diseño d)	90	90	75	75	50	25	90
	2.7	8.1	3.75	2.25	5	2.5	2.7
Diseño e)	75	75	75	75	25	50	75
	2.25	6.75	3.75	2.25	2.5	5	2.25
Diseño f)	90	90	75	75	90	90	90
	2.7	8.1	3.75	2.25	9	9	2.7

$O_s$  =Objetivos de seguridad;  $O_c$  =Objetivos comerciales;

$O_f$  =Objetivos de funcionamiento;

Objetivos $w$ Alternativas	$O_f$	$O_f$	$O_a$	$O_a$	$O_a$	$O_m$	$O_m$
	Peso	Eficiencia	Vibración	Contaminación	Res. a humedad	No. de piezas	Precisión
	0.06	0.09	0.08	0.03	0.03	0.03	0.04
Diseño a)	90	50	75	75	50	75	75
	5.4	4.5	6	2.25	1.5	2.25	3
Diseño b)	90	75	50	90	50	90	50
	5.4	6.75	4	2.7	1.5	2.7	2
Diseño c)	25	50	75	50	75	25	75
	1.5	4.5	6	1.5	2.25	0.75	3
Diseño d)	90	90	75	75	90	90	75
	5.4	8.1	6	2.25	2.7	2.7	3
Diseño e)	75	75	75	75	90	75	75
	4.5	6.75	6	2.25	2.7	2.25	3
Diseño f)	75	90	75	75	90	75	75
	4.5	8.1	6	2.25	2.7	2.25	3

$O_f$  =Objetivos de funcionamiento;  $O_a$  =Objetivos de ambiente;

$O_m$  =Objetivos de manufactura;

Objetivos $w$ Alternativas	$O_m$	$O_m$	$O_{ap}$	$O_{ap}$	$O_{ap}$	$O_{in}$	$O_g$	$\sum w \cdot X$ Porcentaje total de satisfacción de objetivos
	Disp. de maq.	Ensamble	Accesibilidad	Desmontaje	Mantenimiento	Instalación	Dimensiones	
	0.02	0.03	0.03	0.02	0.05	0.03	0.03	
Diseño a)	75	75	75	90	75	90	90	66.6
	1.5	2.25	2.25	1.8	3.75	2.7	2.7	
Diseño b)	90	75	75	75	90	50	75	65.35
	1.8	2.25	2.25	1.5	4.5	1.5	2.25	
Diseño c)	50	50	50	50	75	75	25	59.5
	1	1.5	1.5	1	3.75	2.25	0.75	
Diseño d)	75	90	75	90	90	75	75	74.4
	1.5	2.7	2.25	1.8	4.5	2.25	2.25	
Diseño e)	75	90	75	90	90	25	75	67.95
	1.5	2.7	2.25	1.8	4.5	0.75	2.25	
Diseño f)	75	50	75	75	90	75	75	82.05
	1.5	1.5	2.25	1.5	4.5	2.25	2.25	

$O_m$  =Objetivos de manufactura;  $O_{ap}$  =Objetivos de aplicación;

$O_{in}$  =Objetivos de instalación;  $O_g$  =Objetivos de geometría.

El resultado del análisis hecho anteriormente con matrices de decisión, deja ver una cercanía entre los valores de los porcentajes reales de satisfacción de los diseños d), e) y el diseño f); esto es razonable porque en esencia tienen la misma configuración, salvo por el número de imanes que se incluyen en el diseño f) de aluminio.

#### II.4. Propuesta Final.

Dado que el diseño f) obtuvo la mayor satisfacción de objetivos, fue este el que se seleccionó para proceder con el trabajo de tesis. Teniendo en cuenta los materiales convenientes, con el arreglo adecuado de los imanes permanentes, se procedió a la fabricación. El material que conforma la mayor parte de las piezas es aluminio 6061-T6. Este material es ligero, relativamente rígido y es conductor.

Las camisas de los imanes permanentes están hechas de teflón, para soportar el desgaste a los que se someten los imanes permanentes en el movimiento oscilatorio. Este desgaste provoca un principio de funcionamiento más, que es la fricción de Coulomb. Este principio mecánico fue identificado en el último diseño.

Por último, los imanes permanentes están hechos de una aleación de neodimio, hierro y boro, revestidos por níquel, cobre y níquel negro. El modelo de estos imanes es DX04B-N52, cuyas dimensiones son de una pulgada de diámetro y un cuarto de pulgada de espesor. La marca de estos imanes es K&J Magnetics Inc. [20].

En la foto 22 se muestra cada uno de los elementos (ya contruidos) que conforman el sistema de suspensión magnética seca



**Figura 22.** Foto de las piezas finales que conforman el sistema de suspensión magnética. 1) Tapa superior. 2) Émbolo. 3) Imanes permanentes. 4) Camisas de teflón. 5) Cilindro. 6) Tapa inferior.



En la foto 23 se muestra el amortiguador ensamblado, con el cual se hicieron los experimentos en el banco de pruebas.

La tapa superior fue rediseñada, con una longitud mayor para obtener un movimiento siempre axial, reduciendo así vibraciones no deseadas al momento de probar el amortiguador.



**Figura 23.** Foto del amortiguador magnético ensamblado.

### III. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE AMORTIGUADORES

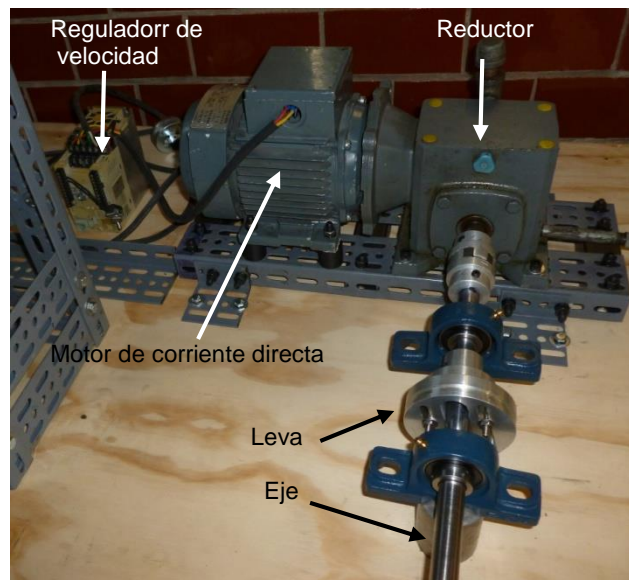
La caracterización en este caso se refiere a medir el desempeño dinámico del amortiguador. Esto se realizó con un banco de pruebas.

En un principio, la base de este banco fue hecha de madera. En dicha base se montaron un motor conectado a un reductor, la flecha de salida del reductor se conecta a una flecha montada entre dos chumaceras, la cual transmite potencia a una leva. Esta última le transmite un movimiento periódico al vástago del pistón. Conforme se comprime el pistón, la base del mismo transmite fuerza a una celda de carga. A continuación se explica con mayor detalle el arreglo y la función que tienen los elementos que conforman el banco de pruebas.

El motor está conectado a un reductor de velocidad, cuya función es disminuir la velocidad angular de la flecha de salida del motor.

El eje proveniente del reductor de velocidad transmite potencia a una leva. Las levas otorgan un mecanismo sencillo para producir el movimiento periódico de traslación, a partir de un movimiento de giro [21].

En la imagen 24 se puede apreciar a la izquierda el regulador de velocidad, conectado al motor de corriente directa. En la parte superior derecha se encuentra el reductor de velocidad, el cual transmite la velocidad angular al eje donde está montada la leva.

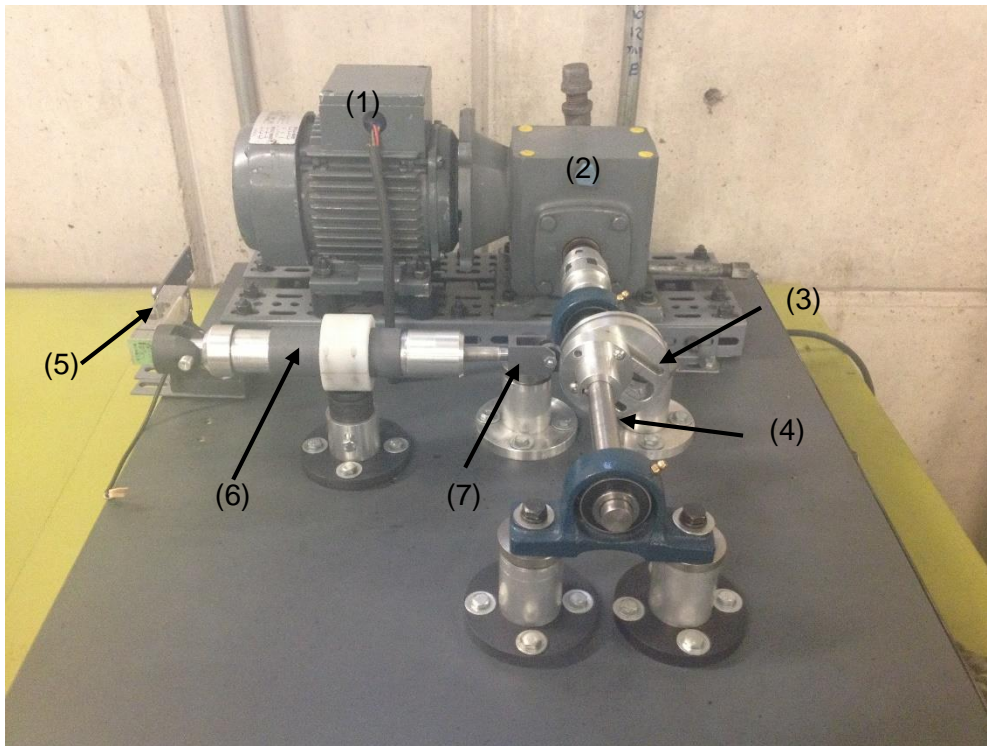


**Figura 24.** Foto del primer banco de pruebas (montado en una base de madera) para la realización de la caracterización dinámica.

Tras pruebas del conjunto de motor, reductor y eje, se observó que este último no giraba sobre su propio eje de simetría, por lo que se tuvo que volver a fabricar, así como toda la base de madera cambiarla por una base de acero, para evitar lo mayor posible, deformaciones que sumadas dieran vibraciones no deseadas.

Por consiguiente se tuvo que volver a fabricar la estructura que soporta a la celda de carga y a la suspensión magnética, debido a la inestabilidad que presentaba, por una estructura rígida.

La nueva estructura de la base está hecha enteramente de acero, donde se volvió a colocar el motor, el reductor, las chumaceras de la flecha y los soportes del amortiguador (ver imagen 25).

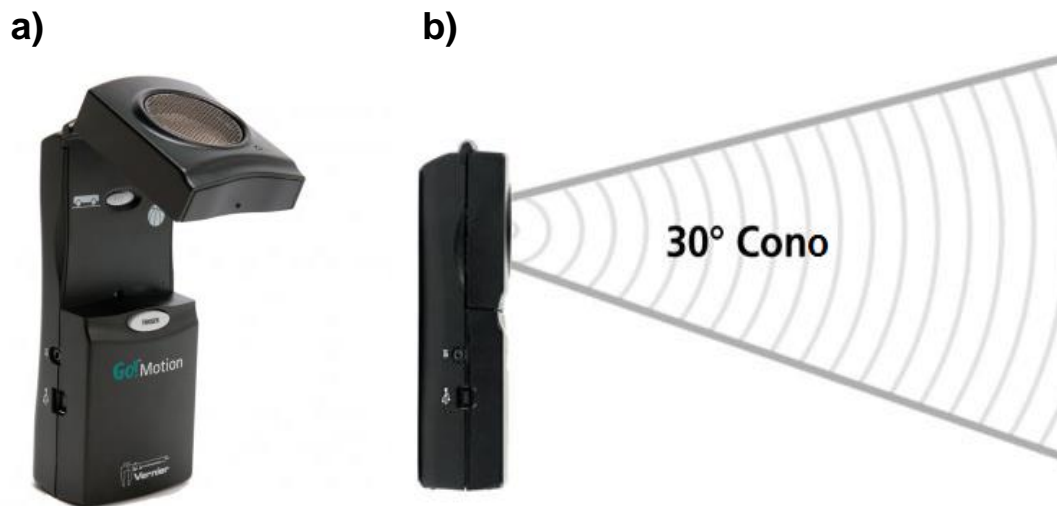


**Figura 25.** Banco de pruebas con base hecha en acero. 1) Motor de corriente directa. 2) Reductor de velocidad. 3) Leva. 4) Eje. 5) Celda de carga. 6) Amortiguador. 7) Seguidor.

Partes del amortiguador magnético también tuvieron que ser fabricadas de nuevo así como las juntas, las cuales quedaban holgadas.

La potencia de rotación del motor de corriente directa se transfiere al movimiento del eje con la leva acoplado al motor. La leva transmite el movimiento al pistón y los imanes permanentes comienzan a repelerse con mayor fuerza. Esta fuerza y el desplazamiento se miden con una celda de carga y un sensor de desplazamiento respectivamente.

El sensor utilizado para la medición de desplazamiento (ver figura 26) del pistón genera ondas ultrasónicas formando un cono de 30° como se aprecia en la figura 26b.



**Figura 26.** a) Foto del sensor de desplazamiento que se utilizará en las pruebas [22]; b) el sensor genera ondas ultrasónicas para medir el desplazamiento.

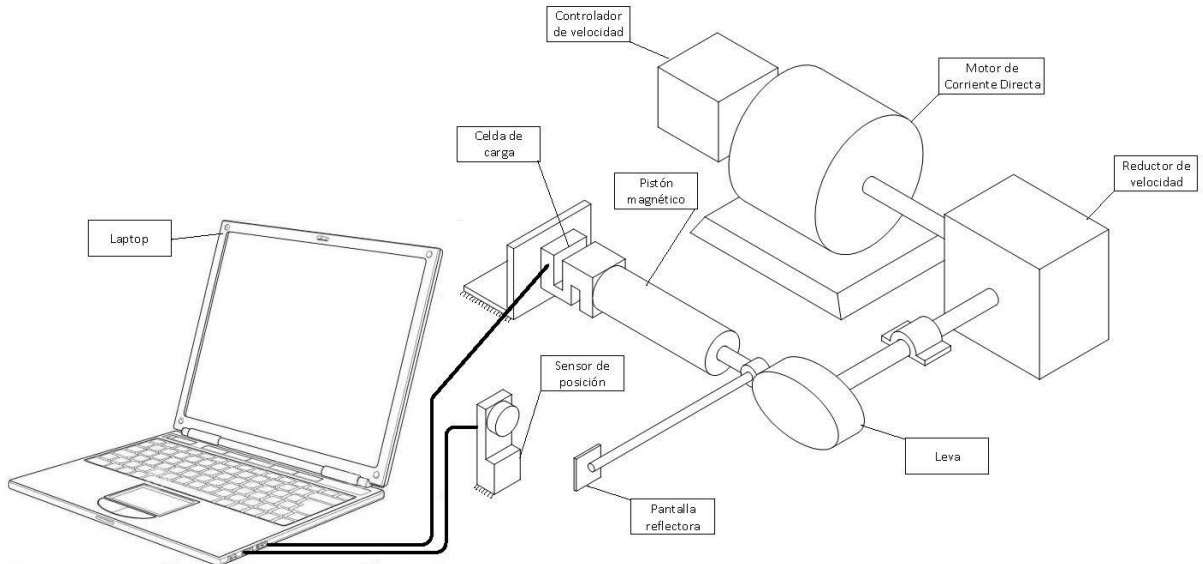
La forma para poder medir la fuerza transmitida es a través de una celda de carga extraída de una báscula comercial (ver imagen 28). La señal de la celda se amplifica y posteriormente se envía a una tarjeta de adquisición de datos Texas Instruments.

Con las mediciones se hace una gráfica de fuerza contra desplazamiento, en la que se obtienen curvas de histéresis.

El área que encierran las curvas de histéresis se puede asociar con la disipación de energía por las corrientes de *Eddy* y fricción de Coulomb en el amortiguador, durante uno o más ciclos.

