

**MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR UNIPOLAR**

**AUTORA**

**LUZ KARINE SANDOVAL GRANADOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR UNIPOLAR**

**AUTORA**

**LUZ KARINE SANDOVAL GRANADOS**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA ELECTRÓNICA**

**DIRECTOR:**

**C. RODRIGO CORREA C.**

**CO-DIRECTOR**

**JOSÉ GABRIEL PLATA CORDERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2009**

A mi familia, amigos y a todos aquellos que hicieron posible la realizacion de este trabajo. Su apoyo y compañía me ayudaron a salir de muchas dificultades.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	8
<b>OBJETIVOS</b> .....	12
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	12
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	12
<b>CAPITULO I</b>	
<b>FUNDAMENTACIÓN</b> .....	13
1.1 DEFINICIÓN .....	13
1.2 DESARROLLO HISTÓRICO .....	14
1.3 MODELOS PRESENTADOS .....	19
1.3.1 Motor Unipolar tipo tambor:.....	19
1.3.2 Motor Unipolar tipo disco.....	20
1.3.2.1 <i>Motor Homopolar Colgado</i> .....	20
1.3.2.2 <i>Modelo de Per-Olof Nilsson (Suecia)</i> .....	21
1.4 FUNCIONAMIENTO.....	22
1.4.1 <i>Teoría de los “Maxwellianos”</i> .....	26
1.4.2 <i>Teoría de Weber</i> .....	30
1.4.3 <i>Experimentos que Respaldan cada Teoría</i> .....	32
1.4.3.1 <i>Experimento de E. H Kennard:</i> .....	32
1.4.3.2 <i>Experimento de J.Guala-Valverde</i> .....	33

1.5 MODELO MATEMÁTICO .....	35
1.5.1 Torque Generado.....	37
1.5.2 Dinámica Del Motor Unipolar .....	39
1.5.3 Velocidad Del Motor En Función Del Tiempo.....	41

## **CAPITULO II**

<b>PROTOTIPO MOTOR UNIPOLAR .....</b>	<b>43</b>
2.1 MODELO EXPERIMENTAL (MONTAJE).....	43
2.2 PUESTA EN MARCHA DEL MOTOR.....	47
2.3 PROBLEMAS QUE ACARREA EL NUEVO DISEÑO .....	47
2.3.1 Rozamiento entre el rotor y estator del Motor. ....	47
2.3.1.1 Características del contacto eléctrico entre materiales.....	48
2.3.1.1.1 Area superficial aparente ( $A_a$ ).....	48
2.3.1.1.2 Area de Carga ( $A_b$ ).....	48
2.3.1.1.3 Area conductora ( $A_c$ ).....	48
2.3.1.1.3.1 Contacto Metálico .....	49
2.3.1.1.3.2 Cuasi-metálico.....	49
2.3.1.1.3.3 Con capas multi-moleculares ajenas. ....	50
2.3.1.2 Selección de la escobilla .....	51
2.3.1.2.1 Escobillas solidas.....	51
2.3.1.2.2 Escobillas de metal líquido.....	52
2.3.2 Corriente de Trabajo del Motor: .....	54

2.3.2.1	<i>Banco de Resistencias</i> .....	55
2.3.2.1.1	<i>Montaje de las Resistencias</i> .....	56
2.3.2.2	<i>Medida de la corriente de trabajo del motor</i> .....	57
2.3.3	<i>Carga del motor</i> .....	57

### **CAPITULO III**

<b>ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO</b> .....	58
3.1 SISTEMA DE MEDICIÓN.....	58
3.2 PRUEBAS REALIZADAS.....	59
3.2.1 <i>Medida de la Velocidad del Motor</i> .....	60
3.2.1.1 Eficiencia del Motor.....	64
3.2.1.2 Velocidad del Motor en función del tiempo .....	66
3.2.1.2.1 <i>Características de descarga de la Bateria</i> .....	70
3.2.2 <i>Torque del Motor Unipolar</i> .....	72
3.2.2.1 Comportamiento del Motor con Carga .....	74

### **CAPITULO IV**

<b>APLICACIONES</b> .....	76
<b>CONCLUSIONES</b> .....	79
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	82
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	85
<b>ANEXO</b> .....	84

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de un Motor Unipolar .....	12
Figura 2: Primer Motor Unipolar .....	14
Figura 3: Modelo de André Marie Ampere .....	15
Figura 4: Rueda de Barlow.....	15
Figura 5: Experimento de Faraday .....	16
Figura 6: Motor unipolar tipo Tambor .....	18
Figura 7: Motor tipo Colgado .....	20
Figura 8: Modelo de Per-Olof Nilsson .....	20
Figura 9: Corriente Inducida.....	21
Figura 10: Fuerza opuesta inducida .....	22
Figura 11: Fotografía del Dispositivo .....	24
Figura 12: Resultado Experimental .....	24
Figura 13: Sistema Aislado (imán rotando) .....	26
Figura 14: Sistema conectado al galvanómetro. ....	29
Figura 15: Esquema básico del experimento de Kennard.....	31
Figura 16: Esquema del Experimento realizado por J.Guala-Valverde .....	32
Figura 17: Experimento J.Guala-Valverde, Generador .....	33
Figura 18: Experimento J.Guala-Valverde, Motor .....	34
Figura 19: Comportamiento de las cargas en el motor.....	35
Figura 20: Tensión inducida en el Imán .....	36

Figura 21: Equivalente Eléctrico Motor Unipolar .....	36
Figura 22: Partes esenciales de un motor .....	38
Figura 23: Modificación del modelo colgado .....	42
Figura 24: Motor de Corriente Continua HITACHI.....	43
Figura 25: Prototipo .....	43
Figura 26: Soportes y Rodamientos .....	44
Figura 27: Eje empleado .....	44
Figura 28: Ciclo de Histéresis típico de un Imán Permanente.....	45
Figura 29: Imán de Neodimio .....	46
Figura 30: Imán recubierto .....	51
Figura 31: Modelo con escobillas de mercurio .....	53
Figura 32: Fuente de Alimentación del Motor.....	54
Figura 33: Banco de Resistencias en paralelo ( $8.2\Omega$ y 20W) .....	55
Figura 34: Prototipo del motor .....	56
Figura 35: Nuevo prototipo del motor .....	56
Figura 36: Sistema completo.....	58
Figura 37: Sistema para medir la velocidad .....	59
Figura 38: Velocidad registrada primera prueba .....	60
Figura 39: Corriente registrada en la primera prueba.....	60
Figura 40: Corriente registrada prueba 2 .....	61
Figura 41: Velocidad registrada prueba 2 .....	61
Figura 42: Corriente registrada prueba 3 .....	62

Figura 43: Velocidad registrada prueba 3 .....	62
Figura 44: Caída de tensión en los acumuladores .....	69
Figura 45: Efecto del descenso del régimen de descarga.....	70
Figura 46: Medida del torque del prototipo.....	72
Figura 47: Torque del Motor en función de la velocidad.....	73
Figura 48: Efecto de la carga en el prototipo.....	74
Figura 49: Efecto de la carga en el prototipo.....	74

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades Físicas Del Mercurio.....	52
Tabla 2: Propiedades Químicas Del Mercurio. ....	52
Tabla 3: Medida de la corriente al adicionar nuevas resistencias en paralelo.....	57
Tabla 4: Características del tacómetro.....	58
Tabla 5. Resultados de la iterpolación. ....	66
Tabla 6. Resultado de la interpolación lineal.....	72
Tabla 7: Magnitudes y unidades eléctricas .....	84

## RESUMEN

**TÍTULO: MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR UNIPOLAR \***

**AUTORA: LUZ KARINE SANDOVAL GRANADOS\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Motor, Homopolar, Unipolar, Máquinas eléctricas, Inducción homopolar.

### DESCRIPCIÓN:

El desarrollo de nuevos y mejores materiales, así como también el uso de dispositivos con características especiales de operación (corrientes mas altas de lo convencional), han renovado el interés en el motor unipolar, un motor creado hace casi de dos siglos y sin embargo es desconocido por la mayoría de personas, puesto que su funcionamiento elude cualquier interpretación clásica de las máquinas, su principio de operación desafía la ley de inducción electromagnética (base de la mayoría de máquinas empleadas actualmente), dado que induce una fuerza electromotriz (fem) aunque el flujo que atraviesa el circuito no cambia con el tiempo.

El motor unipolar es la única máquina que verdaderamente funciona con corriente continua, esto lo hace un dispositivo fácil de manipular y de construcción muy sencilla en comparación a otros; está formado por muy pocos componentes, básicamente los necesarios para garantizar un campo magnético constante y un flujo continuo de corriente. Actualmente se ha omitido de la mayoría de libros de máquinas y se cuenta con muy poca información.

Este documento pretende realizar una completa descripción del motor, para ello examina los principales hallazgos relacionados con la inducción unipolar, las teorías planteadas y los experimentos realizados al respecto, así como también se elaboró un prototipo al cual se le realizaron pruebas experimentales para determinar la validez de su modelo matemático.

---

\* Trabajo de Investigación

\*\* Facultad de Ciencias Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Electrónica, Director: C. Rodrigo Correa C.

## SUMMARY

TITLE: MODELING AND CHARACTERIZATION OF A UNIPOLAR MOTOR\*

AUTHOR: LUZ KARINE SANDOVAL GRANADOS\*\*

KEY WORDS: Motor, Homopolar, Unipolar, Electric engine.

### ABSTRACT:

The development of new and better materials, as well as the use of devices with special characteristics (its work with high currents and low voltages) have renewed interest in the homopolar induction, this engine has been around for about two centuries but it remain unknown by most people, since, the homopolar motor eludes any classic interpretation of the machine. Its principle of operation defies the law of electromagnetic induction (base of most machines currently employed), because the magnetic flux linking the circuit is constant in time.

The unipolar motor is the only rotary electric machine can work with direct current without using rectifiers or conmutators. This characteristic makes it, simple in design and small when compared to conventional motors. Because it has few components, basically the necessary ones to guarantee a permanent magnetic field and direct current flow around the circuit. There has been omitted on the literature and its hard find information about this issue.

In this paper a completely description of the homopolar motor is made, the document contains a strong theoretical basis (characteristics, theories of operation, energy balance, presented models and historical review of unipolar motor), also includes the analysis of a prototype developed for compare experimental results with theoretical model.

---

\* Thesis of Investigation

\*\* Faculty of Physical-mechanical Sciencies, School of Electronic Engineering, C. Rodrigo Correa C.

## INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de la inducción electromagnética en 1831, impulsó el uso de la electricidad puesto que permitió el desarrollo de motores y generadores (base de la mayoría de aparatos empleados actualmente). Hoy en día es un principio esencial para comprender el funcionamiento o mejorar la eficiencia de las distintos aparatos eléctricos; aunque la mayoría de máquinas emplean la variación del campo magnético en el transcurso del tiempo para generar energía eléctrica o fuerza; es posible producir corrientes y fuerzas electromotrices sin que se produzca una variación del flujo que atraviesa el circuito, como es el caso de motor unipolar.

El motor unipolar es entonces, un dispositivo que produce una fuerza electromotriz (fem), aunque el flujo que atraviesa el circuito no cambia con el tiempo. Originalmente estuvo constituido por un imán cilíndrico colgado verticalmente con uno de sus polos sumergido en mercurio, mientras el otro es conectado a una batería. Una vez la corriente fluye por el circuito, el imán comienza a girar alrededor de su eje<sup>1</sup>.

La simplicidad del motor causó un gran desconcierto desde su invención, en el siglo XIX se crearon distintas corrientes para explicarlo y fue uno de los tópicos principales de ese siglo; sin embargo, son pocos los adelantos que se han presentado en la inducción unipolar y solo existen algunos ejemplos. En 1912 la Westinghouse Corporation construyó un colosal generador unipolar el cual entregó una corriente continua de 7700 A, con una tensión de 264V, que nunca fue puesto en producción debido a la masificación de la corriente alterna que mostró ser más

---

<sup>1</sup> [Http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/fisica/electymagne/TEORIA/electmagnet/inducción/homopolar/homopolar.htm](http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/fisica/electymagne/TEORIA/electmagnet/inducción/homopolar/homopolar.htm)

eficiente en lo que a transmisión de la energía se refiere<sup>2</sup> . De esta manera la investigación y estudio de la inducción unipolar fue abandonada.

Recientemente el motor unipolar (homopolar) ha sido retomado; en el 2005 General Atomics fue contratada por la marina de Estados Unidos para realizar el diseño y construcción de un motor homopolar<sup>3</sup>, que emplea superconductores para incrementar el campo magnético, aumentando así su potencia de salida. Este prototipo que trabaja a 125kW y 120rpm tiene múltiples ventajas con respecto a los motores de corriente alterna (AC). Dada la simplicidad de su funcionamiento es necesario un menor número de partes que para cualquier otro motor, haciéndolo más pequeño, silencioso y liviano que un motor de AC; a su vez, debido a que trabaja con corriente continua su sistema de control es más simple y directo que los sistemas de los motores de corriente alterna<sup>4</sup>.

De acuerdo con esto, es importante construir una base teórica del motor unipolar donde se den a conocer los fenómenos y fuerzas que gobiernan su funcionamiento, así como también el desarrollo de un modelo matemático que constituya el punto de partida para el desarrollo de una nueva tecnología. De esta manera, el presente documento provee su completa descripción; en el *Capítulo I (Fundamentación)*, se explica en que consiste, como funciona el motor y los fenómenos que involucran la inducción unipolar, así como los problemas e inconvenientes que se presentaron en la deducción de su comportamiento y los aportes presentados por distintos científicos hasta la época, que permitieron la obtención del modelo matemático del motor (descripción del modelo eléctrico y

---

<sup>2</sup> MONTGOMERY, H. Unipolar induction: a neglected Topic in the teaching of electromagnetism, Eur. J. Phys. 20 (1999); p. 271-280

<sup>3</sup> <http://www.ga.com/atg/EMS/homopolar.php>

<sup>4</sup> Ibíd.

sus ecuaciones de movimiento, como lo son las curvas de velocidad y aceleración angular). En el *Capítulo II* se presenta todo el proceso que llevó a la construcción del prototipo más eficiente, es decir, se presenta un recuento desde la idea inicial, junto con los inconvenientes y la forma de resolver cada uno de ellos para finalmente presentar el prototipo óptimo. En el *Capítulo III* se presentan los datos recopilados producto de pruebas experimentales realizadas, se construyen distintas curvas de comportamiento y se realiza la contrastación con el modelo teórico presentado. En el *Capítulo IV* se presenta sus principales usos y finalmente se muestran las conclusiones de la investigación.

## OBJETIVOS

El libro se desarrolló teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

### A. OBJETIVO GENERAL

Conocer los principios de funcionamiento de un motor unipolar permita proponer una aplicación particular.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

#### Objetivos investigativos:

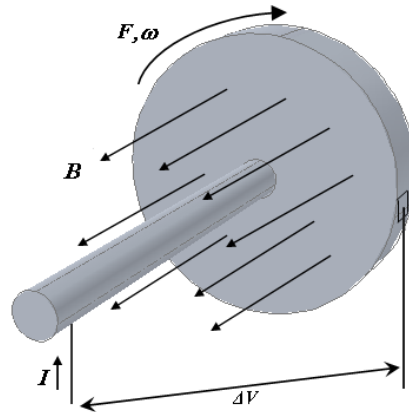
- Buscar y recopilar información relacionada con el motor homopolar.
- Analizar la información recogida de tal forma que sea posible determinar los puntos más sobresalientes de los documentos recopilados.
- Plantear un modelo matemático que represente el comportamiento del motor.
- Construir un prototipo del motor unipolar que permita evaluar el modelo matemático mediante la contrastación de distintos parámetros como velocidad, potencia disipada, etc.

#### Objetivos académicos:

- Conocer los elementos necesarios para realizar un trabajo de investigación coordinado y de auto aprendizaje.
- Aplicar los conocimientos adquiridos en las asignaturas del programa de Ingeniería Electrónica: Máquinas Eléctricas, Circuitos Eléctricos y Teoría Electromagnética II como base para entender y analizar el funcionamiento del motor unipolar.
- Estudiar el fenómeno de inducción electromagnética y las leyes que la gobiernan de tal forma que permita explicar el funcionamiento del motor.

# 1. FUNDAMENTACIÓN

## 1.1 DEFINICIÓN



**Figura 1: Esquema de un Motor Unipolar**

El motor unipolar es básicamente un conductor que gira rotacionalmente en un campo magnético constante por la acción de la corriente que circula a través de éste como se muestra en la Figura 1. Corresponde a una variación del dínamo de Faraday realizado en 1831 y es definido por la IEEE como “Una máquina de corriente continua donde la tensión generada en los conductores activos se mantiene en la misma dirección con respecto a esos conductores”<sup>5</sup>.

