

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN MOTOR
UNIPOLAR**

AUTORES

**MARIO AUGUSTO CARREÑO ORDÓÑEZ
JOSÉ JULIAN DELGADO RANGEL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2009

**DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN MOTOR
UNIPOLAR**

AUTORES

**MARIO AUGUSTO CARREÑO ORDÓÑEZ
JOSÉ JULIAN DELGADO RANGEL**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO
PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

DIRECTOR:

CARLOS RODRIGO CORREA CELY

CO-DIRECTOR

JOSÉ GABRIEL PLATA CORDERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2009

LOGROS

Con la culminación del presente trabajo de grado se consiguió alcanzar los siguientes logros:

- Se construyó un motor unipolar que sirvió para cuantificar sus características de funcionamiento.
- Se validó un modelo matemático que describe en forma cercana la dinámica de una máquina unipolar.
- Se construyó un control de velocidad para el motor unipolar variando la tensión de alimentación.

TABLA DE CONTENIDO

pág.

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1 DESARROLLO HISTÓRICO.....	4
1.2 INDUCCIÓN UNIPOLAR	6
1.3 CÁLCULO DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ.....	14
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR	19
2.1 IMÁN DE NEODIMIO (ND)	19
2.2 CONFIGURACIONES ANALIZADAS	20
2.2.1 Configuración 1.....	20
2.2.2 Configuración 2.....	22
2.2.3 Configuración 3.....	24
2.2.4 Configuración 4.....	26
2.3 DISEÑO DEL PROTOTIPO	27

3. MODELADO Y CONTROL.....	37
3.1 MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR	37
3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	40
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
5. CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor eléctrico de Faraday	4
Figura 2: Modelo desarrollado por Ampère.....	5
Figura 3: Rueda de Barlow	6
Figura 4: Magnetización en un imán cilíndrico	7
Figura 5: Imán cilíndrico rotando sobre su eje	7
Figura 6: Representación del imán como solenoide.	8
Figura 7: Experimentos de Faraday en 1831	9
Figura 8: Integral de trayectoria de los electrones	10
Figura 9: Corte transversal del imán	11
Figura 10: Plano $z = cte$	12
Figura 11: Imán rotando conectado a un circuito externo.	13
Figura 12: Trayectoria de los electrones en el imán con circuito externo.	13
Figura 13: Fuerzas en los electrones del imán rotando con circuito externo.	14
Figura 14: Diagrama que muestra la obtención del diferencial de volumen.....	15
Figura 15: Diferencial de volumen y descomposición de vectorial de J'	17
Figura 16: Fotografía de los materiales.	21
Figura 17: Montaje configuración 1.....	22
Figura 18: Fotografía de la configuración 2.....	23
Figura 19: Fotografía de la configuración 2.....	24
Figura 20: Fotografía de la configuración 3.....	25
Figura 21: Fotografía de la configuración en levitación.....	26
Figura 22: Fotografía de cierre de circuito en levitación.....	27
Figura 23: Primer bosquejo de prototipo.....	28
Figura 24: Fotografía del montaje en madera.	29
Figura 25: Fotografía del montaje con recipientes para mercurio.....	30
Figura 26: Fotografía de la batería de resistencias en paralelo.	31
Figura 27: Fotografía del montaje en acrílico.....	32

Figura 28: Fotografía Montaje final	36
Figura 29: Circuito eléctrico equivalente	37
Figura 30: Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado	42
Figura 31: Curva de $v(\text{rpm})$ Vs. $t(\text{s})$ para alimentación de 8.2 V	45
Figura 32: Curva de $v(\text{rpm})$ Vs. $t(\text{s})$ para alimentación de 11.07 V	47
Figura 33: Curva de $v(\text{rpm})$ Vs. $t(\text{s})$ para alimentación de 13.83 V	48
Figura 34: Curva de $v(\text{rpm})$ Vs. $t(\text{s})$ para alimentación de 13.83 V	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de espiras y salida de tensión DC	34
Tabla 2: Tabla de tensión de alimentación.....	40
Tabla 3: Resultados del ajuste de la primera toma de datos	46
Tabla 4: Resultados del ajuste de la segunda toma de datos.....	46
Tabla 5: Resultados del ajuste de la segunda toma de datos.....	47

RESUMEN

TITULO: **DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UN MOTOR UNIPOLAR** *

AUTORES: MARIO AUGUSTO CARREÑO ORDÓÑEZ Y JOSÉ JULIAN DELGADO RANGEL **

PALABRAS CLAVES: Inducción, Motor, Generador, Unipolar, Homopolar, acíclico, Sistema de control.

DESCRIPCIÓN:

En los últimos años, el estudio de las máquinas unipolares se ha enfocado hacia la búsqueda de mejores alternativas de energía. Sin embargo, el fenómeno de la inducción unipolar fue descubierto por Michael Faraday hace ya cerca de doscientos años y aún hoy en día, su principio de funcionamiento genera bastante controversia. Las principales discusiones se han centrado en determinar si hay diferencia entre el campo magnético de un imán rotando y el de uno que se encuentra estacionario, y en esclarecer donde se genera el torque posterior.

El motor unipolar es una máquina que en verdad se puede llamar de corriente continua; ya que no necesita de conmutadores para su funcionamiento. Weber bautizo su principio de funcionamiento como Inducción Unipolar ya que él creía que solo uno de los polos del imán estaba produciendo este fenómeno. Por eso el término que es aceptado y reconocido por la IEEE es el de máquinas acíclicas.

La facilidad de montar un motor de esta clase y los estudios que han sido realizados anteriormente permitieron seleccionar la mejor topología y así llevar a cabo la elaboración de un prototipo en funcionamiento, formular su modelo matemático, validarlo experimentalmente y construir un sistema de control de velocidad a lazo abierto.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencias Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director: Rodrigo Correa Cely Codirector: Gabriel Plata Cordero

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND ASSEMBLY OF A CONTROL SYSTEM FOR A UNIPOLAR MOTOR *

AUTHORS: CARREÑO ORDOÑEZ, Mario Augusto and DELGADO RANGEL José Julian **

KEY WORDS: induction, motor, generator, unipolar, homopolar, acyclic, control system.

DESCRIPTION:

During the last years, the study of the unipolar machines have been aimed at searching better alternatives of energy. However, the phenomenon of unipolar induction was discovered by Michael Faraday nearly two hundred years ago and even today, its operating system generates enough controversy. The main discussions have focused on deciding whether or not there is a difference between the magnetic field of a rotating magnet and the one of a stationary, and on clarifying where the back torque is generated.

The unipolar engine is a machine that can be classified as a direct current one; since it does not need switches for its operation. Weber called its principle of operation as unipolar induction because he believed that only one of the poles of a magnet is producing this phenomenon. For this reason, the accepted and recognized term by the IEEE is acyclic machines.

The easiness of installing this type of engine and the studies previously made allowed to select the best topology in order to carry out the development of a prototype in place, to make its mathematical model, to validate it experimentally and to build an open loop speed control system.

* Research Project

** Faculty of Physical-Mechanical Sciences, School of Electric, Electronic and Telecommunications Engineering, Director: Rodrigo Correa Cely - Gabriel Plata Cordero

INTRODUCCIÓN

La facilidad de tomar algunos materiales asequibles para montar en tan solo unos segundos un motor de corriente continua, ha sido la iniciativa para estudios y controversias a lo largo de casi dos siglos, la explicación de este fenómeno a iniciado muchos estudios de grandes como Faraday, Ampère, Weber entre otros, pero en nuestro ambiente estudiantil no ha sido tema de estudio. Tópico que debería formar parte del estudio del electromagnetismo.

Los estudios han sido enfocados a la máquina como generador y ha tomado como nombre mas común “Generador Homopolar”, pero también ha sido llamado unipolar, acíclico y su nombre inicial fue disco dinamo de Faraday. Pero el término aceptado por la IEEE es “máquina acíclica” ya que es de corriente continua en la que la tensión generada en los conductores activos mantiene la misma dirección respecto a esos conductores.¹

Considerado el motor más simple del mundo por su fácil construcción, ya que con un imán, batería, alambre y un tornillo se puede realizar, pero a su vez la explicación de su funcionamiento hasta el día de hoy es muy confusa debido a que posee la característica de trabajar con corriente directa “pura” sin necesidad de usar alternador, y la discusión se ha centrado en demostrar los efectos del imán rotando junto con el eje y la generación del torque posterior o reacción en el inducido del motor.

Para poder explicar el funcionamiento del motor unipolar se analizará el generador. Ya que se presenta la dualidad motor – generador, esto es de gran

¹ IEEE, New York, NY; segunda edición. Citado por VALONE, Thomas. The Homopolar Handbook, A definitive guide to Faraday disk and nmachine technologies, Washington D.C. 2001. p. 1.

ayuda por que los grandes estudios que se han presentado están encaminados a la explicación de la inducción homopolar.

La primera de las discusiones se presenta debido a la configuración del generador, en la cual el imán se encuentra unido al eje conductor de manera que rota todo el conjunto imán – eje y por ello no existe estator, también denominado generador de una sola pieza. Michael Faraday experimentó con un imán cilíndrico y un conductor, y observó que tanto cuando el imán giraba junto con el conductor como cuando él se encontraba estacionario y el conductor girando, la tensión generada era la misma.² Ello llevo a discusiones de autores posteriores como Weber, Preston, Plucker, Kennard que trataron de explicar este fenómeno pero no llegaron a una conclusión satisfactoria.³

Gracias a todos estos estudios que se han presentado se puede llevar a cabo la elaboración de un prototipo en funcionamiento, con su modelo matemático y un control de su velocidad. Este proceso se describe a continuación. En el primer capítulo se procede a analizar la bibliografía, aportes de estudios anteriores y fundamentos de la inducción homopolar. En el segundo la presentación de diferentes configuraciones existentes y la construcción de nuestro motor desde el primer bosquejo hasta el producto final, mencionando cada uno de los inconvenientes presentados y sus soluciones. En el tercer capítulo la elaboración del modelo matemático y su control, en el cuarto, la presentación de los resultados. Quinto capítulo se presentan conclusiones y recomendaciones.

² FARADAY, Michael, Phil. Trans. of Royal Acad. 1832, p. 122, 183

³VALONE, Thomas. The Homopolar Handbook, A definitive guide to Faraday disk and nmachine technologies, Washington D.C. 2001. p. 3,4

OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema de control para un motor unipolar.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Plantear un modelo matemático satisfactorio del funcionamiento de un motor unipolar.
- Definir y construir la topología del motor unipolar que satisfaga adecuadamente los requerimientos de calidad y desempeño.
- Seleccionar y montar el tipo de control de velocidad para motores de corriente continua que garantice el funcionamiento adecuado y eficiente del sistema.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 DESARROLLO HISTÓRICO

En 1821 Michael Faraday presenta en sociedad el primer motor eléctrico, el cuál consiste de dos recipientes de vidrio ubicados uno al lado del otro, en el recipiente de la izquierda se encontraba un imán cilíndrico sumergido hasta la mitad de su superficie en mercurio puro, el recipiente de la derecha está configurado como pila galvánica. El polo superior de la pila galvánica se encuentra conectado con el mercurio a través de un soporte de cobre, en el fondo de cada recipiente hay un agujero por el cuál se introduce un cable conductor, estos serán los terminales de cierre del circuito, una vez que esto ocurra se observa como el imán rota sobre el cable conductor⁴, como se observa en la figura 1.

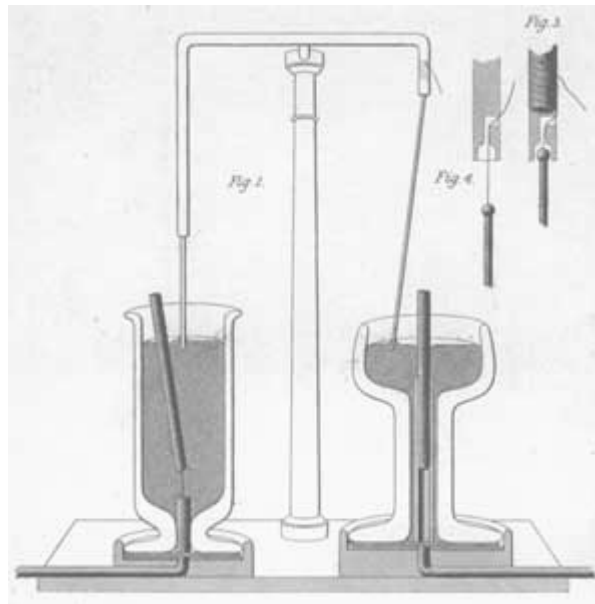


Figura 1: Motor eléctrico de Faraday

(Fuente: <http://www.sparkmuseum.com/MOTORS.HTM>)

⁴ FARADAY, M. Description Of An Electro-Magnetical Apparatus For The Exhibition Of Rotatory Motion En: Quart. J. Sci. XII. (1822); p 283-285. Electromagnetic Rotation (the key experiments).

Poco después del experimento hecho por Faraday, André Marie Ampère llevó a cabo el mismo experimento pero le realizó un par de mejoras, primero llenó un recipiente con mercurio e introdujo en él un polo de un imán cilíndrico, en el otro polo puso un poco de mercurio obteniendo así una escobilla, luego insertó un cable conductor por un orificio en la parte inferior del recipiente y aplicó tensión entre los terminales obteniendo la rotación del imán sobre su propio eje⁵, como muestra la figura 2.