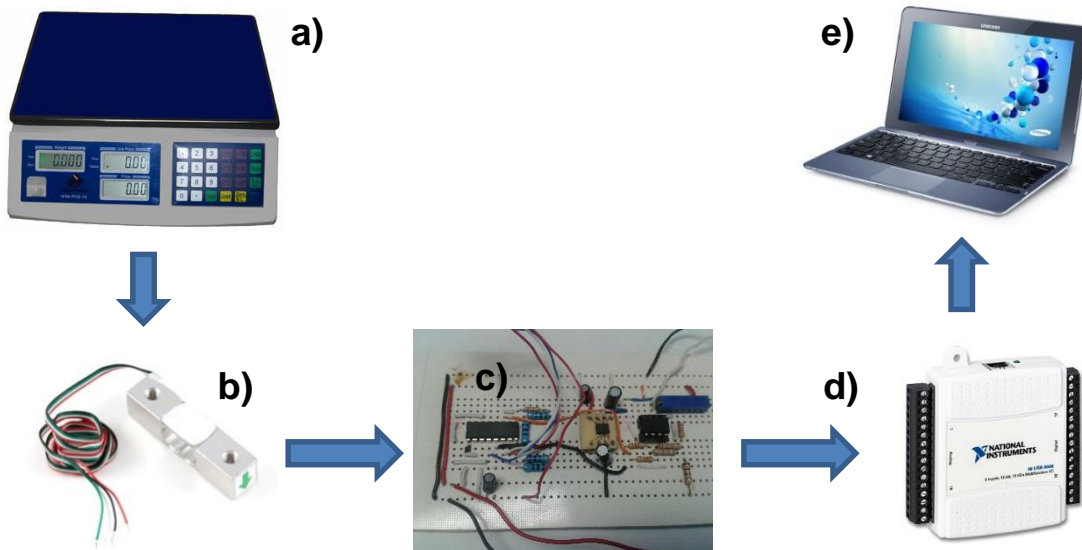
Finalmente la información es enviada a un ordenador portátil para su posterior análisis.

El concepto para poder caracterizar el sistema de suspensión está representado por la imagen 27, un esquema en donde se muestra el conjunto de elementos que conforman el banco de pruebas y el ordenador portátil.



**Figura 27.** Esquema de los componentes para la caracterización de la suspensión magnética seca.

En la imagen 28 se ilustra el acoplamiento de la celda de carga con el ordenador.



**Figura 28.** a) Báscula comercial. b) Celda de carga extraída de la báscula. c) Amplificador (INA125P). d) Tarjeta Texas Instruments (NI USB-6008). e) Ordenador para recabar los datos experimentales.

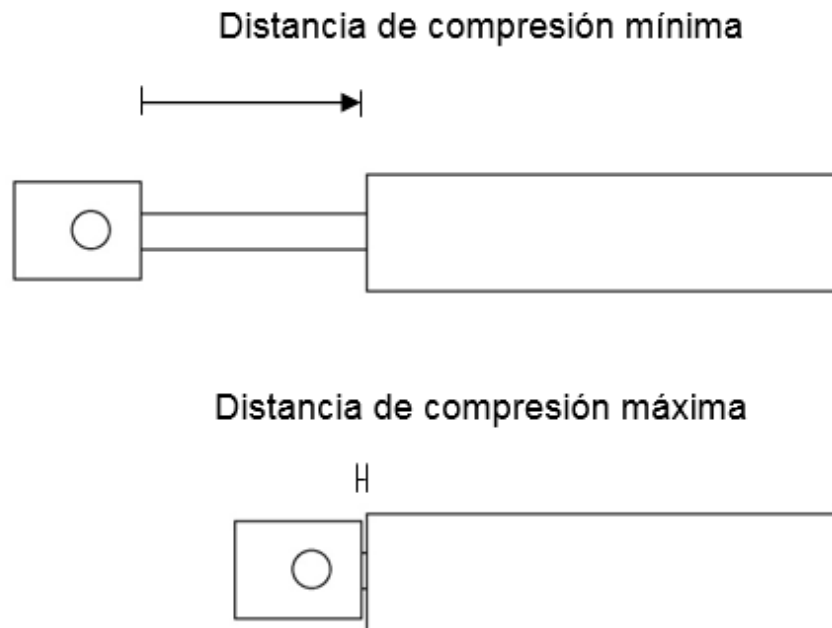
### III.1. Resultados y análisis.

Las pruebas experimentales comenzaron con una frecuencia de 10 rpm, en donde los datos fueron enviados desde el banco de pruebas hasta el ordenador portátil. Se registraron datos de fuerza contra tiempo y desplazamiento contra tiempo.

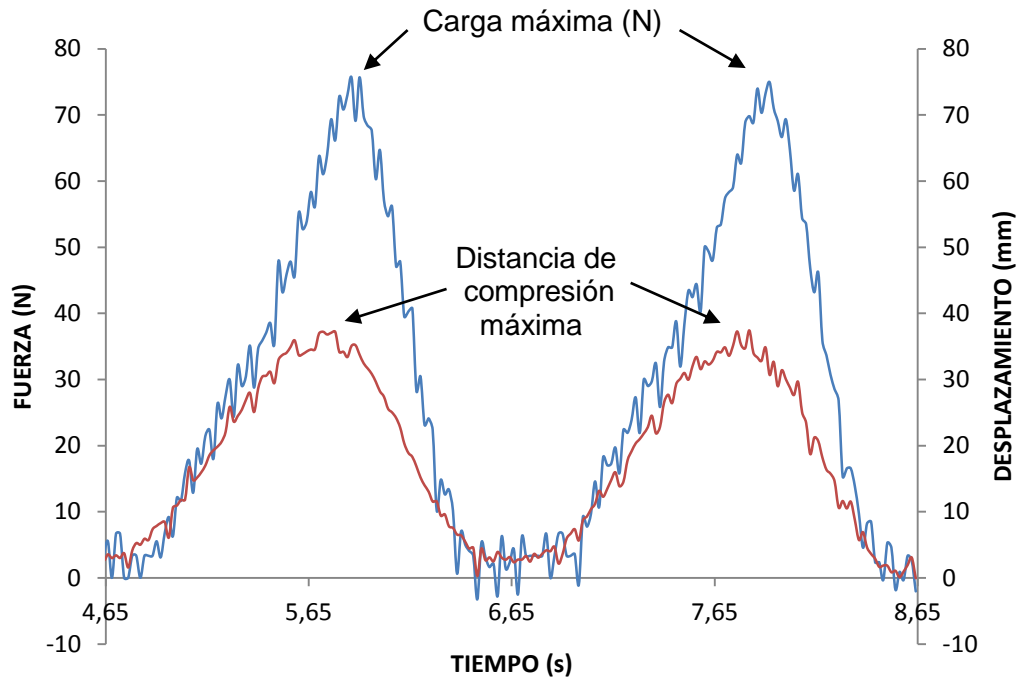
Se registraron datos probando de 10 en 10 rpm de diferencia, hasta llegar a las 100 rpm. La frecuencia fue convertida de rpm a Hz en las gráficas para ser congruentes con el sistema internacional de unidades.

Las figuras (30 - 39) muestran las señales de fuerza vs. tiempo y desplazamiento vs. tiempo correspondientes a cada frecuencia.

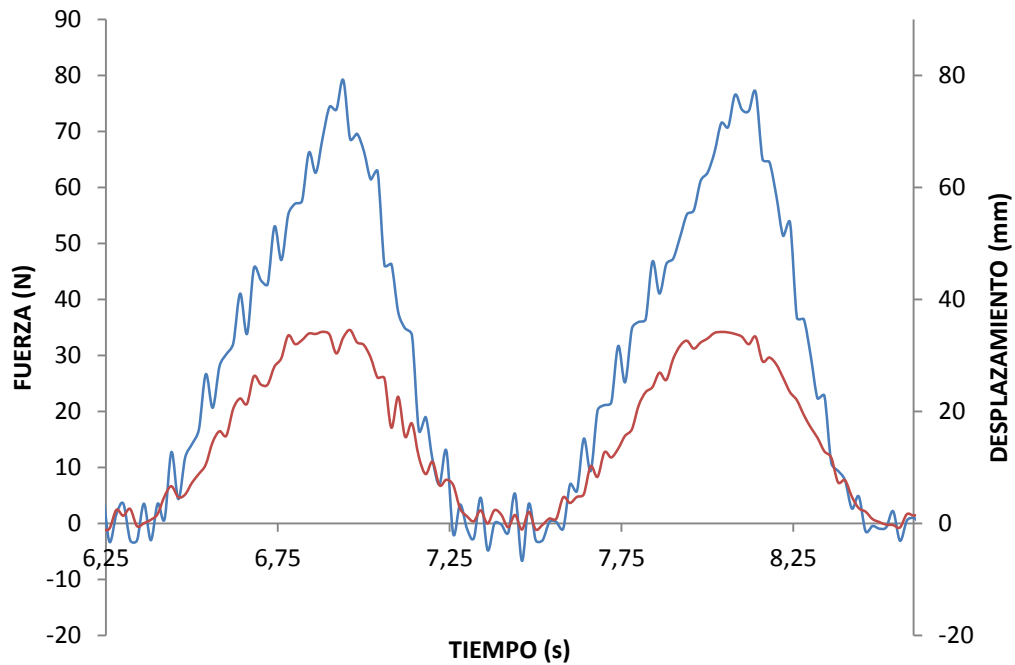
Cabe aclarar que el desplazamiento medido se refiere al desplazamiento de compresión; a menor desplazamiento del émbolo, el pistón no trabaja y la fuerza registrada sería cero y viceversa (ver figura 29).



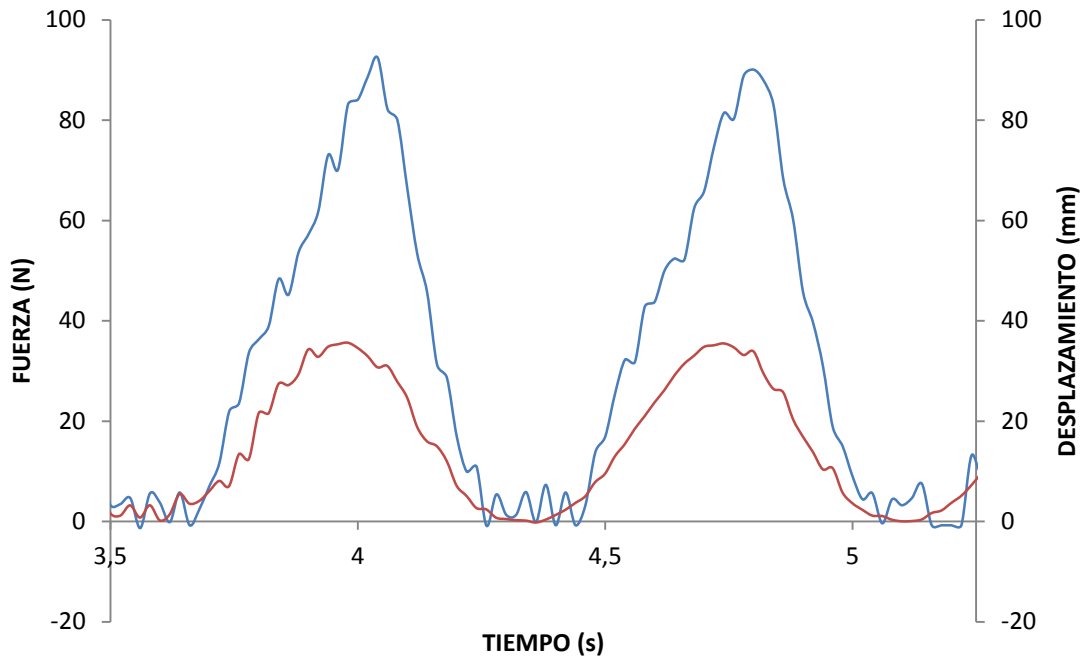
**Figura 29.** Esquema de la distancia de compresión máxima y mínima.



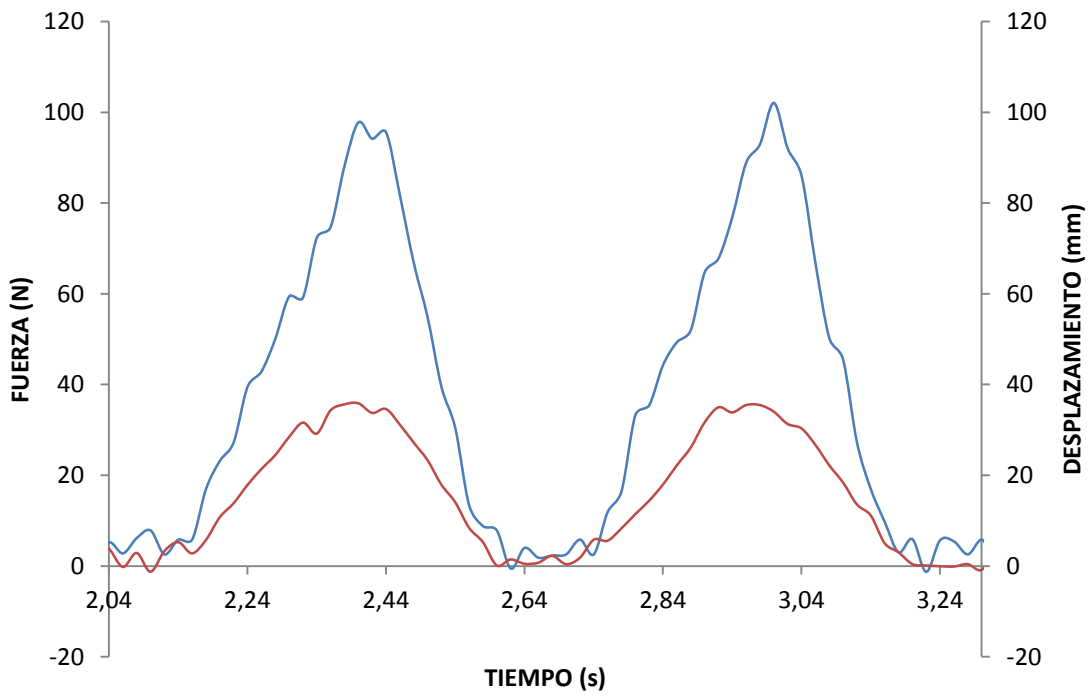
**Figura 30.** Gráfica de fuerza (en color azul) contra tiempo y desplazamiento (en color rojo) contra tiempo a 0.41 Hz.



**Figura 31.** Gráfica de fuerza (en color azul) contra tiempo y desplazamiento (en color rojo) contra tiempo a 0.836 Hz.