Este motor recibe su nombre de su característica más sobresaliente: es el único motor que trabaja con corriente continua directamente, a diferencia de los otros que necesitan de conmutadores para alimentar cada uno de sus polos; es conocido en la mayoría de publicaciones como motor homopolar y esto se debe a que funciona conservando la misma polaridad eléctrica, resultando su nombre en

---

<sup>5</sup> VALONE, Thomas. The Homopolar Handbook, A definitive guide to Faraday disk and n-machine technologies, p 1.

la combinación de la palabra griega homos (igual) y polaridad. Otro nombre dado a estas máquinas es unipolar que en el vocablo griego significa “una polaridad”.<sup>6 7</sup> También se conoce como acíclico evocando otra de sus características, dado que su campo eléctrico es irrotacional o acíclico ( $\text{curl}E=0$ ), puesto que opera bajo un campo magnético constante.

## 1.2 DESARROLLO HISTÓRICO

El motor unipolar es uno de los dispositivos electromagnéticos más antiguos, fue construido por Michael Faraday quien lo presentó en 1821 en el Royal Institute (Figura 2). Este dispositivo esta formado por dos vasos de vidrio próximos el uno al otro, uno de los cuales se emplea como pila galvánica, y el otro como motor<sup>8</sup>.

El motor esta formado por un imán cilíndrico axial con un fuerte campo magnético sumergido en mercurio puro. Para su construcción Faraday perforó el fondo del vaso e introdujo un cable de cobre el cual sería la conexión con la batería, ató uno de los polos del imán al fondo del vaso y dejó el otro libre para rotar; a continuación vertió el mercurio en el vaso de tal forma que el imán quedara ubicado perpendicularmente. El circuito se cierra mediante un hilo de cobre ubicado en la parte superior del vaso con mercurio, que se encuentra unido a la pila galvánica ubicada a la derecha, como se muestra en la Figura 2.

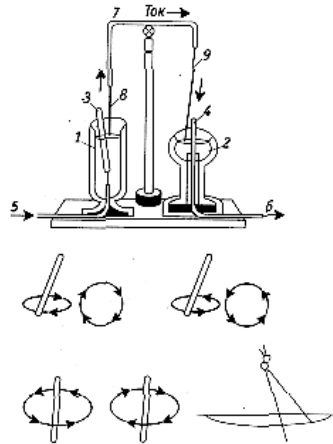
---

<sup>6</sup> MARTÍN MUÑOZ, Agustín. Motor Homopolar. En: Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias. Vol 4, (Ene-Mar 2007); p 352-354.

<sup>7</sup> JOACHIM SCHLICHTING, H y UCKE, Christian. Un Motor Eléctrico De Construcción Sencilla, Bajo Coste Y Alta Tecnología. En: Physik in unserer Zeit. Vol 35, (2004); p 272-273.

<sup>8</sup> 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).

Una vez la corriente fluye por el circuito, el imán comienza a girar alrededor del cable inmerso en mercurio, constituyendo así el primer dispositivo que produjo rotación a partir de un campo electromagnético<sup>9</sup>.



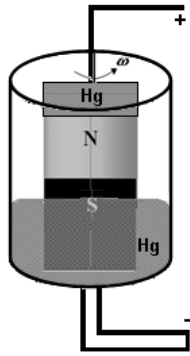
**Figura 2: Primer Motor Unipolar**

(Fuente: 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)*).

Durante ese mismo año André Marie Ampere estudiando el fenómeno observado por Faraday, realizó otro prototipo, para ello llenó un vaso con mercurio e introdujo un imán cilíndrico en posición vertical con uno de sus polos inmerso en él por la acción de un contrapeso; el otro polo contiene un poco de mercurio que actúa como escobilla entre el imán y el cable. Al igual que Faraday un polo de la batería está conectado al fondo del vaso y el otro en la parte superior del dispositivo, de esta manera, se produce un flujo de corriente que origina el giro del imán sobre su propio eje (ver Figura 3)<sup>10</sup>.

<sup>9</sup> FARADAY, M ,op. cit. p 283-285.

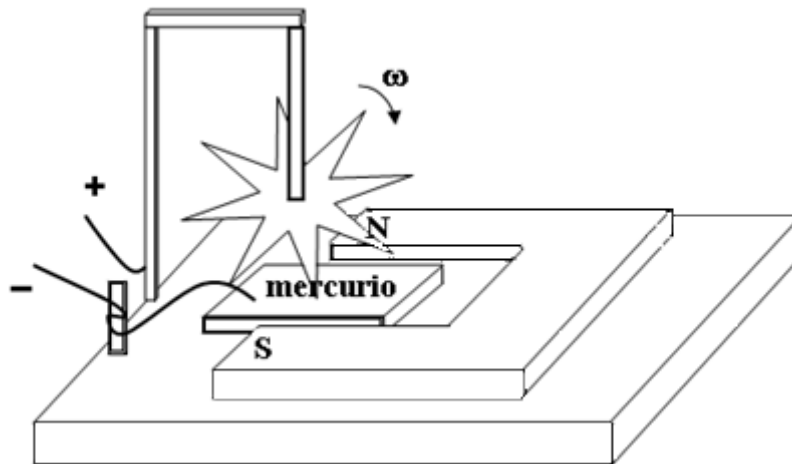
<sup>10</sup> AMPERE, A. *Reponse A La Lettre De M. Van Beck Sur Une Nouvelle Experience Electro-Magnetique.* En: *Journal de Physique.* 1821. T. XCIII; p 447-467. *Electromagnetic Rotation (the key experiments)*.



**Figura 3: Modelo de André Marie Ampere**

(Fuente: 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)*).

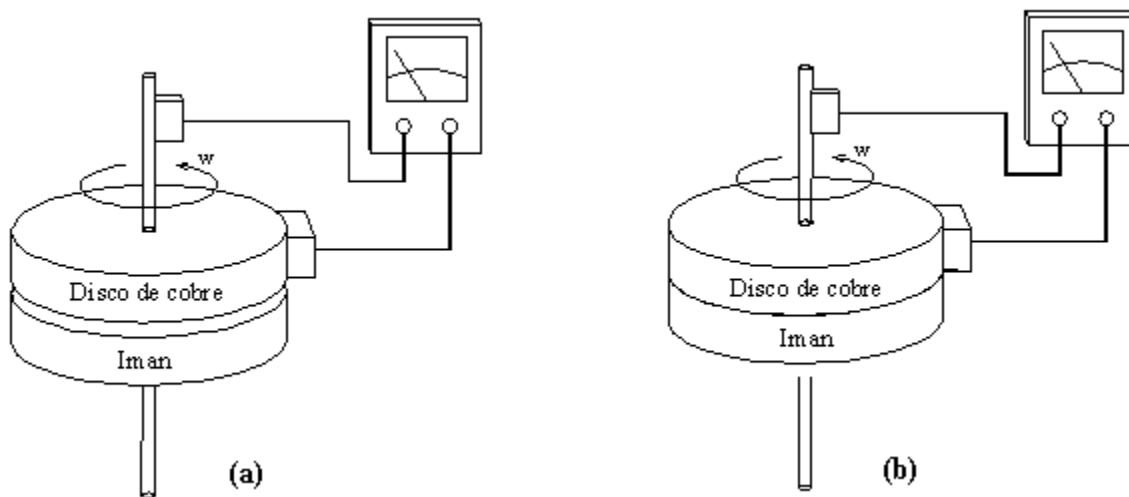
Al año siguiente (1822) se dio a conocer otro motor unipolar desarrollado por Peter Barlow conocido como la Rueda de Barlow, un dispositivo formado principalmente por una estrella metálica, un imán de herradura y una batería (Figura 4), el cual rota debido a la fuerza que se origina cuando una de las puntas de la estrella se sumerge en el mercurio puesto que fluye una corriente (dado que el centro y la punta de la estrella se conectan a la batería por conducción) en presencia de un campo magnético constante<sup>11</sup>.



**Figura 4: Rueda de Barlow**

<sup>11</sup> JOACHIM SCHLICHTING, H y UCKE, op. cit., p.273.

En 1831 Michael Faraday realizó un experimento en el que ubicó un disco de cobre sobre un imán permanente cilíndrico con campo magnético axial; a continuación introdujo una barra metálica sobre sus ejes de tal manera que ambos pueden rotar juntos y luego conectó al eje y la periferia del disco de cobre un galvanómetro. Observó que sin importar si solo el disco rota (el imán permanece estático) ó si ambos lo hacen (Figura 5.a y Figura 5.b respectivamente) se produce la misma deflexión en el galvanómetro<sup>12</sup>.



### Figura 5: Experimento de Faraday

*(A la derecha los elementos rotan juntos y a la izquierda solo rota el disco)*

Este experimento causó un gran desconcierto entre científicos e ingenieros puesto que parece no cumplir la ley de inducción electromagnética, dado que se induce corriente aunque no se produce una variación del campo magnético en el tiempo. Buscando explicar este comportamiento el estudio se concentró en la naturaleza del campo magnético, de esta forma se plantearon dos teorías:

---

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

Una sugiere que la rotación del imán afecta las líneas de campo y por tanto el flujo que atraviesa el disco de cobre varía. Ésta fue apoyada por muchos científicos de la época como Ampere quien planteó que cada una de las líneas era producida por las moléculas del imán, de esta forma las líneas de campo en un imán permanente giran cuando éste lo hace. Plucker que en 1852 realizó una serie de experimentos que le permitieron afirmar “Las líneas de fuerzas emitidas por una porción de una superficie magnética debe ser considerada como participe del movimiento de esa porción de superficie”<sup>13</sup> y Tolver Preston quien en 1885 apoya la teoría de Ampere, en su artículo escribió “las líneas de fuerza o el campo de fuerza sobre un imán debe ser considerado en ese sentido provisto o dependiente del imán, de tal manera que este campo rota con el imán en la misma forma como lo haría si el imán fuera físicamente trasladado ”<sup>14</sup>.

La otra hipótesis fue planteada por Faraday para quien las líneas de campo se mantiene estacionarias aunque el imán rote. Esta teoría fue respaldada tiempo después por el doctor E. H. Kennard quien en 1917 en su artículo “On unipolar induction another experiment and its significance as evidence for the existence of the ether” concluye que la teoría del movimiento de las líneas de campo no es posible<sup>15</sup>.

Aún hoy el fenómeno continúa siendo debatido, no se ha llegado a establecer de forma definitiva la naturaleza del campo magnético rotativo pero ahora se sabe que es imposible distinguir un campo magnético estático y uno que rota por lo que motores y generadores unipolares funcionan bajo la acción de un campo magnético constante.

---

<sup>13</sup> PLUCKER, Pogg. Annalen, (1852), p.357, The homopolar handbook.

<sup>14</sup> PRESTON, Phil. Mag.,33,179,(1917), The homopolar handbook.

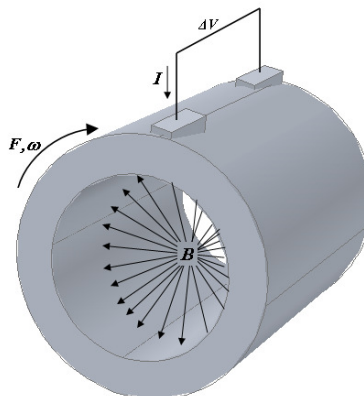
<sup>15</sup> KENNARD, Phil.Mag., 33,179,(1917), The homopolar handbook.

En el siglo XX el comportamiento de las partículas cargadas en un material fue conocido dado que se planteó el principio de relatividad y se unificó la teoría electromagnética con el planteamiento de las leyes de Maxwell y la Ley de Fuerza de Lorentz; esto permitió aclarar, aunque no de forma definitiva el funcionamiento de la máquina unipolar, lo suficiente como para que fuese aceptada y se construyeran prototipos que operaron sin ningún problema. De esta forma es posible encontrar numerosas patentes para máquinas que funcionan con este principio<sup>16</sup>.

### 1.3 MODELOS PRESENTADOS

El motor tiene cerca de 150 años de haber sido propuesto, a lo largo de la historia han surgido diferentes configuraciones orientadas principalmente al entendimiento del fenómeno. A continuación se presentan las más sobresalientes:

#### 1.3.1 Motor Unipolar tipo tambor:



**Figura 6: Motor unipolar tipo Tambor**

(Fuente: SUPERCZYNSKI, Michael J y WALTMAN, Donald J. Homopolar motor with high temperature superconductor field windings. *En: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 7, NO. 2, JUNE 1997*)

---

<sup>16</sup> MONTGOMERY, H. op. cit., p.272.

Esta máquina experimenta una fuerza electromagnética cuando circula corriente continua por el cilíndrico, debido a que se presenta una interacción entre el campo magnético de la máquina (B) que como se observa en la Figura 6 es radial y las cargas que circulan en la periferia del mismo<sup>17</sup>.

### **1.3.2 Motor Unipolar tipo disco:**

Los motores tipo disco son los más conocidos y difundidos en internet puesto que se han desarrollado nuevos y mas potentes materiales magnéticos como lo son los imanes de tierras raras de Neodimio y Samario que superan a los tradicionales dada su elevada remanencia y alta coercitividad, permitiendo que con una menor cantidad de corriente sea posible observar el fenómeno de inducción unipolar. Se han construido dos modelos:

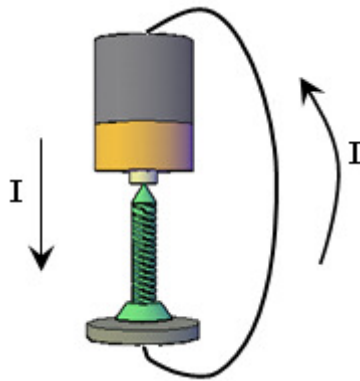
#### **1.3.2.1 Motor Homopolar Colgado:**

Fue propuesto por Prof. Dr. H. Joachim Schlichting y Dr. Christian Ucke en Alemania en el 2004<sup>18</sup>; está formado por un cable, una batería y un imán de neodimio (NeFeB) cromado dispuestos como se muestra en la Figura 7 el cual dada su simplicidad ha conseguido la atención tanto de científicos como de aficionados, y así la bibliografía sobre este tema aumenta cada día.

---

<sup>17</sup> SUPERCZYNSKI, Michael J y WALTMAN, Donald J. Homopolar motor with high temperature superconductor field windings. En: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 7, NO. 2, JUNE 1997.

<sup>18</sup> JOACHIM SCHLICHTING, H y UCKE, op. cit., p.272

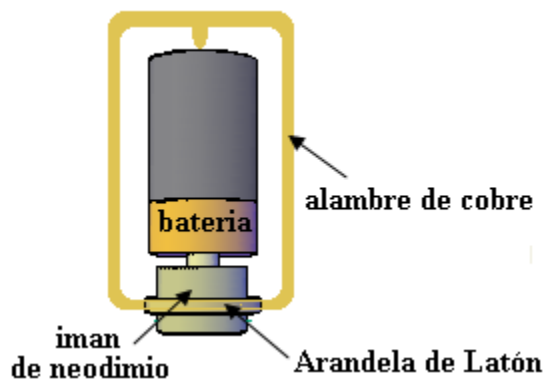


**Figura 7: Motor tipo Colgado**

Esta configuración se caracteriza por:

- El rotor esta formado por el imán y el tornillo.
- Las pérdidas por fricción son muy bajas puesto que el contacto del rotor y estator es mínimo.
- Circula una gran cantidad de corriente debido a que entre los bornes de la batería se hace prácticamente un corto.

### 1.3.2.2. Modelo de Per-Olof Nilsson (Suecia)



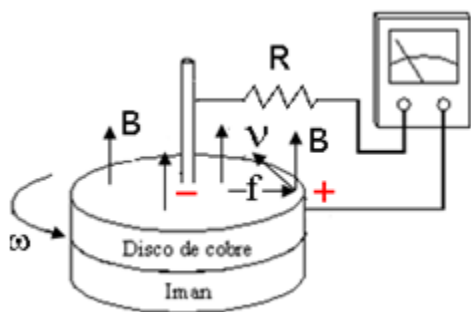
**Figura 8: Modelo de Per-Olof Nilsson**

El modelo de Per-Olof Nilsson se caracteriza por que el alambre de cobre es el único que rota, su construcción no es tan sencilla, pero se observa la misma característica que en el caso anterior una gran cantidad de corriente consumida, dada la baja resistencia conectada, esto es, entre los bornes de la batería<sup>19</sup>.

## 1.4 FUNCIONAMIENTO

Analizando el comportamiento del generador creado por Faraday en 1831, observamos que cuando se hace rotar el disco junto con el imán, se induce una diferencia de potencial debido a que cada carga se mueve con una velocidad lineal ( $V_{in}$ ) obtenida a partir del giro impuesto en la máquina ( $V_{in} = \omega * r$ ) en presencia de un campo magnético uniforme como se observa en la figura 5.