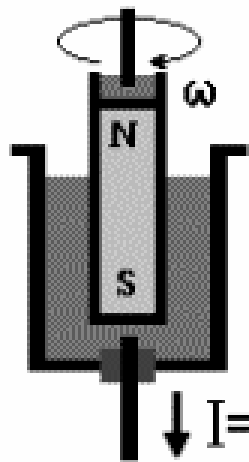


Figura 2: Modelo desarrollado por Ampère

(Fuente: <http://sidam.at.tut.by/en.html#2>)

En 1822 Peter Barlow construyó la denominada rueda de Barlow, que consta de una pieza giratoria en forma de estrella, un pozo de mercurio, un imán permanente con forma de herradura y un suministro de tensión como se muestra en la figura 3. Al inyectar corriente en los terminales de la estrella bajo la acción del campo magnético que proporciona el imán, se obtiene un movimiento rotacional continuo en la estrella.⁶

⁵ AMPERE, A. Reponse A La Lettre De M. Van Beck Sur Une Nouvelle Experience Electro- Magnetique. En: Journal de Physique. 1821. T. XCIII; p 447-467. Electromagnetic Rotation (the key experiments).

⁶ JOACHIM SCHLICHTING, H y UCKE, Christian. A fast, high-tech, low cost electric motor construction Un Motor Eléctrico Physik in unserer Zeit. Vol 35, (2004); p 272-273.

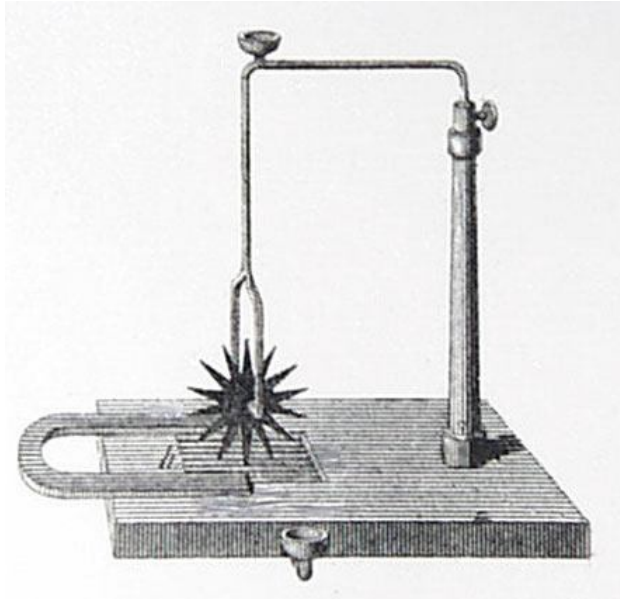


Figura 3: Rueda de Barlow

(Fuente: <http://www.dkimages.com/discover/previews/795/940047.JPG>)

1.2 INDUCCIÓN UNIPOLAR

Si se toma un imán cilíndrico y se pone a rotar en condiciones ideales, en total aislamiento, él rotaría indefinidamente ya que no encontraría una fuerza que lo frenara. Para comprender el principio de inducción unipolar se analiza este caso, primero se realiza la caracterización eléctrica del campo magnético generado en el imán⁷. Si el imán posee una magnetización \vec{M} en dirección \hat{z} como muestra la figura 4.

$$\vec{M} = M\hat{z} \quad [\text{A}\cdot\text{m}^2] \quad (1.1)$$

\vec{M} = Magnetización = Momento bipolar magnético por unidad de volumen.

⁷ MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism
En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

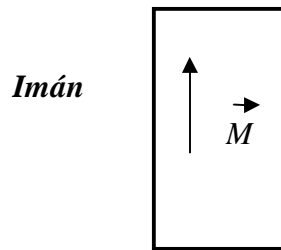


Figura 4: Magnetización en un imán cilíndrico

Como en el experimento el imán se encuentra girando, esto se representa en la figura 5. El campo magnético adentro del cilindro se puede obtener calculando la corriente K_B

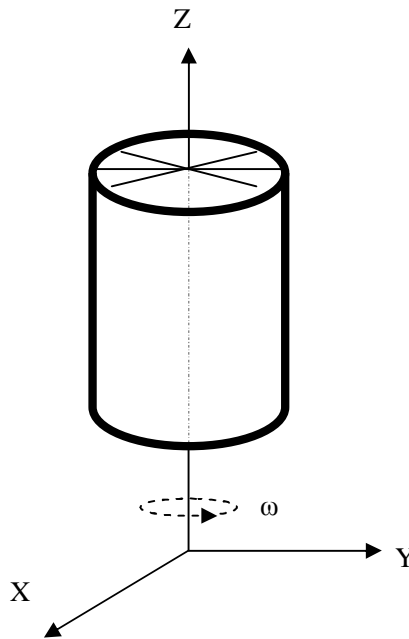


Figura 5: Imán cilíndrico rotando sobre su eje

$$\vec{K}_B = \vec{M} \times \hat{n} \quad [\text{A}\cdot\text{m}^2] \quad (1.2)$$

donde \hat{n} = vector normal a la superficie.

Reemplazando (1.1) en (1.2)

$$K_B = M\hat{z} \times \hat{\rho} = M\hat{\phi} \quad [\text{A}\cdot\text{m}^2] \quad (1.3)$$

Conociendo esta corriente K_B podemos representar el imán como un solenoide como se muestra en la figura 6.

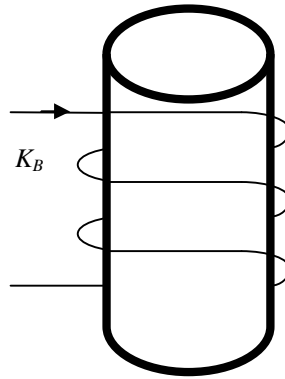


Figura 6: Representación del imán como solenoide.

La corriente K_B genera un campo \vec{B} en dirección del eje \hat{z} . Lo anterior no tendría ninguna objeción si el imán estuviese estático pero este se encuentra rotando y aquí es donde se presenta una de las grandes discusiones de la inducción unipolar y es el efecto del campo magnético de un imán rotando sobre su eje⁸.

En 1831 Michael Faraday experimentó con un imán cilíndrico y un disco conductor realizando las configuraciones mostradas en la figura 7, poniendo a rotar el disco manteniendo el imán quieto, luego poniendo a girar el imán junto con el disco conductor y observó que se presentaba la misma corriente en el galvanómetro para cada una de las configuraciones. Los resultados obtenidos de este experimentos llevó a discusiones sobre la variación del campo magnético de un imán rotando, el mismo Faraday trató de explicar este fenómeno por medio de las líneas de campo aseverando de acuerdo a sus observaciones que estas no

⁸ MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism
En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

variaban así rotara el imán, sin embargo tenía sus detractores, como Ampère que opinaba que las líneas de campo rotan junto con el imán, científicos posteriores como Weber, Preston, Plucker, Kennard trataron de explicar este fenómeno tomando como referencia las líneas de campo, pero no llegaron a una conclusión satisfactoria. Hoy en día se sabe que las líneas de campo son solo una representación del campo magnético y por lo tanto no es posible diferenciar experimentalmente entre un campo magnético giratorio y uno no giratorio⁹.

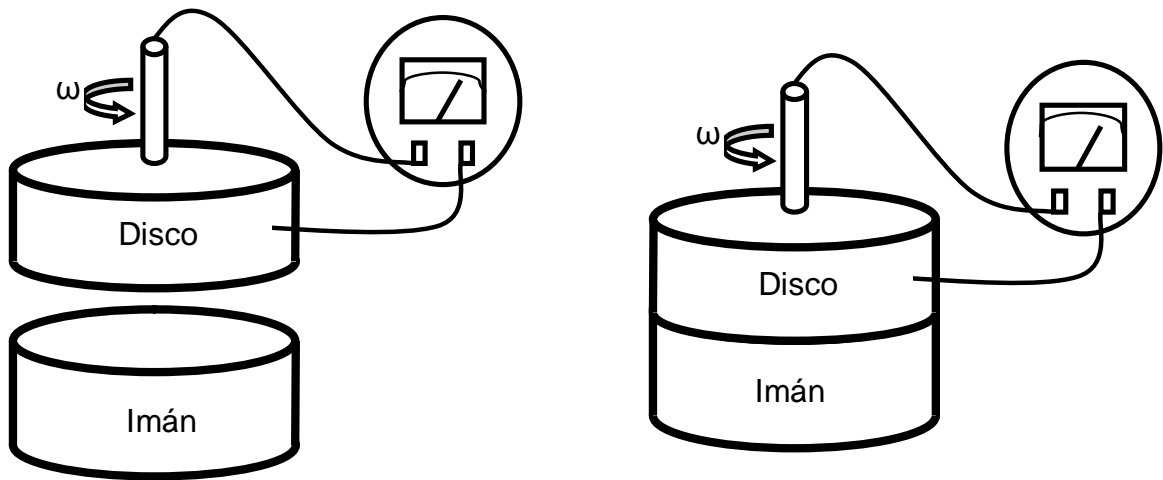


Figura 7: Experimentos de Faraday en 1831

Esto permite que todo el análisis posterior se realice tomando en cuenta que el campo magnético \vec{B} en el imán no cambia, así se encuentre rotando sobre su eje o este estacionario.

Ya analizando el comportamiento al interior del imán podemos decir que los electrones poseen una velocidad de drift \vec{v} la cual se relaciona con la velocidad angular ω por:

⁹ VALONE, Thomas. The Homopolar Handbook, A definitive guide to Faraday disk and machine technologies, Washington D.C. 2001. p. 3,4

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \Rightarrow \vec{v} = \omega \rho \hat{\phi} \text{ [m/s]} \quad (1.4)$$

Y también experimentan una fuerza debido al campo magnético \vec{B} :

$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B} \text{ [N]} \quad (1.5)$$

Donde e es la carga del electrón $e = 1.6 * 10^{-19} [C]$

Pero los electrones están estáticos en la dirección $\vec{\rho}$, entonces la suma de fuerzas sobre los electrones es cero. La fuerza que contrarresta a la fuerza magnética es de origen eléctrico:

Aplicando ley de Lorentz

$$\vec{F}_T = -e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B} = 0 \text{ [N]} \quad (1.6)$$

despejando

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B} \text{ [V/m]} \quad (1.7)$$

Ahora se calcula el potencial V correspondiente a este campo eléctrico por medio de la integral de línea de la trayectoria de los electrones desde 0 a P como se muestra en la figura 8.

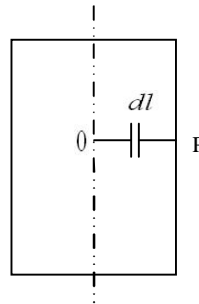


Figura 8: Integral de trayectoria de los electrones

$$V_p = -\int_0^p \vec{E} \cdot d\vec{l} \text{ [V]} \quad (1.8)$$

Reemplazando (1.7) en (1.8)

$$V_p = -\int_0^P \left(-\vec{v} \times \vec{B} \right) \cdot d\vec{l} \quad [\text{V}] \quad (1.9)$$

Reemplazando (1.4) en (1.9)

$$V_p = -\int_0^P \omega \rho \hat{\phi} \times B \hat{z} \cdot d\rho = \omega \int_0^P B \rho d\rho \hat{\phi} \quad [\text{V}] \quad (1.10)$$

Multiplicando (1.10) por la unidad $\frac{2\pi}{2\pi}$

$$V_p = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^P B(2\pi\rho) d\rho \quad [\text{V}] \quad (1.11)$$

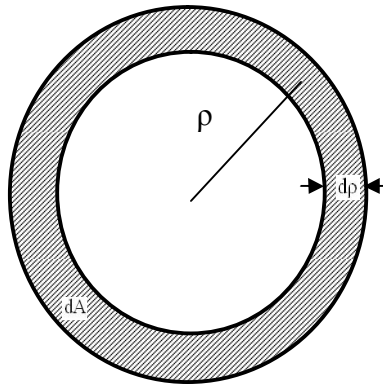


Figura 9: Corte transversal del imán

En la figura 9 se observa la posición de los electrones dentro de un diferencial de área del corte del cilindro en rotación, este diferencial es:

$$dA = 2\pi\rho d\rho \quad (1.12)$$

Reemplazando (1.12) en (1.11)

$$V_p = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^P \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad [\text{V}] \quad (1.13)$$

teniendo en cuenta que la definición de flujo magnético ϕ_B es:

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad [\text{Wb}] \quad (1.14)$$

reemplazando (1.14) en (1.13) obtenemos el potencial

$$V_P = \frac{\omega}{2\pi} \phi_B \text{ [V]} \quad (1.15)$$

La ecuación (1.15) describe la diferencia de potencial que se presenta dentro del conductor debido al campo eléctrico. Calculando el flujo magnético que pasa a través de una superficie podemos obtener el potencial eléctrico en cualquier punto dentro del imán¹⁰. Viendo el plano xy ($z = cte$) de la figura 10 podemos observar la trayectoria de los electrones y deducir que se mueven circularmente:

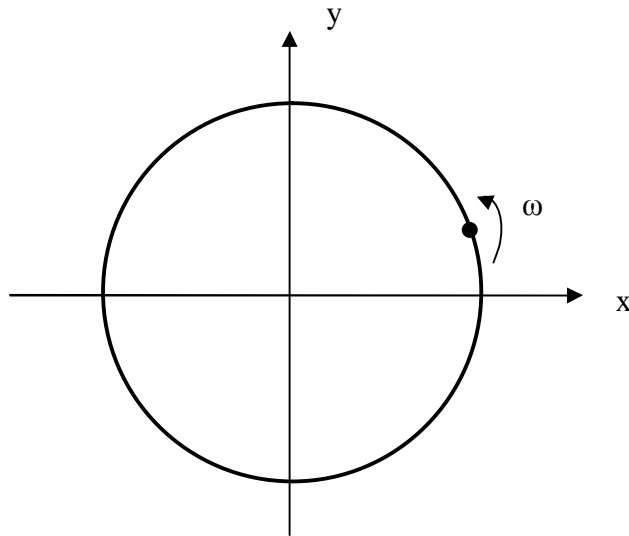


Figura 10: Plano $z = cte$

Ahora se analiza el caso en el cual se pone a rotar el imán cilíndrico y se conecta un alambre con una resistencia como muestra la figura 11.