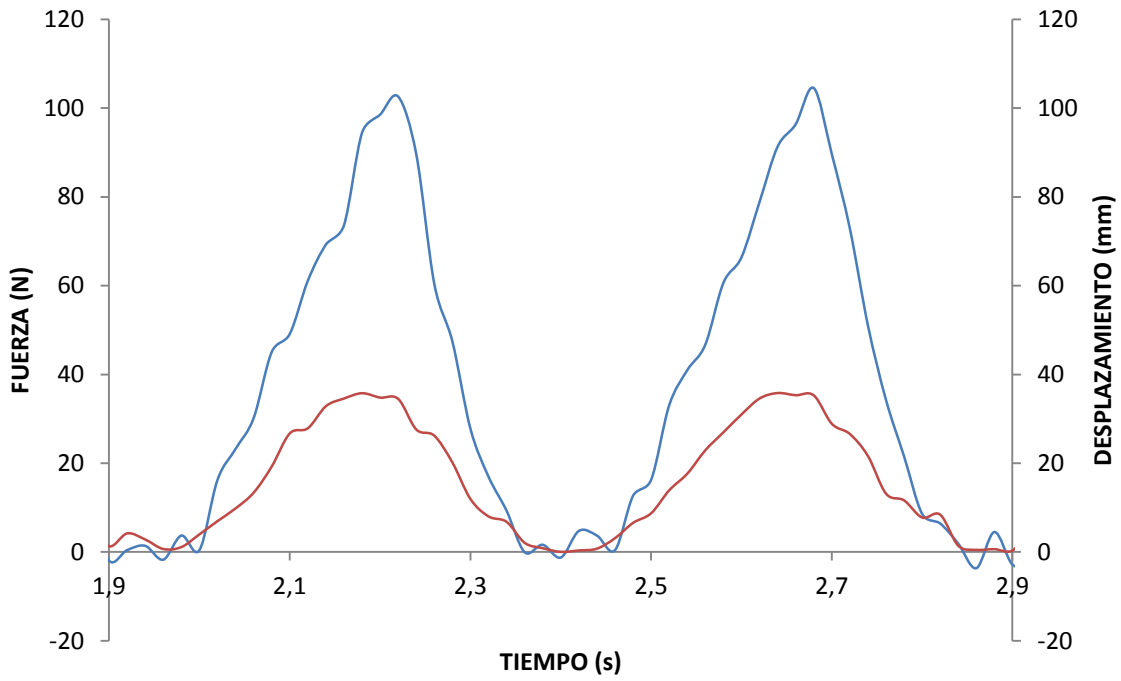


**Figura 32.** Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 1.255 Hz.

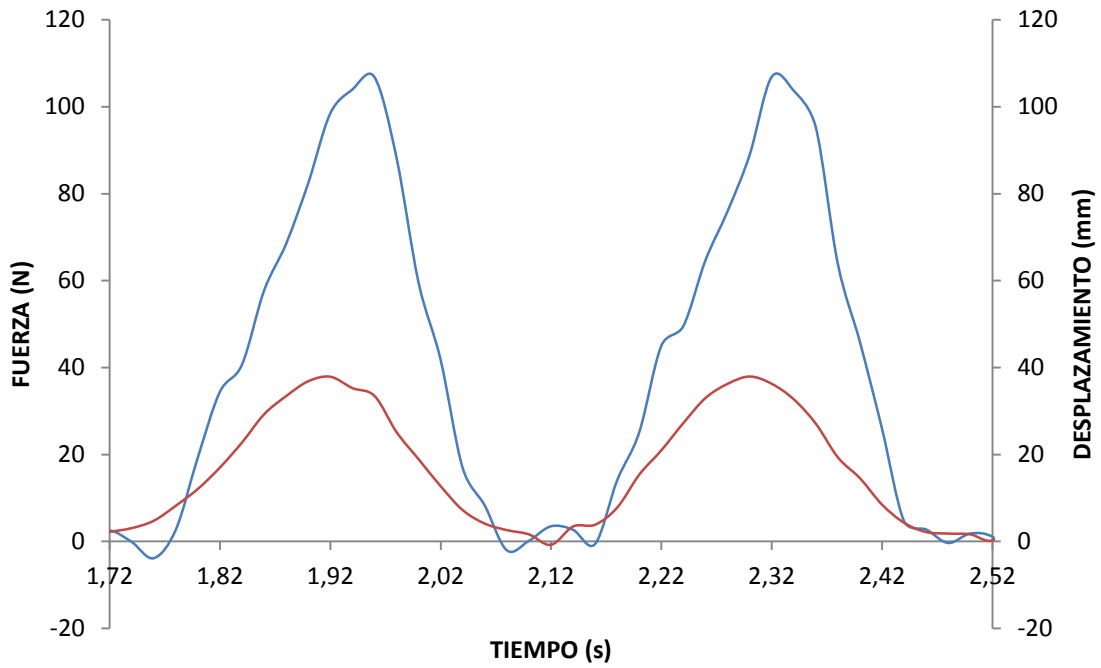


**Figura 33.** Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 1.673 Hz.





**Figura 34.** Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 2.091 Hz.



**Figura 35.** Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 2.51 Hz.

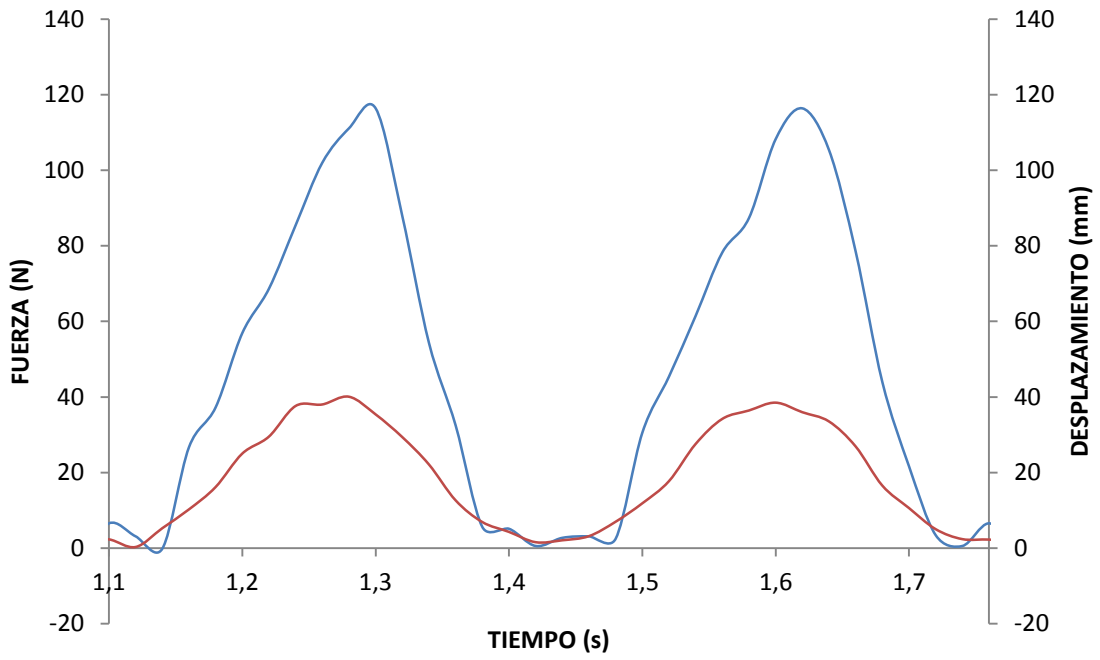


Figura 36. Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 2.928 Hz.

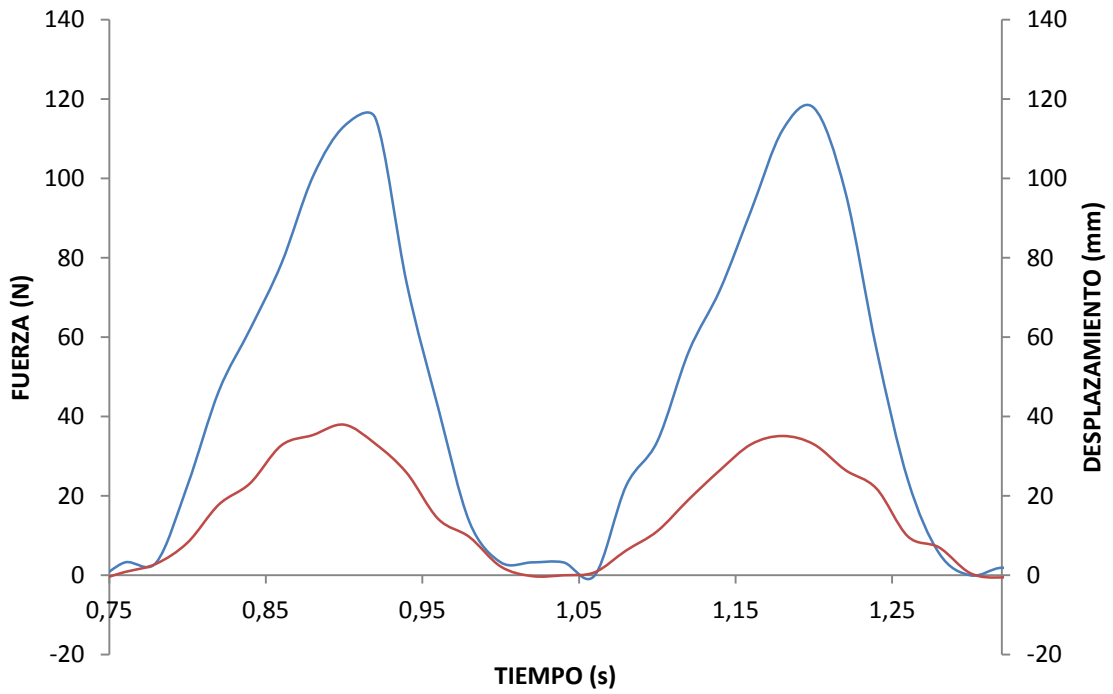


Figura 37. Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 3.346 Hz.

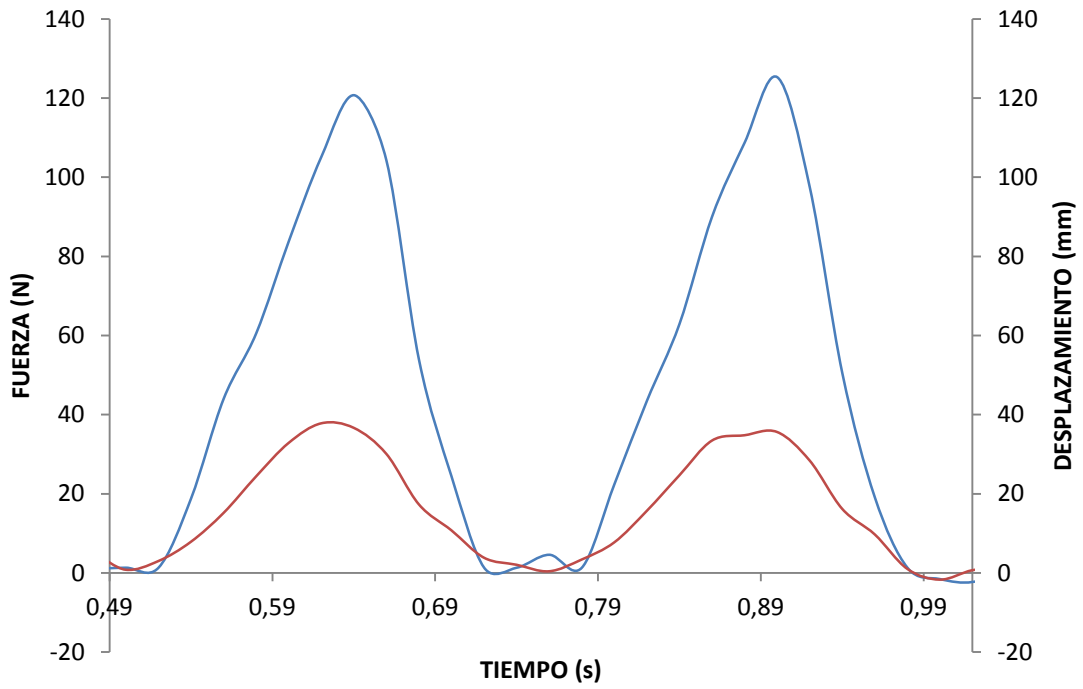


Figura 38. Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 3.765 Hz.

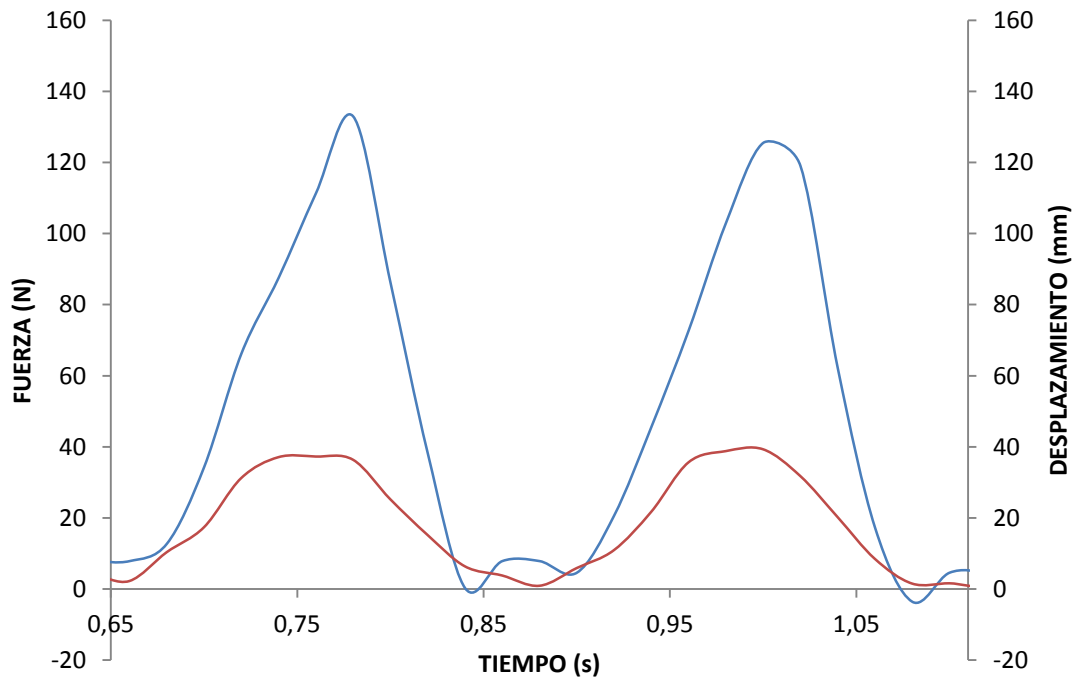
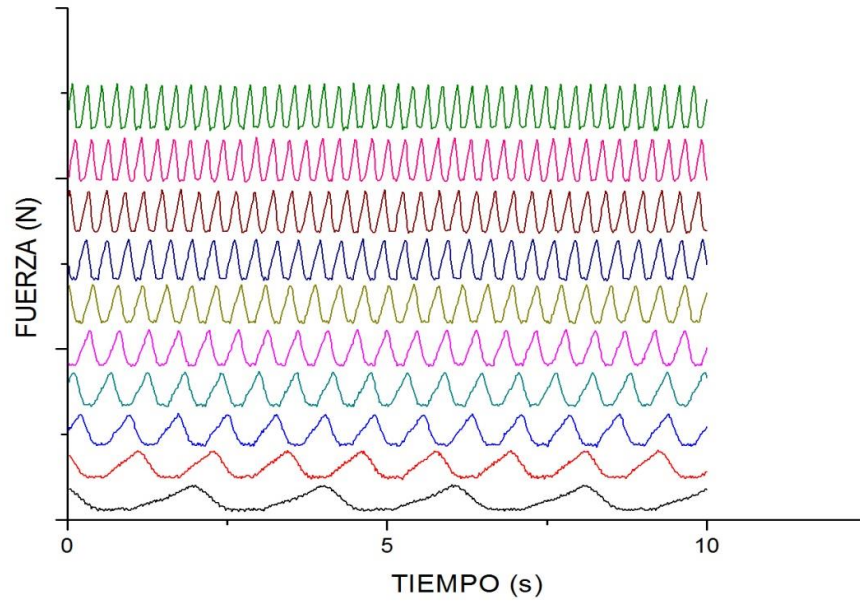
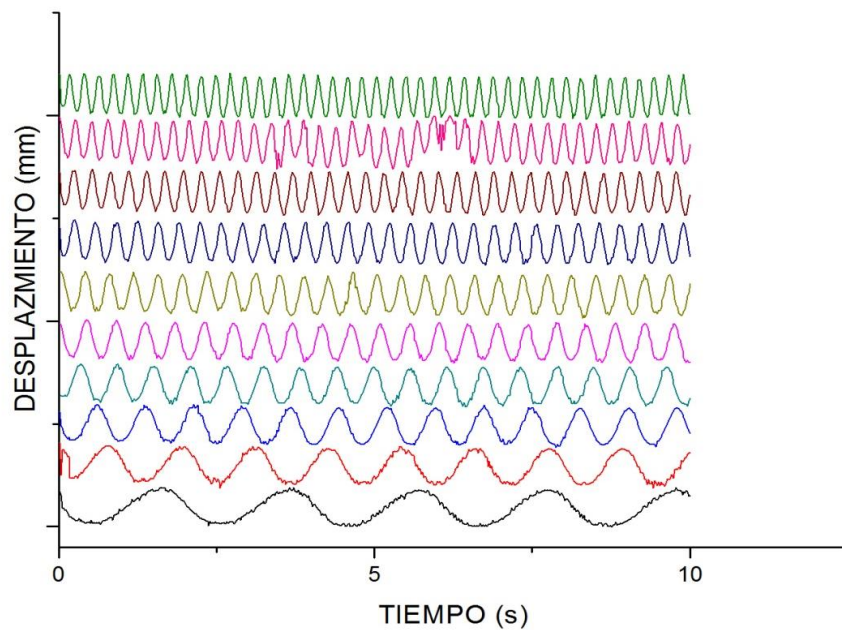


Figura 39. Gráfica de fuerza y desplazamiento contra tiempo a 4.183 Hz.

Las gráficas 40 y 41 muestran una comparación de las curvas de fuerza y de las curvas de desplazamiento a distintas frecuencias, respectivamente. Cada una de las diez curvas en cada gráfica representa el promedio de tres mediciones.