Para calcular la diferencia de potencial se debe tener en cuenta que un portador de carga bajo la acción de un campo magnético uniforme ( $B$ ) induce una fuerza electromotriz ( $f$ ) como se observa en la figura 9<sup>20</sup>:



**Figura 9: Corriente Inducida**

$$\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.1)$$

$$[N] = [C] \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N * s}{C * m} \right]$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{f}}{q} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (1.2)$$

$$\left[ \frac{V}{m} \right] = \left[ \frac{N}{C} \right] = \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N * s}{C * m} \right]$$

$$\vec{E} = (\omega * r) \hat{\phi} \times B \hat{k} = \omega r B \hat{\rho} \quad (1.3)$$

$$\left[ \frac{N}{C} \right] = \left[ \frac{rad}{s} \right] [m] \left[ \frac{N * s}{C * m} \right]$$

<sup>19</sup> JOACHIM SCHLICHTING, H y UCKE, op. cit., p.272

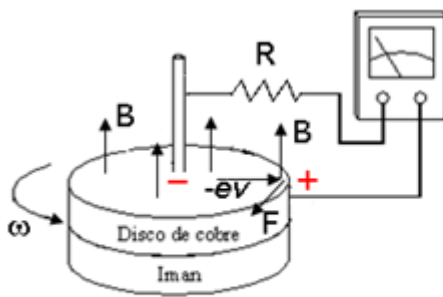
<sup>20</sup> Las unidades se comprueban directamente debajo de cada una de las ecuaciones y se presentan en el anexo I.

$$\vec{V} = - \int_0^r E \cdot d\vec{l} = \int_0^r wrB\hat{j}d\rho \quad (1.4)$$

$$\vec{V} = -\frac{1}{2}wBr^2\hat{\rho} \quad (1.5)$$

$$\left[\frac{J}{C}\right] = \left[\frac{rad}{s}\right] \left[\frac{J * s}{C * m^2}\right] [m^2]$$

La rotación del disco y el imán, entonces, crea una diferencia de potencial, que se mantiene indefinidamente puesto que la energía está continuamente entrando al sistema, a partir del trabajo realizado al mover el imán. Presentándose, por lo tanto, un movimiento de cargas (electrones) de la periferia al centro del disco que inducirán una nueva fem como se observa en la figura 10.



**Figura 10: Fuerza opuesta inducida**

$$\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$[N] = [C] \left[\frac{m}{s}\right] \left[\frac{N * s}{C * m}\right]$$

$$\vec{f} = qwr\hat{\rho} \times B\hat{k}$$

$$\vec{f} = -qwrB\hat{\phi} \quad (1.6)$$

$$[N] = [C] \left[\frac{m}{s}\right] \left[\frac{N * s}{C * m}\right]$$

Esta fuerza se opone al movimiento de la máquina, obligando así, a que la fuerza mecánica con la que gira el imán y el disco sea mayor que la inducida, y es de esta manera como se lleva a cabo la conversión energía mecánica a eléctrica.

En el caso del motor, se conecta una fuente entre el eje y la periferia del imán, la cual garantiza un flujo continuo de corriente en el circuito; así, se presenta un desplazamiento de carga que junto con el campo magnético constante induce una fuerza dada por la ecuación de Lorentz:  $F = -q\vec{v} \times \vec{B}$  que aplicada a los electrones de conducción genera el movimiento del conjunto imán-disco. Por lo tanto, el comportamiento del motor se analiza en base a que se tiene un campo

magnético constante, cargas en movimiento (electrones de conducción del disco) dentro de un conductor, en presencia de un campo magnético (ecuación 1.6), lo cual se traduce en una fuerza total aplicada al mismo conductor (el disco) dado que: “Un campo magnético que ejerce fuerzas sobre los electrones tiende a provocarles un leve cambio de posición y produce un pequeño desplazamiento en los centros de “gravedad” de las cargas positivas y negativas. Las fuerzas de Coulomb entre electrones e iones positivos, sin embargo, tienden a resistir tal desplazamiento. Por lo que cualquier intento de mover los electrones, tiene como resultado una fuerza de atracción entre electrones e iones positivos de la red cristalina que es transferida a la red cristalina o al mismo conductor”<sup>21</sup> .

Para que se mantenga indefinidamente el movimiento debe haber una entrada continua de energía, ésta es suministrada por la fuente puesto que una vez se genera el torque necesario para que el conjunto imán-disco se ponga en movimiento; de la ecuación 1.5 se observa una tensión inducida de polaridad inversa a la de la fuente, de manera que para mantener el movimiento, el potencial de la fuente debe ser mayor que el inducido.

Experimentalmente la fem inducida por la rotación del imán (ecuación 1.5) ha sido medida y comprobada. En el trabajo realizado por M.P. Frigerio, G. La Bruna, M.G. Larreguy y J. Romani “Generador de Faraday de una sola pieza” se evalúa su validez, realizando una comparación entre la densidad del campo magnético (B) obtenida al despejar esta fórmula y la derivada a partir de la medida realizada sobre el imán con una punta de Hall. Para esta prueba fijaron un imán de neodimio a un taladro de varias velocidades y empleando un multímetro midieron la tensión inducida entre el eje y la periferia del imán, conforme varía la velocidad del mismo (Figura 11):

---

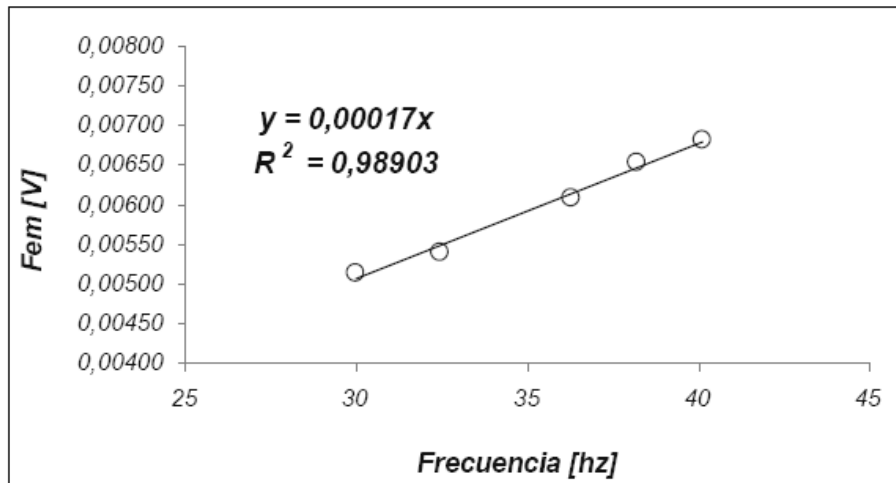
<sup>21</sup> HAYT H, William. Teoría Electromagnética, Quinta Edición; p 298



**Figura 11: Fotografía del Dispositivo**

(Fuente: FRIGERIO,Paz; LA BRUNA,Gimena.; LARREGUY, María y ROMANI, Julieta. Generador de Faraday de una sola pieza. Universidad Favaloro-Buenos Aires Octubre (2001))

Con estos datos construyeron la curva tensión (V) vs frecuencia (Hz) que se presenta a continuación:



**Figura 12: Resultado Experimental**

(Fuente: FRIGERIO,Paz; LA BRUNA,Gimena.; LARREGUY, María y ROMANI, Julieta. Generador de Faraday de una sola pieza. Universidad Favaloro-Buenos Aires Octubre (2001))

Usando la ecuación de la tensión inducida por el giro del imán en función de la frecuencia se obtiene:

— —

$$\left[\frac{J}{C}\right] = \left[\frac{1}{s}\right] \left[\frac{J * s}{C * m^2}\right] [m^2]$$

A partir de los datos recopilados anteriormente, se observa que la pendiente de la figura 12 representa:

$$\pi B r^2 = 0.00017$$

Por lo que el campo magnético es:

$$B = \frac{0.00017}{\pi r^2} \text{ (Gauss)}$$

Según las dimensiones del imán, el campo magnético es de 0.49T, que, al compararse con el obtenido mediante la punta de Hall, mostró un error absoluto de 0.03T (*error* = 6%). Los resultados de esta prueba, permitieron probar en definitiva la validez de la ecuación 1.5, puesto que se observó la relación directa entre la velocidad de giro y la *fem* inducida; también, se obtuvo con precisión el campo magnético a partir de esta expresión. Sin embargo, existe polémica sobre el lugar en el que se origina la *fem*; aun hay dudas sobre cual es el elemento principal y responsable de la inducción. Actualmente existen dos teorías al respecto fuertemente apoyadas:

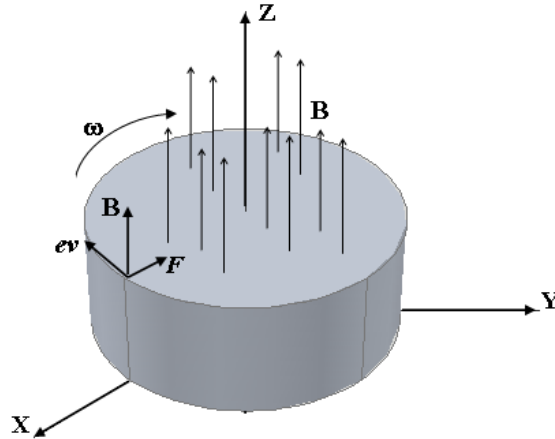
#### 1.4.1 Teoría de los “Maxwellianos”<sup>22</sup>

Esta teoría, asegura que es el disco (imán conductor) en movimiento en presencia de un campo magnético constante el que induce la *fem*, de esta manera, la

---

<sup>22</sup> MONTGOMERY, H. Some Comments on J.Guala-Valverde’s Experiments on Unipolar Induction; En: Apeiron, Vol. 14, No. 1 (enero 2007); p 34.

explicación comienza analizando la distribución de cargas en un imán aislado eléctricamente mientras gira con velocidad angular  $\omega$  (Figura 13)<sup>23</sup>.



**Figura 13: Sistema Aislado (imán rotando).**

En el sistema de la figura 13 la rotación del imán produce el movimiento de sus átomos; esto ocasiona que los electrones choquen entre sí, produciendo un movimiento rotacional de éstos<sup>24</sup> cuya velocidad de flujo neta en cada punto está dada por la relación:

$$v = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (1.7)$$

$$\left[\frac{m}{s}\right] = [s^{-1}][m]$$

Donde  $\omega$  es la velocidad con la que gira el imán y  $r$  representa el vector posición de un punto dentro del imán. Dado que existen cargas en movimiento, éstas experimentarán una fuerza debida al campo magnético presente:

$$F = -q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.8)$$

$$[N] = [C] \left[\frac{m}{s}\right] \left[\frac{N*s}{C*m}\right]$$

---

<sup>23</sup> MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

<sup>24</sup> Ibíd, p 274.

Sin embargo, el sistema se encuentra en equilibrio puesto que el imán está aislado; entonces, la fuerza sobre los electrones de conducción observada anteriormente (ecuación 1.8) debe ser contrarrestada por otra fuerza de origen eléctrico, de tal forma que la fuerza electromagnética total sea nula. Por lo tanto, la fuerza de Lorentz sobre cada partícula es:

$$F = -q\vec{E} - (q\vec{v} \times \vec{B}) = 0 \quad (1.9)$$

$$[N] = [C] \left[ \frac{N}{C} \right] - [C] \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N*s}{C*m} \right] = 0$$

De la ecuación 1.9 podemos calcular el campo eléctrico generado:

$$\Rightarrow q\vec{E} = -q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.10)$$

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.11)$$

$$\left[ \frac{N}{C} \right] = \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N*s}{m*C} \right]$$

La tensión generada por este campo eléctrico es:

$$V_p = -\int_0^r \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.12)$$

$$\left[ \frac{J}{C} \right] = \left[ \frac{N}{C} \right] [m]$$

Reemplazando en la ecuación 1.11 se obtiene:

$$V_p = -\int_0^r (-\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (1.13)$$

$$\left[ \frac{J}{C} \right] = \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N*s}{m*C} \right] [m]$$

En coordenadas cilíndricas:

$$V_p = \int_0^\rho w \rho \vec{\varphi} \times B \vec{z} \cdot d\rho \quad (1.14)$$

$$V_p = w \int_0^\rho B \rho \, d\rho \vec{\rho} \quad (1.15)$$

$$V_p = \frac{w}{2\pi} \int_0^\rho B \underbrace{(2\pi\rho)}_{dS} \, d\rho \vec{\rho} \quad (1.16)$$

$$\left[\frac{J}{C}\right] = [s^{-1}] \left[\frac{N*s}{m*C}\right] [m^2]$$

Teniendo en cuenta que el flujo magnético que pasa a través de un área determinada esta dado por la relación:

$$\phi = \int_S B \cdot dS \quad (1.17)$$

$$\left[\frac{N*m}{A}\right] = \left[\frac{N}{A*m}\right] [m^2]$$

Entonces, la diferencia de potencial  $V_p$  en términos del flujo magnético es:

$$V_p = \frac{\omega}{2\pi} \phi \quad (1.18)$$

$$\left[\frac{N*m}{C}\right] = [s^{-1}] \left[\frac{N*m}{C}\right] [s]$$

Ahora, cuando un galvanómetro es conectado entre el borde y el eje del imán (Figura 14) se observa una deflexión; esto muestra que al conectarlo, se rompe el equilibrio entre la fuerza magnética y eléctrica. De esta forma el campo eléctrico se hace mas pequeño y entonces los electrones de conducción del disco se desplazan impulsados por la fuerza producida por la presencia del campo magnético en dirección radial, cambiando así su trayectoria (de una circunferencia cuando el sistema se encuentra aislado) a una espiral<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> MONTGOMERY, H. Unipolar Induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism En: Eur. J. Phys. Vol 20 (1999); p 271–280.

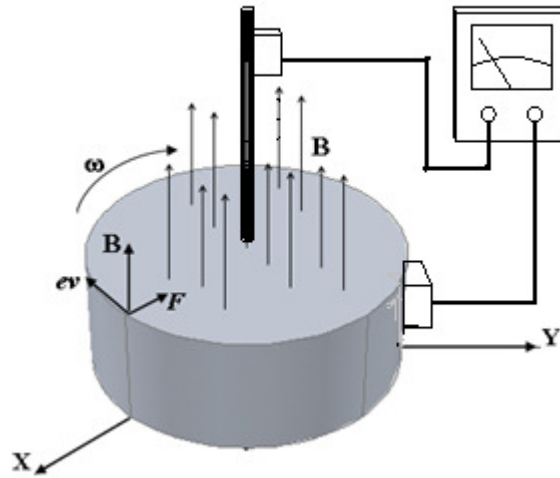


Figura 14: Sistema conectado al galvanómetro.

### 1.4.2 Teoría de Weber

Analizando el experimento realizado por Faraday en 1830 (Figura 5), observamos que acorde a Webber, para que se produzca una fuerza electromotriz debe existir movimiento relativo entre el imán y la carga; de esta manera los electrones de conducción del disco no son parte activa del sistema dado que estos se encuentran en reposo relativo respecto al imán. Así, son los electrones de conducción en el conductor que cierra el circuito (cable que conecta el galvanómetro en la Figura 5) los que experimentan fuerza magnética<sup>26</sup>, que se calcula empleando la relación de Lorentz para cargas en movimiento como:

$$F = -q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.19)$$

$$[N] = [C] \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N*s}{C*m} \right]$$

---

<sup>26</sup> MONTGOMERY, H. Some Comments on J.Guala-Valverde's Experiments on Unipolar Induction; En: Apeiron, Vol. 14, No. 1 (enero 2007); p 34.

donde  $v$  es la velocidad con la que se mueve la carga. Dado que es el imán el que gira a una velocidad con respecto al laboratorio (marco de referencia), la velocidad relativa de la carga esta dada:

$$v = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (1.20)$$

$$\left[\frac{m}{s}\right] = [s^{-1}][m]$$

donde  $r$  representa el radio del imán y  $\omega$  la velocidad relativa entre conductor e iman:

$$\omega = \omega_{conductor} - \omega_{iman} \quad (1.21)$$

$$[S^{-1}] = [S^{-1}] - [S^{-1}]$$

Usando la ecuación 1.19, encontramos que, el movimiento induce un campo eléctrico:

$$E = -\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.22)$$

$$\left[\frac{N}{C}\right] = \left[\frac{m}{s}\right] \left[\frac{N * s}{m * C}\right]$$

que a su vez genera una diferencia de potencial:

$$V_p = \frac{\omega}{2\pi} \phi \quad (1.23)$$

$$\left[\frac{J}{C}\right] = [S^{-1}] \left[\frac{N*m*s}{c}\right]$$

### 1.4.3 Experimentos que respaldan cada teoría

La discusión sobre el origen de la fuerza electromotriz en el motor es un asunto que hasta hoy no se ha aclarado, debido a que aunque se han diseñado experimentos que respaldan una de ellas, éstos no han sido aceptados completamente y por lo tanto no se consideran como pruebas suficientes para desechar una de ellas; a continuación se presentan dos de las más discutidas recientemente:

#### 1.4.3.1 Experimento de E. H Kennard:

En 1912 E.H Kennard realizó un experimento que parecía poner fin a la controversia; para ello empleó básicamente un Electrómetro de Cuadrante (instrumento para medir pequeñas diferencias de potencial) y un imán cilíndrico rodeado por un cilindro metálico hueco coaxial y aislado eléctricamente del imán como se muestra en la Figura 15.<sup>27</sup>

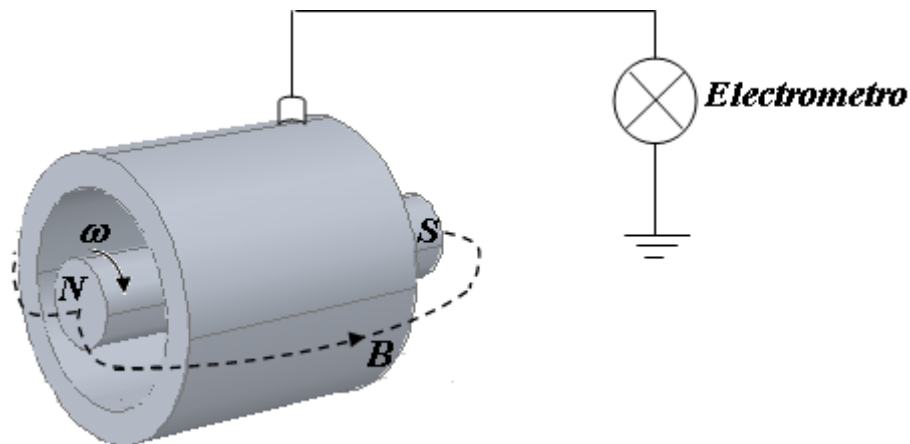


Figura 15 Esquema básico del experimento de Kennard

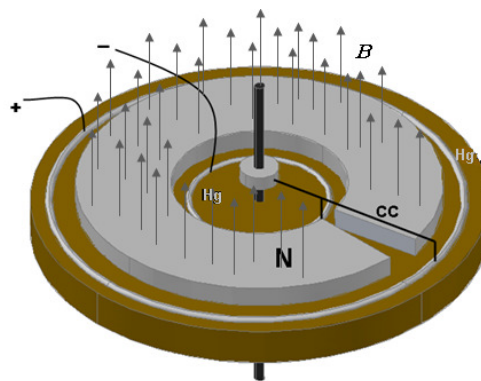
---

<sup>27</sup> MONTGOMERY, H. Some Comments on J.Guala-Valverde's Experiments on Unipolar Induction; *En: Apeiron*, Vol. 14, No. 1, enero 2007; p 34.