¹⁰ MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism
En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

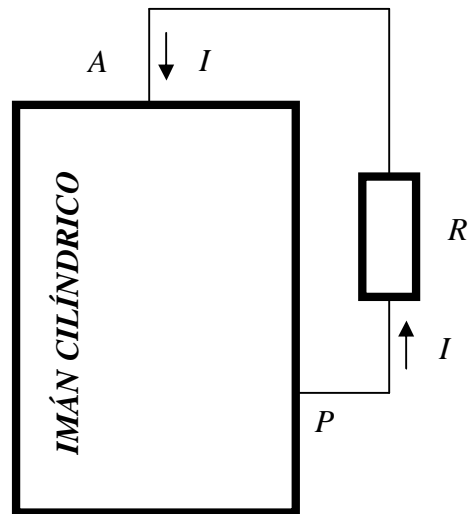


Figura 11: Imán rotando conectado a un circuito externo.

La fuerza eléctrica llega a ser menor que la magnética y se forma una corriente. Debido a esto la trayectoria de los electrones tendrá una componente en la dirección radial y estos se moverán en trayectorias espirales como se representa en la figura 12.

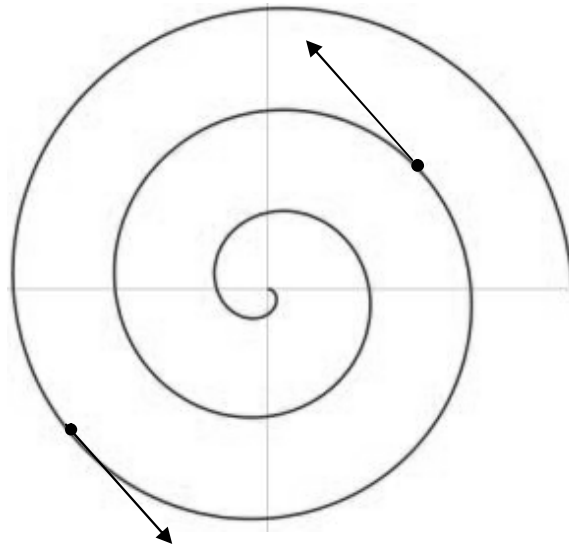


Figura 12: Trayectoria de los electrones en el imán con circuito externo.

Debido a los choques de los electrones con los demás componentes del imán (red cristalina) transfieren momentum y generan un torque sobre el cilindro.

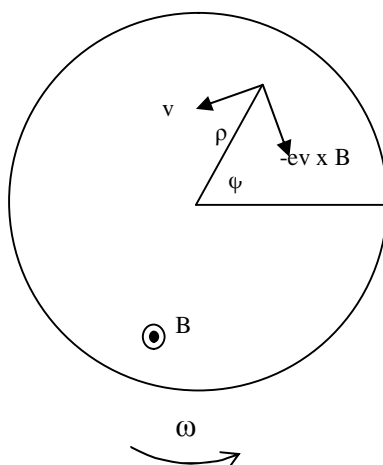


Figura 13: Fuerzas en los electrones del imán rotando con circuito externo.

Hay una componente magnética de fuerza que tiene la dirección negativa de φ y los choques generan un torque contrario a ω . Se debe entonces suministrar energía externa para mantener la velocidad ω .

1.3 CÁLCULO DE LA FUERZA ELECTROMOTRIZ

El torque se calcula como: $d\tau = \vec{r} \times d\vec{F}$

$d\tau = id\vec{l} \times \vec{B}$, para hilos

$d\tau = \vec{K} \times \vec{B} ds$, para corrientes superficiales

$d\tau = \vec{J} \times \vec{B} dv$, para corrientes volumétricas

El torque total se calcula sumando todas las contribuciones,

$$\tau = \int_v \vec{r} \times (\vec{J} \times \vec{B}) dv \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1.16)$$

Para poder resolver esta integral se escogió el dv entre líneas de campo \vec{B} que se muestra en la figura 14, se puede ver que al seleccionar este dv obtenemos un caso general para la solución de la integral del torque¹¹.

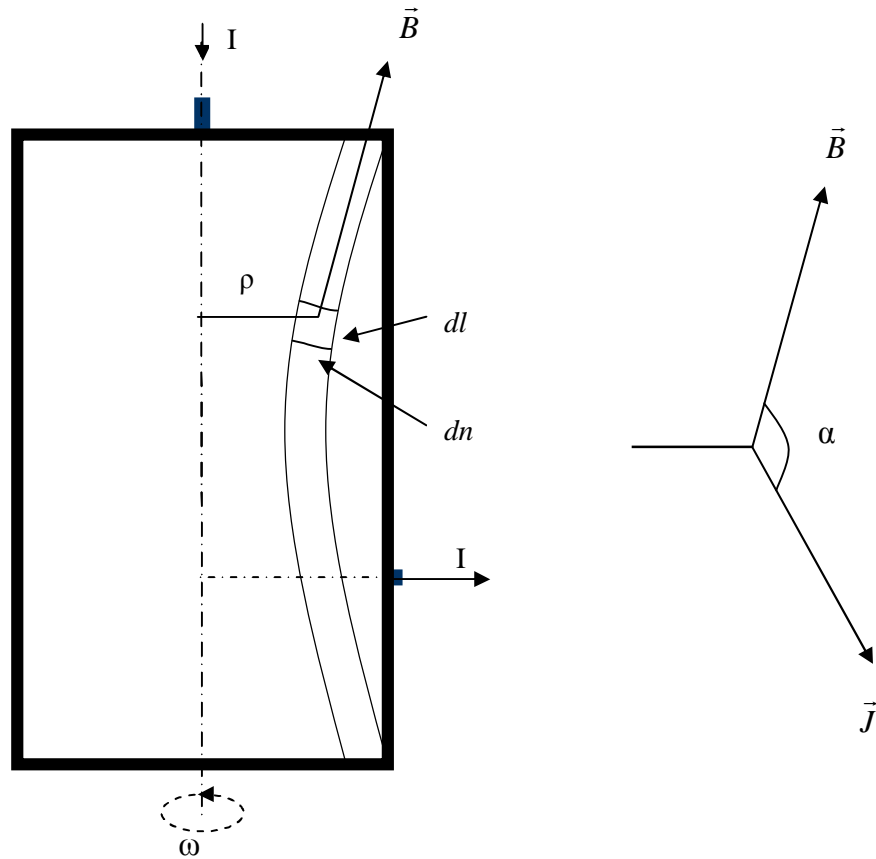


Figura 14: Diagrama que muestra la obtención del diferencial de volumen.

Se procede a desarrollar el producto vectorial $\vec{J} \times \vec{B}$

$$\vec{J} = J_{\rho} \hat{\rho} + J_{\phi} \hat{\phi} + J_z \hat{z} \quad [\text{A/m}^2]$$

$$\vec{B} = B_{\rho} \hat{\rho} + B_z \hat{z} \quad [\text{T}]$$

$$\vec{J} \times \vec{B} = J_{\phi} B_z \hat{\rho} + J_z B_{\rho} \hat{\phi} - J_{\rho} B_z \hat{\phi} - J_{\phi} B_{\rho} \hat{z} \quad [\text{N}]$$

¹¹ MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism
En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

$$\vec{J} \times \vec{B} = J_{\varphi} B_z \hat{\rho} + (J_z B_{\rho} - J_{\rho} B_z) \hat{\phi} - J_{\varphi} B_{\rho} \hat{z} \quad [\text{N}] \quad (1.17)$$

Ahora se realiza el producto vectorial

$$\vec{r} \times (J_{\varphi} B_z \hat{\rho} + (J_z B_{\rho} - J_{\rho} B_z) \hat{\phi} - J_{\varphi} B_{\rho} \hat{z}) \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1.18)$$

$$\vec{r} = r_{\rho} \hat{\rho} + r_z \hat{z} \quad [\text{m}] \quad (1.19)$$

reemplazando (1.19) en (1.18)

$$r_{\rho} \hat{\rho} + r_z \hat{z} \times (J_{\varphi} B_z \hat{\rho} + (J_z B_{\rho} - J_{\rho} B_z) \hat{\phi} - J_{\varphi} B_{\rho} \hat{z}) \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1.20)$$

Solo importa el torque en la dirección \hat{z} el cual nos produce el movimiento rotacional. De (1.20)

$$r_{\rho} \cdot (J_z B_{\rho} - J_{\rho} B_z) \hat{z} \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1.21)$$

Al realizar el producto cruz $\vec{r} \times (\vec{J} \times \vec{B})$ se observa que la componente J_{φ} no aporta torque para el movimiento rotacional del imán. Ahora se puede trabajar haciendo \vec{J}' como la proyección del vector \vec{J} en el plano ρz como se muestra en la figura 15, y así obtenemos los tres vectores $(\vec{r}, \vec{J}, \vec{B})$ en el mismo plano y ahora procedemos a calcular el torque. Podemos calcular el producto $\vec{J}' \times \vec{B}$ realizándolo como $\vec{J}' \times \vec{B}$, de la figura 15 observamos que el producto cruz de dos vectores que se encuentran en el mismo plano es la multiplicación de sus magnitudes y el seno del ángulo que forman¹²:

$$\vec{J}' \times \vec{B} = (J' B \text{Sen} \alpha) \quad [\text{N}] \quad (1.22)$$

El diferencial de volumen es:

$$dv = \rho d\varphi dln \quad (1.23)$$

Reemplazando (1.22) y (1.23) en (1.16) y tomando la posición $\vec{r} = \rho \hat{\rho}$

$$\tau_z = -\iiint \rho (J' B \text{Sen} \alpha) \rho d\varphi dln \quad [\text{N}\cdot\text{m}]$$

$$\tau_z = -\iiint \rho^2 (J' B \text{Sen} \alpha) d\varphi dln \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1.24)$$

¹² MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism
En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

El flujo encerrado en las paredes del diferencial de volumen mostrado en la figura 15 esta dado por:

$$d\phi_B = 2\pi\rho Bdn$$

$$Bdn = \frac{d\phi_B}{2\pi\rho} \quad (1.25)$$

Reemplazando (1.25) en (1.24)

$$\tau_z = -\iiint \frac{\rho}{2\pi} J' \text{Sen}\alpha d\phi dl d\phi_B \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1.26)$$

Procedemos a realizar el cálculo de la corriente que circula en el sistema:

$$I = \int J \cdot ds \quad [\text{A}] \quad (1.27)$$

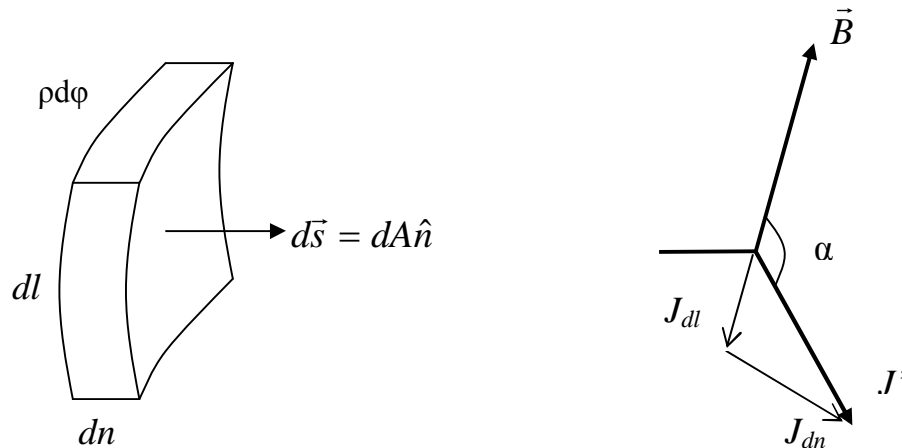


Figura 15: Diferencial de volumen y descomposición de vectorial de J'

$$dl = J_{dn}\rho d\phi dl$$

$$J_{dn} = \cos(\alpha - 90)J' = (\cos\alpha \cos 90 + \text{sen}\alpha \text{sen}90)J' \quad [\text{A}/\text{m}^2]$$

$$J_{dn} = J' \text{sen}\alpha \quad [\text{A}/\text{m}^2] \quad (1.28)$$

$$I = \iint \rho J' \text{sen}\alpha d\phi dl \quad [\text{A}] \quad (1.29)$$

Ahora reemplazando (1.29) en (1.26)

$$\tau_z = -\iiint \frac{\rho}{2\pi} (J' \sin \alpha) d\varphi d\ell d\phi_B = -\frac{I}{2\pi} \int d\phi_B = -\frac{I}{2\pi} \phi_B \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

$$\tau_z = -\frac{I}{2\pi} \phi_B \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad (1.30)$$

Por ello se debe aplicar un torque externo para que se mantenga girando. Este es:

$$\tau_{ext} = \frac{I}{2\pi} \phi_B \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

Por conservación de energía, la mecánica y la eléctrica deben ser iguales; la energía mecánica es igual a $\tau\omega$ y esto es igual a la f.e.m. por la corriente

$$\tau\omega = \frac{I\phi_b\omega}{2\pi} = EI \text{ [J/s]}$$

$$E = \frac{\phi_B\omega}{2\pi} \text{ [V]} \quad (1.31)$$

De la ecuación 1.31 se concluye que la tensión inducida en una máquina homopolar depende del flujo magnético interno, la velocidad angular y de una constante que representa la construcción mecánica de la máquina¹³.