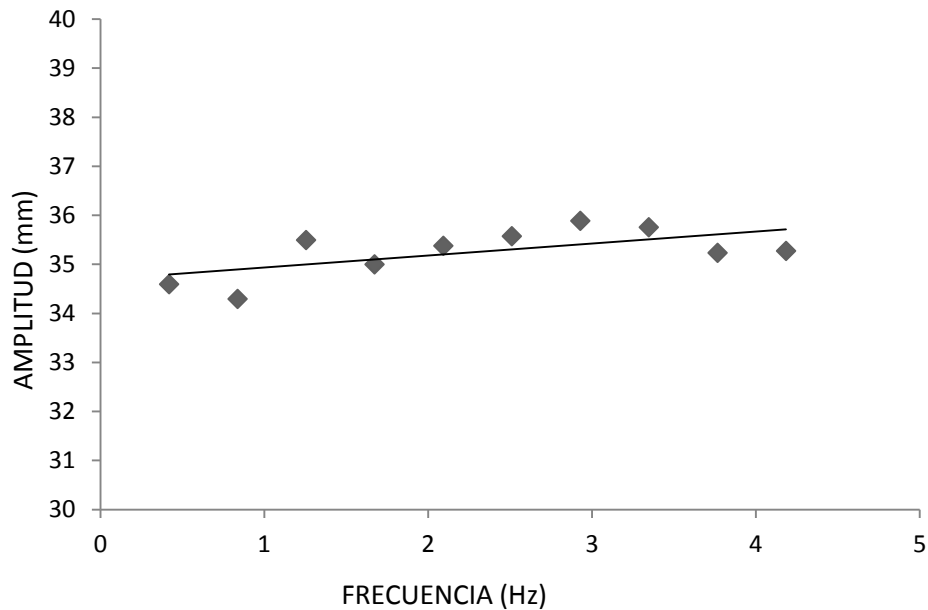


**Figura 40.** Grafica comparativa de fuerza contra tiempo a distintas frecuencias, de abajo hacia arriba la frecuencia se incrementa.



**Figura 41.** Grafica comparativa de desplazamiento contra tiempo a distintas frecuencias, de abajo hacia arriba la frecuencia se incrementa.

La gráfica 42 muestra la distancia de compresión (o recorrido) del pistón. Tal como se observa el recorrido permanece prácticamente constante (alrededor de 35 m) para todas las frecuencias. El ligero incremento que muestra la línea de tendencia se debe a que la placa (utilizada como pantalla para el medidor ultrasónico) se deforma por la inercia al incrementar la frecuencia.



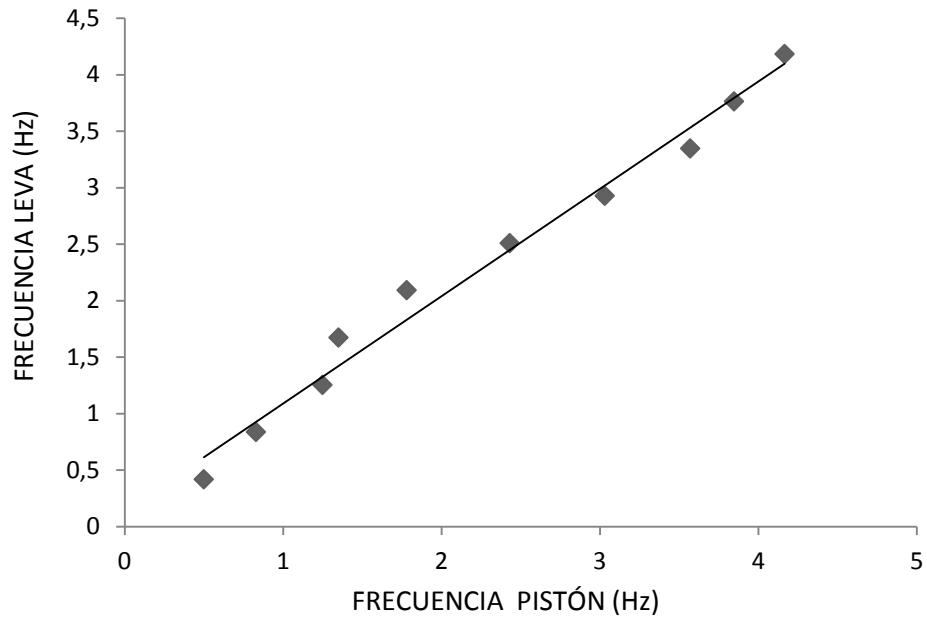
**Figura 42.** Gráfica de distancia de compresión contra frecuencia.

Las figuras 43 y 44 muestran gráficas de la frecuencia de la leva (frecuencia de excitación) contra la frecuencia del pistón. La figura 42 se obtuvo midiendo la frecuencia del pistón a partir de los datos con el sensor de desplazamiento. Esto se hizo con ayuda del programa OriginLab que proporciona los puntos de las crestas y midiendo el lapso entre dos crestas.

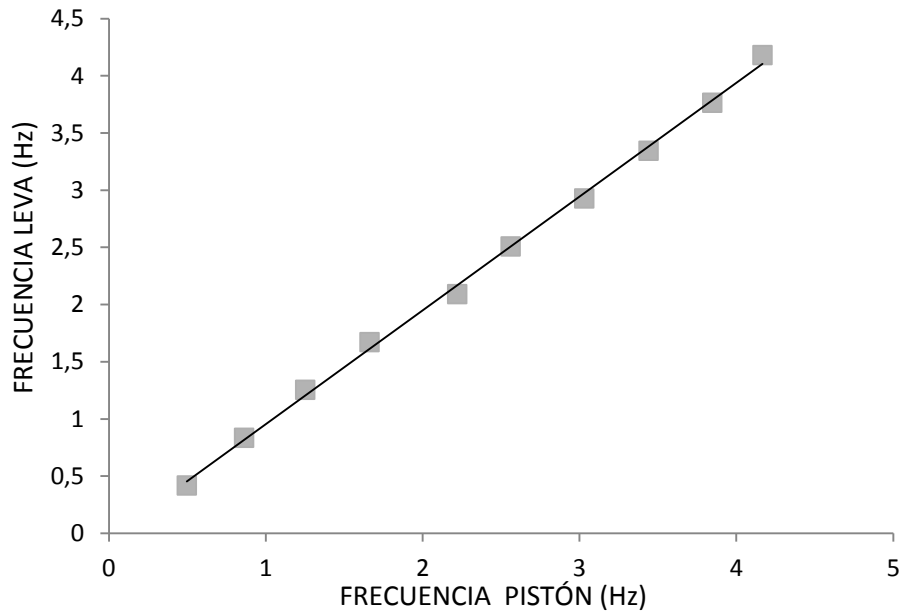
Por otra parte se hizo este procedimiento pero con los datos del sensor de fuerza, ver figura 44.

La frecuencia de la leva es la misma en ambos casos ya que se midió directamente de su eje respectivo en el banco de pruebas utilizando un tacómetro digital.

En estas dos gráficas se aprecian tendencias lineales bastante similares como es de esperarse. Lo que indican es que la frecuencia de excitación es prácticamente igual a la frecuencia de oscilación del pistón.

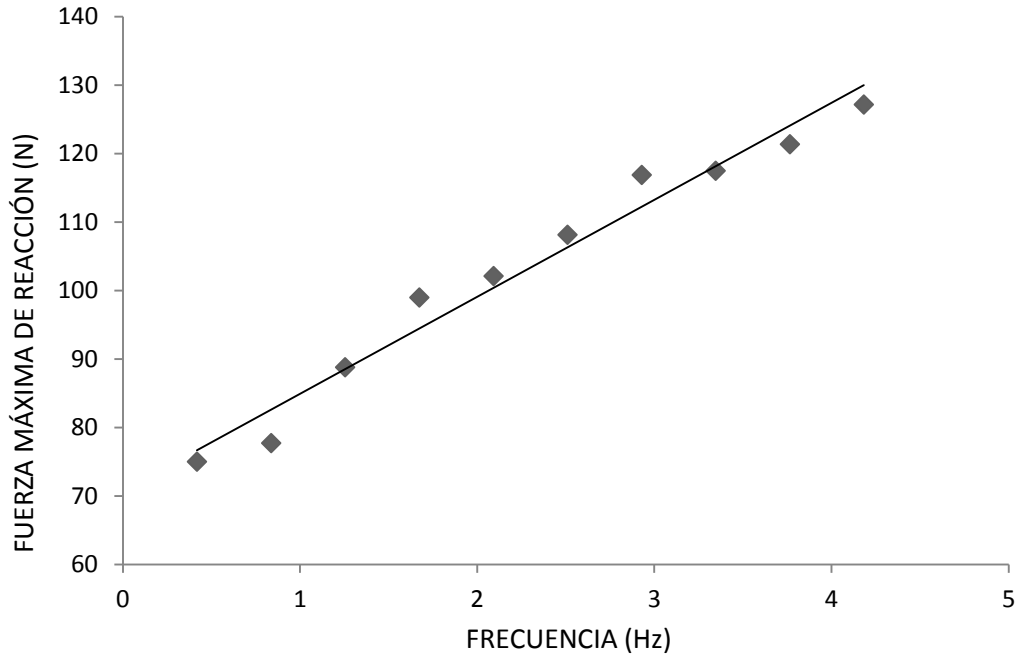


**Figura 43.** Gráfica de frecuencia de la leva contra frecuencia del pistón a partir de la gráfica de desplazamiento.



**Figura 44.** Gráfica de frecuencia de la leva contra frecuencia del pistón a partir de la gráfica de fuerza.

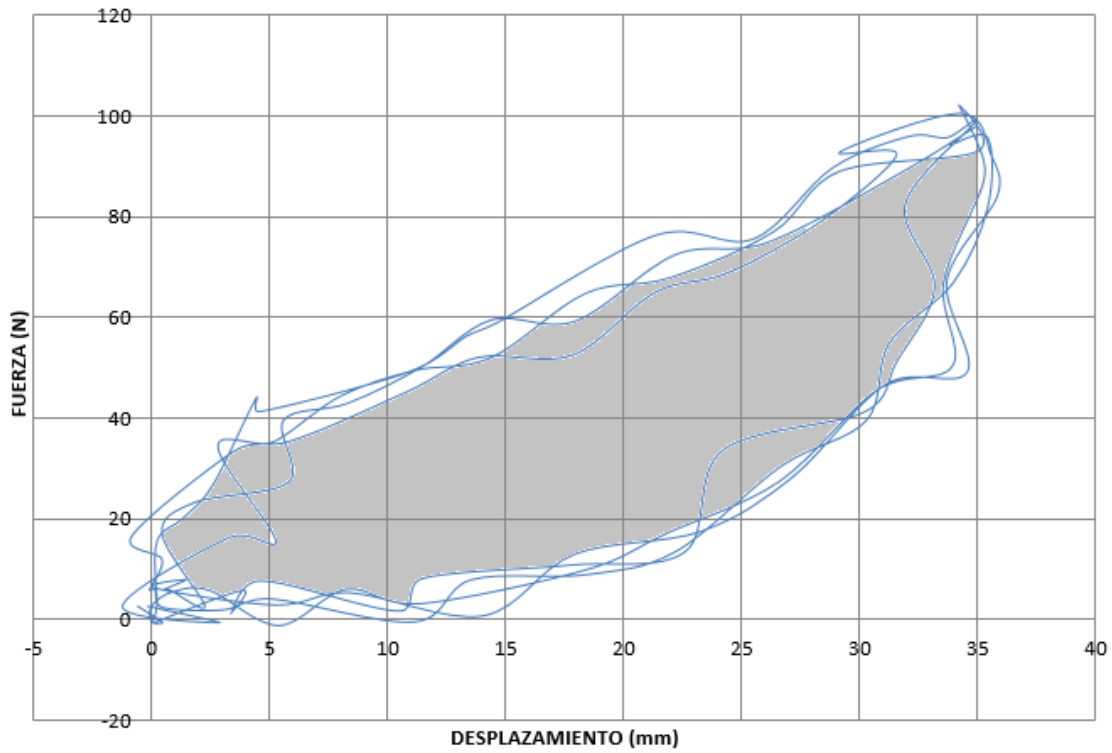
La figura 45 muestra que la fuerza máxima con la que reacciona el amortiguador al comprimirlo aumenta linealmente con la frecuencia de excitación. Este resultado indica que el amortiguador funciona como tal y que la fuerza de amortiguación que lo caracteriza (al menos en el rango de frecuencias considerado) se puede modelar matemáticamente con una relación lineal (considerando a la fuerza como directamente proporcional a la velocidad de compresión) como ocurre con ciertos tipos de amortiguadores cuyo funcionamiento se basa en la fricción viscosa.



**Figura 45.** Gráfica de fuerza máxima de reacción contra frecuencia.

Las figuras 47 a la 56 muestran las curvas de histéresis correspondientes a cada frecuencia de medición. El área dentro de las curvas de histéresis es equivalente a la energía disipada por el amortiguador.

Estas curvas se grafican a partir de los datos de fuerza y desplazamiento. La energía disipada o bien, el área dentro de cada curva de histéresis, se calculó mediante el cuadrículado de cada gráfica y un conteo aproximado. Este conteo se puede visualizar en la figura 46, el color gris representa la energía disipada.



**Figura 46.** Curva de histéresis a 0.41 Hz.

La figura 57 muestra una gráfica de energía disipada a diferentes frecuencias, en la cual hay una dispersión indicando que la energía disipada varía significativamente. La línea de tendencia muestra un comportamiento ascendente. Los datos de la figura 57 muestran gran dispersión haciendo necesarios más experimentos en un futuro si se quiere establecer una descripción más precisa del comportamiento dinámico del amortiguador.



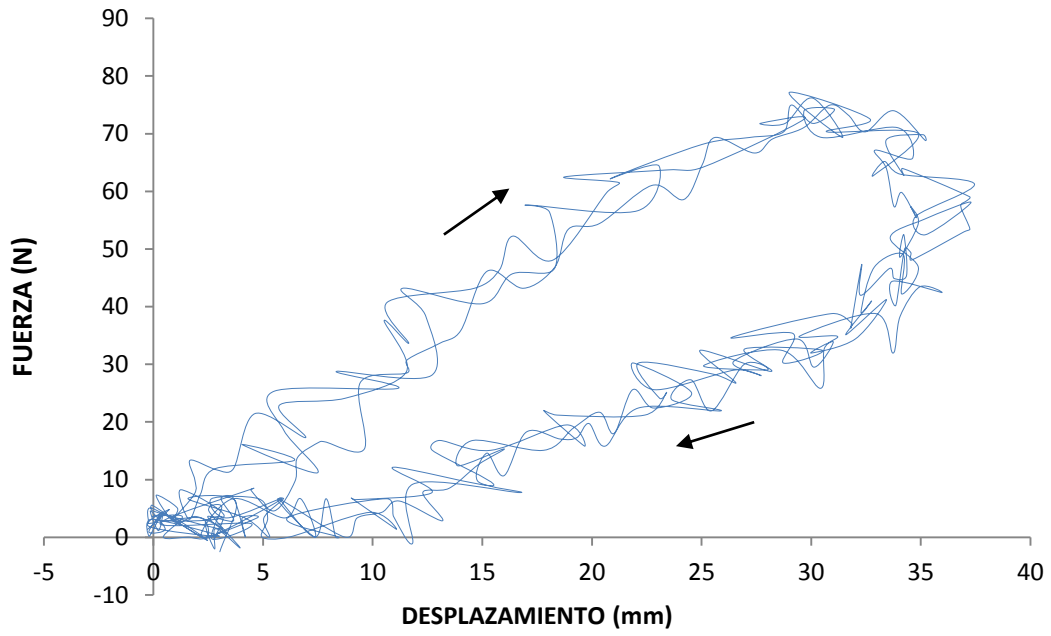


Figura 47. Curva de histéresis a 0.41 Hz.