El cilindro se mantuvo estacionario y se hizo girar el imán, pero no se detectó desplazamiento de cargas del cilindro ya que no se produjo ninguna deflexión en el electrómetro<sup>28</sup>. Analizando este resultado desde el punto de vista de ambas teorías encontramos que según Weber cuando el imán rota existe un movimiento relativo entre el cilindro y su campo magnético (B), por lo que se debería observar el desplazamiento de los electrones. Esto no ocurre como lo afirma la teoría de los “Maxwelianos” donde el campo magnético se mantiene constante. Esta teoría, cobró fuerza durante el siglo XIX y actualmente es la de mayor aprobación por parte de los físicos e ingenieros.

#### 1.4.3.2 Experimento de J.Guala-Valverde

En 2002 J.Guala-Valverde realizó una serie de experimentos sobre inducción unipolar, que parece revivir la teoría de Weber. En su experimento Guala-Valverde diseñó el sistema mostrado en la Figura 16; Éste consta básicamente de un imán cilíndrico al cual se le extrajo un sector circular de 12º, dos anillos de cobre en los cuales se ubica una tabla circular, que tiene su eje unido con el del imán de manera que ambos pueden girar juntos, una fuente o un motor dependiendo el caso que se analice (motor o generador) y un conductor de cobre que permite cerrar el circuito.

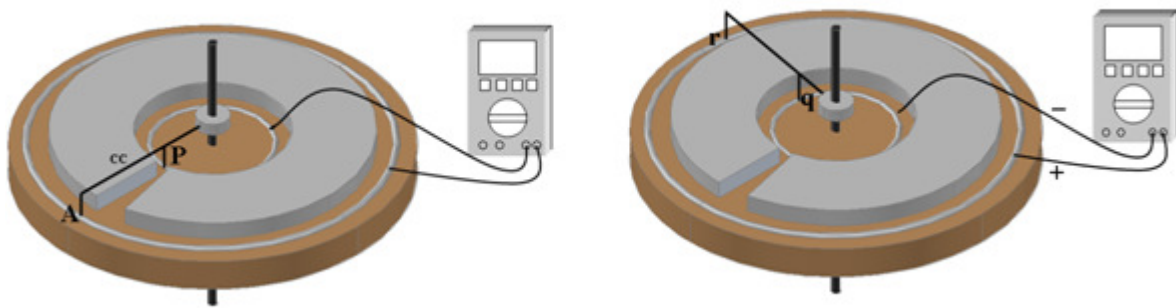


**Figura 16: Esquema del Experimento realizado por J.Guala-Valverde**

(Fuente: Motor-Generador Unipolar D. López Nacir y Guillermo Pedro Acuña)

<sup>28</sup> MONTGOMERY, H. op. cit., p.35.

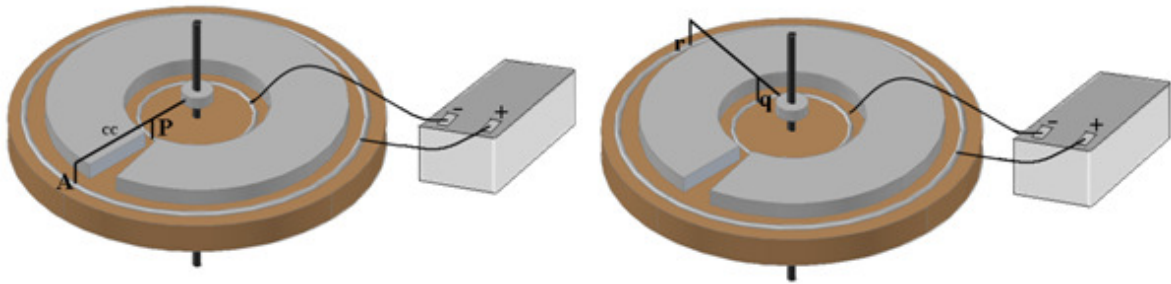
En el modo generador se evaluaron dos casos, en el primero el conductor de cobre es soldado entre los puntos q y r de manera que experimenta un campo magnético  $B$  en la dirección del eje  $Z$ . El sistema fue puesto en rotación mediante un motor externo en dirección anti-horaria y esto indujo una diferencia de potencial entre los puntos q y r, con un mayor potencial en el punto r que en el q.



**Figura 17: Experimento J.Guala-Valverde, Generador**

Este resultado fue predicho por ambas teorías, ahora cuando el conductor se ubica en la región donde se sustrajo el material magnético entonces el campo magnético será opuesto al presentado en el caso anterior, de manera que el punto q debe estar a un mayor potencial que r; sin embargo, se obtuvo el resultado opuesto contradiciendo así la teoría de Maxwell pero avalando la de Weber dado que al originarse la FEM en el circuito estacionario (cables que se unen al galvanómetro), el efecto del corte del imán es insignificante por lo tanto se conserva la dirección presentada anteriormente.

El sistema en la configuración motor es ahora alimentado por una fuente de corriente continua (Figura 18), el conductor de nuevo es soldado en los puntos r-q, sometiéndolo a un campo magnético en la dirección del eje  $z$ .



**Figura 18: Experimento J.Guala-Valverde, Motor**

Una vez la corriente circula por el sistema se observa que el conductor gira contra las manecillas del reloj acorde a la predicción de ambas teorías; sin embargo, cuando el conductor es puesto entre los puntos P y A como se ilustra en la Figura 18 según la teoría de los “Maxwelianos” al conectar la fuente ocurre un desplazamiento de electrones por el conductor. Entonces se presenta básicamente un conjunto de cargas en movimiento en presencia de un campo magnético, por lo que se induce una fuerza ortogonal a ambos vectores, ocasionando que este se mueva con las manecillas del reloj, resultado opuesto al observado experimentalmente por el autor pero esperado según la teoría de Weber. Aunque esta prueba parece dejar muy mal a la teoría generalmente aceptada (la de los “Maxwelianos”), se ha cuestionado la validez misma del experimento, como lo muestra la réplica de H Montgomery<sup>29</sup>.

## 1.5 MODELO MATEMÁTICO

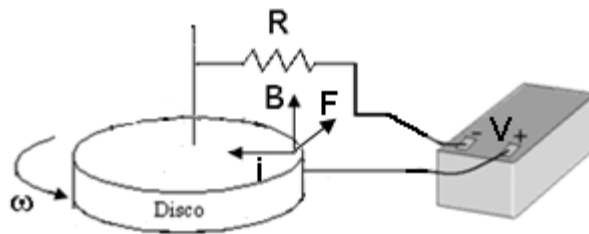
Simplificando el motor unipolar, podemos decir que consta básicamente de un imán cilíndrico, un eje que permite conectar el centro del imán a un polo de la batería y escobillas, usadas para evitar posibles chispas. Desde el punto de vista eléctrico cada uno de estos elementos representa:

---

<sup>29</sup> MONTGOMERY, H. op. cit., p.35.

- Eje y Escobillas: Se opndrán al paso de corriente en proporción equivalente al material y condiciones en las que se emplee, por lo que en el circuito equivalente del motor se representan como una resistencia; esto los hace muy importantes en el diseño, puesto que el motor opera con gran cantidad de corriente continua.
- Imán Cilíndrico: Aporta el campo magnético uniforme, y también actúa como conductor.

Así el motor queda reducido al sistema que se observa en la figura 19:



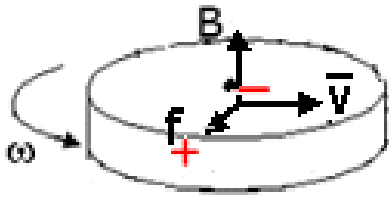
**Figura 19: Comportamiento de las cargas en el motor.**

Como se observó en la sección 1.4 se produce una fuerza al presentarse el movimiento de portadores de carga,

$$\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1.24)$$

$$[N] = [C] \left[ \frac{m}{s} \right] \left[ \frac{N \cdot s}{C \cdot m} \right]$$

Una vez el imán comience a girar, inducirá una diferencia de potencial entre el eje y la periferia de éste, con la misma polaridad que la de la fuente (figura 19), como se explicó en la sección 1.4 y que es función tanto del radio como de la velocidad ( $\omega$ ) de rotación.

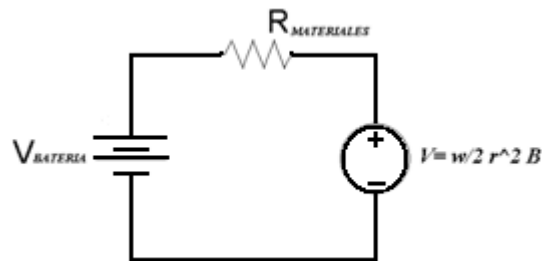


$$V_p = \frac{\omega}{2} r^2 B \quad (1.25)$$

$$\left[ \frac{J}{C} \right] = [s^{-1}] [m^2] \left[ \frac{N \cdot s}{C \cdot m} \right]$$

**Figura 20: Tensión inducida en el Imán.**

De esta manera, el motor se representa mediante el siguiente circuito:



**Figura 21: Equivalente Eléctrico Motor Unipolar**

Una vez obtenido el equivalente eléctrico del motor, es posible describir el torque de este tipo de motores.

### 1.5.1 TORQUE GENERADO

El torque generado por estas máquinas puede ser calculado empleado la forma diferencial de la fuerza de Lorentz para un hilo de corriente:

$$dF = \vec{i} dl \times \vec{B} \quad (1.26)$$

$$[N] = [A][m] \left[ \frac{N}{A \cdot m} \right]$$

Puesto que se asume que la corriente que fluye a través de la superficie del imán, describiendo una trayectoria lineal en dirección radial del borde al eje del disco

(imán). La fuerza total en el conductor se obtiene entonces resolviendo la integral a lo largo de la trayectoria C descrita por la corriente:

$$F = i \int_C dl \times B \quad (1.27)$$

$$[N] = [A][m] \left[ \frac{N}{A \cdot m} \right]$$

Tomando como eje de referencia el centro del imán en coordenadas cartesianas se tiene que:

$$dl = -dy \vec{a}_x \quad (1.28)$$

$$r = y \vec{a}_y [m] \quad (1.29)$$

donde r es el radio del imán. Asumiendo un campo magnético constante a lo largo de la superficie del imán y esta dirigido en la dirección del eje Z:

$$\vec{B} = B \vec{a}_z [T] \quad (1.30)$$

La fuerza total que experimenta el imán es:

$$F = -i B a_x \int_0^r dy = -i B r \vec{a}_x \quad (1.31)$$

$$[N] = [A] \left[ \frac{N}{A \cdot m} \right] [m]$$

El torque que actúa en un conductor está dado por:

$$T = i \int_C \vec{r} \times \vec{F} \quad (1.32)$$

$$[N \cdot m] = [m][N]$$

Entonces para el motor es:

$$T = i B \vec{a}_z \int_0^r y dy$$

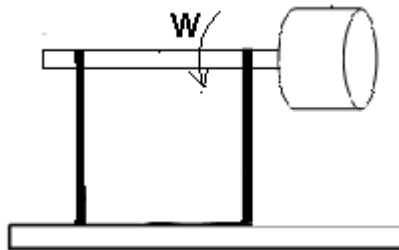
$$T = \frac{i B r^2}{2} \vec{a}_z \quad (1.33)$$

$$[N \cdot m] = [A] \left[ \frac{N}{A \cdot m} \right] [m^2]$$

El torque generado por el imán (ecuación 1.33), solo constituye una versión muy aproximada de las fuerzas a las que está sometido un motor real, puesto que en él, intervienen otras fuerzas que afectan su comportamiento. A continuación se presenta el análisis completo para un motor estándar.

### 1.5.2 DINÁMICA DEL MOTOR UNIPOLAR

El análisis de la dinámica del prototipo puede desarrollarse al estudiar las partes esenciales del motor. Se puede describir como un sistema rígido con dos discos uniformes concéntricos conectados entre si (el eje y el imán cilíndrico), que experimentan fuerzas de fricción básicamente en el punto de unión del estator y el rotor (periferia del imán y apoyo del eje); esto se muestra en la Figura 22.



**Figura 22: Partes esenciales de un motor**

Teniendo en cuenta que el sistema rota sobre su eje de simetría, el momento de inercia es:

$$I = \frac{1}{2}Mr^2 + \frac{1}{2}M_e r_e^2 \quad (1.34)$$

donde:  $M$  y  $M_e$  representan las masas del imán y el eje respectivamente.

$r$  y  $r_e$  son el radio del imán y el eje respectivamente.

Empleando la segunda ley de Newton y observando el sistema (figura 22), tenemos:

$$\sum F_T = F - f_{EJE} - f_i = (M + M_e) a \quad (1.35)$$

donde: F representa la fuerza inducida por la interacción de la corriente y el campo magnético, cuya magnitud esta dada por  $F = iBr [N]$  como se estableció en la sección 1.6 ecuación 1.31.

$f_{EJE}$  y  $f_i$  representan las pérdidas por fricción de la máquina.

Reemplazando en la ecuación 1.35, obtenemos:

$$\sum F_T = iBr/2 - f_{EJE} - f_i = (M + M_e) a \quad (1.36)$$

Utilizando la forma rotacional de la segunda ley de Newton y teniendo en cuenta la rotación del sistema sobre el eje de simetría, tenemos:

$$\sum T = \frac{iBr^2}{2} - f_{EJE} * r_e - f_i * r = I\alpha \quad (1.37)$$

donde  $\alpha$  representa la aceleración angular del motor estando relacionada con la aceleración lineal por:

$$a = r\alpha \quad (1.38)$$

Reemplazando la ecuación 1.38 en la ecuación 1.36 y despejando  $f_{EJE}$  obtenemos:

$$f_{EJE} = \frac{iBr}{2} - f_i - (M + M_e)r\alpha \quad (1.39)$$

Reemplazando la ecuación 1.39 en la ecuación 1.37, encontramos que la velocidad angular del motor está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{iBr^2}{2} - \left( \frac{iBr}{2} - f_i - (M + M_e)r\alpha \right) * r_e - f_i * r &= I\alpha \\ \alpha = \frac{d\omega}{dt} &= \frac{iBr \left( \frac{r - r_e}{2} \right) - f_i(r - r_e)}{I - (M + M_e)r * r_e} \end{aligned} \quad (1.40)$$

Despreciando el radio del eje, la aceleración angular está dada por:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{iBr^2/2 - f_i r}{I} \quad (1.41)$$

Una vez calculada la aceleración angular del motor, es posible establecer la velocidad que alcanza en función del tiempo.