¹³ MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism
En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR

Para la elaboración de las configuraciones descritas en este capítulo y la implementación de un motor homopolar se requirió un material indispensable, este es un imán que proporcione alto campo magnético. Esto es posible con una clase de imanes fabricados con neodimio y por esto se presentará las características.

2.1 IMÁN DE NEODIMIO (Nd)

Se trata de un elemento recientemente conocido o poco utilizado en nuestra vida cotidiana. Una de las propiedades que más llama la atención, es su gran poder magnético desarrollando una potencia de 7 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Debido a esta propiedad, está sustituyendo, lenta pero progresivamente, a las aleaciones de Samario-Cobalto (Sm-Co) ya que, además de ser más potente y menos frágil, es también más barato.

En apariencia son metálicos, debido al recubrimiento de Níquel que llevan por ser altamente sensibles a la corrosión. Adicionalmente, son bastante frágiles a temperaturas superiores a los 80 °C, condición bajo la cual, el imán perderá su potencia hasta en un 65%. Por eso en estas temperaturas se prefiere la aleación samario-cobalto.

Características especiales del imán

- Alta resistencia a la desmagnetización
- Buen comportamiento a temperatura ambiente.
- Alta energía
- Susceptible de corroerse
- Su máxima temperatura de trabajo es de 80°C

- Su fuerza residual está entre 12.800 y 14.000 Gauss dependiendo del grado.
- Se fabrican en grado 30, 35, 40 y 45
- Es extremadamente quebradizo. Debe manipularse con cuidado¹⁴.

2.2 CONFIGURACIONES ANALIZADAS

La primera fase de la construcción del motor se centró en la observación y montaje de las configuraciones ya existentes y que se pueden encontrar en la Internet, cualquier persona puede buscar con las palabras claves “motor homopolar” y a esta búsqueda responden un sin fin de videos de montajes de motores de este tipo. Después de esta observación se decidió hacer el montaje de tres sencillas configuraciones para analizar su comportamiento. Para realizarlo se requieren materiales muy fáciles de conseguir excepto los imanes de neodimio; ellos se consiguen pero no tan fácilmente como los demás elementos. Las siguientes son las configuraciones montadas con sus respectivos materiales y un pequeño resumen del comportamiento presentado:

2.2.1 Configuración 1

Materiales:

- Imán cilíndrico de neodimio
- Tornillo de cabeza plana
- Alambre conductor de cobre
- Batería recargable de 2650 mAh

En la figura 16 se observan estos implementos

¹⁴ <http://www.dimetales.com/pdf/imanesneo.pdf>

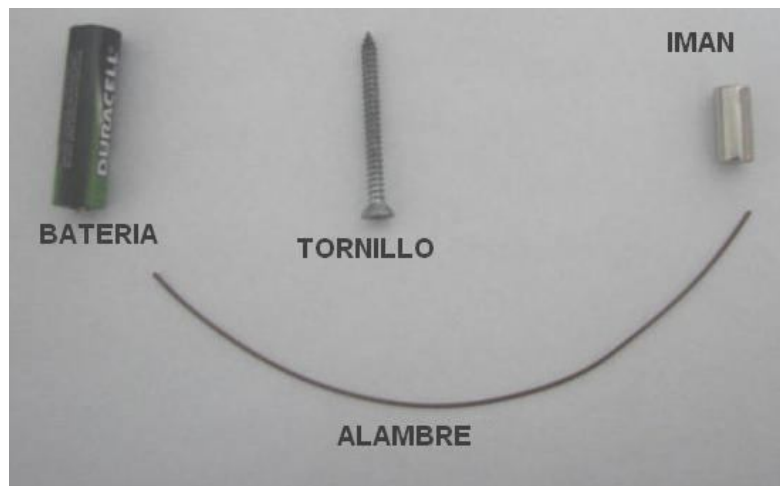


Figura 16: Fotografía de los materiales.

Montaje:

Se une la cabeza del tornillo con uno de los polos del imán de neodimio, además se sostiene la batería con la mano izquierda con el terminal positivo en la parte superior y se deja sostener la punta del tornillo sobre el terminal negativo, esto se logra mediante la acción magnética que confiere el imán al tornillo, seguidamente se procede a cerrar el circuito, con un extremo del alambre en el terminal positivo de la pila y con el otro extremo tocando la periferia del imán cilíndrico. Este es todo el montaje que se debe realizar como muestra la figura 17.

Comportamiento:

El tornillo junto con el imán gira sobre su propio eje a una buena velocidad comportándose como el rotor del motor, la velocidad se sostiene por buen tiempo, pero debido al calentamiento que presenta el alambre después de 30 segundos aproximadamente, el experimento se debe terminar. El contacto entre el cable y el imán presenta chispas cada vez que por efecto del giro hay una separación y unión en él. El sentido de giro se puede variar intercambiando el polo del imán que se encuentra en contacto con el tornillo.

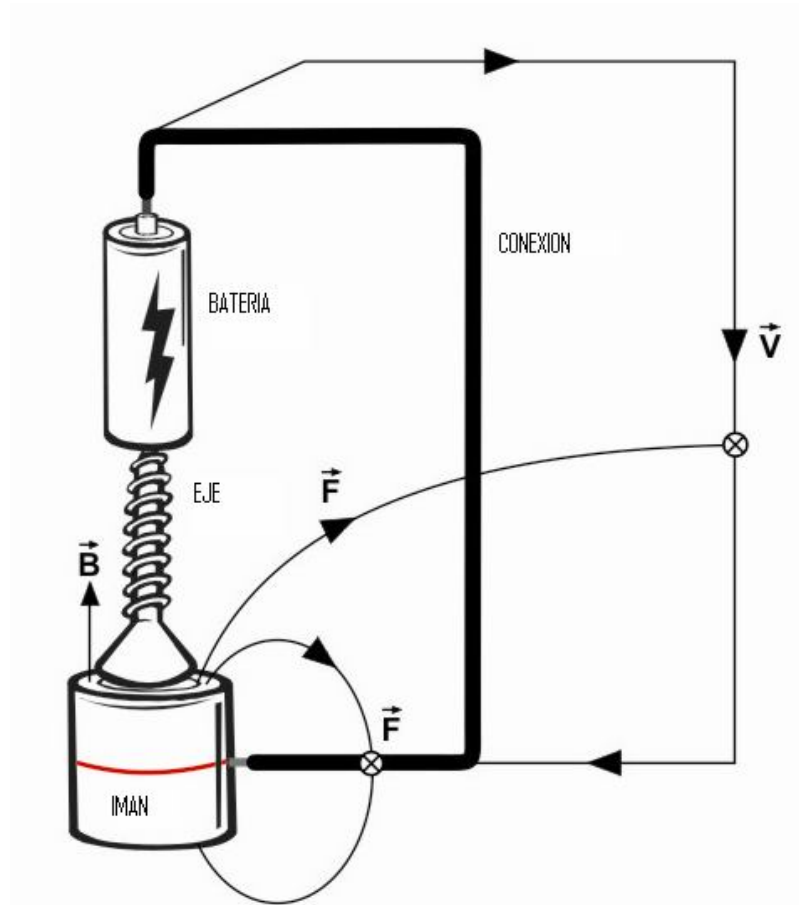


Figura 17: Montaje configuración 1.

También se puede invertir intercambiando los terminales de la batería. Pero por comodidad se recomienda el primer caso (en el terminal positivo se sostiene el tornillo con mas dificultad). Otro comportamiento observado es que al colocar en contacto una superficie con el rotor del motor el disminuía su velocidad y el calentamiento del alambre se eleva mas rápido.

2.2.2 Configuración 2

Materiales:

- Imán cilíndrico de neodimio

- Alambre conductor de cobre
- Batería recargable de 2650 mAh

Montaje:

Un polo del imán se une con el terminal negativo de la pila y el alambre se dobla como se ilustra en la figura 18.

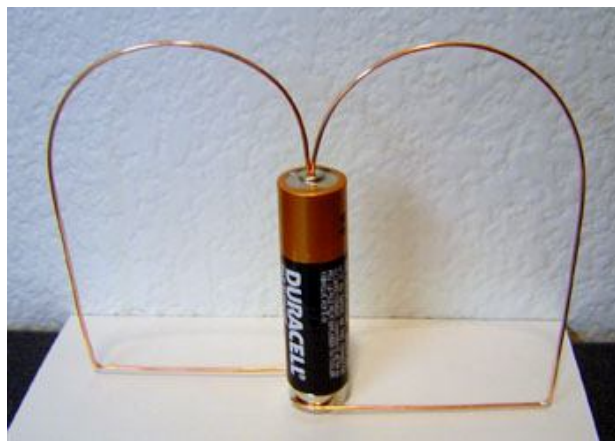


Figura 18: Fotografía de la configuración 2.

(Fuente: <http://dangerouslyfun.com/homopolar-motor>)

De esta forma el cable cierra el circuito entre la batería y el imán; el cable debe tocar la batería en el positivo de esta y también el imán pero este contacto debe permitir la rotación del cable.

Comportamiento:

En la actual configuración el alambre se comporta como rotor, el cual empieza a girar cuando se presenta el cierre de circuito. Si invertimos el polo del imán que se encuentra en contacto con la batería entonces el sentido de giro también se invierte. En esta configuración no son necesarias las manos para sostener el cierre del circuito, esto permite que el motor gire un tiempo superior al de la primera configuración, ya que se necesita menos fuerza para que rote el alambre.

Pero en cualquier momento se puede presentar un volcamiento del alambre debido al efecto de su misma rotación. La forma de la espira puede ser variada como se ilustra en la figura 19.

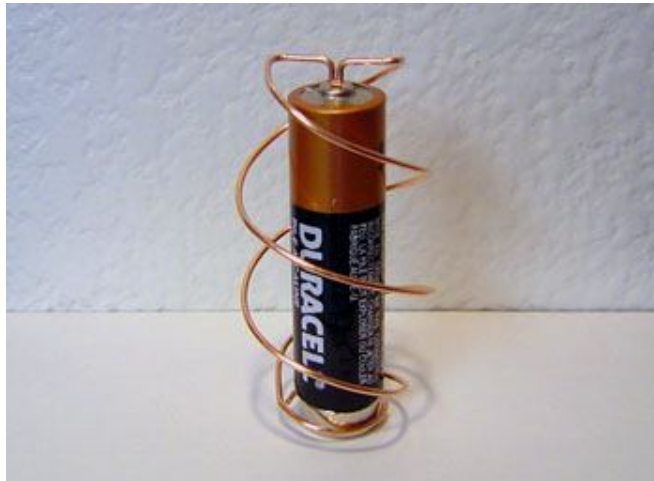


Figura 19: Fotografía de la configuración 2

(Fuente: <http://dangerouslyfun.com/homopolar-motor>)

2.2.3 Configuración 3

Materiales:

- Dos imanes de neodimio de similar dimensión
- Batería AA
- Alambre conductor

Montaje:

En cada extremo de la pila se coloca un imán y con el alambre doblado de la manera como se muestra en la figura 20, se cierra el circuito tocando cada terminación del cable uno de los dos imanes. Se debe asegurar que los imanes se encuentren puestos de la siguiente forma: si el terminal positivo de la batería se

encuentra en contacto con el polo sur del imán 1, el terminal negativo debe estar en contacto con el polo norte del imán 2.

Comportamiento:

En este caso la batería junto con los imanes se va a comportar como el rotor del motor, ya que al cerrar el circuito van a semejarse a un eje de carro. Si se suelta el cable de manera que haga contacto con cada imán, estos y la batería rodaran sobre la superficie en la que se encuentran, este fenómeno ocurre mientras el cable se encuentre conectado con los dos imanes; de lo contrario finalizará el movimiento.

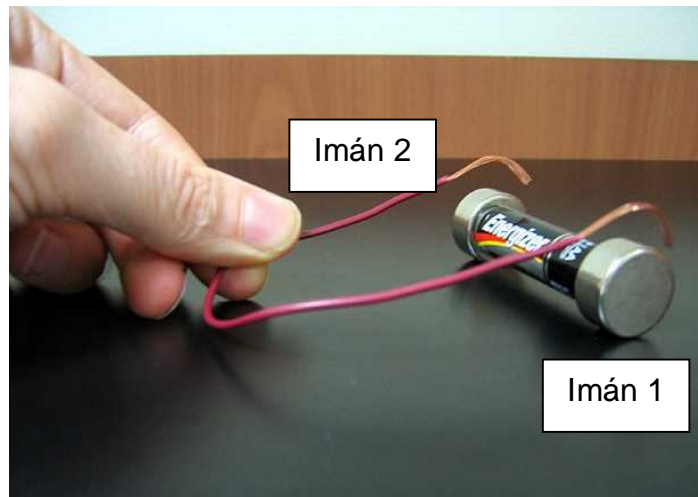


Figura 20: Fotografía de la configuración 3

(Fuente: http://www.grand-illusions.com/articles/homopolar_roller/)

Esas tres configuraciones son las más encontradas en la Internet, la mayoría de las páginas dan la explicación para realizar el montaje de ellas pero pocas se permiten explicar el fenómeno que lleva a que se presente el movimiento.

En el transcurso de nuestros experimentos llevamos a cabo una variación a la configuración 1, a continuación la presentamos:

2.2.4 Configuración 4

Materiales:

- 2 Imanes de neodimio
- Tornillo
- Batería AA

Montaje:

Con la ayuda de otro imán se logra que el rotor (imán 1 y tornillo) leviten horizontalmente como se muestra en la figura 21. Se colocó el imán 1 en la cabeza del tornillo y la punta del tornillo pegada al polo negativo de la pila que se encuentra horizontalmente. Después el imán 2 (imán de ayuda) suspendido en una superficie metálica a la misma altura de la batería se empieza a acercar hacia el polo libre del imán 1, hasta encontrar una distancia que mantiene el rotor en forma horizontal. Luego procedemos a cerrar el circuito con el alambre de cobre entre el imán pegado al tornillo y el polo positivo de la batería ilustrado en la figura 22.