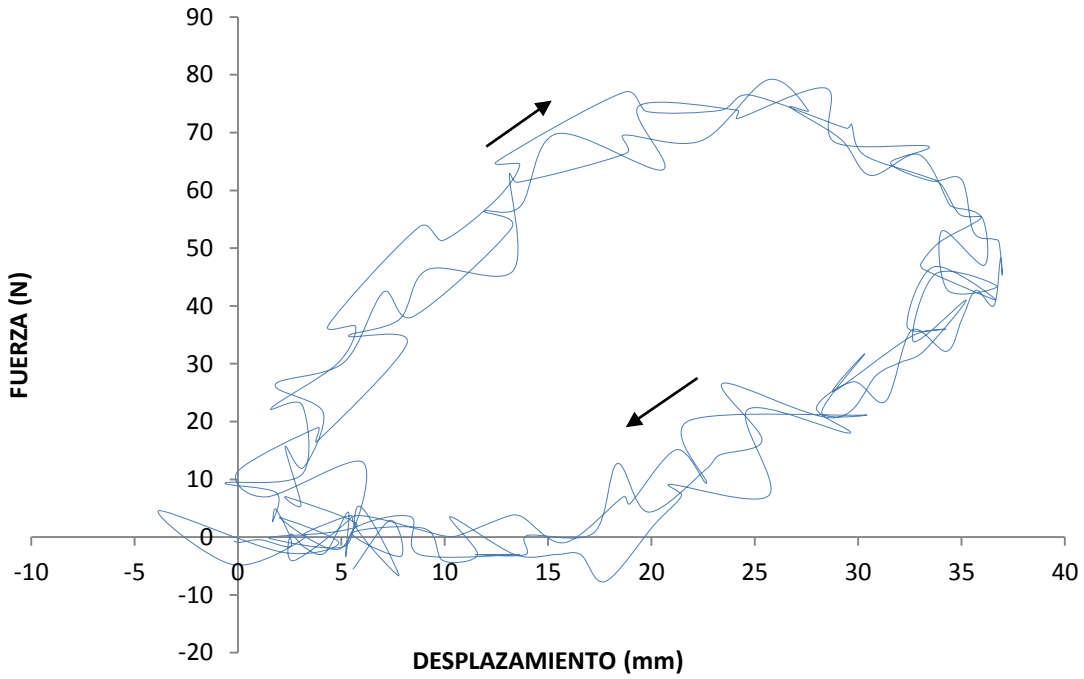
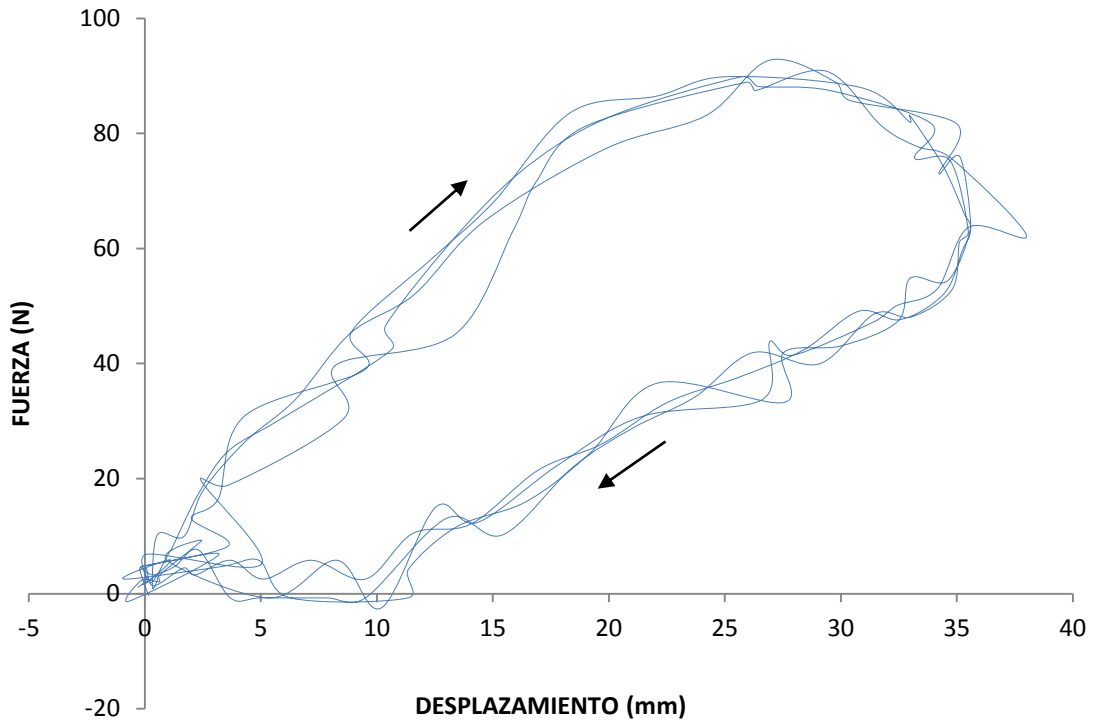
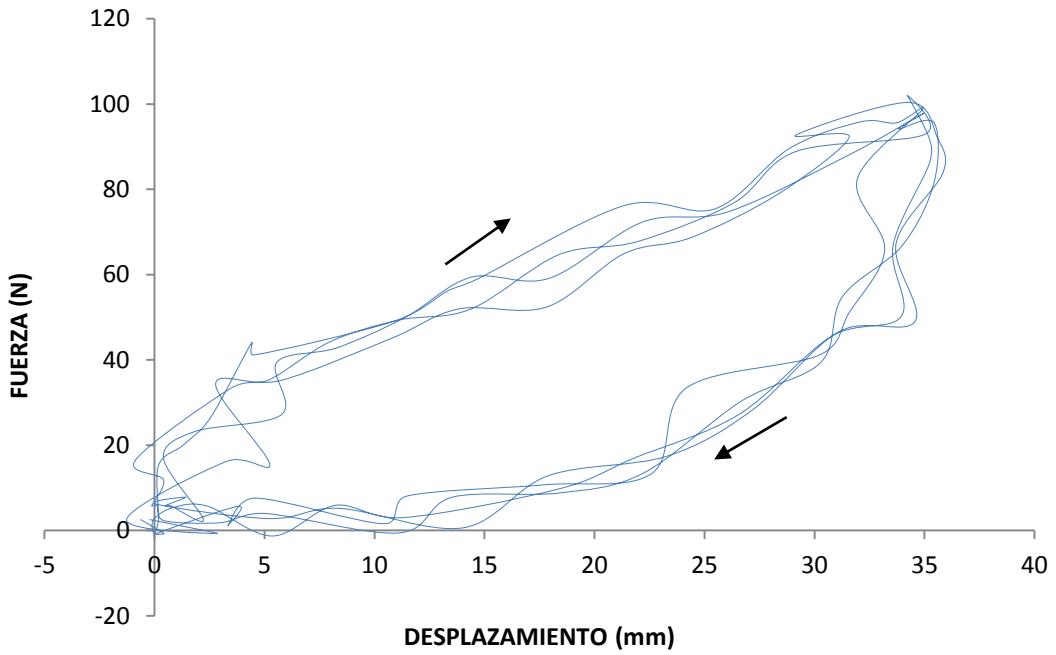


Figura 48. Curva de histéresis a 0.836 Hz.



**Figura 49.** Curva de histéresis a 1.255 Hz.



**Figura 50.** Curva de histéresis a 1.673 Hz.

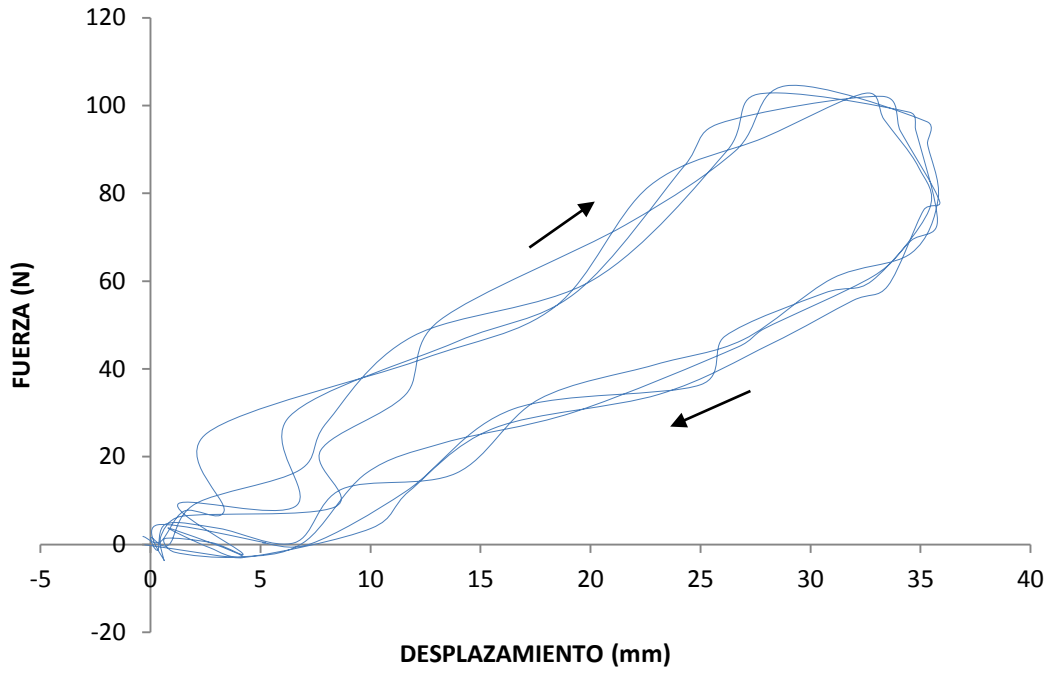


Figura 51. Curva de histéresis a 2.091 Hz.

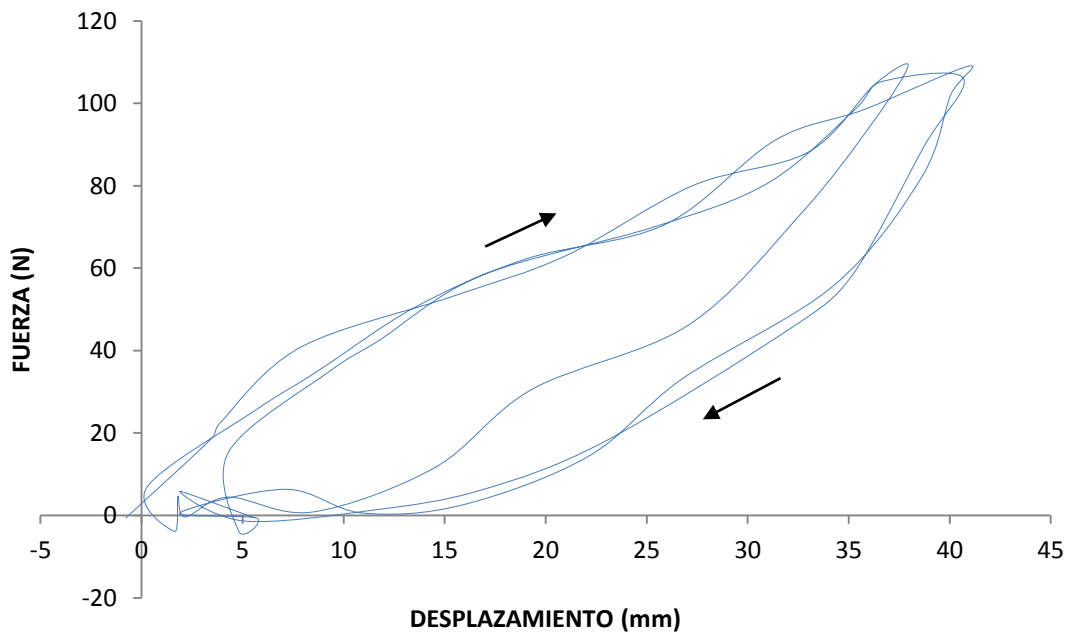
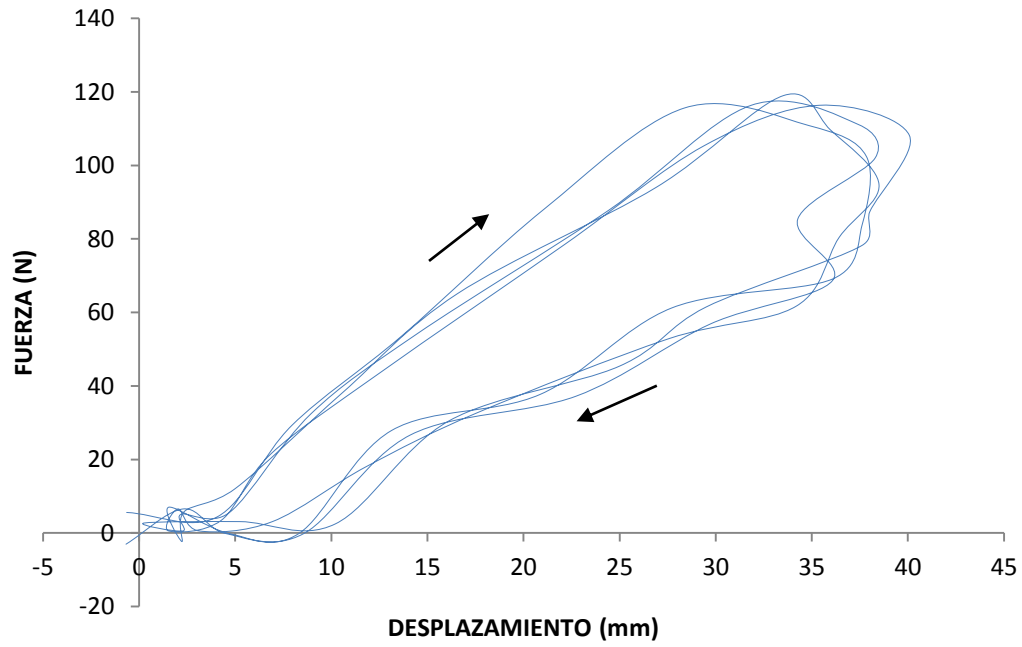
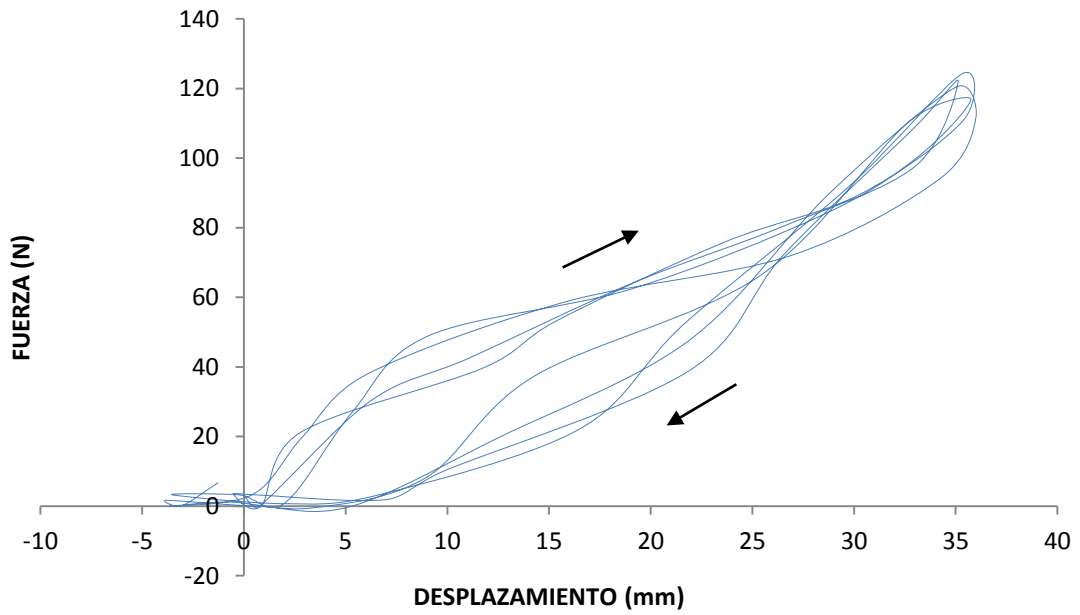


Figura 52. Curva de histéresis a 2.51 Hz.



**Figura 53.** Curva de histéresis a 2.928 Hz.



**Figura 54.** Curva de histéresis a 3.346 Hz.

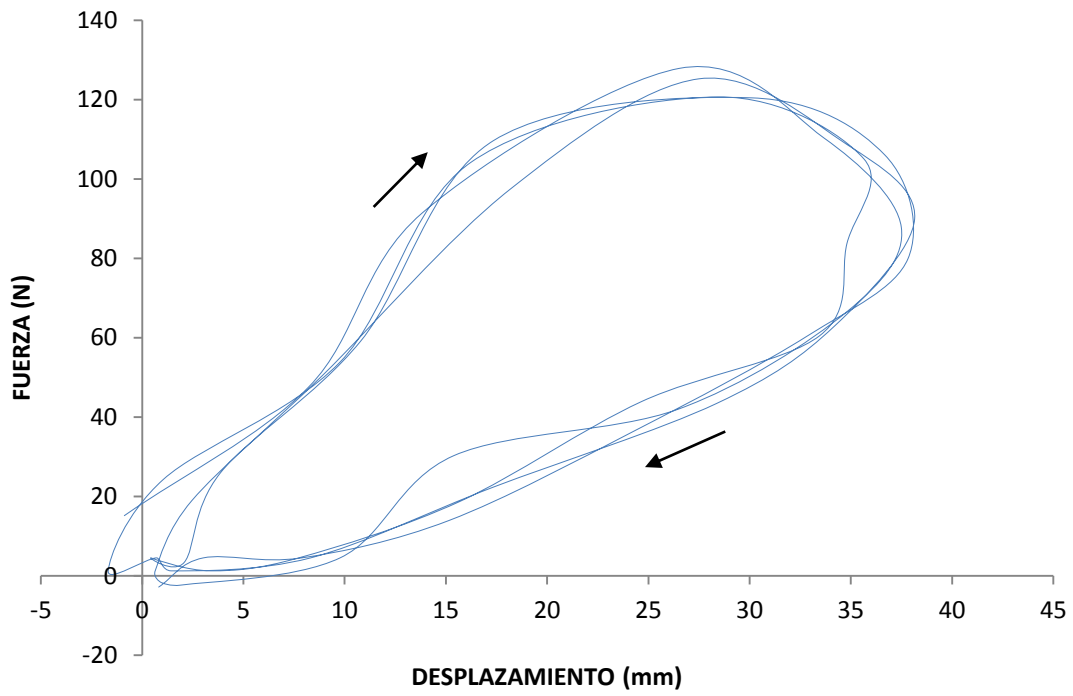


Figura 55. Curva de histéresis a 3.765 Hz.