### 1.5.3 VELOCIDAD DEL MOTOR EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Tomando la ecuación diferencial, mostrada anteriormente, es posible determinar la velocidad y corriente del motor en función del tiempo.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{iBr^2/2 - f_i r}{I} \quad (1.42)$$

Del circuito equivalente del motor es claro que:

$$V - V_p = iR \quad i = \frac{V}{R} - \frac{r^2 B}{2R} \omega \quad (1.43)$$

Reemplazando la ecuación 1.43 en 1.42, tenemos:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Br^2}{2I} \left( \frac{V}{R} - \frac{r^2 B}{2R} \omega \right) - \frac{f_i r}{I} \quad (1.44)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{Br^2 V}{2I R} - \frac{r^4 B^2}{4RI} \omega - \frac{f_i r}{I} \quad (1.45)$$

Entonces es necesario resolver una ecuación diferencial de la forma:

$$\frac{dy}{dx} = -C_1 y + C_2 \quad (1.46)$$

Teniendo en cuenta la condición inicial  $y(0)=0$ , resolvemos la ecuación (1.46)

$$y = \frac{C_2}{C_1} (1 - e^{-C_1 x}) \quad (1.47)$$

Usando la ecuación (1.47), encontramos la velocidad del motor en función del tiempo:

$$C_1 = \frac{r^4 B^2}{4R I} \quad C_2 = \frac{Br^2 V}{2 I R} - \frac{f_i r}{I}$$

$$\omega = \left( \frac{2V}{r^2 B} - \frac{f_i}{r^2 B^2} * 4R \right) (1 - e^{-C_1 t}) \quad (1.48)$$

Dado que el motor se diseña para que las pérdidas por fricción sean mínimas y para que opere con campos magnéticos grandes, es posible aproximar la velocidad a:

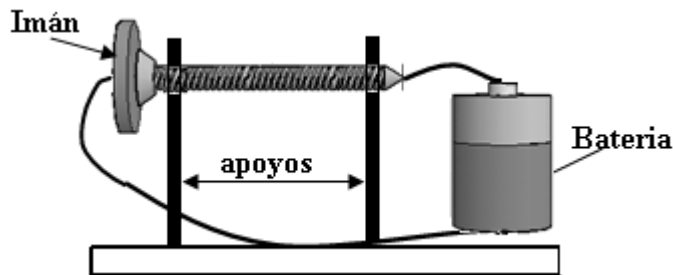
$$\omega = \frac{2V}{r^2 B} (1 - e^{-C_1 t}) \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (1.49)$$

De esta manera, se espera que la velocidad del motor crezca exponencialmente hasta alcanzar un máximo de  $\frac{2V}{r^2 B}$ , en un tiempo determinado por la resistencia del motor.

## 2 PROTOTIPO MOTOR UNIPOLAR

### 2.1 MODELO EXPERIMENTAL (MONTAJE)

Para desarrollar el prototipo del motor se evaluaron los distintos modelos presentados previamente (sección 1.3); ninguno de éstos resultó ser el adecuado, puesto que no permiten desacoplar la batería del motor (limitando el tipo de fuente que podría emplear), ni tampoco ofrecen la posibilidad de aprovechar el torque que está generando la máquina (estos modelos carecen de un eje fijo al cual ajustar la carga). De esta manera, se optó por modificar el motor colgado, construyéndolo en forma horizontal, con su eje firmemente acoplado al centro del imán y paralelo a la superficie como se observa en la Figura 23.



**Figura 23: Modificación del modelo colgado**

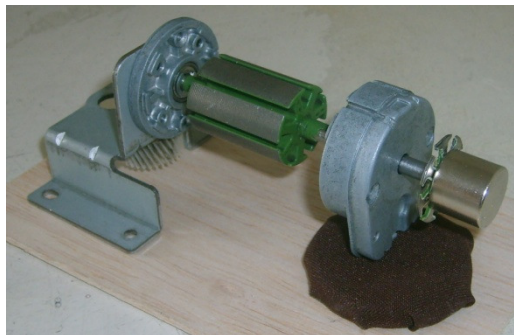
Sin embargo, la modificación propuesta conlleva a un mayor consumo de potencia producto de las pérdidas adicionales que este modelo acarrea, como lo son la fricción debida a los apoyos del eje (Figura 23) y la presentada ante cualquier error al realizar el acople mecánico entre el eje y el apoyo (leve desbalance que pueda presentarse). Considerando estas condiciones, se concluye que la construcción de cada una de las piezas del motor acarrearía mayores problemas, por lo cual se decidió emplear partes de un motor de corriente continua prefabricado cuyo diseño y construcción fue cuidadosamente realizado en una fábrica y por lo tanto sus pérdidas son mínimas; después de observar la gran variedad de motores de cc

que existen, se escogió un motor de rotor bobinado marca HITACHI de 24V y 21W (Figura 24):



**Figura 24: Motor de Corriente Continua HITACHI**

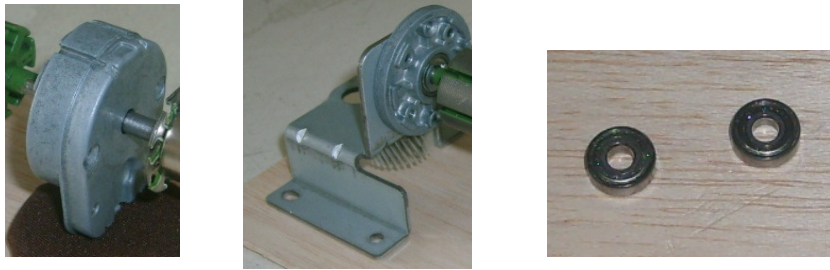
Así, se desarrolló el primer prototipo, que como se observa en la Figura 25, que conserva varias características del motor original.



**Figura 25: Prototipo**

Las partes fundamentales del modelo físico son:

**Chasis:** Es el encargado de dar apoyo y estabilidad al motor, para ello dispone de balineras como contacto entre rotor y estator, minimizando de esta forma las pérdidas por fricción (Figura 26).



**Figura 26: Soportes y Rodamientos**

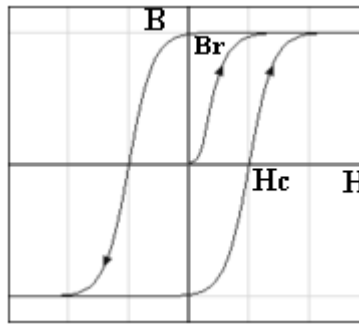
**Eje:** Es una de las partes más importantes puesto que es la unión entre el centro del imán y la batería; ésta parte está conformada por el rotor del motor original eliminando el devanado de campo alojado en el rotor.



**Figura 27: Eje empleado**

**El imán permanente:** es una parte fundamental del motor; crea y mantiene un campo magnético prácticamente invariante en el tiempo, como se observa al estudiar su curva de magnetización (Figura 28). Se caracteriza por un elevado punto de remanencia ( $B_r$ ) (máxima densidad de campo magnético que el imán puede producir por sí mismo) y una alta fuerza coercitiva ( $H_c$ ) (fuerza magneto-motriz necesaria para desmagnetizar el imán) que indica su resistencia a la des-magnetización.





**Figura 28: Ciclo de Histéresis típico de un Imán Permanente**

En el mercado se puede encontrar distintos tipos de imanes según el material empleado para su construcción. Imanes de ferrita, de aleaciones de Níquel y cobalto (ALNICO) y de tierras raras; estos últimos son extremadamente fuertes (fuerza residual entre 12800 y 14000 Gauss), en tamaños relativamente pequeños, pero son bastante frágiles a temperaturas superiores a 80°C. Existen dos tipos: los de Samario – Cobalto- Hierro y los de Neodimio-Hierro-Boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ).

Considerando los distintos tipos de imanes que existen, su precio, tamaño y energía remanente que puede ofrecer; se optó por uno de Neodimio ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) que al ser de tierras raras entrega el mayor rendimiento, con la ventaja que para un menor volumen ofrece las mismas características de uno de Samario-Cobalto (una densidad menor en un 13% que los de Samario-Cobalto).

El imán adquirido (Figura 29) tiene las siguientes características:

Forma : Cilíndrico.

Diámetro: 1.7mm

Altura: 1.5mm

Grado: 35

Temperatura máx. de operación: 80°C



**Figura 29: Imán de Neodimio**

## **2.2 PUESTA EN MARCHA DEL MOTOR**

Una vez construido el motor se intentó ponerlo en funcionamiento conectando una batería entre la periferia del imán y el eje del motor, como se observó en la Figura 2.1; en principio se esperaba poder alimentar este motor simplemente con una batería AA de 1.5V 2 A-h, pero las pérdidas resultaron ser demasiado grandes por lo que la capacidad de corriente de la batería no fue suficiente para producir movimiento. Entonces se intentó con una batería de moto de 12V, 7 A-h , que una vez fue conectada al motor permitió el movimiento del rotor. Sin embargo, el aumento en la potencia de la batería deja al descubierto problemas que antes eran despreciables:

## **2.3 PROBLEMAS QUE ACARREA EL NUEVO DISEÑO**

**2.3.1 Rozamiento entre el rotor y estator del Motor:** La fricción que se presenta en los cables que hacen contacto con el rotor genera chispas de gran intensidad que hacen peligrosa su implementación; a su vez dañan la cubierta de plata del imán, rayándola, de manera que pierde su capacidad para conducir corriente. Esto lleva irremediablemente a la falla del motor. Ante este problema fue necesario el uso de una escobilla que garantice un buen contacto eléctrico entre el rotor y el estator, puesto que un adecuado contacto es fundamental en esta aplicación (la elevada cantidad de corriente supone una caída considerable de voltaje en este dispositivo). A continuación se estudia el tema a fondo,

determinando las características y factores que permiten una buena conducción eléctrica.

**2.3.1.1 Características del contacto eléctrico entre materiales:** para establecer un buen contacto eléctrico es necesario tener en cuenta tres parámetros: El área superficial aparente, el área de carga y el área conductora entre las dos superficies (rotor y escobilla)<sup>30</sup>.

**2.3.1.1.1 Área superficial aparente (Aa):** se refiere al área de contacto, apreciable a simple vista, sin tener en cuenta las irregularidades de los materiales<sup>31</sup>.

**2.3.1.1.2 Área de Carga (Ab):** es el área real en contacto entre los materiales; depende del grado de rugosidad de los mismos, dado que la presencia de irregularidades ocasiona que el área en contacto sea mucho menor que la que se visualiza, limitándose a sus protuberancias. También depende de la presión mecánica aplicada a los materiales, dado que produce deformación plástica de uno o ambos materiales<sup>32</sup>.

**2.3.1.1.3 Área conductora (Ac):** es el área de conducción eléctrica y corresponde a una fracción del área de carga (Ab), puesto que entre los materiales pueden presentarse distintos tipos de contacto: Contactos metálico, cuasi-metálico y con capas multi-moleculares ajenas<sup>33</sup>.

---

<sup>30</sup> BUKOW JOHN, George. A Design Study of a Small homopolar motor (1958); p 5

<sup>31</sup> *Ibíd*; p 5

<sup>32</sup> *Ibíd*; p 5

<sup>33</sup> BUKOW JOHN, George. *op. cit.*, p.6

2.3.1.1.3.1 Contacto Metálico: Un contacto es metálico cuando ninguna capa superficial ajena a los materiales interviene, de manera que hay un contacto directo entre ambos materiales, produciendo un excelente contacto eléctrico, dado que no hay una resistencia de transición entre ellas<sup>34</sup>.

2.3.1.1.3.2 Cuasi-metálico: Ocurre cuando existe una delgada capa ajena entre los materiales (un grosor  $< 30$  angstroms), sin embargo este elemento no puede ser tratado simplemente como una resistencia entre dos electrodos puesto que dado el grosor de la capa, se presenta el efecto tunel, el cual hace que la resistencia de transición entre los materiales sea casi despreciable<sup>35</sup>.

✓ Efecto Túnel: Es un fenómeno mecánico-cuántico que se presenta cuando una partícula sin tener la suficiente energía para superar una barrera de potencial, la atraviesa. Este fenómeno ocurre por la dualidad de la materia, ya que la partícula al ser también una onda y al chocar con la barrera de potencial transmite parte de la onda a la barrera de potencial; si ésta es “delgada”, entonces el electrón tiene una probabilidad aunque pequeña de encontrarse al otro lado de la barrera<sup>36</sup>. El efecto túnel ha sido comprobado en numerosos experimentos y se observa cuando las propiedades conductivas de una capa delgada de un material como el óxido de cobre son mayores de las esperadas, puesto que aunque tiene una resistividad definida de acuerdo a sus características; experimentalmente exhibe una resistencia considerablemente más pequeña que la teórica<sup>37</sup>.

---

<sup>34</sup> Ibíd. p 6

<sup>35</sup> Ibíd. p 6

<sup>36</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_túnel](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_túnel)

<sup>37</sup> BUKOW JOHN, George. op. cit., p.11

En el motor, la barrera de potencial la constituye la separación entre ambas superficies debido a la presencia de un material extraño (contacto cuasi-metálico), a su vez, el efecto túnel ocurre tanto en un material como en el otro; por consiguiente, la cantidad de electrones que pasa de un lado o del otro depende fundamentalmente del nivel de fermi (máximo nivel de energía en el que encontramos electrones) de los materiales, si ambos tuviesen el mismo nivel de fermi entonces no se observaría corriente, puesto que los electrones de ambos materiales tienen las mismas probabilidades de salirse de la barrera (pasar al otro material). Sin embargo esto cambia cuando hay una diferencia de potencial entre ellos, el nivel de fermi entonces baja para el material mas positivo (que posee menos electrones), disminuyendo así las posibilidades de que ocurra efecto túnel por parte de este material, de esta manera se establece un flujo continuo de electrones del material con menor potencial al de mayor.

2.3.1.1.3.3 Con capas multi-moleculares ajenas: Se presenta cuando se encuentra una capa ajena entre los materiales lo suficientemente ancha como para que el efecto túnel no pueda ocurrir; de esta manera, la conducción eléctrica es nula y la capa funciona como un aislante<sup>38</sup>. Para romperla y permitir la conducción eléctrica se requiere de un proceso conocido como “fritting” (freir)<sup>39</sup>; éste consiste básicamente en incrementar la tensión entre los contactos, produciendo por consecuencia un campo eléctrico que sí es lo suficientemente grande (del orden de  $10^6$  a  $10^7$  V/cm), forma un pequeño canal conductor a través de la capa, permitiendo el flujo de la corriente y produciendo a su vez, calentamiento el cual funde uno o ambos materiales; el metal líquido creado es conducido entonces, por fuerzas electrostáticas al canal, formando un puente entre los contactos que continúa creciendo conforme más material llega a éste; de

---

<sup>38</sup> *Ibíd.* p 6.

<sup>39</sup> BUKOW JOHN, George. *op. cit.*, p.7

manera que la densidad de carga aumenta. Esto se repite hasta que el puente es capaz de llevar la corriente en estado sólido.

Aunque este canal ha sido observado experimentalmente y su existencia esta comprobada; aún se desconoce los mecanismos de su formación.

Dependiendo del grosor de la capa aislante, se presentan dos tipos de procesos: A-fritting donde la tensión necesaria para que se produzca conducción llega a casi fundir uno de los contactos, en este proceso, las caídas que se observan son del orden de 0.3 a 0.6 V; cuando el ancho de la capa no es muy grande (generalmente 50 angstroms), la tensión necesaria para producir la conducción es mas pequeña y se conoce como B-fritting; las caídas de tensión son del orden de 0.1 a 0.2 V.

La escobilla óptima deberá entonces garantizar máxima área de conducción con un contacto metálico o semi-metálico. A continuación se analizará los distintos tipos con el fin de seleccionar la mejor.

**2.3.1.2 Selección de la escobilla:** Para la selección de un adecuado elemento, se inició el estudio, analizando las soluciones adoptadas anteriormente en distintas máquinas:

**2.3.1.2.1 Escobillas sólidas:** son las más comunes y de general aplicación en la mayoría de máquinas eléctricas; generalmente son de carbón puesto que tiene la propiedad de desprender su última capa, esto reduce considerablemente la fricción entre los materiales y además no daña la superficie sobre el que se frota; ofrece un buen contacto eléctrico, sin embargo al ser un sólido, su área se ve reducida por las irregularidades y a su vez es posible encontrar capas moleculares extrañas, que impiden parcial o totalmente el flujo de la corriente.

La implementación de una escobilla de carbón para el motor requeriría del uso de una de gran tamaño que garantice un adecuado funcionamiento sin llevar a la destrucción de la misma, ésta resultaría siendo excesiva para el rotor (imán conductor) que mide 17mm de diámetro y a su vez sería necesario estudiar las pérdidas en el prototipo puesto que el carbon no es un buen conductor de la electricidad y al trabajar con grandes cantidades de corriente la caída de tensión en este dispositivo será considerable, afectando así el consumo de potencia.

De manera que se propuso emplear otro tipo de material como escobilla. El material seleccionado fue alambre dulce enrollandolo en su superficie como se observa en la Figura 30, que pese a no ser el material ideal para hacer contacto con el cable, genera pocas chispas, dado que se establece la ruta que recorre el cable que une el rotor (imán) y la batería.