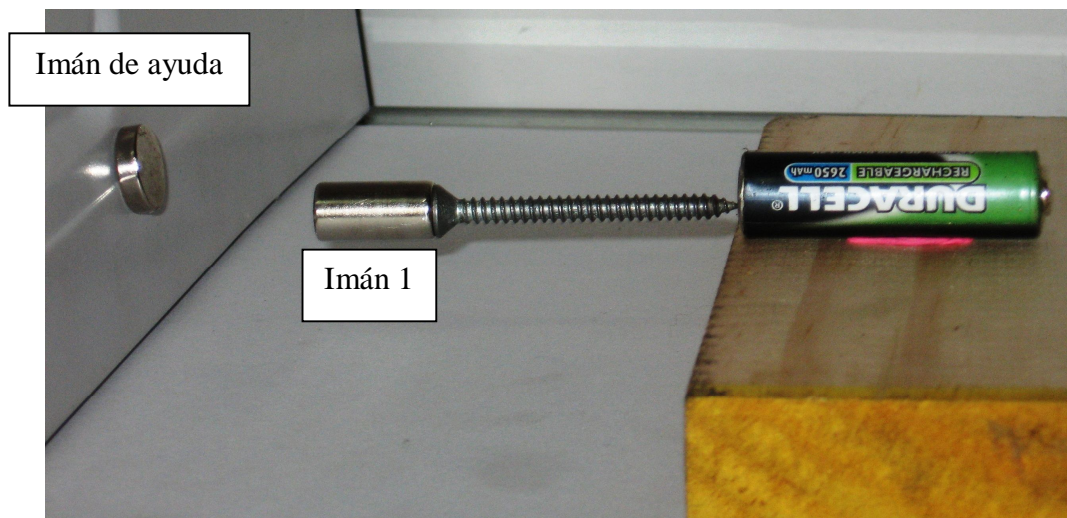


Figura 21: Fotografía de la configuración en levitación.

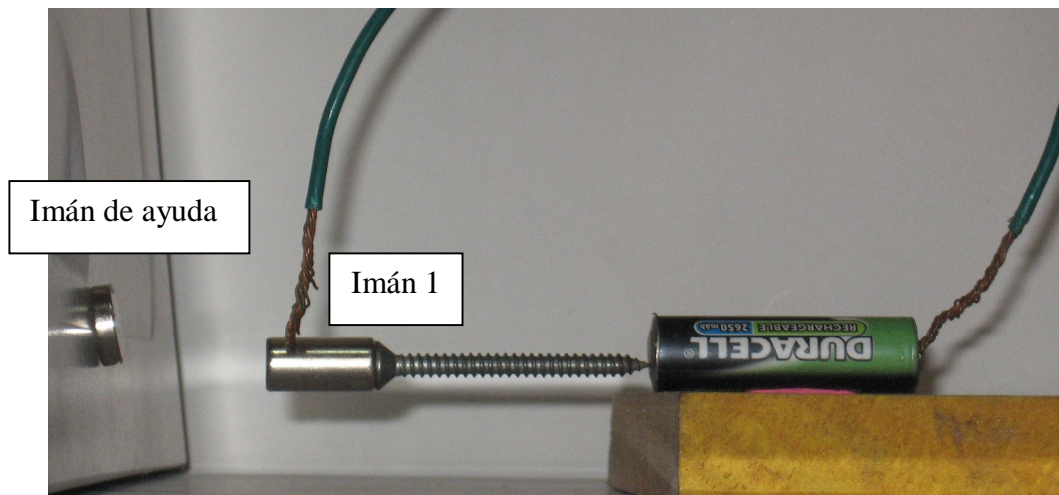


Figura 22: Fotografía de cierre de circuito en levitación.

Comportamiento:

Cuando se ha cerrado el circuito se presenta la acción de rotación, el tornillo y el imán juntos se comportan como el rotor del motor y el alambre como una escobilla, en esta configuración también podemos mantener el giro por un tiempo mas largo que en la configuración 1, debido a que nuestras manos no se encuentra en contacto directo con las zonas que presentan calentamiento.

2.3 DISEÑO DEL PROTOTIPO

Después de realizados estos experimentos se procede a la creación de un prototipo propio, el primer inconveniente se presentó al tratar de reproducir las configuraciones anteriores extrayendo la batería y colocando una fuente de tensión continua en reemplazo de ella, no se obtenía buenos resultados. Las configuraciones no funcionaban por que solicitaban demasiada corriente a la fuente, la cual no podía abastecer. Otro problema encontrado fue al colocar horizontalmente la primera configuración, funcionaba con extrema dificultad. Esto se presentaba por que la fuente no podía suministrar suficiente corriente para

poner a rotar el eje (tornillo) ya que por su masa, tenía mas fricción estando en esta posición.

Debido a que no se podía suministrar corriente mediante una fuente de tensión o corriente comerciales, se decidió probar con baterías recargables de mayor tamaño y amperaje. Se consiguió el siguiente modelo de batería: FC12-7 (12V 7AH/20H), ya con ella se inicio el montaje de un primer prototipo partiendo del diseño de la figura 23.

Se adquirió una varilla de acero plata de diámetro de 5 milímetros que sería el eje, unos rodamientos que encajaban con este eje y se realizó el montaje, utilizando como escobillas los cables que se encontraban conectados a la batería.

Se usó imanes de neodimio de forma cilíndrica en diferentes tamaños, el resultado que se obtuvo no fue satisfactorio. El eje no presentaba rotación, esto se atribuye al fuerte peso de él y a la fricción que se producía entre eje y rodamientos.

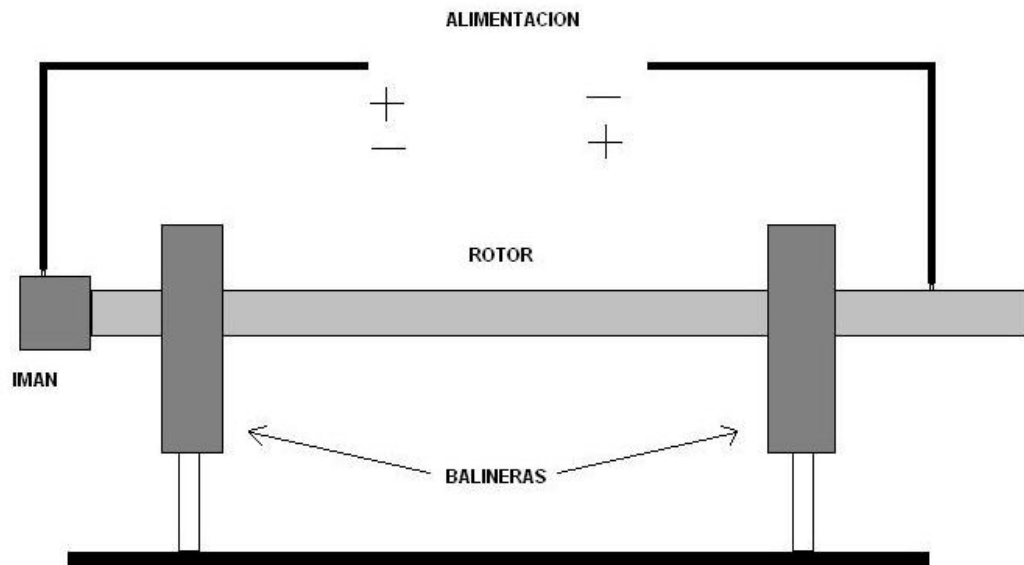


Figura 23: Primer bosquejo de prototipo.

Por estos motivos se decidió utilizar un mecanismo de rotación que se encontrara ya fabricado, para ello nos hicimos de un par de motores pequeños de corriente continua idénticos, de marca Hitachi®, tipo DCMO4AE100 de 24V, se desmontaron para utilizar el eje y rodamientos extraídos de este desarme para garantizar la menor fricción posible para un buen funcionamiento. Como resultado el prototipo cambio a montaje en madera que sostenía los rodamientos y el eje del motor desarmado que se ilustra en la figura 24.

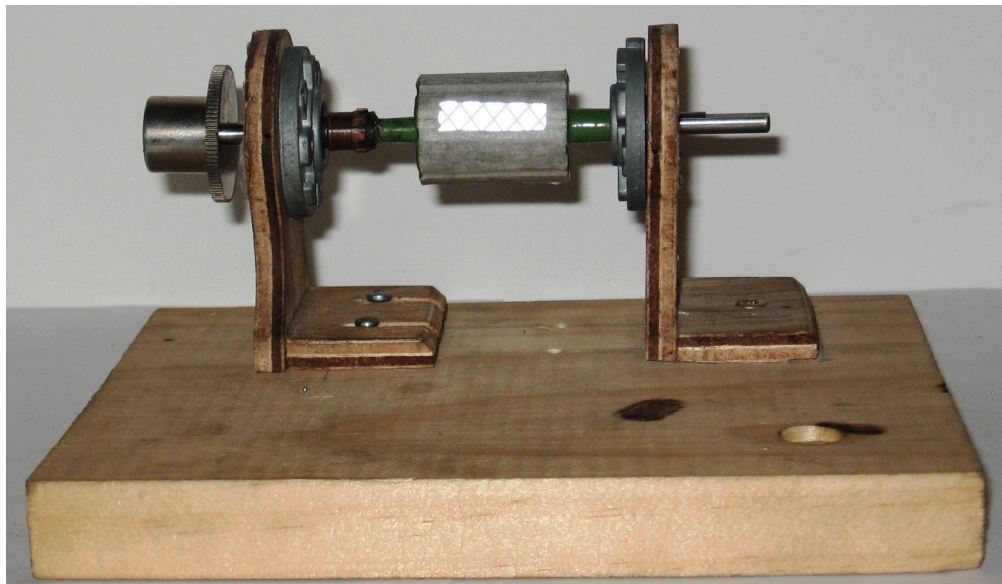


Figura 24: Fotografía del montaje en madera.

Se le suministró corriente con un cable calibre 18 entre la terminación del eje y la periferia del imán, el sistema presentó rotación, la cual variaba dependiendo del imán que se utilizara para suministrar el campo magnético; como en las configuraciones iniciales si se intercambia la posición del imán, el sentido de giro se invierte. Un inconveniente observado fue la generación de grandes chispas en los contactos y calentamiento en los componentes del prototipo especialmente en los cables, se derretía su recubrimiento y las chispas dejaban partículas de cobre que se adherían al eje y al imán, produciendo un gran deterioro en las características del imán y en su aspecto físico

Leyendo material bibliográfico, especialmente los experimentos e investigaciones llevados a cabo¹⁵, se encontró que en varios de ellos, tanto de motores como de generadores homopolares utilizaban como contacto un metal líquido, mercurio, se llevo esta idea a nuestro prototipo teniendo en cuenta las precauciones requeridas para manipular este metal tóxico. Este material es buen conductor y con un punto de ebullición alto, para que el mercurio permitiera el contacto se montaron dos recipientes en cada uno de los extremos del motor, los cables llevarían la corriente al metal líquido y este al imán y a la terminación del eje como se muestra en la figura 25.

Para controlar la corriente de entrada al motor se construyó una batería de resistencias en paralelo, este montaje se realizó con 19 resistencias de potencia cerámicas de 8.2 Ohm a 20 Watts, ver figura 26. Esta configuración estabiliza la velocidad del motor a medida que se descarga la batería de alimentación, y también disminuyen el calentamiento que se presenta en los cables conductores.

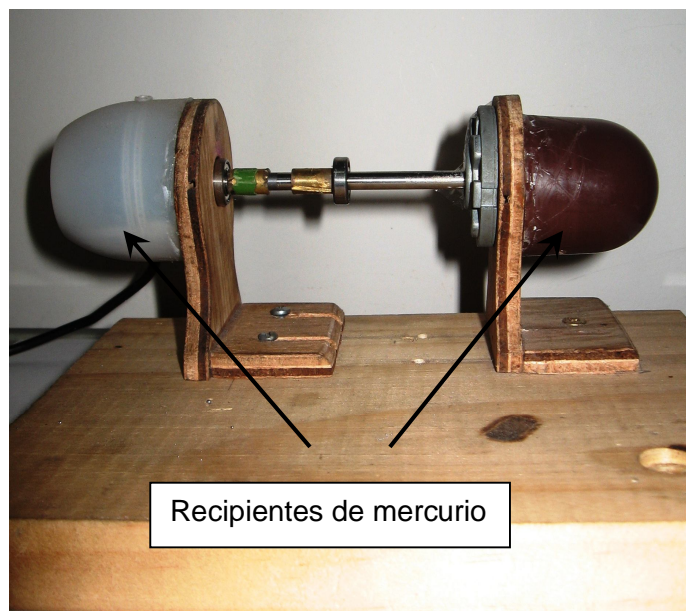


Figura 25: Fotografía del montaje con recipientes para mercurio.

¹⁵ Guala-Valverde, J; Mazzonib, P; Achillese, R, The homopolar motor: A true relativistic engine, Am. J. Phys. 70 ~10!, October 2002 p. 1052 -55



Figura 26: Fotografía de la batería de resistencias en paralelo.

Los resultados con los contactos de mercurio y la batería de resistencias dieron un buen funcionamiento del motor sin presencia de chispas. El calentamiento se presentaba tanto en cables, rotor, mercurio y resistencias evitando así el calentamiento excesivo en un solo material. Se observan dos inconvenientes en esta configuración, uno es el calentamiento del mercurio el cual lleva a presentar pequeñas emisiones de vapor lo cual es tóxico, entonces se deben tomar medidas de seguridad como manipulación con guantes quirúrgicos y tapabocas. El otro fue la colocación del imán, para ello se puso una rueda metálica en un extremo del eje la cual fue devanada en un torno para el tamaño exacto del imán, esto permite centrarlo mejor para que la rotación sea limpia y sin altibajos.