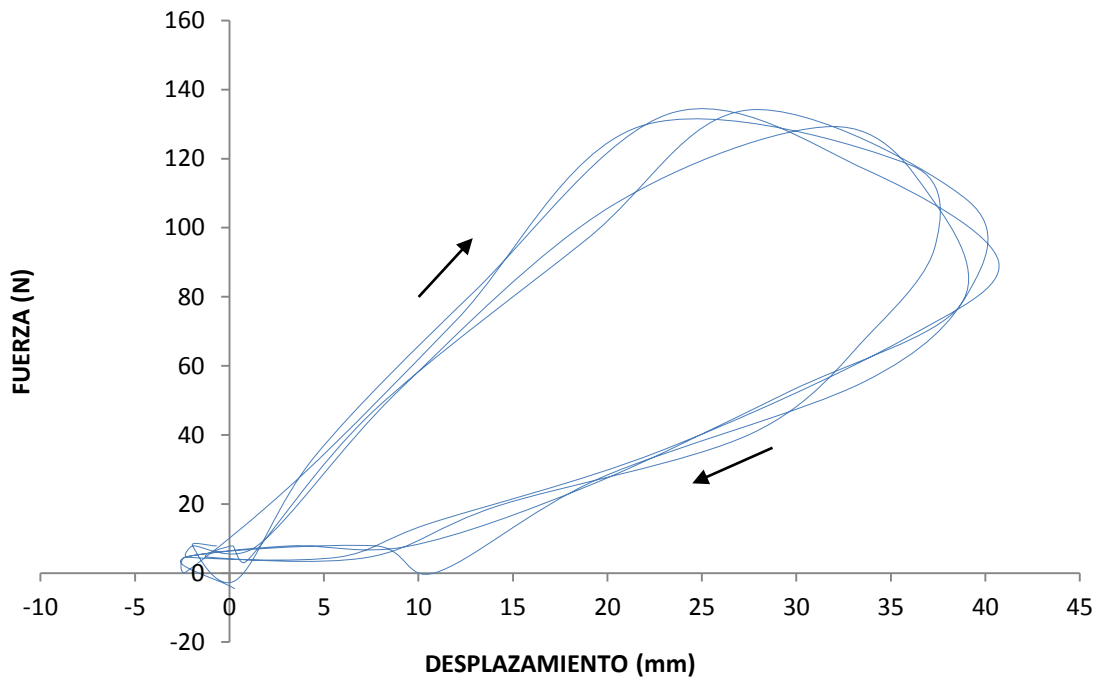
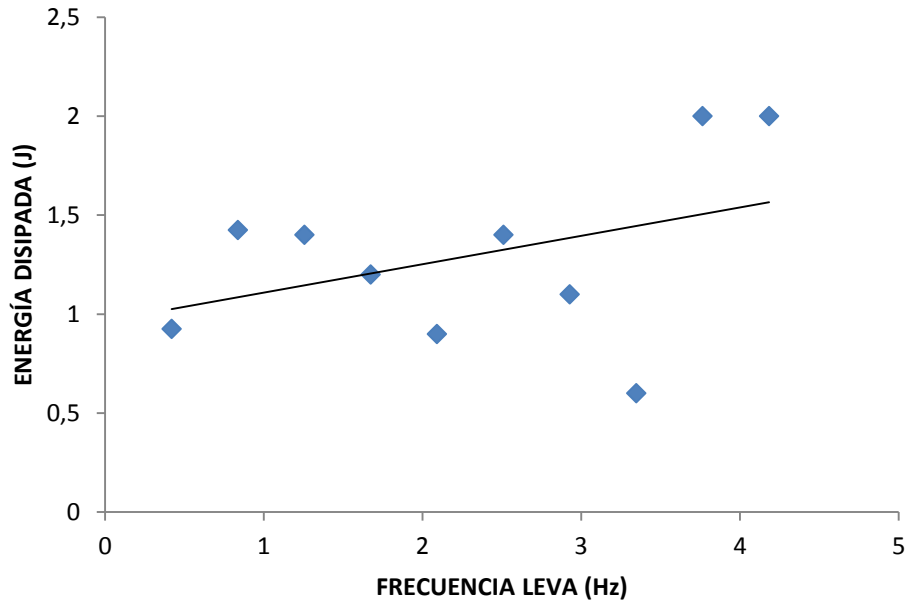


Figura 56. Curva de histéresis a 4.186 Hz.



**Figura 57.** Gráfica de energía disipada contra la frecuencia de la leva.

## IV. APLICACIÓN DE AMORTIGUADORES MAGNÉTICOS EN UNA RUEDA CON SUSPENSIÓN PARA BICICLETAS

La caracterización de la suspensión magnética seca es importante ya que con estos datos, se pueden determinar los posibles usos que se le dará.

Es importante aclarar que los diseños de los amortiguadores se hicieron paralelamente con los diseños de sus respectivas ruedas.

El arreglo del amortiguador en la rueda fue un diseño basado en la rueda de la marca Softwheel, el cual contiene tres amortiguadores convencionales como brazos (ver foto 58).



**Figura 58.** Diseño de rueda de la marca Softwheel [23].

Un posible uso es el de adaptar esta suspensión en una rueda, mediante la disposición en brazos, como lo es en un rin. Cada prototipo se diseñó en el software Solid Edge para posteriormente, determinar su viabilidad. En el diseño a) de la figura 59, se observa una rueda con cinco brazos, cada uno de los cuales, es un pistón

magnético. En los extremos de cada pistón se agregaron muelles con el fin de darle mayor capacidad de restituir energía.



**Figura 59.** Diseño a) con cinco brazos (pistones magnéticos).

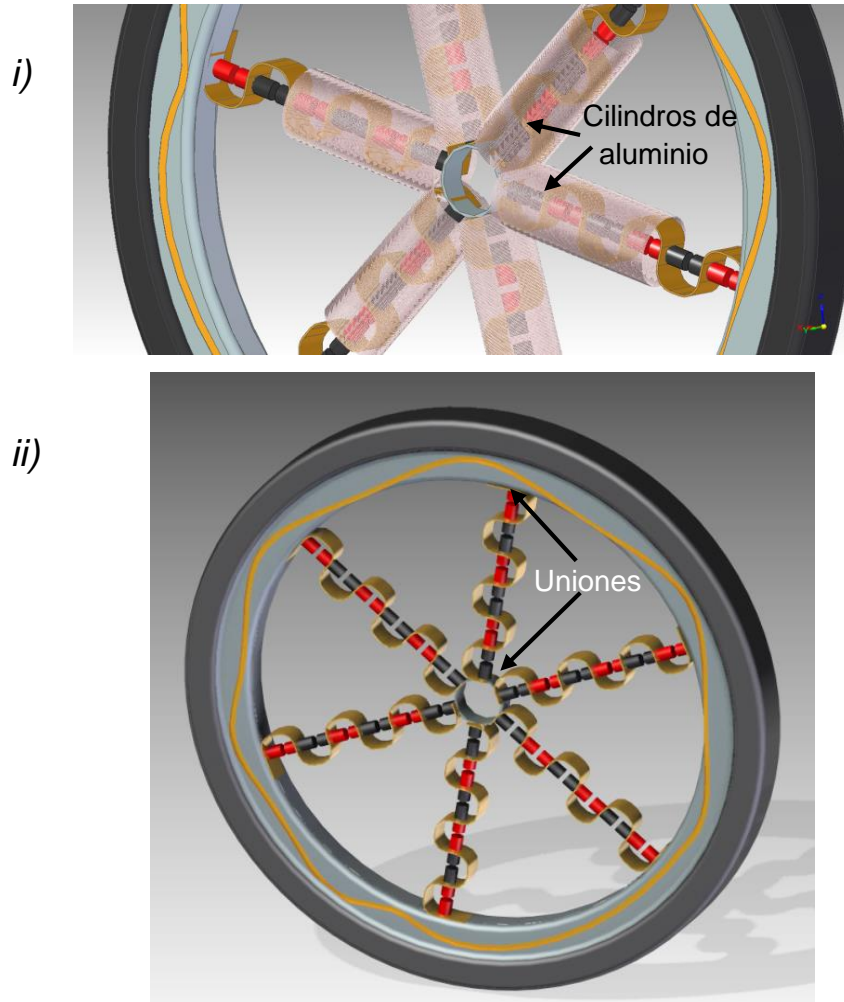
Sin embargo, creemos que durante el movimiento de la rueda, sería difícil mantener la dirección correcta de cada brazo, ya que las uniones (muelles) son inestables, provocando un mal funcionamiento del sistema.

Consideramos que otra desventaja, es que el número de imanes permanentes es insuficiente para producir disipación de energía en forma de calor por las *corrientes de Eddy*.

El diseño b) contiene más imanes cilíndricos (ver figura 60) que nos otorgan mayor capacidad de disipación de energía por *corrientes de Eddy* y fuerza de repulsión, respecto al diseño a). Cada lámina que forma las curvas en forma de "S" constituye un brazo de suspensión magnética y la rueda. Cada brazo estaría soldado al centro y al rin de la rueda.



En la figura 60i, se muestra con más detalle la unión que hay entre la suspensión magnética y la rueda. Cada brazo estaría soldado al centro y al rin de la rueda. Cada lámina con su correspondiente conjunto de imanes está dentro de un cilindro conductor a través del cual se generan las *corrientes de Eddy*.

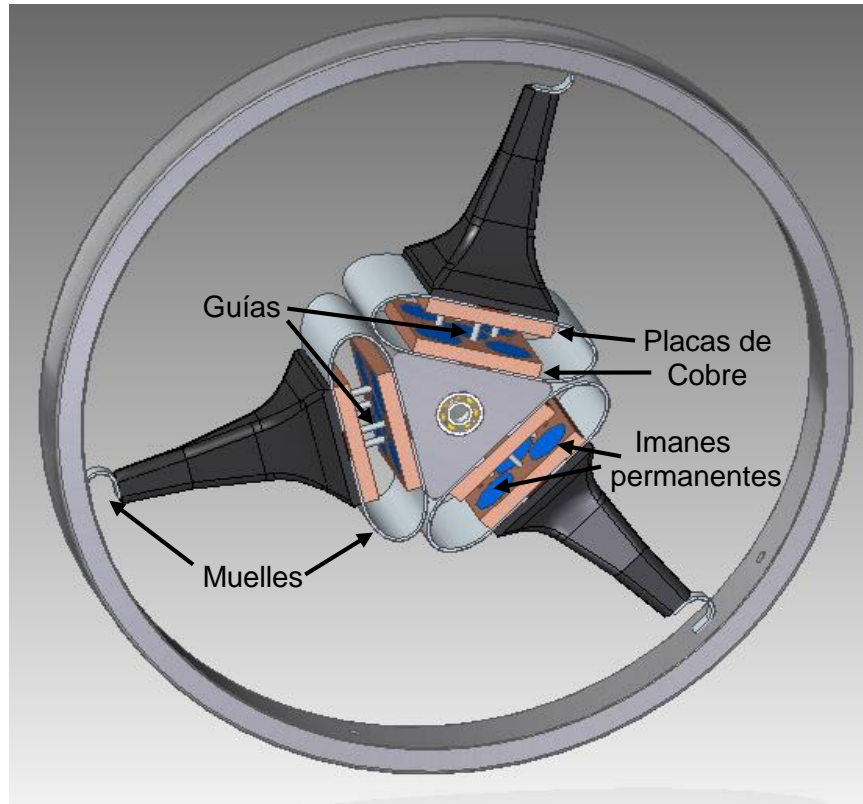


**Figura 60.** Diseño de una rueda con 6 brazos de lámina en forma de “S”, cada brazo se encuentra dentro de un cilindro de material conductor.

Las dificultades para implementar el diseño b) serían varias. Por un lado, la complejidad que implica su fabricación. Además, consideramos que la estabilidad estructural de cada brazo se vería afectada durante cargas significativas. Las terminaciones de los brazos y sus uniones también contribuirían con la inestabilidad estructural. Por último, pensamos que las fuerzas totales de repulsión entre imanes resultarían insuficientes cuando se demanden altos esfuerzos.

El diseño c), ver figura 61, también incorpora láminas, con la función de muelles, tanto en las uniones con el rin como con el centro de la rueda.

Las uniones estaban formadas por las láminas en forma de "U" acostada para tener un efecto de restitución de fuerzas; las láminas en este diseño se consideraron lo suficientemente resistentes (gruesas) para soportar el peso de una persona.



**Figura 61.** Tercer diseño de sistema de suspensión de tres brazos.

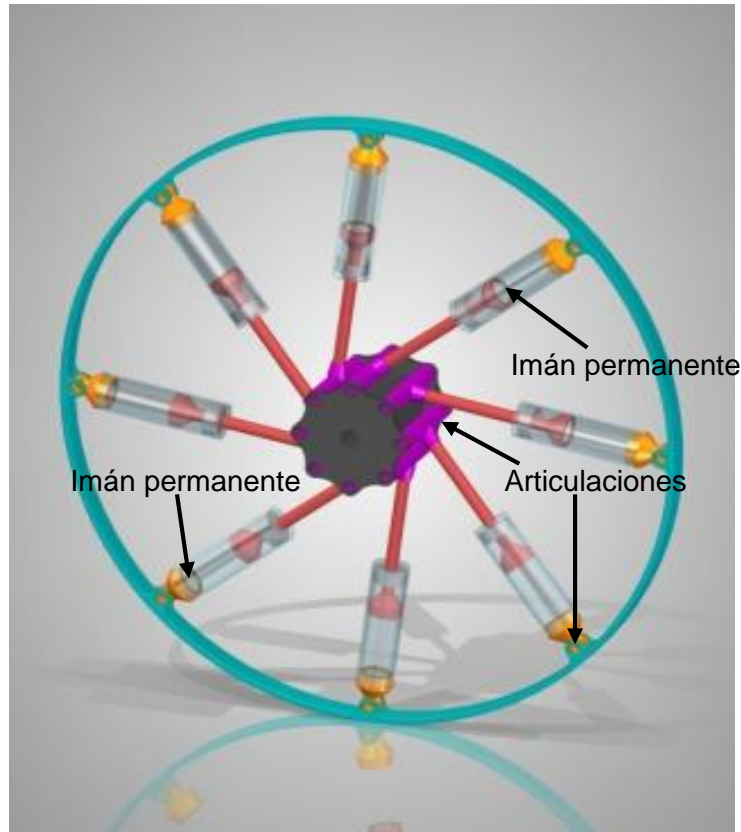
En las placas de cobre se tendrían montados los imanes permanentes. Al producirse el movimiento relativo de las placas se producirían corrientes de *Eddy* a través de las mismas, y así el efecto de disipación de energía.

El diseño final del sistema de suspensión de tres brazos, fue un diseño que no cumplía con las expectativas, debido a la unión de los brazos de la rueda. A partir de éste diseño se pudo crear otro, pensando en eliminar las uniones tipo muelle y las barras guía.

Creemos que la versión final del diseño c) con tres brazos, no cumpliría con los requerimientos básicos de desempeño. Un sistema crítico de poca estabilidad sería el conjunto de guías entre las placas de cobre. Teniendo en cuenta las corrientes de *Eddy* y la fuerza de repulsión magnética entre los imanes, era más factible sustituir

las uniones en “U” (muelles) de cada brazo por más pares de imanes permanentes, ya que estos últimos pueden desempeñar los mismos principios de funcionamiento.

El diseño d) estaba fundamentado en la idea del primer diseño, pero quitando el resorte y poniendo imanes de mayor diámetro para una mayor repulsión magnética. En la figura 62 se observa el diseño d) que consta de una rueda con ocho brazos, con este arreglo se trataría de compensar la falta de repulsión magnética que caracteriza a los diseños a), b) y c).



**Figura 62.** Diseño d), rueda con 8 brazos, cada uno de los cuales es un pistón con un par de imanes en su interior trabajando a repulsión.

El nuevo arreglo entre los brazos y la rueda ayudó a dar un paso adelante para acercarnos al objetivo propuesto.

Debido a que el diseño d) era más práctico que todos los diseños anteriores, se ideó el diseño final en base a este último, pero con más imanes permanentes en el interior de los pistones.