**Figura 30: Imán recubierto**

El uso de este dispositivo mejoró enormemente el funcionamiento del motor, pero aún se presentaron pequeñas chispas que lo hacen poco seguro.

*2.3.1.2.2 Escobillas de metal líquido:* Las condiciones de trabajo a las que sería sometida la escobilla, limitaron el uso de soluciones convencionales. En busca de un material que actuara como contacto, se examinaron trabajos previos sobre máquinas homopolares, en los cuales se adoptó el uso del mercurio como el medio de conducción <sup>40 41 42 43 44</sup>.

---

<sup>40</sup> MONTGOMERY H. Unipolar Induction: A neglected topic in the teaching of electromagnetism. En: Eur. J. Phys. Vol **20** (1999); p 271

El mercurio es un metal líquido de color plateado, inoloro y ligeramente volátil, presente en diversas formas, pesado (con peso atómico 200.59 g/mol) y ampliamente utilizado en la industria; sus propiedades se presentan a continuación (Tablas 1 y 2):

**Tabla 1: Propiedades físicas del mercurio.**

PROPIEDADES FÍSICAS			
Punto de fusión:	-38.87 C		
Punto de ebullición:	357.72 C		
Densidad (g/ml) :	13.534 (25 C)	13.546 (20 C)	14.43 (-38.87C)
Calor de vaporización:	14.652 Kcal/mol (25 C)		
Tensión superficial:	484 dinas/cm (25 C)		
Resistividad eléctrica:	95.76 $\mu\Omega$ cm (20 C)		
Viscosidad (20 C):	1.55 mPa s		

(Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO, Hoja de seguridad XXI mercurio y sales de mercurio).

**Tabla 2: Propiedades químicas del mercurio.**

PROPIEDADES QUÍMICAS
Oxidación: No se oxida a temperatura ambiente en estado puro cerca del punto de ebullición si lo hace, lentamente formando HgO.
Forma aleaciones con muchos metales, excepto hierro (solo a temperaturas muy altas) y con azufre se combina a temperatura ambiente.

(Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO, Hoja de seguridad XXI mercurio y sales de mercurio).

<sup>41</sup> LÓPEZ NACIR, Diana y ACUÑA Guillermo Pedro. Motor-Generador Unipolar; p 2

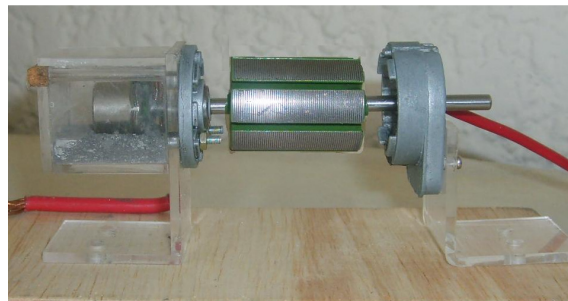
<sup>42</sup> VALONE, Thomas F. The Homopolar HandBook a Definitive Guide to Faraday Disk and N-Machine Technologies; p 14 – 16

<sup>43</sup> VALONE, Thomas F. Armature Reaction in the Homopolar Generator; p 95

<sup>44</sup> BUKOW JOHN, George. op. cit., p.22

El contacto eléctrico con otros materiales tiende a ser cuasi-metálico o metálico puesto que no se oxida fácilmente y a su vez al ser un líquido se amolda a una superficie rugosa de tal manera que la diferencia entre el área superficial aparente y el de carga es prácticamente despreciable, eliminando el riesgo de cualquier chispa, sin embargo, la aleación con otros metales es un problema que más tarde se tratará.

Observando las características del mercurio se optó por modificar el modelo del motor, de esta manera, se rediseñó, adicionándole un recipiente de plástico encargado de mantener éste en contacto con la periferia del imán. El nuevo prototipo se presenta a continuación:

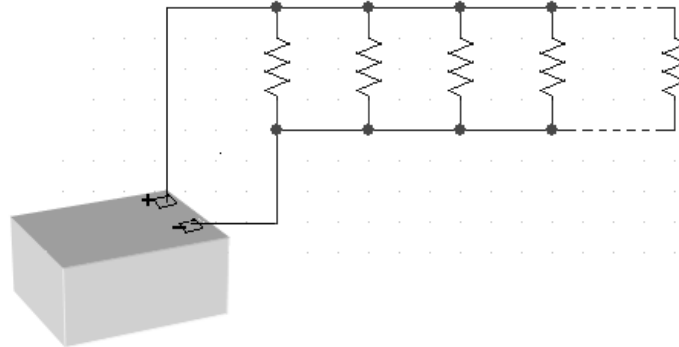


**Figura 31: Modelo con escobillas de mercurio**

### **2.3.2 Corriente de Trabajo del Motor:**

Representa un problema puesto que es demasiado elevada (mayor de 10A) y sobrepasa los niveles normales en los que opera la mayoría de dispositivos. La tarea de encontrar una “fuente de corriente” que pueda mantener este nivel constante en el tiempo y a su vez ofrezca un amplio rango de niveles de corriente es difícil; comúnmente se utilizan BJTs y potenciómetros o trimmers, que en este rango de corriente son de gran tamaño y/o requieren de potenciales elevados para funcionar (mayores de 30V); además sería necesario un proceso de rectificación y un transformador, incrementando enormemente el costo de este tipo de fuente; Así,

en vez de emplear la red como fuente de energía, se empleó una batería y un banco de resistencias que conectadas en paralelo permiten aumentar cada vez más la corriente que circulará por el motor y de esta forma es posible analizar su comportamiento. A continuación se muestra el esquema del dispositivo.



**Figura 32 Fuente de Alimentación del Motor**

El sistema de alimentación cuenta con los siguientes componentes:

**2.3.2.1. Banco de Resistencias:** como se observa en la Figura 32 la variación de la corriente se realizará a partir del paralelo de varias resistencias, para simplificar los cálculos se optó por seleccionar resistencias del mismo valor y de las de mayor potencia disponible en el mercado (20W), puesto que al soportar mayor corriente se necesita un menor número de éstas. Con la información de la potencia y la tensión de la fuente obtenemos un valor aproximado de la resistencia que se debe seleccionar; aplicando la ley de Ohm obtenemos la siguiente relación:

$$P = V * I = \frac{V^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V^2}{P} \quad (2.1)$$

$$\frac{J}{s} = \left[ \frac{J}{C} \right] * \left[ \frac{C}{s} \right]$$

Reemplazando en la ecuación 2.1 obtenemos que el valor de la resistencia que se debe adquirir.

$$R = \frac{12^2}{20} = 7.2\Omega \quad (2.2)$$

Para el montaje se decidió comprar 40 resistencias de  $8.2\Omega$  puesto que es el valor más cercano que ofrece el mercado, de esta manera, se obtuvo un amplio rango de corriente que idealmente esta dado por:

$$\frac{12}{8.2} A \leq I_{MOTOR} \leq 40 * \frac{12}{8.2} A \quad (2.3)$$

$$1.463A \leq I_{MOTOR} \leq 58.2A \quad (2.4)$$

*2.3.2.1.1 Montaje de las Resistencias:* para la construcción se empleó una baquelita de 20X20 cm y se acomodaron las resistencias como se muestra en la Figura 33:

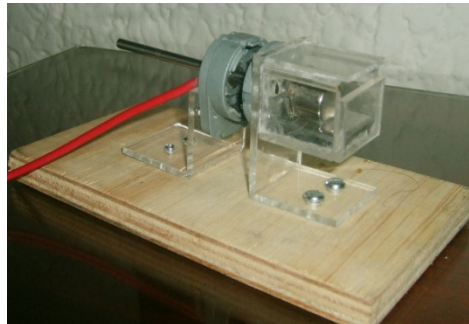


**Figura 33: Banco de Resistencias en paralelo (  $8.2\Omega$  y 20W), caras: anterior y posterior**

En ésta se observa que uno de los extremos de todas las resistencias se encuentra fijo y forman un mismo nodo mientras que el otro está libre, listo para ser conectado y ser parte de la resistencia equivalente; aumentando así el número de resistencias en paralelo y la corriente que circulará por el circuito. Con esta configuración la resistencia vista por la fuente puede ser variada sobre todo el rango disponible.

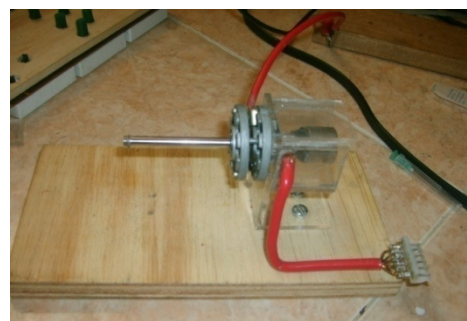
**2.3.2.2 Medida de la corriente de trabajo del motor:** dados los altos valores de corriente que se manejan, es difícil encontrar dispositivos de medida que permitan sensor un amplio rango; de manera que se debe medir de forma indirecta, determinando mediante un multímetro la diferencia de potencial entre los bornes de la resistencia equivalente y a partir de la ley de Ohm obtener la corriente que circula en el motor.

**2.3.3 Carga del motor:** Aunque en el previo modelo se corrigieron las pérdidas por fricción adicionales al modificar el modelo colgado; el comportamiento del motor distó de ser eficiente, por lo que se consideró simplificarlo retirando el núcleo laminado del motor original (Figura 34), esto redujo el peso y facilitó el arranque del motor, la eficiencia mejoró obteniéndose hasta cuatro veces la velocidad alcanzada, para la misma corriente.



**Figura 34: Prototipo del motor**

Unos ajustes más en la parte mecánica nos conduce a considerar un solo apoyo (Figura 35)



**Figura 35: Nuevo prototipo del motor**

### 3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO

#### 3.1 SISTEMA DE MEDICIÓN

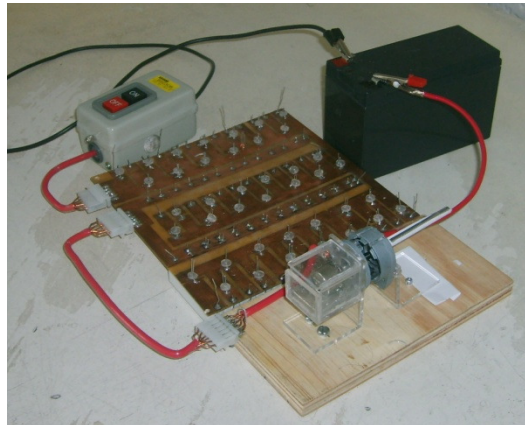
Para el desarrollo de las pruebas fue necesario construir un sistema que permita variar la corriente que circula por el motor, éste como se explicó anteriormente se realizó a partir de una batería conectada en serie con un banco de resistencias en paralelo que puede variar de 0 a 40 (Figura 31(a)).

Para hacer que una resistencia pertenezca al banco se presenta un cambio de diferentes materiales (cobre de la baquelita, el cable que las une y el alambre de la misma), estos representan una caída adicional de tensión y por lo tanto, al conectar una nueva resistencia hay que agregar el aporte del contacto mecánico; de esta manera debe hacerse una estimación de la resistencia real que se adiciona al circuito; para ello se alimentó el sistema con 5.14V y se midió la corriente cuando se añadan resistencias al sistema, con esta información y la ecuación  $R = \frac{V_{suministrado}}{I} * Num.resistencias$  se calculó aproximadamente el valor de las resistencias en paralelo que idealmente se estarían uniendo. En la tabla 3 se muestran los resultados.

**Tabla 3: Medida de la corriente al adicionar nuevas resistencias en paralelo.**

Datos tomados		Calculado
No de Resistencias(n)	Corriente (I) [A]	Resistencia R[Ω]
1	0.548	9.380
2	1.008	10.198
3	1.87	8.246
4	2.283	9.006
5	2.655	9.680
6	3.05	10.111
7	3.408	10.558
Valor promedio		9.597

El sistema empleado para realizar las mediciones se muestra la Figura 36, por seguridad y comodidad se adiciona un switch con capacidad de alta potencia (7.5kW, 500V y 30A), que es el encargado de aislar la batería.



**Figura 36: Sistema completo**

Otros elementos utilizados para llevar a cabo los ensayos son un multímetro con precisión de 3 cifras decimales y un tacómetro óptico DELORENZO. En la tabla 4 se muestran sus características.

**Tabla 4: Características del Tacómetro**

PRECISIÓN (rpm)		
0	999.9	+/- 0.1
1000	20000	+/- 1
20000	100000	+/- 0.005
Rango Temperatura	0 – 45 °C	
Rango	0 - 100000 rpm	

### 3.2 PRUEBAS REALIZADAS

Una vez caracterizado el sistema de medición, se procedió a establecer las características del motor, para ello se diseñaron dos tipos de ensayos, uno en el que se mide la velocidad del motor conforme se varían otros parámetros como la corriente y otro donde se mide el torque en un intervalo de tiempo.

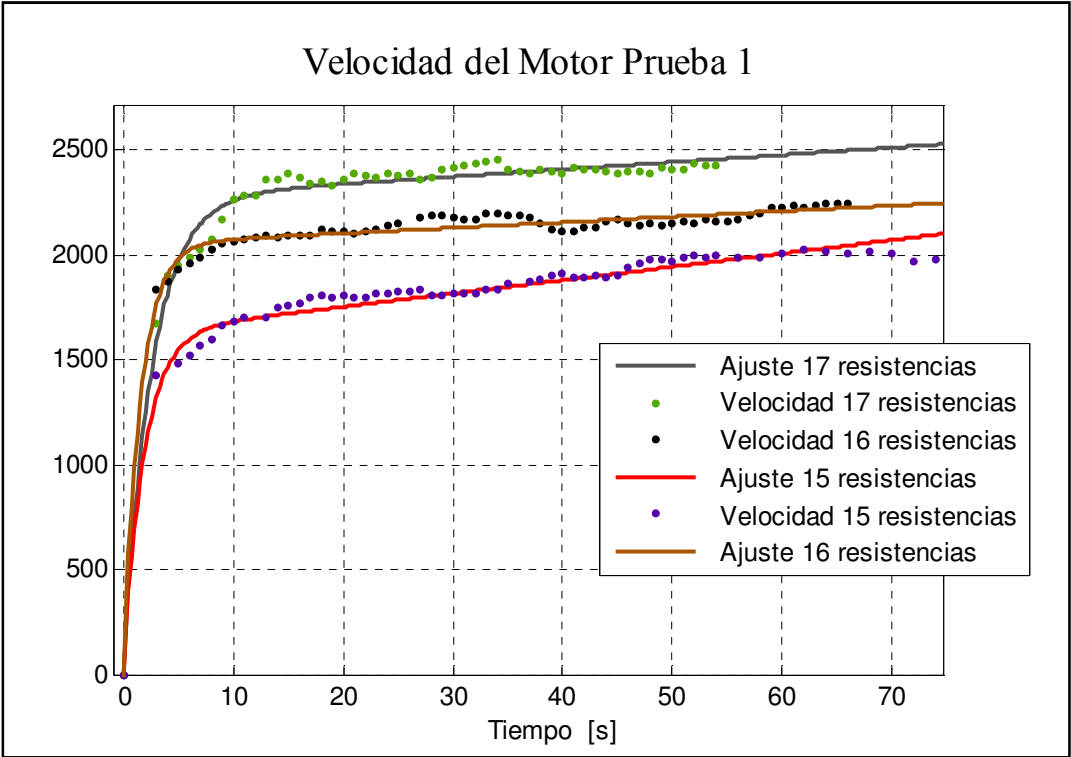
### 3.2.1 Medida de la velocidad del motor

Se realizó conectando el motor en serie al banco de resistencias, al switch y a la batería; se ubicó un voltímetro entre los extremos del banco para medir indirectamente la corriente de trabajo del motor (a partir de la tensión en los extremos de la resistencia equivalente y el número de resistencias en paralelo usadas en cada prueba) y un tacómetro para obtener la velocidad de éste al detectar el paso de una tira de cartón que se adhirió a su eje (figura 37). Manteniendo constante la corriente en el motor, se registraron los valores suministrados por el tacómetro y el multímetro cada segundo; con esta información se obtuvieron los valores de velocidad y corriente del motor en función del tiempo.