Después de todos estos cambios al prototipo, se llevó a cabo la construcción de un nuevo modelo. Se cambió el material de soporte del motor, de madera a acrílico, estos soportes se fijaron en una superficie de madera con formica blanca, los recipientes se hicieron transparentes para observar la rotación del imán y el comportamiento que presenta el mercurio, como se ve en la figura 27. Se montó un interruptor trifásico de 10 amperios, para el accionamiento del mecanismo, y por ultimo se consiguió una batería de mayor amperaje marca Rocket® de referencia ES30-12 (12V/30AH).

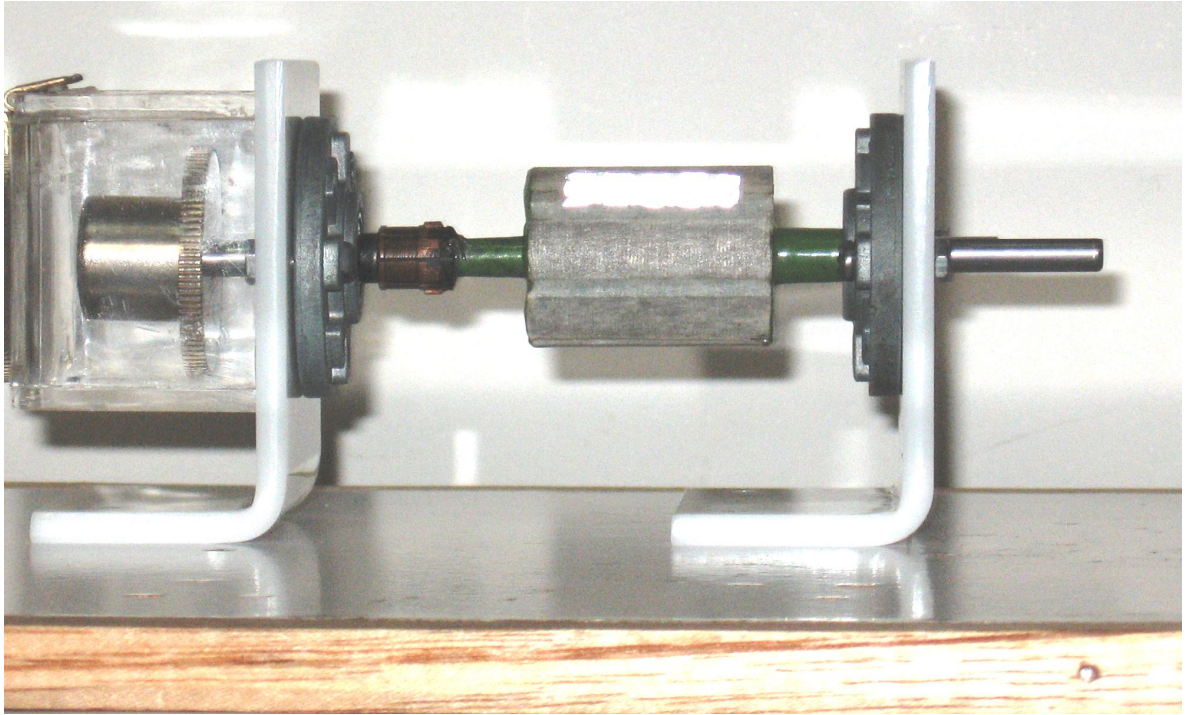


Figura 27: Fotografía del montaje en acrílico.

Los resultados obtenidos de este montaje:

- La rotación del motor no es constante y presenta pequeñas vibraciones debido a que el imán no se encuentra perfectamente acoplado con el eje.
- Se genera turbulencias, calentamiento y una pequeña evaporación de mercurio.
- A medida que funcionaba el sistema la batería presentaba una disminución en su carga, esto es un inconveniente ya que implica un cambio constante de las condiciones de funcionamiento del motor.

Para evitar las emisiones tóxicas y para mejorar el movimiento se buscó la manera de eliminar el mercurio. Esto se consiguió tomando como contactos los soportes de los rodamientos y dejando el imán fuera del rotor. Los cambios se llevaron a

cabo colocando la rueda dentada en una de las superficies de la caja donde se alojaba el mercurio y colocando el imán en esta rueda, esto nos permite que el imán suministre el campo magnético al sistema no entrando en contacto directo con el eje, aquello implica que el imán ya no formará parte del rotor. Para eliminar la inminente descarga de la batería cada vez que se utilizaba, se buscó un reemplazo para el suministro de energía. Para ello se cambió la batería por un transformador de tensión junto con un rectificador, el cual proporciona 5 diferentes salidas de tensión, de las cuales se utilizaron solo tres por que dos de ellas no nos producen suficiente corriente en el circuito como para poner en funcionamiento el motor.

Este transformador fue diseñado a partir de un núcleo existente. Se realizó un bobinado teniendo en cuenta las siguientes relaciones de espiras.

$N1$ = número de espiras del devanado primario = 220 espiras

$N2$ = número de espiras del devanado secundario

$V1$ = tensión en el primario = 110 V

$V2$ = tensión en el secundario

$$\text{Relación: } \frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2} \Rightarrow N2 = \frac{N1 * V2}{V1} = 2 * V2$$

Deseábamos 5 salidas de tensión distintas entonces $V2$ tomo cinco valores diferentes con sus respectivas espiras para obtenerlo, como se observa en la tabla 1.

Tensión (V)	$N2$ (# de espiras)	Tensión Rectificada (V)
3	6	2.65
6	12	4.98

9	18	8.21
12	24	11.07
15	30	13.83

Tabla 1. Relación de espiras y salida de tensión DC

Se realiza una rectificación de onda completa a las salidas del transformador por medio de un puente rectificador de alta corriente y se obtiene tensión continua como se muestra en la tabla 1.

Así se llega a la construcción final que es mostrada en la figura 28, en la cuál se obtuvieron los mejores resultados, ya que la rotación del eje no presenta ninguna vibración que altere su movimiento, aseguramos una tensión constante de alimentación, y eliminamos el rozamiento que presentaban las escobillas de mercurio, por consiguiente se obtiene una mejor y mayor velocidad de rotación del motor.

Entre los inconvenientes adquiridos, se tiene la imposibilidad de romper el torque de arranque, haciéndose necesario la utilización de un motor de corriente continua de 12 V marca Johnson para darle arranque al prototipo, se acoplan los ejes mecánicamente por medio de un acople flexible de rosquilla de caucho, donde la rosquilla está ajustada a los ejes y se desliza axialmente para desacoplarse mediante un riel en la plataforma que sostiene al motor de arranque. Para darle arranque al prototipo, primero se enciende el motor de arranque por medio de un interruptor normalmente abierto, luego se acciona el interruptor del motor homopolar y por último se desacoplan los ejes, de ahí en adelante se observa en funcionamiento el prototipo.

Otro inconveniente se presenta en el calentamiento excesivo de los rodamientos ya que el cierre del circuito se hace a través de estos, por este motivo se opta por

adicionar un disipador de calor en el soporte de los rodamientos para que ayude a disminuir la temperatura en ellos y aumentar su vida útil.

Al comparar nuestro prototipo con el propuesto en la tesis de grado “Modelado y Caracterización de un Motor Unipolar” observamos que se obtienen mejoras ya que en este, se concluye que se presentan grandes variaciones en los parámetros de funcionamiento debido al calentamiento en el mercurio, la temperatura actúa como catalizador, produciendo una reacción química por el contacto con el cobre y la superficie del imán, formando una capa de suciedad que hace que el sistema solicite más corriente para poder sostener el movimiento¹⁶. Al eliminar el mercurio se evitan estas perturbaciones. En el modelo presentado en la tesis ya mencionada la fuente de alimentación es una batería de 12 V, la cual presenta una descarga a medida que se coloca en funcionamiento el motor, esto conlleva que después de algunos experimentos se requiera cargar de nuevo esta batería. El efecto de carga y descarga que presenta la batería implica variaciones en las características del sistema¹⁷. Al reemplazar la batería por la alimentación de la red eléctrica por medio de un transformador y un puente rectificador, se elimina el problema de estar cargando la batería cada vez que se realizan experimentos y también se disminuyen las variaciones en el sistema por este efecto. Otro cambio que se observa es que en el montaje del motor el imán que provee el campo magnético se encuentra estático, lo que permite anticipar un mejor rendimiento de velocidad, ya que obtenemos una mejor distribución de pesos en el eje del motor en comparación con la posición del imán a un extremo del eje en el prototipo presentado en el trabajo de grado “Modelado y Caracterización de un Motor Unipolar”.

¹⁶ SANDOVAL Luz Karime, Tesis de grado: Modelado y Caracterización de un Motor Unipolar, UIS 2009, p 65

¹⁷ SANDOVAL Luz Karime, Tesis de grado: Modelado y Caracterización de un Motor Unipolar, UIS 2009, p 70 - 72



Figura 28: Fotografía Montaje final

3. MODELADO Y CONTROL

3.1 MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR

El motor consta de un Imán de neodimio capaz de proveer un campo magnético constante muy fuerte, un eje de rotación y sus respectivos apoyos los cuales sirven de terminales para inyectar la corriente que hace funcionar al motor. El circuito eléctrico del motor se presenta en la figura 29, donde la tensión inducida y el torque generado fueron calculados en la sección 1.3, ahora se procederá a realizar el análisis dinámico del motor para encontrar la ecuación de velocidad en función del tiempo.

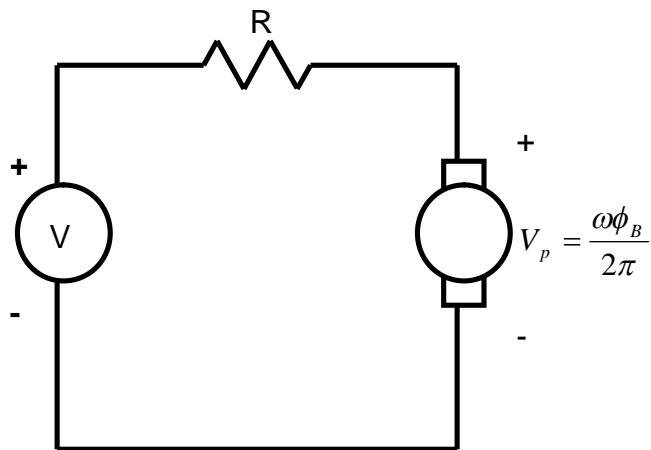


Figura 29: Circuito eléctrico equivalente

Aplicando la segunda ley de newton en su forma rotacional al diagrama de cuerpo libre del motor se obtiene:

$$\sum \tau = F_i r_{eje} - F_r r_{eje} = I_0 \alpha \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (3.1)$$

Donde F_i es la fuerza generada por el paso de corriente bajo la acción de un campo magnético, F_r es la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento, pero teniendo en cuenta que el motor está diseñado para tener la menor fricción posible y obtener máximo rendimiento mecánico, esta fuerza se desprecia para el análisis, luego tenemos:

$$\sum \tau = \frac{i\phi_B}{2\pi} = I_0\alpha \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (3.2)$$

donde

$$\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = 2\pi B \int \rho d\rho = \pi B r_{eje}^2 \quad [\text{Wb}] \quad (3.3)$$

Reemplazando (3.3) en (3.2)

$$\sum \tau = \frac{iBr_{eje}^2}{2} = I_0\alpha \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (3.4)$$

despejando la aceleración angular de (3.4)

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{iBr_{eje}^2}{2I_0} \quad [\text{Rad/s}^2] \quad (3.5)$$

Del circuito equivalente podemos obtener la corriente en función de la velocidad angular, y así poder desarrollar la ecuación diferencial de (3.5).

Calculando la corriente del circuito de la figura 30 se tiene

$$V - V_p = iR \Rightarrow i = \frac{V}{R} - \frac{\omega\phi_B}{2\pi R} \quad [\text{A}] \quad (3.6)$$

Reemplazando (3.3) en (3.6)

$$i = \frac{V}{R} - \frac{\omega Br_{eje}^2}{2R} \quad [\text{A}] \quad (3.7)$$

Reemplazando (3.7) en (3.5) se obtiene

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Br_{eje}^2 V}{2I_0 R} - \frac{B^2 r_{eje}^4 \omega}{4I_0 R} \quad [\text{rad/s}^2] \quad (3.8)$$

La ecuación diferencial de primer orden es de la forma $\frac{d\omega}{dt} = -A_1\omega + A_2$ tiene una solución tomando como condición inicial $\omega(0) = 0$ de la siguiente manera:

$$\omega = \frac{A_2}{A_1} (1 - e^{-A_1 t}) \quad [\text{rad/s}] \quad (3.9),$$

donde $A_1 = \frac{B^2 r_{eje}^4}{4I_0 R}$ y $A_2 = \frac{Br_{eje}^2 V}{2I_0 R}$

Luego la velocidad angular en función del tiempo esta descrita por

$$\omega = \frac{2V}{Br_{eje}^2} (1 - e^{-A_1 t}) \quad [\text{rad/s}] \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 nos describe la velocidad angular en función del tiempo, la cual nos permite modelar el sistema, si los datos obtenidos en las mediciones se ajustan a este modelo se podrá comprobar la validez del mismo.

La velocidad máxima que alcanza el motor es $\frac{2V}{Br_{eje}^2}$, de aquí se puede deducir,

que la velocidad depende directamente del tensión de alimentación e inversamente proporcional a los parámetros de construcción del motor (Br_{eje}^2).