La falta de amortiguamiento era compensada su vez, con la presencia de corrientes de *Eddy*, lo que dio lugar a pensar en un arreglo únicamente de pares de imanes permanentes dispuestos en polos iguales.

Por otro lado, no existiría el problema de la inestabilidad en el cambio de dirección de los brazos, ya que los imanes permanentes se moverían a lo largo de un cilindro y los extremos de cada pistón estarían unidos al centro de la rueda y al rin mediante articulaciones.

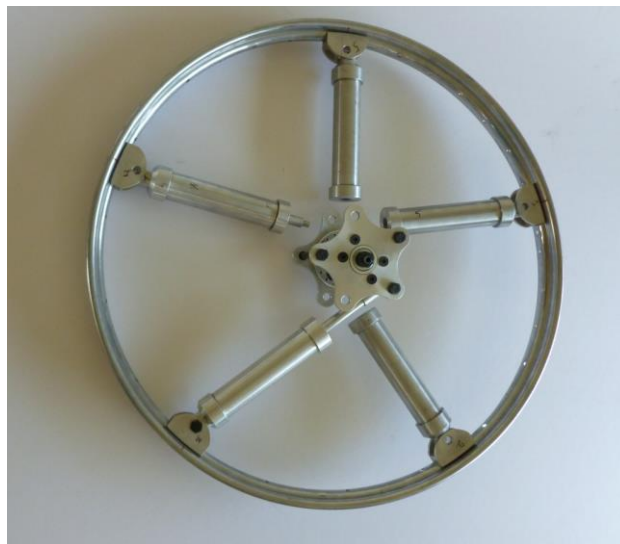
El diseño f) es una rueda que contiene cinco amortiguadores del diseño final como brazos, los cuales fueron montados en un rin de aluminio. Esta rueda será el modelo a seguir en posteriores investigaciones de tesis.

En la figura 63 se aprecia la rueda con los amortiguadores.

Sin embargo, los amortiguadores no están completamente ensamblados al eje de la rueda, debido a que las piezas pertinentes aún no se han fabricado por limitaciones de tiempo que esta tesis implica.

De momento, las desventajas que tiene el diseño e) de rueda, son pocas, tales como el peso de la rueda, la fricción en las articulaciones.

Por el contrario, las ventajas son que la rueda integra el sistema de suspensión en lugar de optar por las horquillas convencionales. Muchas de las desventajas mostradas en los diseños anteriores no están presentes en este diseño por lo que se deduce una utilidad prometedora.



**Figura 63.** Diseño final de la rueda, hecha en aluminio con cinco amortiguadores finales como brazos.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se realizó el diseño conceptual de un sistema de suspensión magnética (amortiguador magnético seco). También se fabricó y probó dicho sistema de suspensión. Este trabajo también contempló el diseño y la fabricación de un banco de pruebas que sirvió para estudiar el desempeño dinámico del amortiguador.

Se generaron una serie de resultados experimentales que muestran el comportamiento del pistón al ser sometido a una fuerza periódica. Se obtuvieron curvas de fuerza contra tiempo y desplazamiento contra tiempo. Estas curvas nos dan información sobre el comportamiento de la fuerza de compresión (la respuesta) en función de la frecuencia. Lo que se encontró es que esta fuerza va incrementándose linealmente conforme se incrementa la frecuencia de excitación. Esto sugiere que la fuerza de disipación se podría modelar considerándola como proporcional a la velocidad (tal como ocurre con la fuerza de disipación viscosa). Sin embargo, para estar completamente seguros, es necesario como trabajo a futuro, medir las corrientes de Eddy en el cilindro de aluminio, posibles incrementos de temperatura en su superficie y además es necesario medir y cuantificar las fuerzas de Coulomb entre las camisas y la superficie interior del cilindro.

Por otro lado, las curvas de histéresis no muestran una tendencia clara de cómo el amortiguador disipa la energía. Resulta evidente y necesario realizar más pruebas tomando en consideración los siguientes aspectos: a) mejorar la precisión de maquinado y alineamiento de las diferentes piezas que conforman el banco de pruebas, b) construir un pistón de referencia, el cual tendría las mismas dimensiones y usaría el mismo arreglo de imanes pero el cilindro que contiene los imanes fuera de un material no conductor.

También se diseñó y fabricó parcialmente un sistema de suspensión magnética para bicicletas basado en el amortiguador seco. El diseño final de la rueda es un diseño del cual se cree que podría abrir camino a una utilidad en las bicicletas principalmente, por lo que se piensa diseñar y fabricar un banco de pruebas que se adapte a las necesidades de la caracterización de una rueda de este tipo. Caracterizar una rueda con este tipo de amortiguadores magnéticos nos podría otorgar, la libertad de decidir su viabilidad incluso, en vehículos motorizados de baja potencia como las bicicletas eléctricas o las motocicletas.

Otras recomendaciones a tomar en cuenta son:

- 1) Uno de los aspectos que se pueden mejorar en el banco de pruebas, es el soporte de la celda de carga. Como ya sabemos, la celda de carga basa su funcionamiento

en su deformación, la cual es reflejada al momento de censar la fuerza. Si no se tiene un soporte suficientemente rígido, lo más probable es que haya pérdida de información al recabar los datos en algún ordenador portátil; por lo cual, un par de recomendaciones para trabajo a futuro son aumentar la rigidez del soporte y aumentar la precisión al momento de fijarlo y alinearlo.

2) Por otro lado, obtener un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico de este amortiguador magnético sería muy importante, aunque cabe destacar que el modelo podría ser únicamente para este amortiguador, ya que es muy probable que el comportamiento de diferentes amortiguadores magnéticos de este tipo dependan de diversos factores, tales como las dimensiones de los imanes, el número de imanes, grosor del cilindro de material conductor, el tipo de material conductor que se utiliza en el cilindro, etc.

3) El análisis por elemento finito es una herramienta de análisis importante, ya que nos permitiría anticipar el desempeño mecánico del amortiguador magnético sin siquiera haberlo construido. Los datos más importantes que se esperarían obtener con software de análisis de elemento finito, son las fuerzas de los campos magnéticos de los imanes en movimiento y las zonas de concentración de esfuerzos. Esto último, podría ayudar a rediseñar el amortiguador identificando áreas donde se requieran mayor o menor material o una geometría distinta, según sea el caso.

4) Probar distintas configuraciones en el arreglo de imanes es otro dato a considerar para estudiar su comportamiento, determinando si hay mayor capacidad de carga máxima, menor o igual.

5) Es importante también, aislar distintos efectos presentes en el amortiguador, para calcular el valor de los mismos. Estos experimentos son:

- Hacer experimentos con un tubo de plástico en lugar de uno de aluminio, permitirá medir corrientes de Eddy en lugar de usar un embobinado alrededor del tubo.
- Experimentos sin imanes, supliéndolos con pastillas de metal y usando resortes mecánicos, esto permitiría medir las fuerzas de Coulomb (rozamiento mecánico).

## Referencias

- [1] Marcos Emídio Bressani. 2012. Nociones básicas e introducción a las “vibraciones mecánicas”. Albany International.
- [2] Reza N. Jazar, (2014). Vehicle Dynamics. Theory and Application. Segunda Edición. Bundoora, VIC, Australia. Editorial Springer.
- [3] <http://www.muellestosca.com/img/presupuestos/muelle-traccion-con-anilla-alemana.jpg>. Fecha de consulta: 23/7/2015, 14:43 hrs.
- [4] Resorte Lacas. Disponible desde: [http://www.resortelacas.com.ar/images/5page\\_img1.jpg](http://www.resortelacas.com.ar/images/5page_img1.jpg). Fecha de consulta: 24/7/2015, 17:38 hrs.
- [5] AliExpress. Disponible desde: <http://es.aliexpress.com/popular/small-torsion-spring.html>. Fecha de consulta: 27/8/2015, 16:04 hrs.
- [6] Tipos de. 2012-2015. Tipos de amortiguadores. Disponible desde: <http://www.tiposde.org/general/695-amortiguadores/>. Fecha de consulta: 13/8/2015, 9:34 hrs.
- [7] Aficionados a la Mecánica. 2015. Amortiguador de gas. Disponible desde: <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-suspension-curso/amortiguador-gas.jpg>. Fecha de consulta: 11/9/2015, 20:54 hrs.
- [8] Monroe, Shocks & Struts. 1995.-2013. [tec\\_shockabsorbers\\_06.png](http://www.monroe.com/images/support/spanish/tec_shockabsorbers_06.png). Disponible desde: [http://www.monroe.com/images/support/spanish/tec\\_shockabsorbers\\_06.png](http://www.monroe.com/images/support/spanish/tec_shockabsorbers_06.png). Fecha de consulta: 28/9/2015, 12:07 hrs.
- [9] Aficionados a la Mecánica. 2015. Suspensiones. Disponible desde: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension9.htm>. Fecha de consulta: 4/10/2015, 23:33 hrs.
- [10] [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/cilindro-neumatico-doble-efecto-fuelle-40276-6725885.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/cilindro-neumatico-doble-efecto-fuelle-40276-6725885.jpg). Fecha de consulta: 6/10/2015, 21:23 hrs.
- [11] Silvester Fly’s Blog. 2011. Amortiguador. Disponible desde: <https://silvesterfly.files.wordpress.com/2011/11/amortiguador.jpg>. Fecha de consulta: 17/10/2015, 11:59 hrs.
- [12] KawaClub. 2011. Diseñando y “FABRICANDO” una excepcional Café Racer AG Sys. Disponible desde:

<http://www.kawaclub.com.ar/foro/viewtopic.php?f=2&t=26342&start=30>. Fecha de consulta: 2/11/2015, 12:44 hrs.

[13] Miguel Cupich Rodríguez, Fernando J. Elizondo Garza. Amortiguadores Magnetoreológicos. (1998). Ingenierías. Volúmen 1.

[14] Nanjimag. 2012. Imanes de Neodimio para Embalaje. Disponible desde: <http://www.nanjimagnet.com.es/application/1-5-1.jpg>. Fecha de consulta: 7/11/2015, 16:01 hrs.

[15] Endesa Educa. 2014. Repulsión Magnética. Disponible desde: [http://www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/imagenes/Magnetisme5\\_repulsioimant.jpg](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/imagenes/Magnetisme5_repulsioimant.jpg). Fecha de consulta: 8/11/2015, 13:49 hrs.

[16] Jae-Sung B. Jai-Hyuk H. Jung-Sam P. Dong-Gi K. 2009. Modeling and experiments on eddy current damping caused by a permanent magnet in a conductive tube. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 3025-3027.

[17] Jacobo Tarrío. In the land of the inexpensive. 2014. Cómo funcionan las tarjetas de banda magnética. Disponible desde: <http://jacobo.tarrío.org/es/know/como-funcionan-las-tarjetas-de-banda-magnetica>. Fecha de consulta: 29/11/2015, 11:23 hrs.

[18] David V. Marco B. Ludek H. Petr S. 2009. Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets. *Journal of Magnetism And Magnetic Materials*. 3759-3760. Disponible desde: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030488530900746X>. Fecha de consulta: 4/1/2016, 14:23 hrs.

[19] Francisco Antonio Godínez Rojano. 2000. Diseño de un sistema de transmisión para un vehículo de competencia mini baja (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México, Distrito Federal.

[20] K&J Magnetics, Inc. Disponible desde : <https://www.kjmagnetics.com/>. Fecha de consulta: 9/12/2015, 13:06 hrs.

[21] Robert L. Mott, (2011). Diseño de elementos de máquinas. Cuarta edición. Edición Prentice Hall, México.

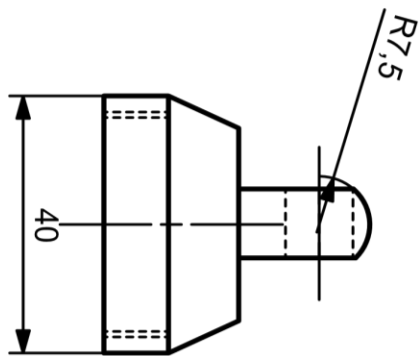
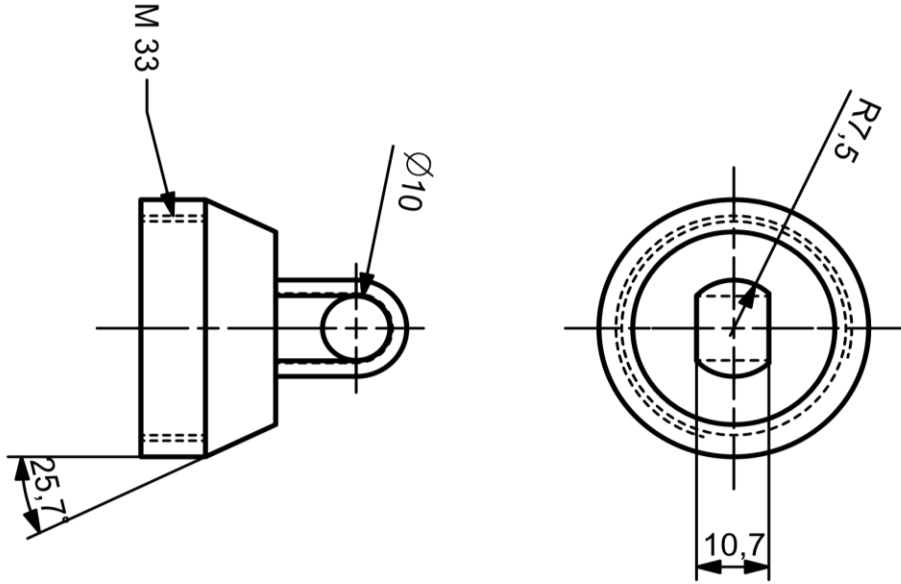
[22] Vernier, Go!Motion. Disponible desde: <http://www.vernier.com/products/sensors/motion-detectors/go-mot/>. Fecha de consulta: 14/12/2015, 17:16 hrs.

[23] Softwheel Wheel Reinvented. Disponible desde: <http://www.softwheel.technology/>. Fecha de consulta: 17/7/2015, 11:23 hrs.

