

# Freno de Inducción Magnética.

Anhel Coatlicue Orozco Olvera

Emilio Villa Cueva

Alan García Zermeño

Angel Lizbeth Piña Ruiz

**Resumen**—Se realizó un prototipo de freno de inducción magnética a partir de un disco conductor giratorio, un imán de neodimio y un montaje bastante elaborado utilizando como fundamento básico la ley de inducción de Faraday para poder explicar el fenómeno de las corrientes parásitas en el sistema de frenado montado. Una vez entendido dicho fenómeno se obtuvieron mediciones de las R.P.M del disco y fue posible regular éstas mismas.

## I. INTRODUCCIÓN

Un freno de corriente parásita, también conocido como freno de inducción, freno eléctrico o retardador eléctrico, es un dispositivo utilizado para reducir o detener un objeto en movimiento al disipar su energía cinética como calor. La fuerza de arrastre en un freno de corriente parásita es una fuerza electromagnética entre un imán y un objeto conductor cercano en movimiento relativo, debido a las corrientes parásitas inducidas en el conductor a través de la inducción electromagnética.

Una superficie conductora que se mueve más allá de un imán estacionario desarrolla corrientes eléctricas circulares llamadas corrientes parásitas inducidas por el campo magnético, como lo describe la ley de inducción de Faraday. Según la ley de Lenz, las corrientes circulantes crean su propio campo magnético que se opone al campo del imán. Así, el conductor en movimiento experimenta una fuerza de arrastre del imán que se opone a su movimiento, proporcional a su velocidad [1].

## II. MARCO TEÓRICO

La fuerza de arrastre en un freno de corriente parásita es una fuerza electromagnética entre un imán y un objeto conductor cercano en movimiento relativo, debido a las corrientes parásitas inducidas en el conductor a través de la inducción electromagnética.

Un freno de corriente parásita consiste en una pieza conductora de metal, ya sea una barra recta o un disco, que se mueve a través del campo magnético de un imán, ya sea un imán permanente o un electroimán. El imán ejerce una fuerza de arrastre sobre el metal que se opone a su movimiento, debido a las corrientes eléctricas circulares llamadas corrientes parásitas inducidas en el metal por el campo magnético [1].

Las corrientes parásitas son corrientes inducidas que aparecen cuando se modifica el flujo magnético que pasa a través de un trozo grande de material conductor. La fuerza magnética

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

se transmite al material y la ley de Lenz se aplica para demostrar que la fuerza se opone al movimiento del conductor. Se origina así una clase de *frenado magnético*, en el cual los campos magnéticos aplicados a un disco giratorio o a un riel en movimiento producen fuerzas que desaceleran el movimiento.

La fuerza de frenado debido a la corriente parásita es exactamente proporcional a la velocidad  $v$ . La fuerza de frenado disminuye a medida que disminuye la velocidad [2].

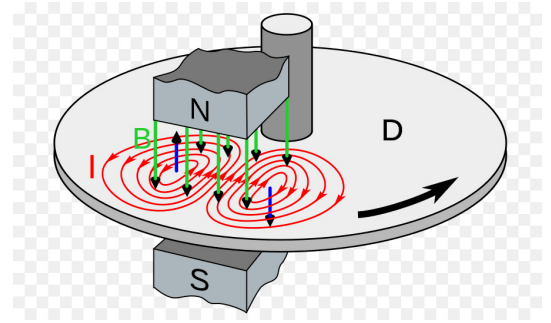


Figura 1. Freno de corriente parásita para un disco

A menudo, a la fuerza que proviene del movimiento entre el conductor y la fuente de campo magnético se le conoce como fuerza electromotriz de movimiento. Obtenemos la fuerza electromotriz  $\xi$  partiendo de la ley de Faraday:

$$|\xi| = \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right| \quad (2)$$

La fuerza electromotriz genera una corriente dada por

$$i = \frac{|\xi|}{R} \quad (3)$$

Donde  $R$  es la resistencia del objeto conductor. De acuerdo con la ley de Lenz la corriente se opone al cambio (de  $\Phi_B$ ) creando para ello un campo paralelo al campo externo dentro del objeto conductor portador de corriente.