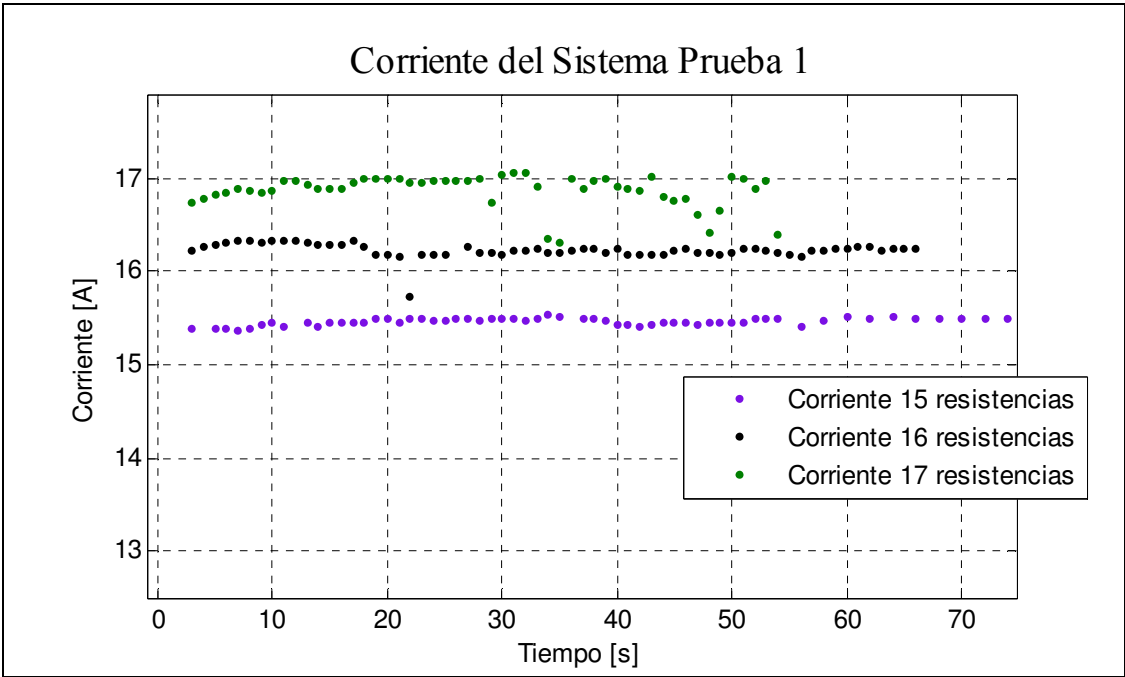


**Figura 37: Sistema para medir la velocidad**

Se realizaron varias mediciones con diferente número de resistencias en paralelo y un intervalo de tiempo de aproximadamente un minuto, con esto se construyeron las curvas de velocidad y corriente en función del tiempo; se evaluó la variación de los resultados al repetir la prueba en días diferentes (diferentes condiciones de la escobilla) y empleando MATLAB se obtuvo la ecuación de la curva que mejor se ajusta a los datos. Los resultados se presentan a continuación:



**Figura 38: Velocidad registrada primera prueba**



**Figura 39: Corriente registrada en la primera prueba**

Despues de cargar la bateria, se realizó la siguiente prueba:

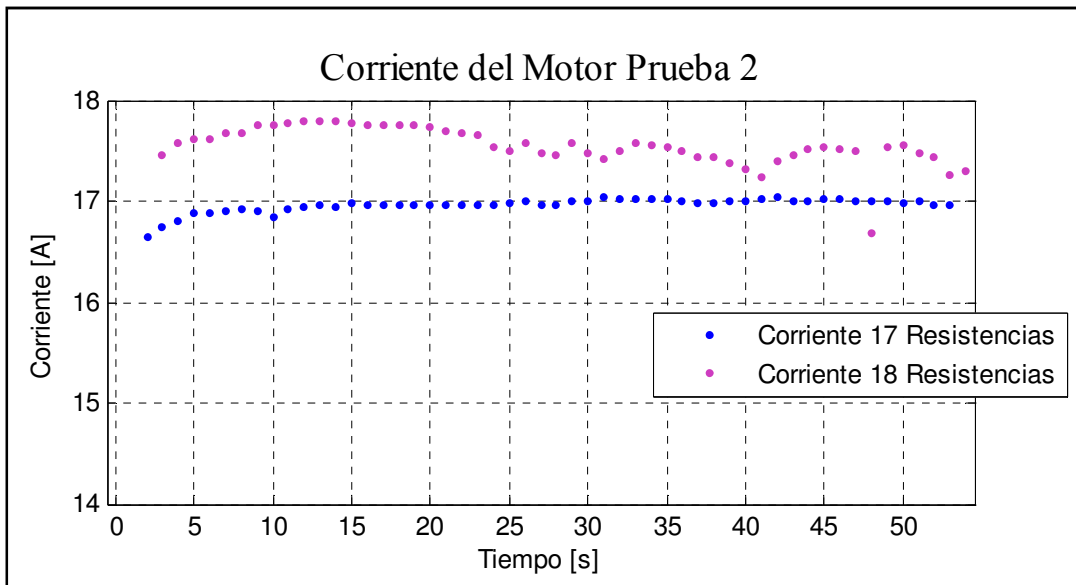


Figura 40: Corriente registrada prueba 2

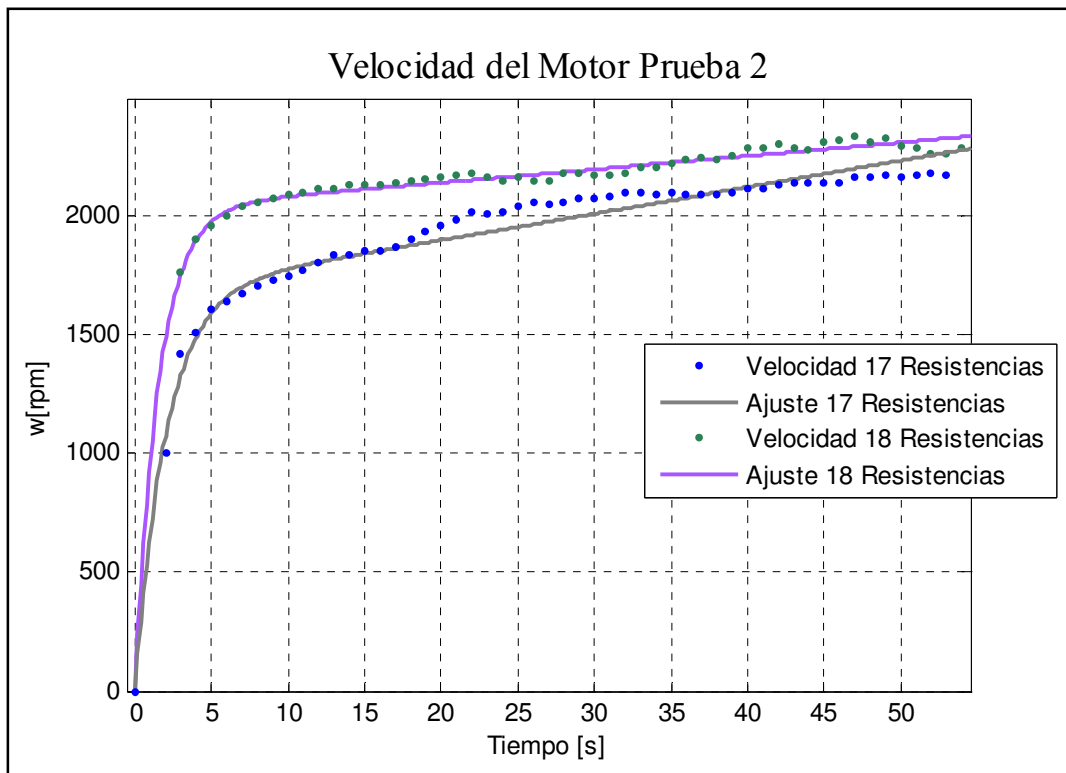


Figura 41: Velocidad registrada prueba 2

Prueba 3.

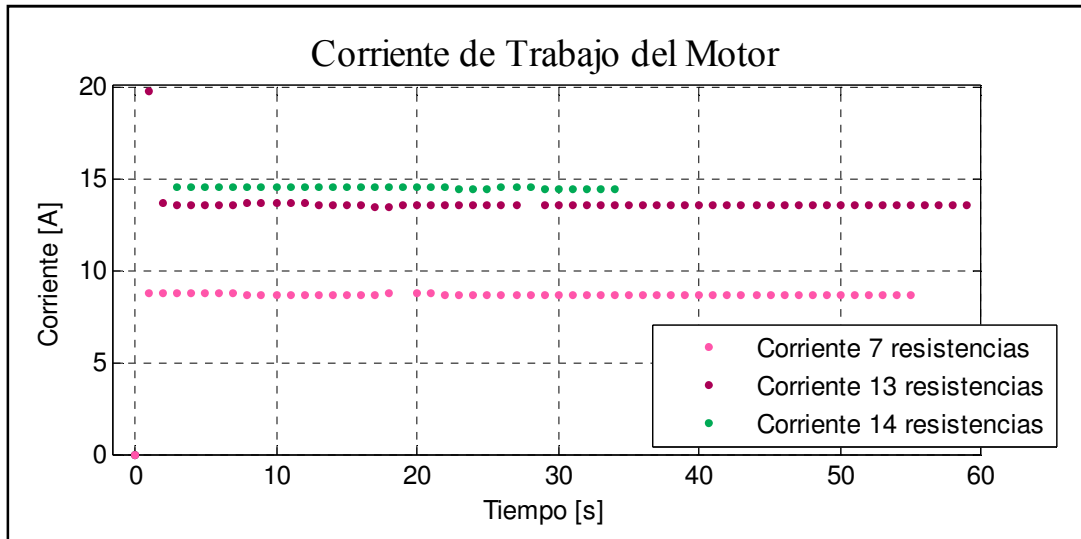


Figura 42: Corriente registrada prueba 3

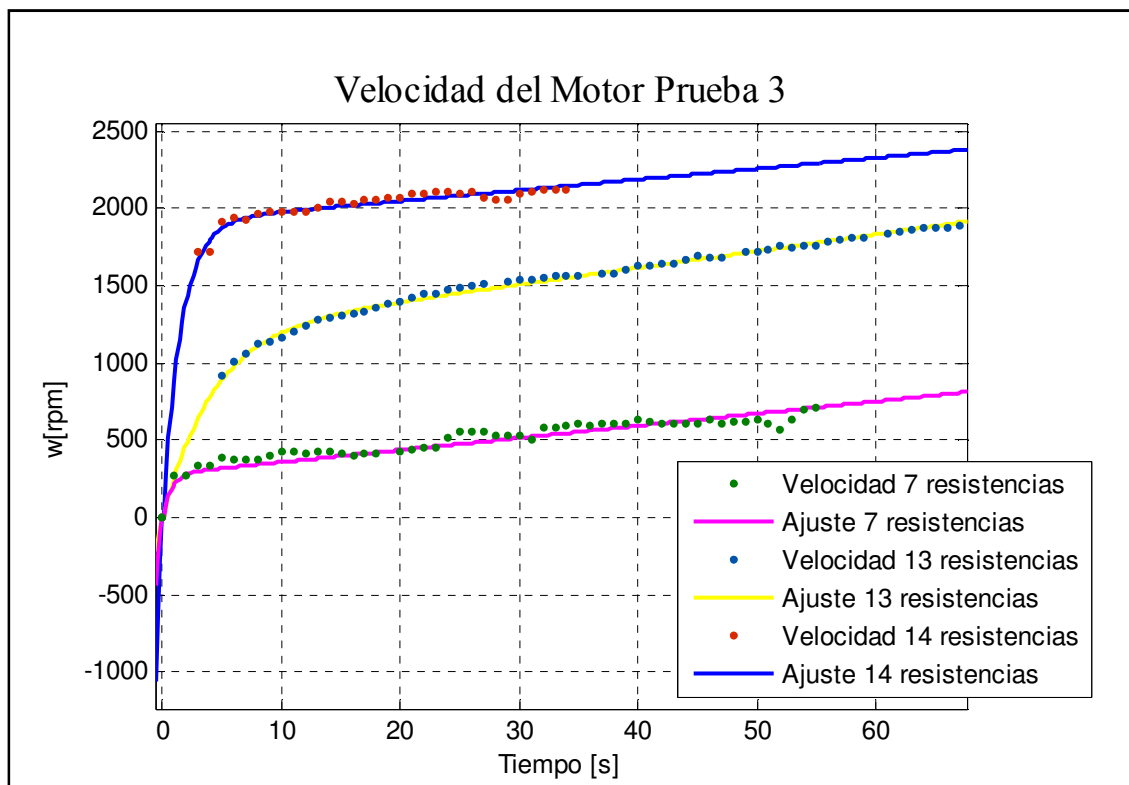


Figura 43: Velocidad registrada prueba 3

Con esta información es posible examinar varias características del motor:

### 3.2.1.1 Eficiencia del Motor

La eficiencia en estos motores radica en el control de las pérdidas resistivas, se deben mantener al mínimo dado que las corrientes de trabajo de este tipo de motores son muy altas; analizado el diseño, vemos que hay que controlar las pérdidas entre las dos escobillas (el rodamiento y el mercurio). La caída de tensión en el rodamiento es constante y depende del material del que está hecho, mientras que en la escobilla de mercurio la resistencia interna dependerá de las características del contacto eléctrico, en lo posible se busca que sea metálico por lo que ambas superficies deben estar limpias.

Al realizar las pruebas en el motor, se observó:

- ❖ Conforme se aumenta el tiempo de trabajo y reposo del motor, el mercurio perdía brillo y se formaba una capa de óxido en la superficie de éste.
- ❖ Se presentó un incremento de residuos a medida que el motor se mantuvo en reposo.
- ❖ Durante la operación del motor esta capa es retirada y el mercurio recupera su brillo original.
- ❖ Si el mercurio está sucio, el motor puede dejar de operar para un número de resistencias en paralelo en el que normalmente lo haría, pero si se aumenta el número de resistencias en paralelo hasta que se produzca el arranque y posteriormente se baja esta cantidad de resistencias, el motor sigue operando sin problemas.
- ❖ Cambio de color de la superficie del imán y del cable de cobre.

- ❖ Al repetir las pruebas para un mismo número de resistencias, se obtienen curvas de velocidad diferentes. Se mantuvo 17 resistencias en paralelo y se midió la velocidad en un intervalo de tiempo (Figura 38), una vez se volvió a cargar la batería, se repitió el ensayo obteniendo la curva de velocidad de la Figura 41; si comparamos ambas curvas se observa una caída considerable en la velocidad de la primera a la segunda prueba, a los 10 segundos de operación la velocidad alcanzada por el motor en la prueba 1 fue de 2288 rpm mientras que en la prueba 2 fue apenas de 1746 rpm.

Las anteriores observaciones nos indican que se está produciendo una reacción química entre el mercurio y los elementos en contacto (cable e imán); analizando las propiedades químicas del mercurio (sección 2.3.1.2) se encontró que es un material que forma aleaciones con muchos metales, en este caso se presume reacciona con la superficie del imán la cual es de plata y a su vez con el cobre del cable. De esta manera es posible explicar los resultados anteriores:

- ❖ El cambio de color y el hecho de que la capa observada creciera conforme se pone en funcionamiento el motor indican una reacción química.
- ❖ Conforme se incrementa el tiempo de trabajo del motor, el mercurio se ensucia cada vez más; puesto que acompañado al trabajo del motor se produce un incremento en su temperatura que actúa como catalizador; de manera que se requerirá cada vez mayor corriente para iniciar y mantener el movimiento aumentando así las pérdidas y el calentamiento en el motor.
- ❖ La pérdida en la eficiencia del motor se presenta dado que existe una capa de óxido entre el mercurio y el imán, el contacto eléctrico entre estos elementos pasa de ser metálico a cuasi-metálico (sección 2.3.1.1), de manera que la conducción se produce ahora por efecto túnel y la corriente que circula por el

sistema es menor que en el caso anterior; esto implica una mayor resistencia interna del dispositivo. Sin embargo, una vez se produce el arranque, la capa de oxido es desplazada a los lados; el contacto vuelve a ser metálico en algunas zonas; su resistencia es mas pequeña y por ende una mayor cantidad de electrones pueden circular por el sistema; ésto induce una mayor fem, que se traduce en mayor velocidad del motor.