El valor A_1 determina el tiempo de estabilización del sistema; a medida que es más alto, el sistema tiende a estabilizarse más rápido. La única opción para variar este valor es haciendo R más pequeño. Esto implica más consumo de corriente.

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

La ecuación (3.10) define el comportamiento del sistema en función del tiempo. Se observa que es una exponencial creciente hasta un máximo de $\frac{2V}{Br_{eje}^2}$. Como la variable que se requiere controlar es la velocidad del sistema, se debería hacer variando el máximo de esta ecuación. El campo proporcionado por el imán de neodimio se mantiene constante, r_{eje} no varía ya que es el radio del eje, pero si podemos variar V , que es la tensión de alimentación del sistema. La alimentación del motor es proporcionada por un transformador de tensión, que posee cinco salidas de tensión diferentes en corriente alterna, las cuales al ser rectificadas proporcionan una alimentación de corriente continua como lo ilustra la tabla 2

SALIDA	VAC (V)	VDC (V)
Salida 1	2.8	2.65
Salida 2	5.6	4.98
Salida 3	8.9	8.21
Salida 4	12.2	11.07
Salida 5	15.5	13.83

Tabla 2: Tabla de tensión de alimentación.

El prototipo fue alimentado con las cinco salidas, pero solo se obtuvo movimiento rotacional en las salidas 3, 4 y 5. Esto se atribuye a que la corriente que proporcionan no es lo suficientemente alta para producir el torque necesario para realizar el movimiento. Esto concuerda con la ecuación (1.30) que nos da el torque generado por el efecto de inducción homopolar, el torque es directamente proporcional a la corriente de corto que circula a través del conductor (eje). Cada una de estas alimentaciones nos proporciona como resultado una diferente velocidad de rotación, a medida que la tensión aumenta la velocidad también.

Opciones de control.

1. Sensar la velocidad de rotación del sistema, comparar esta velocidad con el setpoint deseado, aumentar o disminuir la tensión de alimentación según se requiera. Este proceso se realiza hasta conseguir la velocidad deseada.
2. Otra manera de hacer el control sería sensar velocidad, y luego variar la magnitud del campo magnético B. En el motor construido esta opción no es viable por que el campo es proporcionado con un imán permanente de neodimio con campo constante. Solo se permitiría intercambiar entre los tamaños de imán que se poseen, pero para ello el sistema debe encontrarse en reposo.

La opción que se siguió fue la de controlar la tensión de alimentación. Teniendo en cuenta las fuentes de alimentación disponibles, que son:

- Fuente regulada de tensión de DC.
- Dos baterías de 12 V
- Transformador de tensión con rectificador DC.

Se realizaron pruebas de funcionamiento.

Al trabajar con las fuentes existentes en los laboratorios no se obtuvo resultados; el movimiento no se presenta debido a que estas fuentes no proveen corrientes superiores a tres Amperes y poseen un circuito de protección contra corto circuito. Las baterías mantienen una tensión constante entonces no cumplíamos con nuestro requisito para controlar la velocidad. Y con el transformador al tener la posibilidad de tres tensiones diferentes de alimentación se pudieron observar los cambios en la salida (rpm). Para realizar un control a lazo cerrado se requeriría una fuente regulada de tensión capaz de suministrar entre 0 y 30 Amperes, estas no son fáciles de adquirir en el mercado y su costo se sale del presupuesto del proyecto.

Ahora observando experimentos realizados bajo unas mismas condiciones iniciales de trabajo, los resultados no se mantienen constantes, sino que se presenta una variación significativa en ellos. La razón de estas variaciones es el estado cambiante de resistencia en el circuito debido al calentamiento por la gran circulación de corriente en él. También al desgaste continuo de los rodamientos ya que ellos sirven de escobillas para el cierre del circuito y soportan la elevada corriente, reduciendo su vida útil y aumentando la fricción que se opone al movimiento.

Se fija un setpoint en la velocidad deseada, el sistema comienza a trabajar, se sensa la salida y esta nos sirve como señal de realimentación para comparar con la entrada y obtener la señal error, el cual entra al controlador que realiza cambios de tensión para elevar o disminuir la velocidad y así tratar de conseguir el setpoint. Pero las condiciones cambiantes tanto de resistencia y como de fricción de los rodamientos no permitirían lograr el resultado deseado y el sistema no convergería sino que llevaría a una inestabilidad. La exposición del circuito a elevados tiempos de trabajo con tan alta corriente lleva al completo deterioro de los rodamientos deteniendo el movimiento y obligando su reemplazo, variando las condiciones iniciales para un nuevo experimento.

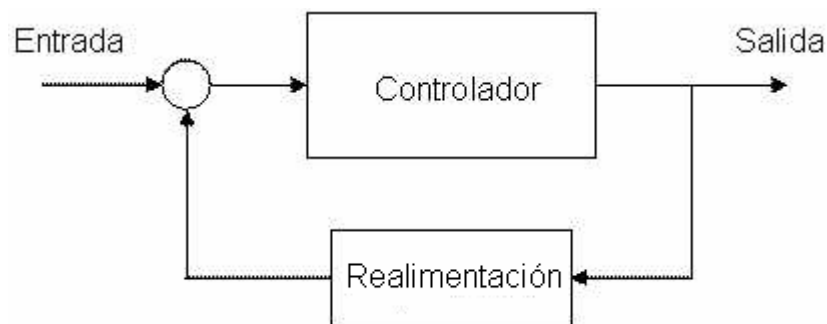


Figura 30: Diagrama de bloques de un sistema de control de lazo cerrado

Por las condiciones anteriormente descritas, se decide utilizar un control a lazo abierto. Teniendo en cuenta que proporciona algunas ventajas, como la construcción sencilla, menores costos y principalmente no existe el problema de garantizar la estabilidad del sistema¹⁸.

El sistema de control de velocidad a lazo abierto se implementó por medio de un interruptor de cuatro posiciones, el cual permite cambiar el valor de la tensión de alimentación, permitiendo así variar la velocidad de acuerdo con la ecuación que nos describe la velocidad angular del sistema. (3.10)

¹⁸ OGATA, Kasuhiko, Ingeniería de Control Moderno, tercera edición, Prentice Hall, 1998, p 10.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Instrumentos de medición

Para la realización de la toma de datos para cada una de las pruebas realizadas se utilizaron los siguientes instrumentos:

- Multímetro digital de tres cifras decimales de precisión
- Tacómetro digital marca Delorenzo

Pruebas realizadas

Una vez listo el prototipo se procedió a realizar las pruebas de velocidad y corriente consumida durante un intervalo de tiempo, utilizando el tacómetro para sensor la velocidad de giro del motor y dos multímetros para sensor la tensión en la alimentación y la tensión en las resistencias respectivamente.

Para cada prueba se mantuvo siempre en 19 el número de resistencias en paralelo de manera y de esta forma tratar de conservar constante la resistencia interna del motor, pero se variaba la tensión de alimentación para obtener un cambio en la velocidad de rotación. Entre la realización de cada prueba se dejaron tiempos prudenciales de descanso para permitir el enfriamiento de los elementos más afectados por el calentamiento, como lo son los rodamientos y las resistencias y así obtener igualdad de condiciones iniciales en cada toma de datos.

Una vez adquiridos los datos se construyeron las graficas de velocidad angular contra tiempo con la ayuda de la herramienta Curve Fitting (“Ajuste de Curvas”)

de Matlab® y así encontrar la ecuación que mejor describa los datos tomados en cada prueba. Los datos y las gráficas relacionadas se presentan a continuación:

- Primera toma de datos

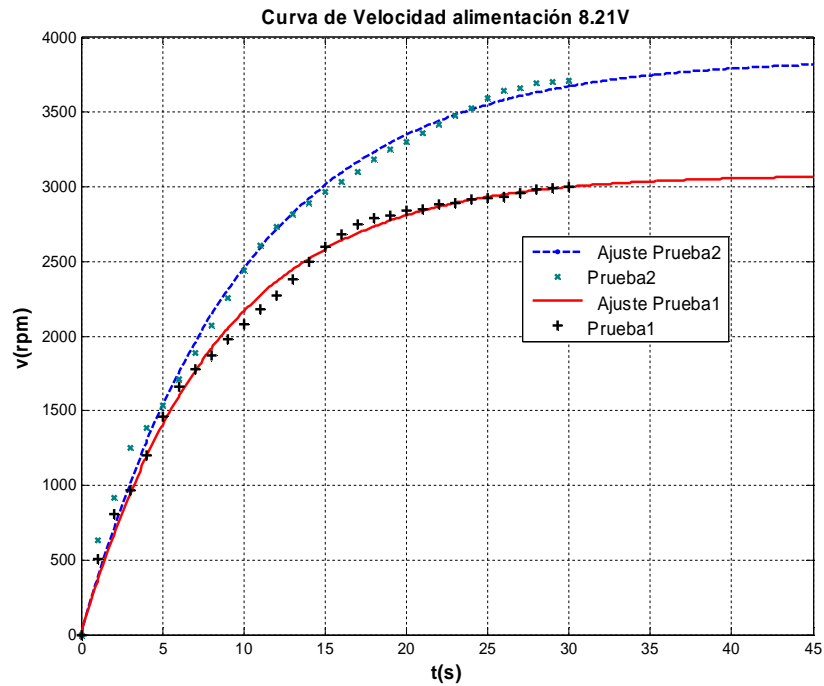


Figura 31: Curva de v(rpm) Vs. t(s) para alimentación de 8.2 V

Características del ajuste

Prueba 1	
Modelo General: $f(x) = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$ Coeficientes (Límite de confianza del 95%): $a = 3080 \quad (3026, 3134)$ $b = 0.1216 \quad (0.1151, 0.128)$	<u>Bondad del ajuste</u> sse: 1.0049e+005 rsquare: 0.9951 adjrsquare: 0.9950 rmse: 58.8663
Prueba 2	
Modelo General: $f(x) = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$	<u>Bondad del ajuste</u>

Coeficientes (Límite de confianza del 95%): $a = 3860$ (3757, 3964) $b = 0.1011$ (0.09386, 0.1083)	sse: 2.3181e+005 rsquare: 0.9926 adjrsquare: 0.9923 rmse: 89.4067
--	--

Tabla 3: Resultados del ajuste de la primera toma de datos

- Segunda toma de datos

Características del ajuste

Prueba 1	
Modelo General: $f(x) = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$ Coeficientes (Límite de confianza del 95%): $a = 4810$ (4644, 4976) $b = 0.146$ (0.1298, 0.1622)	<u>Bondad del ajuste</u> sse: 9.0921e+005 rsquare: 0.9791 adjrsquare: 0.9783 rmse: 187.0018
Prueba 2	
Modelo General: $f(x) = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$ Coeficientes (Límite de confianza del 95%): $a = 5668$ (5523, 5813) $b = 0.1736$ (0.1567, 0.1906)	<u>Bondad del ajuste</u> sse: 1.2861e+006 rsquare: 0.9785 adjrsquare: 0.9778 rmse: 214.3178

Tabla 4: Resultados del ajuste de la segunda toma de datos

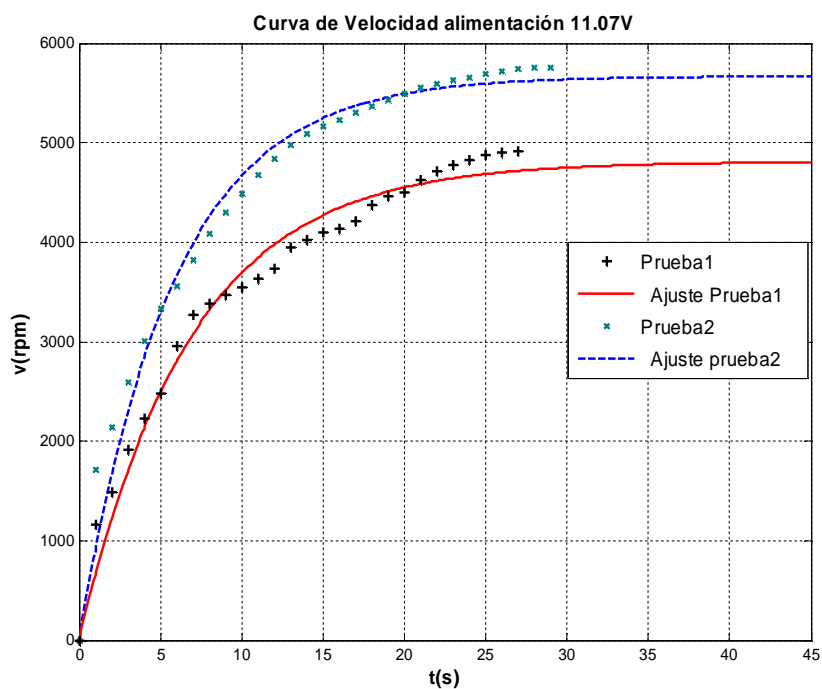


Figura 32: Curva de v(rpm) Vs. t(s) para alimentación de 11.07 V

- Tercera toma de datos

Prueba 1	
Modelo General: $f(x) = a*(1-\exp(-b*x))$ Coeficientes (Límite de confianza del 95%): $a = 7583 \quad (7422, 7745)$ $b = 0.1948 \quad (0.1765, 0.213)$	<u>Bondad del ajuste</u> sse: 2.6498e+006 rsquare: 0.9811 adjrsquare: 0.9805 rmse: 292.3649
Prueba 2	
Modelo General: $f(x) = a*(1-\exp(-b*x))$ Coeficientes (Límite de confianza del 95%): $a = 7754 \quad (7624, 7884)$ $b = 0.1992 \quad (0.1862, 0.2123)$	<u>Bondad del ajuste</u> sse: 8.6392e+005 rsquare: 0.9920 adjrsquare: 0.9916 rmse: 185.8951