La magnitud de la fuerza magnética  $\vec{F}_B$  es  $F_B = qvB$  ya que la velocidad y el campo son vectores perpendiculares entre ellos. Como el agente externo debe ejercer una fuerza igual a  $F_B$ , la energía entregada por este agente es

$$P = F_B v \quad (4)$$

También es posible calcular la rapidez con que se disipa la energía en el disco a consecuencia del calentamiento joule por la corriente inducida. Está dada por [2]

$$P = i^2 R = \left(\frac{\xi}{R}\right)^2 R \quad (5)$$

### III. MONTAJE EXPERIMENTAL

#### III-A. Materiales

Para la elaboración del prototipo fueron necesarios los siguientes materiales, algunos de los cuales ya se tenían:

- Husillo.
- tuerca Acme.
- Dos discos delgados provenientes de discos duros.
- Imán de neodimio.
- Motor DC.
- Arduino.
- Medidor de revoluciones por minuto.
- Tabla de madera cortada de acuerdo a las necesidades del proyecto.
- Dos varas delgadas de madera.
- Soporte para disco.

#### III-B. Procedimiento

Como se puede apreciar en la figura 7, el prototipo conecta un motor a pasos con uno de los discos por medio de un husillo. Un husillo es un actuador lineal mecánico que convierte el movimiento de rotación en movimiento lineal con bajas pérdidas por fricción.

El mecanismo del husillo y la tuerca acme permite convertir el movimiento giratorio del tornillo en movimiento rectilíneo de la tuerca produciendo un desplazamiento longitudinal a lo largo del eje del husillo. Este principio es lo que nos permitió manipular el movimiento del disco con el imán y aproximarlos o alejarlos del disco giratorio.

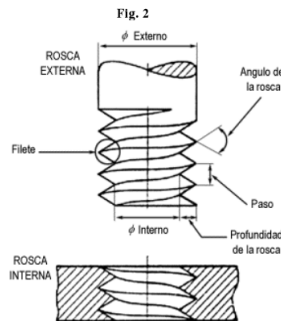


Figura 2. Estructura de un husillo

Este movimiento era moderado por un motor a pasos, que es dispositivo que convierte una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control.

El motor a pasos, a su vez, fue controlado por un microcontrolador *Arduino*, por medio del cual fue posible regular la velocidad del movimiento del imán montado al disco y la distancia de proximidad entre éste y el disco giratorio.

Finalmente, se colocó frente al disco giratorio un medidor de revoluciones por minuto que mostraba dichas revoluciones en una pantalla LCD, pudiendo así observar el cambio de la velocidad del disco giratorio cuando el imán se acercaba a éste (todos los datos de las R.P.M y las posiciones del imán quedaron registrados en el arduino).

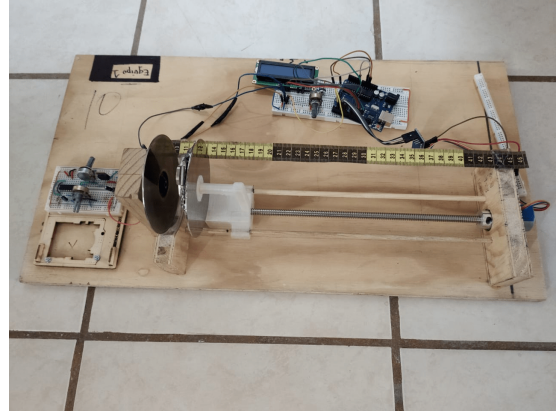


Figura 3. Prototipo final de freno de inducción

Para la determinación del campo magnético percibido por el disco giratorio se hizo uso de un teslámetro, se colocó éste mismo en una posición fija y con ayuda de un flexómetro se fue variando la distancia del imán respecto al teslámetro y éste arrojaba la magnitud del campo magnético en mili teslas (mT).