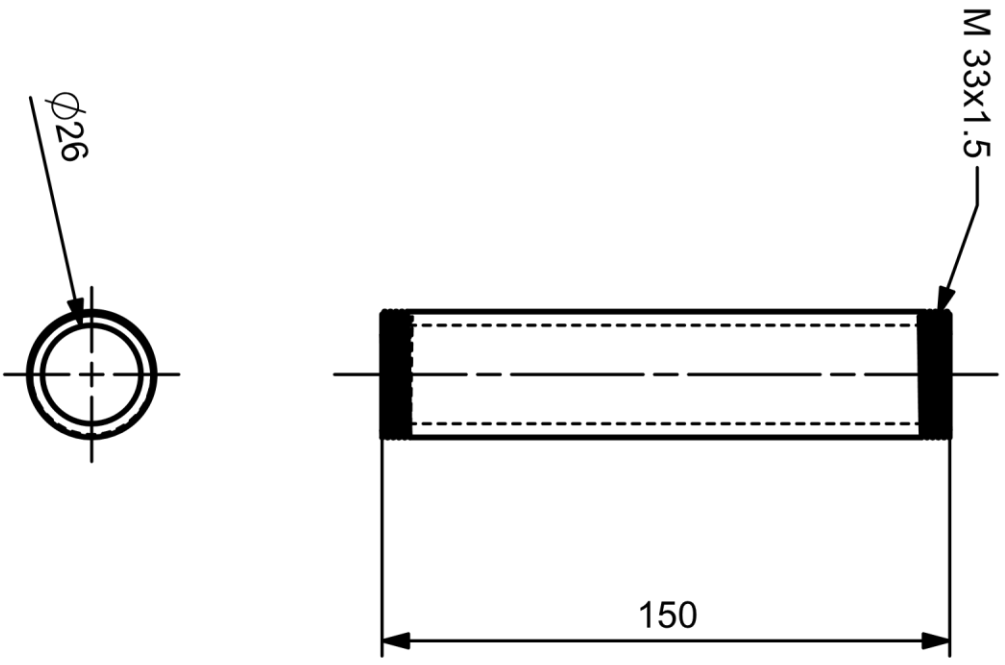


### Apéndice.

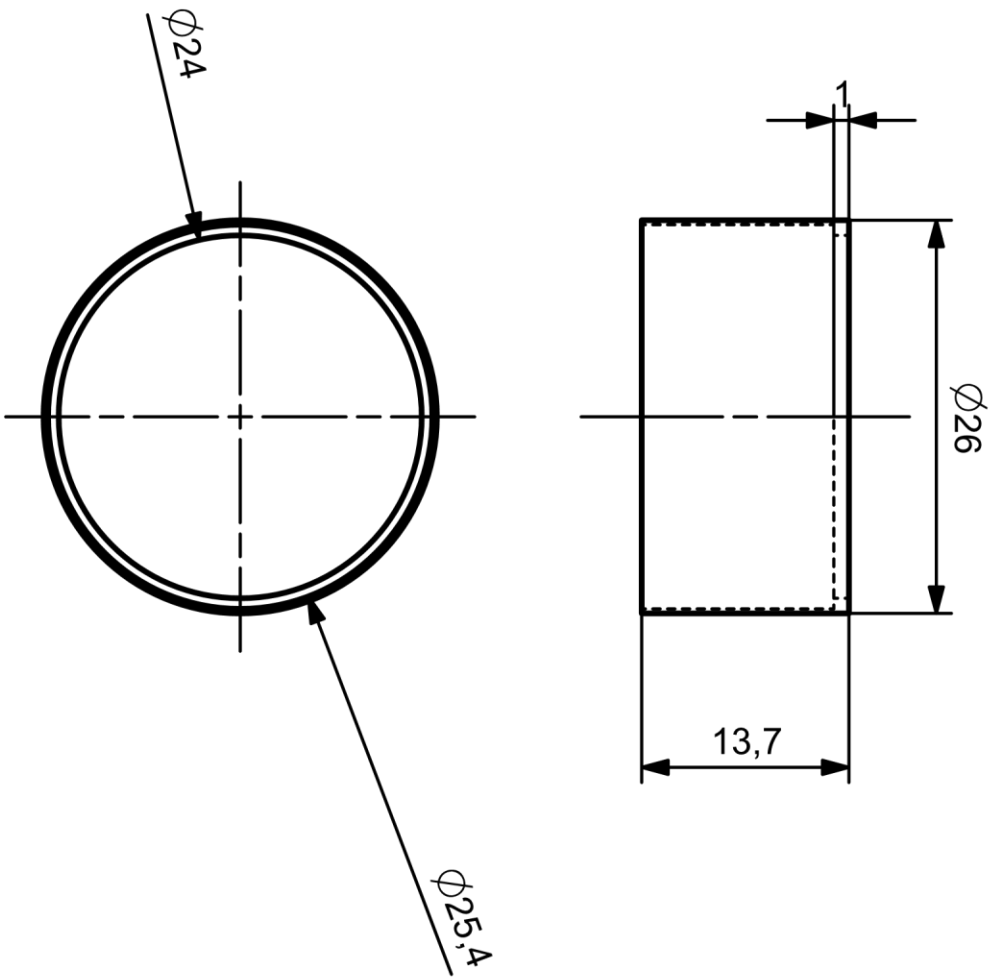
Planos de fabricación



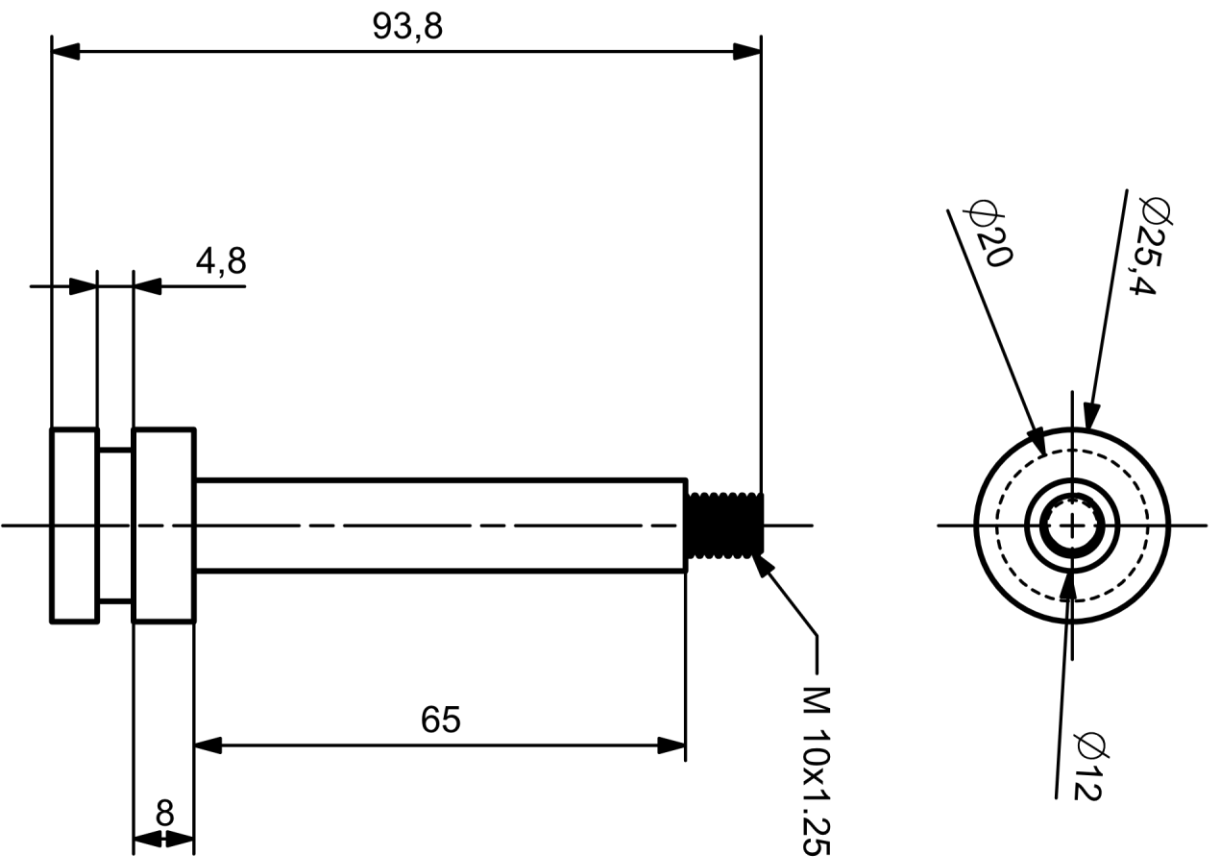
Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 1:1
Material: Aluminio 6061-T6	Hoja 1



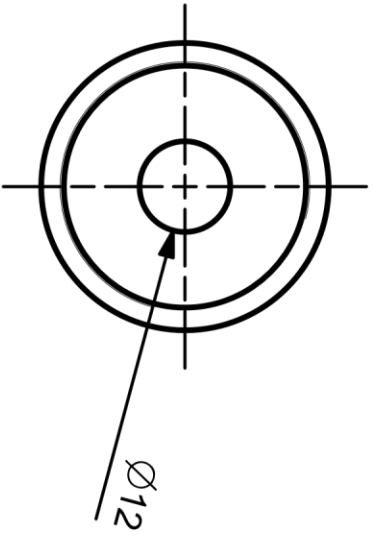
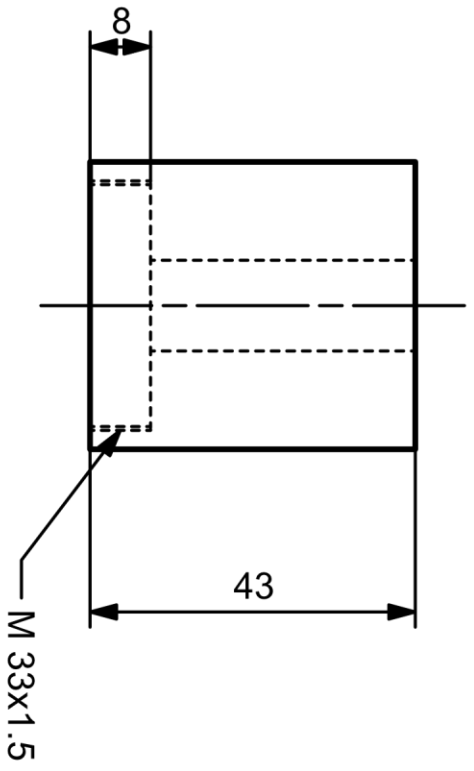
Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 1:2
Material: Aluminio 6061-T6	Hoja 2



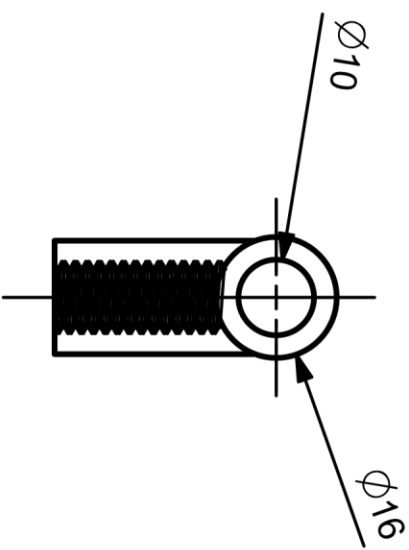
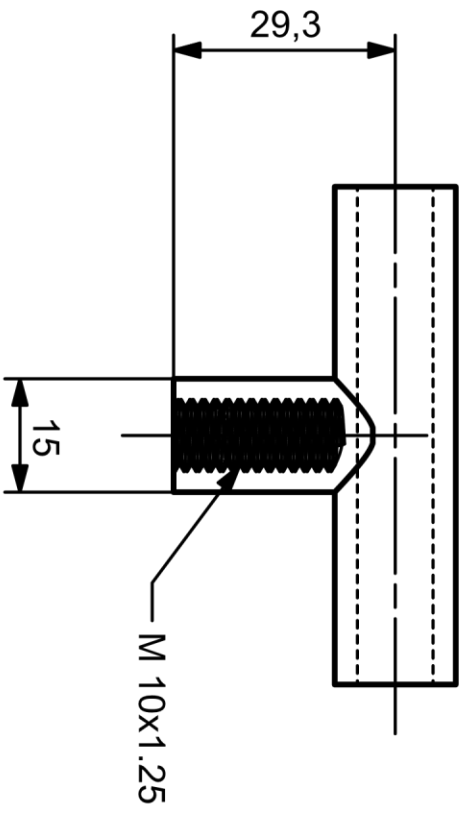
Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 2:1
Teléfono	Hoja 3



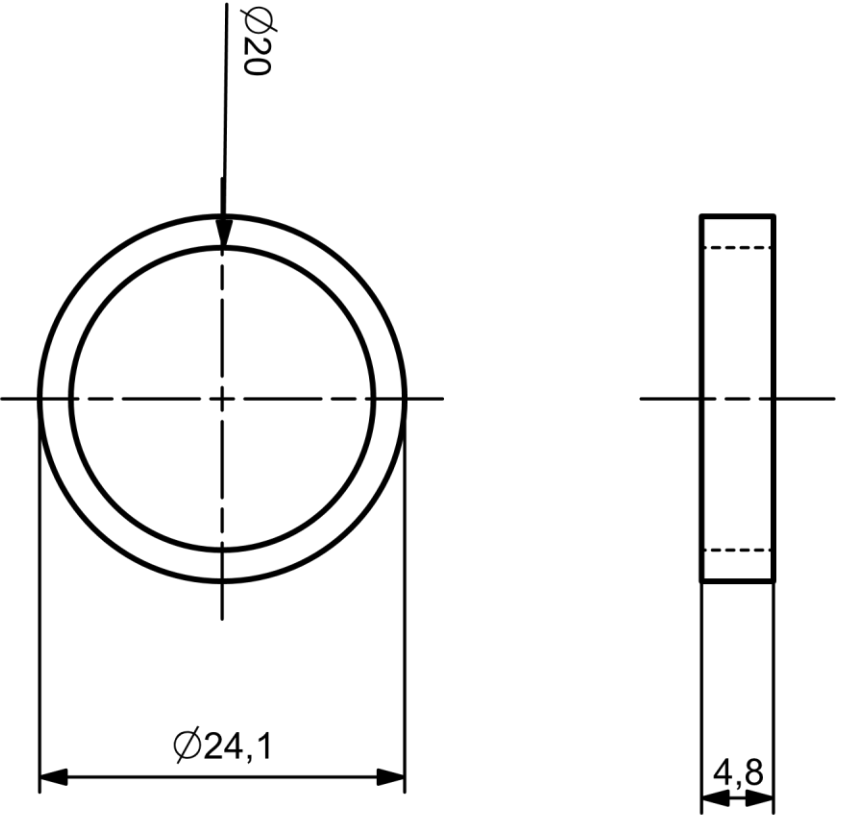
Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 1:1
Material: Aluminio 6061-T6	Hoja 4



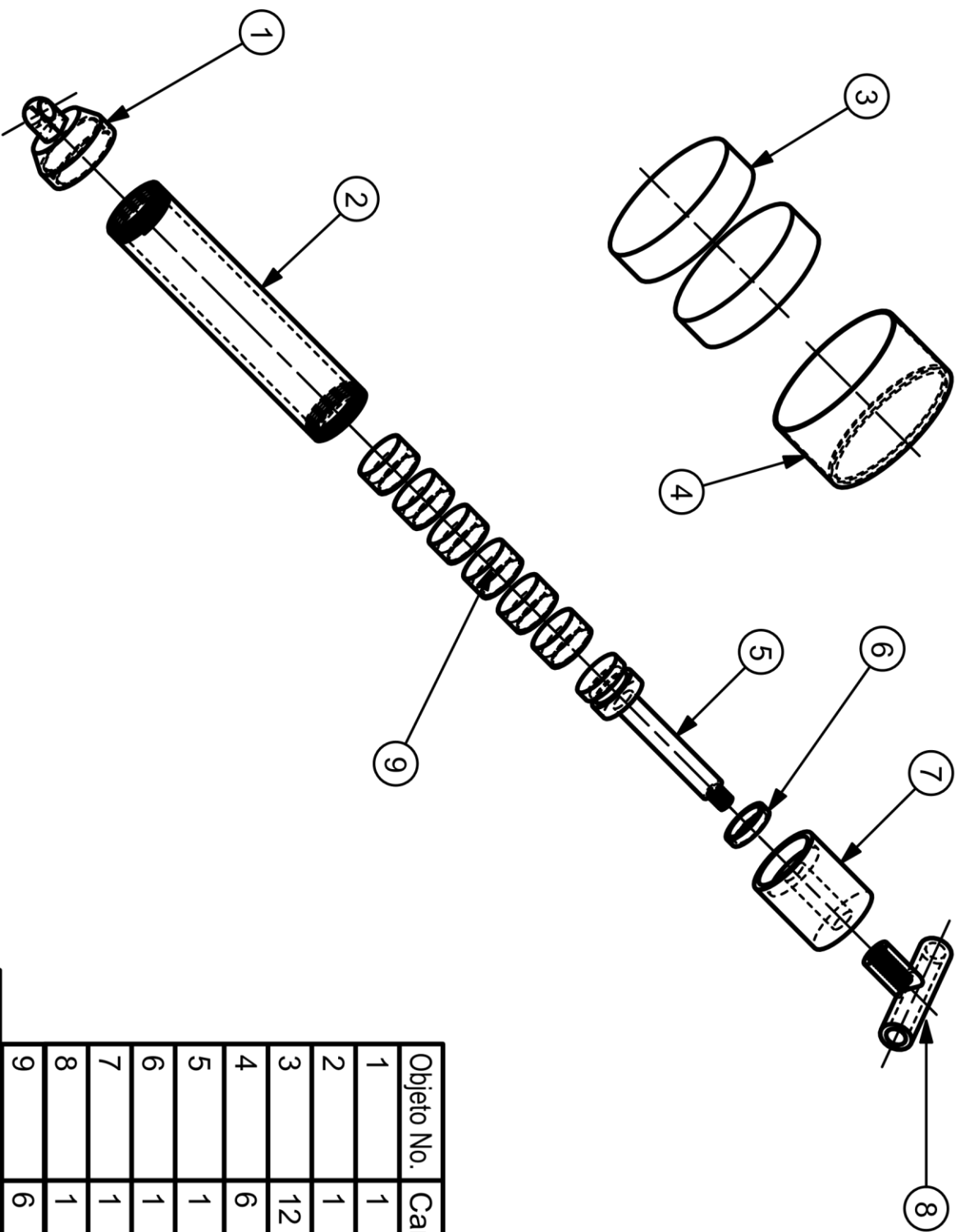
Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 1:1
Material: Aluminio 6061-T6	Hoja 5



Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 1:1
Material: Aluminio 6061-T6	Hoja 6



Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 2:1
Material: Teflón	Hoja 7



Objeto No.	Cantidad	Descripción
1	1	Tapa inferior
2	1	Cilindro
3	12	Imán permanente
4	6	Camisa
5	1	Émbolo
6	1	Buje
7	1	tapa superior
8	1	Soporte
9	6	Conjunto imán-camisa

Tamaño: A4	Unidades: mm
Autor: Torres Toribio Normando	Escala: 1:3
Material: Teflón, Aluminio 6061-T6	Hoja 8