Tabla 5: Resultados del ajuste de la segunda toma de datos

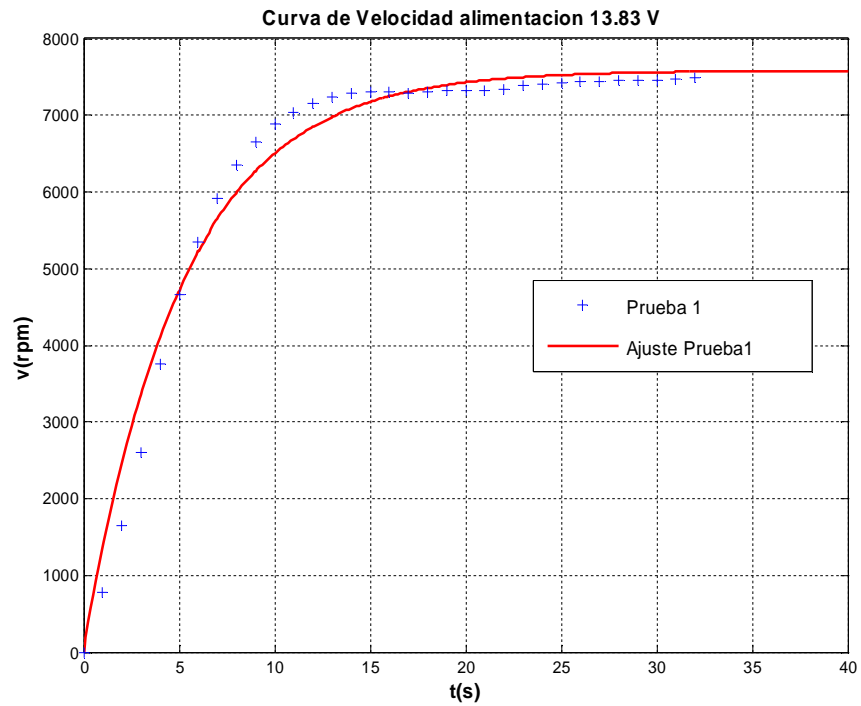


Figura 33: Curva de v(rpm) Vs. t(s) para alimentación de 13.83 V

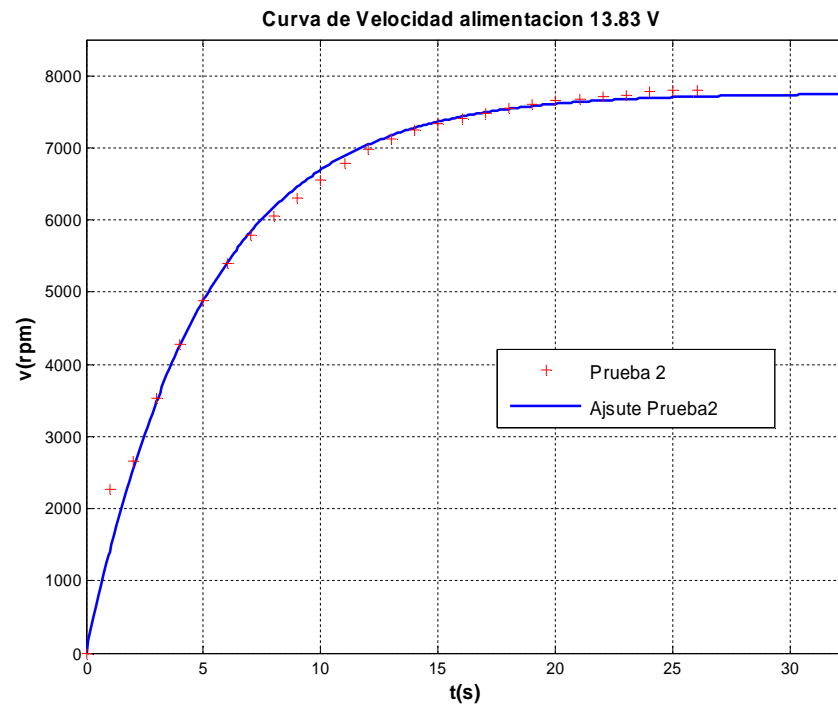


Figura 34: Curva de v(rpm) Vs. t(s) para alimentación de 13.83 V

Analizando los resultados obtenidos por el ajuste de las curvas, podemos concluir que el motor se puede modelar por medio de la ecuación general de la forma: $a(1 - e^{-bt})$ que corresponde a la ecuación que describe la velocidad del motor respecto al tiempo $\omega = \frac{2V}{Br_{eje}^2}(1 - e^{-At})$, donde $a = \frac{2V}{Br_{eje}^2}$ y este valor varía proporcionalmente al cambio en la tensión de alimentación.

Esto se puede observar en las tablas 3, 4 y 5 de ajuste de datos, a medida que se aumenta el tensión de alimentación entre prueba y prueba el valor de a se va incrementando.

El termino b equivale a $\frac{B^2 r_{eje}^4}{4I_0 R}$ de la ecuación 3.9, debería permanecer constante

en todas la pruebas, ya que ninguno de los términos que la componen se ha variado entre las pruebas realizadas, sin embargo si nos remitimos a los resultados de las interpolaciones de las tablas 3, 4 y 5 se puede ver claramente que hay una ligera variación de este valor en cada prueba.

La explicación para que este hecho se presente, radica en el comportamiento de la resistividad de los materiales conductores ante los cambios de temperaturas, dependiendo del tipo de material su resistividad aumenta o disminuye, así pues los metales aumentan su resistividad cuando aumenta la temperatura y ciertos materiales semiconductores disminuyen su resistividad cuando aumenta la temperatura de trabajo.

Entonces para que el motor presente un óptimo rendimiento se deben reducir las pérdidas resistivas que acarrear el trabajar a temperaturas elevadas, debidas a la alta corriente que pone en funcionamiento al motor, para solucionar este inconveniente se hace necesario trabajar con materiales superconductores que en

condiciones de baja temperatura reducen su resistividad a cero, disminuyendo las pérdidas y aumentando la eficiencia del motor.

Debido a los inconvenientes descritos es que se puede justificar también el porque del cambio de la velocidad en las pruebas que tienen el mismo tensión de alimentación, ver figuras 32 y 33, donde las respuestas a una entrada de alimentación igual presentan comportamientos diferentes.

Es claro ahora el motivo por el cual la realización de un sistema de control a lazo cerrado se hace muy complicado de llevar a cabo, porque el comportamiento del motor no permanece constante cada vez que se pone en funcionamiento, tendiendo así a la inestabilidad del sistema.

5. CONCLUSIONES

- Se cumplieron los objetivos planteados en la propuesta de investigación, puesto que el documento provee una completa descripción del motor unipolar, que incluye el seguimiento histórico, funcionamiento, modelos desarrollados, la construcción de un motor propio, implementación de un sistema de control de velocidad y la validación de los resultados.
- El motor homopolar es una máquina que en verdad se puede denominar como máquina de corriente directa, ya que no necesita de un conmutador sino que se aplica directamente una tensión DC entre puntos en el rotor y se consigue que éste entre en funcionamiento. Es un motor de fácil construcción, pero que durante casi de dos siglos, ha sido tema de estudio y controversia.
- El modelo matemático del motor homopolar se presenta en la ecuación 3.10 describiendo el comportamiento de la velocidad angular en función del tiempo. Al realizar mediciones de la velocidad del rotor durante un intervalo de tiempo se observó un comportamiento exponencial creciente, de acuerdo con lo predicho por el modelo expuesto. Al observar diferencias entre las pruebas presentadas para una misma alimentación, se concluyó que estas se deben a los cambios manifestados en los parámetros característicos del motor debido a su calentamiento. Pero a pesar de esto, el comportamiento exponencial se mantuvo. Se obtuvo un acercamiento del modelo real al modelo ideal presentado, dándole validez al mismo.
- La estabilidad del sistema debida a los grandes cambios en las características de funcionamiento de sus componentes, por la acción del calentamiento, hacen que el control de lazo cerrado se convierta en una opción no viable para el manejo del sistema. Para poder llevar a cabo esta

clase de control se deben eliminar el calentamiento tanto en la batería de resistencias, como en los componentes mecánicos (rodamientos, eje, cables) del motor homopolar, para garantizar la repetición de resultados en los ensayos y así la estabilidad del sistema.

- En un trabajo de grado anterior, se realizó un prototipo que fue diseñado a partir de un rotor que contenía el imán proporcionando el campo magnético que permite el movimiento en el sistema. En el nuevo prototipo el imán se encuentra fuera del rotor, se encuentra estacionario, lo que implica revalidar lo expuesto por Faraday en sus experimentos, con respecto a la paradoja que existe de la rotación del campo magnético. El afirma que se debe presentar una equivalencia en términos de comportamiento eléctrico y mecánico cuando el imán se encuentra estacionario y cuando se incluye en el movimiento del rotor.
- Una mejora que se realizó al prototipo del primer proyecto de motor homopolar, es el reemplazo del mercurio como escobilla por contactos metálicos, evitándose las perturbaciones en el sistema que se presentan debido al calentamiento en el mercurio, ya que producen reacciones químicas entre él y los materiales con los que realiza contacto (cobre, eje e imán). También la eliminación de este material evita posibles problemas por la alta toxicidad que se puede presentar en las personas que manipulan este metal líquido.
- Un problema presentado en el prototipo desarrollado en la tesis de grado anterior fue la alimentación con una batería recargable de 12V, la cual se empezaba a descargar a medida que el motor se encontraba en funcionamiento, esto dificultaba las condiciones de igualdad en la realización de cada experimento. En el presente trabajo se reemplazó la batería por una fuente de alimentación constituida por un transformador de

tensión y un puente rectificador de alta corriente, que mantenía la magnitud de su salida constante.

- El motor homopolar es el primer motor del que se tiene conocimiento, pero a su vez es el menos estudiado y puesto en práctica que hay. Si bien es cierto su principio funcionamiento no es de fácil entendimiento ya que se sale del modelo clásico de inducción electromagnética, pero no por ello se debe obviar su estudio; por el contrario se debe incentivar la comprensión de la inducción unipolar, que de la mano del desarrollo actual de los materiales superconductores se lograrán nuevos avances tecnológicos.

RECOMENDACIONES

- Para el desarrollo de nuevos prototipos se deben tener en cuenta el progreso de los materiales superconductores e incluirlos en un nuevo montaje. Esto permitiría un mejor desempeño debido a la eliminación de perturbaciones en el sistema por calentamiento de sus componentes.
- Se debe mejorar la alimentación del motor por medio de una fuente de tensión regulada de alta corriente, que permita la flexibilización de la toma de datos y así obtener más información del comportamiento del motor a diferentes tensiones de trabajo.
- Hay que controlar el calentamiento presente en los rodamientos del motor, ya que su vida útil disminuye al trabajar a altas condiciones de temperatura, debido a que pierde su lubricación y aumenta su oposición al movimiento rotatorio.

- El estudio de esta clase de máquinas se debe fomentar en la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, y así contribuir al avance tecnológico de los generadores y motores de inducción homopolar.

BIBLIOGRAFÍA

AMPERE, A. Reponse A La Lettre De M. Van Beck Sur Une Nouvelle Experience Electro-Magnetique. En: Journal de Physique. 1821. T. XCIII Disponible en: <http://sidam.at.tut.by/en.html>.

BERG, R; ALLEY, C. The Unipolar Generator: A Demonstration of Special Relativity. University of Maryland, Editado 2005.

FARADAY, M. Description Of An Electro-Magnetical Apparatus For The Exhibition Of Rotatory Motion En: Quart. J. Sci. XII. (1822); p 283-285. Electromagnetic Rotation (the key experiments). Disponible: <http://sidam.at.tut.by/en.html>.

FARADAY, M, Fhil. Trans. of Royal Acad. 1832, p. 122, 183

FRIGERIO, P; LA BRUNA, G.; LARREGUY, M; ROMANI, J. Generador de Faraday de una sola pieza. Universidad Favaloro-Buenos Aires Octubre (2001)

GUALA-VALVERDE, J; MAZZONIB, P; ACHILLESC, R, The homopolar motor: A true relativistic engine, Am. J. Phys. 70 ~10!, October 2002 p. 1052 -55

JOACHIM SCHLICHTING, H; UCKE, C. A fast, high-tech, low cost electric motor construction. En: Physik in unserer Zeit. Vol35, 2004; p272-273. Disponible: http://www.fysikbasen.dk/Referencemateriale/PDFartikler/Unipolarmotor_English.pdf

MARTÍN MUÑOZ, A. Motor Homopolar. En: Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias. Vol 4, 2007; p 352-354.

LOPEZ, D; ACUÑA, G. Motor-Generador Unipolar *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*, Universidad de Buenos Aires. Disponible en: http://www.df.uba.ar/users/sgil/labo5_uba/inform/info/pract_especial/motor_unipolar_uba2k2.pdf

MONTGOMERY, H. Some Comments on J.Guala-Valverde's Experiments on Unipolar Induction; En: Apeiron, Vol. 14, No. 1 2007; p 34

MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism En: Eur. J. Phys. Vol 20 1999; p 271–280.

SANDOVALGRANADOS, L, Tesis de grado: Modelado y Caracterización de un Motor Unipolar, UIS 2009

VALONE, Thomas. The Homopolar Handbook, A definitive guide to Faraday disk and nmachine technologies, Washington D.C. 2001

<http://www.dimetales.com/pdf/imanesimo.pdf>, consultada en marzo de 2008.

<http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/fisica/electromagne/TEORIA/electromagnet/inducción/homopolar/homopolar.htm>, consultada en julio de 2008