Se realizaron distintas configuraciones para obtener la magnitud del campo magnético, comenzando con una distancia de separación de 10cm y reduciéndola hasta 4cm en intervalos de 1cm, después de 4 a 1.5 cm en intervalos de 0.5cm, y finalmente de 1.5 a 0.3cm en intervalos de 0.3cm. Cada una de estas configuraciones se repitieron 8 veces para poder generar un promedio y realizar una gráfica que permitiera apreciar la relación del campo magnético respecto a la distancia de separación entre el disco giratorio y el imán.

En base a las mediciones obtenidas, se realizó un ajuste de las mediciones para poder estimar el campo magnético en las mediciones posteriores. Debido a la forma del imán (la longitud  $L$  de éste mucho menor a la distancia sobre la cuál se medía el campo), el campo magnético se puede aproximar a  $\approx C/(x^3)$ , por lo que utilizando regresión lineal se obtuvo el ajuste:

$$B(x) = \frac{471,927}{(x + 0,955)^3} \quad (6)$$

Que da  $B(x)$  en miliTeslas recibiendo argumento una distancia  $x$  en centímetros. La siguiente gráfica muestra los datos medidos del campo magnético junto con el ajuste utilizado:

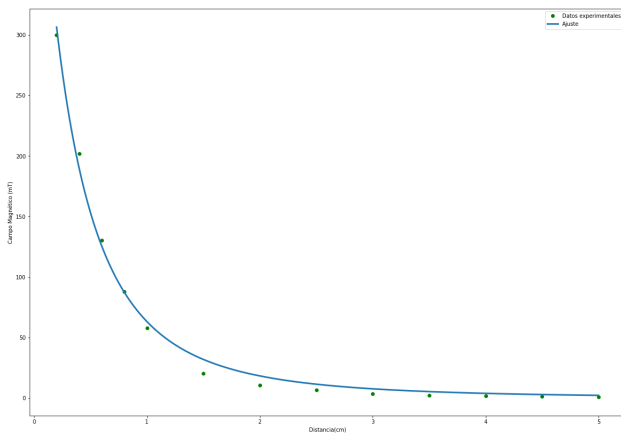


Figura 4. Ajuste del campo magnético estimado del imán de neodimio utilizado

#### IV. RESULTADOS

Se hizo uso del monitor serial del arduino para recopilar datos de RPM y de distancia entre el imán y el disco en muy cortos periodos de tiempo y se realizaron varias pruebas distintas con diferentes velocidades iniciales del disco.

La siguiente gráfica muestra la medición de RPM respecto a la distancia del imán al disco para nueve distintas velocidades iniciales del éste. Se inició a una distancia de 2.6 cm, donde se puede apreciar que la velocidad del disco se mantiene relativamente estable, pero mientras se aproxima el imán se aprecia una desaceleración gradual. Todas las pruebas convergen alrededor de un valor mínimo de velocidad, que es cuando el imán se encuentra a una distancia aproximada a los 0.5 cm.

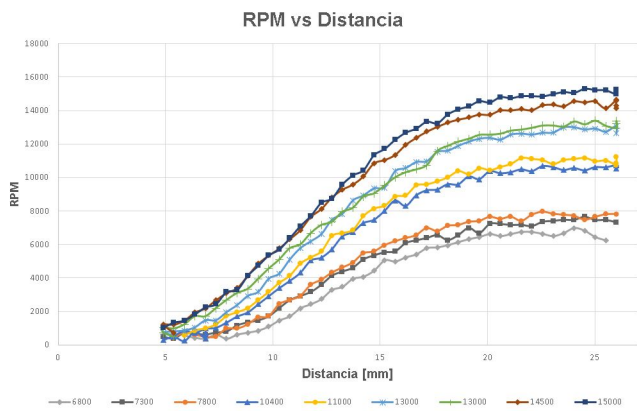


Figura 5. Gráfico de RPM respecto a la distancia del imán al disco.

Para la gráfica mostrada a continuación de RPM vs Campo magnético, se analizaron las RPM del disco respecto a la magnitud aproximada del campo magnético en éste, que a su vez, depende de la distancia del imán. Entre más pequeña es la magnitud del campo magnético actuando sobre el disco, menos disminuyen las RPM. Se puede apreciar una serie de curvas muy similar a la de la gráfica de RPM vs Distancia, en donde en las primeras instancias el decrecimiento muestra una curva relativamente uniforme y aproximadamente cuando

el campo ejerce una magnitud de 2 mT sobre el disco, éste deja de desacelerar.

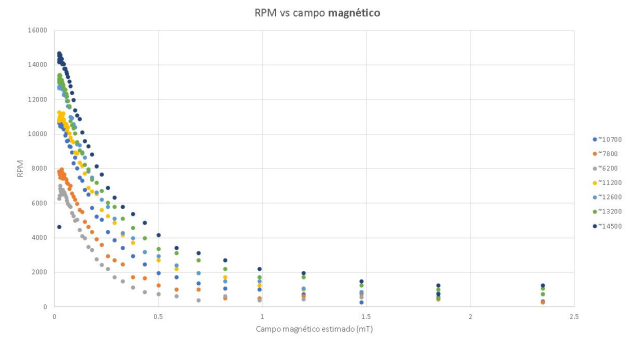


Figura 6. Gráfico de RPM respecto a la distancia del imán al disco.

La siguiente gráfica muestra el cambio de las RPM respecto del campo magnético. A diferencia de la anterior gráfica de RPM vs Campo magnético, aquí se puede observar con más claridad qué tan pronunciado es el cambio de RPM o el frenado del disco, respecto al campo. Se muestran sólo dos pruebas a distintas velocidades iniciales para apreciar con más claridad la diferencia, podemos apreciar la misma tendencia en ambas, aunque el cambio es más pronunciado en la prueba con la velocidad más alta, y parece aumentar la diferencia de ambas pruebas entre menos distancia exista entre el disco y el imán. Podemos interpretar también del gráfico, que el punto máximo del cambio es muy similar en ambas dispersiones, cuando el campo tiene una magnitud aproximada de 0.3 mT.

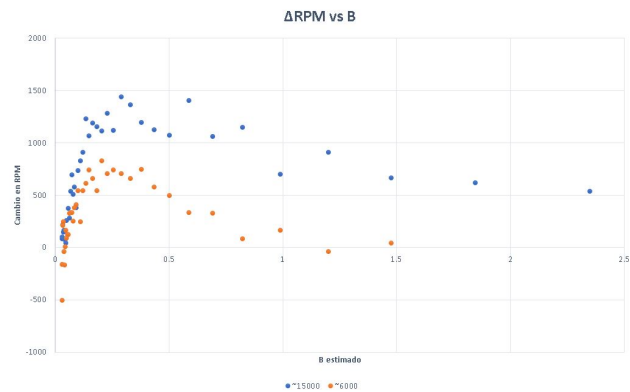


Figura 7. Gráfico de RPM respecto a la distancia del imán al disco.

En las **tres gráficas anteriores**, se puede observar que al aumentar la intensidad del campo, parece disminuir la desaceleración, es decir, inicialmente conforme se aumenta la intensidad del campo estimado  $B$  se observa una desaceleración **rápida**, pero se debe recordar que al fuerza  $F_B$  que frena al disco **depende de la velocidad a la que éste gira**, por tanto, es natural que conforme el disco comienza a frenar, a pesar de aumentar el campo magnético, la fuerza que está frenando a dicho disco también comienza a disminuir, de ahí el comportamiento observado en las gráficas anteriores. Se puede ver que el frenado del disco ( $\Delta RPM$ ) tiene un

comportamiento parecido para cualquier velocidad inicial, por tanto, se propuso un ajuste de la forma:

$$\Delta\omega(B) = \frac{a}{(B+c)} - \frac{b}{(B+c)^2} \quad (7)$$

Este ajuste propuesto se basa en el potencial efectivo, utilizado en mecánica. Con  $\Delta\omega = \Delta RPM$ , y por medio de regresión no lineal, se ajustaron los parámetros  $a, b$  y  $c$  para las diferentes velocidades iniciales, en las siguientes figuras se muestra el ajuste obtenido (se normalizó tanto el campo suministrado como el cambio en los RPM para realizar la regresión):

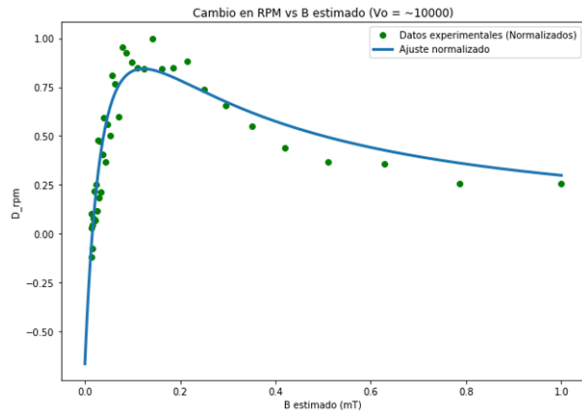


Figura 8. Frenado y ajuste para velocidad inicial de 10000 RPM

Para el caso anterior los coeficientes obtenidos fueron:

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
0.35824	0.0381	0.09087

La siguiente figura muestra el ajuste para la velocidad inicial 15000 RPM:

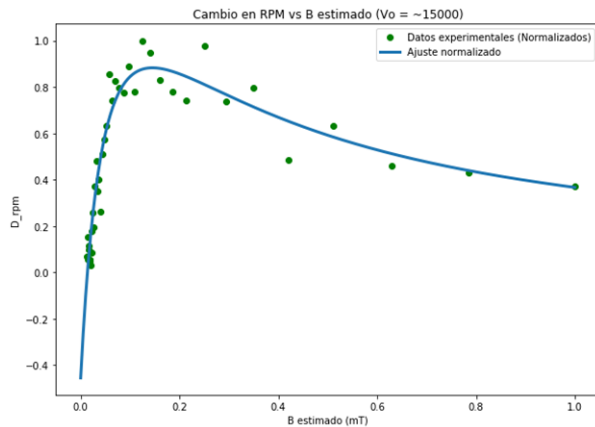


Figura 9. Frenado y ajuste para velocidad inicial de 15000 RPM

Con los coeficientes:

<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
0.046447	0.06110	0.1179

En general se observó que **a** es aproximadamente un orden de magnitud mayor que **b**.

Se debe recordar, como se menciono anteriormente, que el

comportamiento que se ajustó **no representa el frenado frente a un campo**, ya que la velocidad a la que el disco gira tiene una contribución muy importante a la fuerza de frenado.

## V. CONCLUSIONES

El prototipo logró desacelerar de manera efectiva el disco giratorio, sin necesitar un campo magnético del orden de cientos de miliTeslas como inicialmente se había pensado, por lo cual se podría reducir el tamaño del prototipo utilizando bobinas para regular el campo magnético. Se demostró una aplicación útil de las corrientes parásitas que generalmente resultan perjudiciales en otras aplicaciones, debido al calentamiento generado.

Debido a la utilización de sensores electrónicos y micro-controladores, las mediciones obtenidas mostraron un comportamiento de desaceleración claro y esperado. Aunque se observa que el frenado frente al campo parece ajustarse a la ecuación propuesta, no se logró deducir de primeros principios el por qué de esto, sin embargo resulta interesante la relación observada para un posterior análisis.

## REFERENCIAS

- [1] Serway, R. A., Jewett, J. W. (2005). Electricidad y magnetismo. McGraw-Hill.
- [2] R. Resnick y D. Holliday, Física vol.2. CECSA. México.