### 3.2.1.2 Velocidad del Motor en función del tiempo

Como se puede observar en las figuras 38, 41 y 43 una vez el circuito es conectado y la corriente es suficiente para mover el motor se produce un crecimiento progresivo de su velocidad en pocos segundos. Teniendo en cuenta el modelo planteado en la sección 1.5, para una corriente constante la velocidad del motor en función del tiempo está dada por la siguiente relación:

$$w = \left( \frac{2V}{r^2 B} - \frac{f_i}{r^2 B^2} * 4R \right) (1 - e^{-C_1 t}) \quad (1.48)$$

Con esta ecuación en mente se realizó una interpolación de los datos, empleando la herramienta “curve fitting tool” de Matlab 7.1 se encontró que la ecuación más cercana a la ideal que se ajusta los datos es de la forma:

$$f(x) = (a * e^{bx} - c) * (1 - e^{-dx}) \quad (1.50)$$

Esta ecuación fue tomada por la interfaz como el modelo general y se procedió a realizar la interpolación de cada uno de los datos con un limite de confianza del 95%. La curva de ajuste obtenida, puede observarse en las figuras 38, 41 y 43. Los coeficientes y la bondad del ajuste se presentan a continuación (Tabla 5.):

**Tabla 5. Resultados de la interpolación.**

Primera Prueba:

Para 15 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 4.268e+004 (-3.32e+006, 3.406e+006)	SSE: 1.071e+005
b = 0.0001482 (-0.01175, 0.01146)	R-square: 0.9761
c = 4.105e+004 (-3.404e+006, 3.322e+006)	Adjusted R-square: 0.9748
d = 0.5366 (0.444, 0.6292)	RMSE: 43.73
Para 16 Resistencias	
Coeficientes (con 95% limite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 3945 (-1.52e+005, 1.598e+005)	SSE: 6.86e+004
b = 0.0006543 (-0.02591, 0.0246)	R-square: 0.986
c = 1892 (-1.578e+005, 1.54e+005)	Adjusted R-square: 0.9853
d = 0.6378 (0.5651, 0.7106)	RMSE: 33.81
Para 17 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 1.276e+004 (-2.776e+006, 2.801e+006)	SSE: 1.135e+005
b = 0.0002683 (-0.0584, 0.05786)	R-square: 0.9828
c = 1.049e+004 (-2.799e+006, 2.778e+006)	Adjusted R-square: 0.9818
d = 0.3906 (0.3445, 0.4367)	RMSE: 48.14

Segunda Prueba:

Para 17 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 3.887e+004 (-2.487e+006, 2.565e+006)	SSE: 1.373e+005
b = 0.0002842 (-0.0186, 0.01803)	R-square: 0.9789
c = 3.719e+004 (-2.563e+006, 2.489e+006)	Adjusted R-square: 0.9777
d = 0.4995 (0.4215, 0.5775)	RMSE: 52.94
Para 18 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 8935 (-2.142e+005, 2.321e+005)	SSE: 2.89e+004
b = 0.0006171 (-0.01574, 0.0145)	R-square: 0.9552
c = 6906 (-2.301e+005, 2.162e+005)	Adjusted R-square: 0.9524
d = 0.6465 (0.5875, 0.7056)	RMSE: 24.54

Tercera Prueba:

Para 7 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 7.179e+004 (-9.717e+006, 9.86e+006)	SSE: 9.619e+004
b = 0.0001091 (-0.01494, 0.01472)	R-square: 0.895
c = 7.151e+004 (-9.86e+006, 9.717e+006)	Adjusted R-square: 0.8888
d = 1.423 (0.1368, 2.71)	RMSE: 43.43
Para 13 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 1.268e+004 (-6.415e+004, 8.952e+004)	SSE: 1.661e+004
b = 0.0008186 (-0.005611, 0.003974)	R-square: 0.9971

c = 1.149e+004 (-8.836e+004, 6.539e+004) d = 0.252 (0.2315, 0.2726)	Adjusted R-square: 0.997 RMSE: 17.22
Para 14 Resistencias	
Coeficientes (con 95% límite de confianza):	Bondad del Ajuste:
a = 1.334e+004 (-1.636e+006, 1.663e+006) b = 0.0005131 (-0.06327, 0.06224) c = 1.143e+004 (-1.661e+006, 1.638e+006) d = 0.6613 (0.5511, 0.7716)	SSE: 2.933e+004 R-square: 0.9932 Adjusted R-square: 0.9925 RMSE: 31.8

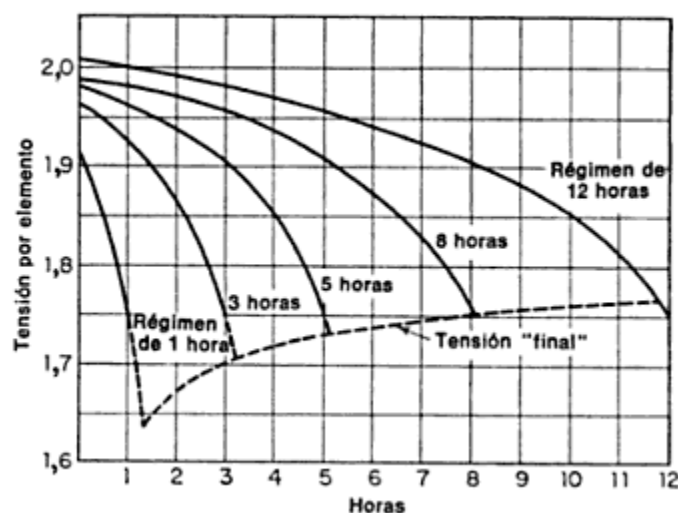
El resultado de la interpolación, nos muestra que la velocidad del motor se puede modelar mediante la ecuación 1.48, puesto que el coeficiente b de la ecuación 1.50 es casi nulo (del orden de  $10^{-4}$ ) en todas las pruebas. Esta leve diferencia entre las ecuaciones indica que existen parámetros que están afectando al motor que no se tuvieron en cuenta en el modelo teórico.

Comparando la ecuación 1.48 con la ecuación 1.50 vemos que para que sean equivalentes se debe cumplir la siguiente relación:

$$a * e^{bx} = \frac{2V}{Br^2}$$

Por lo tanto, uno de los coeficientes del término  $\frac{2V}{Br^2}$  presenta un leve crecimiento exponencial, dado que el radio del imán (r) y el campo magnético (B) son constantes entonces lo que varía es la tensión de la batería. A continuación se analiza el comportamiento de la batería, conforme es sometida a un periodo de trabajo.

**3.2.1.2.1 Características de descarga de la Batería:** Cuando la batería se conecta al circuito, se produce una caída inmediata de la tensión en sus bornes puesto que cada uno de sus acumuladores tienen una resistencia interna que representa una pérdida una vez se cierra el circuito; de esta manera, la tensión que entrega depende de que tanta corriente deba suministrarse; es decir varía dependiendo del régimen de descarga, entre mayor sea la corriente de trabajo, mayor será la pérdida en la resistencia interna de la batería; por lo que se presentará una tensión inicial mas pequeña, así como también una descarga más rápida de los elementos acumuladores como se observa en la Figura 44. Una vez la batería comienza a descargarse, la tensión disminuye suavemente durante el 70 u 80% del periodo de descarga y luego cae bruscamente hasta el valor de tensión final (punto a partir del cual la batería deja de ser eficaz) <sup>45</sup>.

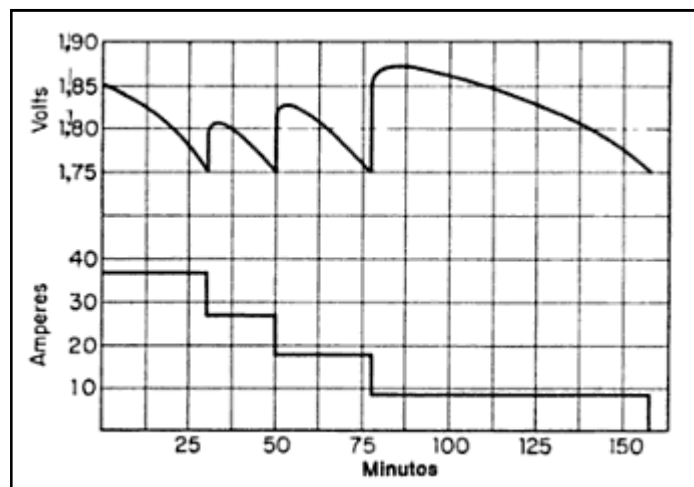


**Figura 44: Caída de tensión en los acumuladores**

Fuente: G. Fing Donald, Manual práctico de electricidad para ingenieros. fig 24.3 p 24-6

<sup>45</sup> G. FING Donald, Manual práctico de electricidad para ingenieros. fig 24.3 p 24-10

Si la batería es sometida a intensidades de descarga sucesivamente menores, la tensión que entrega se comporta como se observa en la figura 45; cuando pasa a una menor intensidad se produce un aumento instantáneo de la tensión seguido de su descarga normal, esto se presenta puesto que la capacidad para ceder energía de la batería es inversamente proporcional a su intensidad de descarga (corriente a la que opera durante el periodo de trabajo); de esta forma, si la corriente es muy alta se presenta en los acumuladores una mayor pérdida en su resistencia interna y una descarga más rápida puesto que bajo estas condiciones el electrolito se difunde más lentamente, lo que impide que el ácido pueda llegar al material activo. Cuando la corriente disminuye habrá mayor difusión del electrolito así como también una menor pérdida en la resistencia interna, por lo que la tensión externa aumentará de manera que se presentan los picos observados en la figura 45 al bajar la corriente de trabajo<sup>46</sup>.



**Figura 45. Efecto del descenso del régimen de descarga**

Fuente: G. Fing Donald, Manual práctico de electricidad para ingenieros. fig 24.6 p 24-10

<sup>46</sup> G. FING Donald, Manual práctico de electricidad para ingenieros. fig 24.3 p 24-8

Inicialmente la corriente en el motor no es estable, antes de que el imán comience a girar, no se ha inducido ninguna tensión entre el eje y la periferia de éste, por lo que la caída de tensión entre los bornes del banco de resistencias es la máxima (aproximadamente 12V); pero una vez se cuenta con una corriente lo suficientemente grande como para producir el giro, ésta disminuirá casi instantáneamente puesto que no solo depende de la diferencia de potencial de la batería y el voltaje inducido en el imán, sino que a su vez depende de la resistencia propia de la escobilla, que como se mencionó anteriormente disminuye conforme aumenta el tiempo de operación del motor. De esta manera la batería en un principio es sometida a corrientes altas lo que implica una caída de tensión significativa en un periodo de tiempo muy corto; disminuyendo así la intensidad de corriente que suministra dado que el motor es básicamente una carga resistiva y por ende directamente relacionado con la tensión de la batería; de esta manera el régimen de descarga baja permitiendo una mayor difusión del electrolito y menores pérdidas, por lo que la tensión aumenta o se recupera antes de volver a descender hasta el mínimo.

Entonces, cuando el motor es conectado a la batería, ésta se descarga a intensidades sucesivamente pequeñas para los primeros segundos de operación, las cuales permiten que aumente la tensión el primer intervalo de tiempo; así se incrementa la corriente que circula y por ende se aumenta la velocidad. Esto puede explicar la exponencial creciente observada al modelar la curva de ajuste de velocidad.

### 3.2.2 Torque del Motor Unipolar

El torque fue medido de manera indirecta a partir del acople de un motor de corriente continua al prototipo, poniendo este como generador se midió la velocidad alcanzada por el conjunto, la potencia generada y el voltaje entre los bornes del banco de resistencias.



**Figura 46: Medida del torque del prototipo**

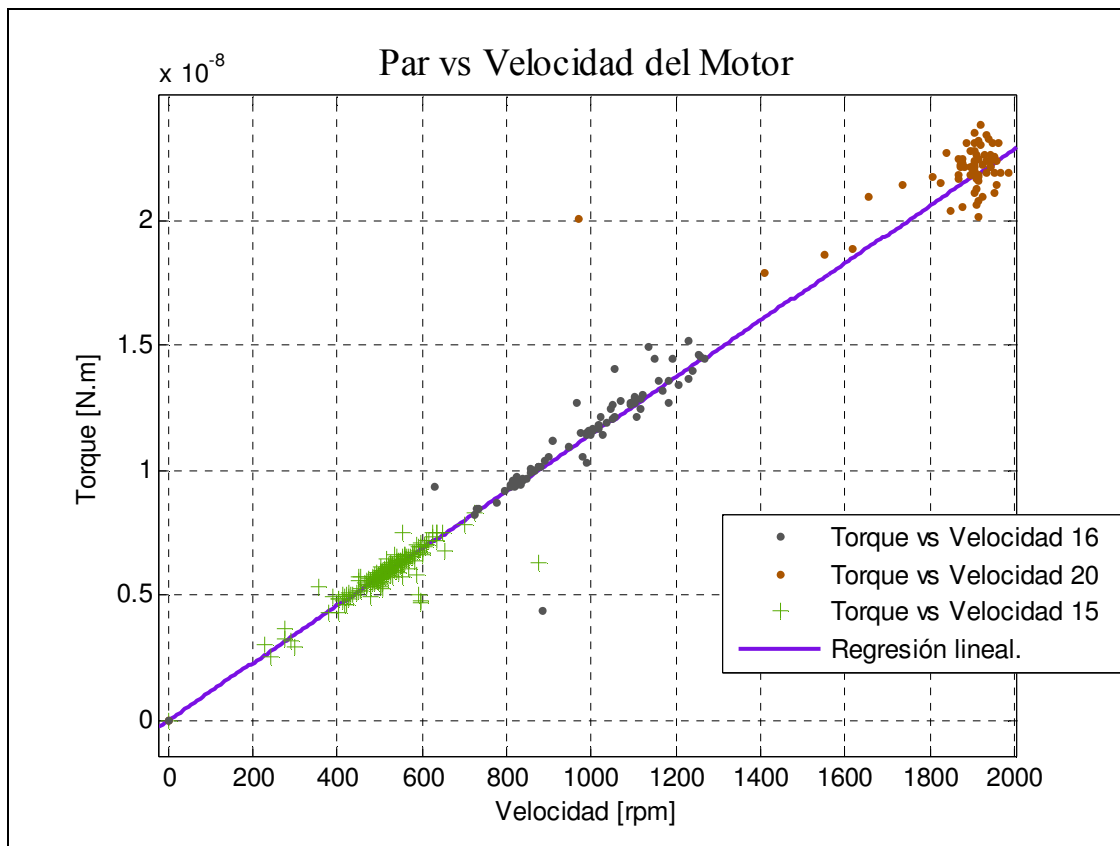
Con estos datos se obtiene el torque, puesto que:

$$\begin{aligned}
 \text{Potencia entregada} &= \text{Torque} * \text{velocidad} \\
 [W] &= [N] * \left[ \frac{m}{s} \right]
 \end{aligned}$$

En la figura 47 se muestran los resultados para distintos valores de corriente, para una misma carga (motor de corriente continua acoplado); como se esperaba el par del motor está directamente relacionado con la corriente suministrada por el sistema y según los datos recopilados la mejor aproximación es lineal, sin embargo se presentó una gran variabilidad de los datos que se atribuye principalmente a la vibración de los motores durante las pruebas. La curva de ajuste observada en la figura 47 se obtuvo mediante interpolación lineal con el comando `cftool` de Matlab para un intervalo de confianza del 95% (los resultados se muestran en la Tabla 6).

**Tabla 6. Resultado de la interpolación lineal**

Ecuación de ajuste: $f(x) = a*x$	
Coeficientes (con un límite de confianza del 95%):	Bondad del Ajuste:
$a = 1.144e-011$ (1.134e-011, 1.154e-011)	SSE: 3.696e-017 R-square: 0.7859 Adjusted R-square: 0.7859 RMSE: 4.026e-010



**Figura 47: Torque del Motor en función de la velocidad**

### 3.2.2.1 Comportamiento del Motor con Carga

Al comparar la velocidad del motor cuando gira con carga y sin ésta, se observa que disminuye casi un 70%. Como lo evidencia las figuras 48 y 49.

Con 15 Resistencias en paralelo.

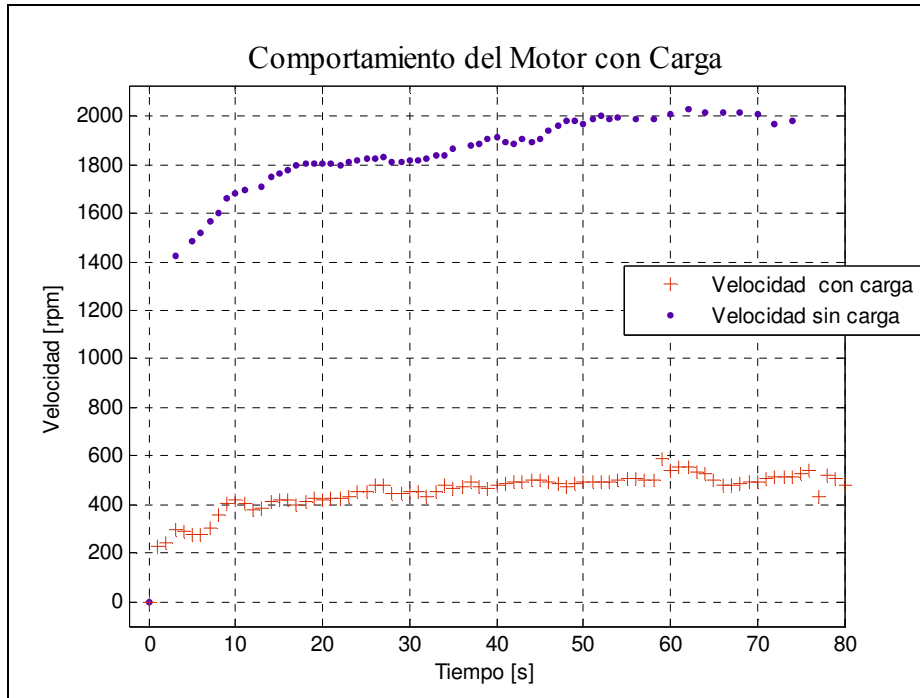


Figura 48: Efecto de la carga en el prototipo.

Con 16 resistencias

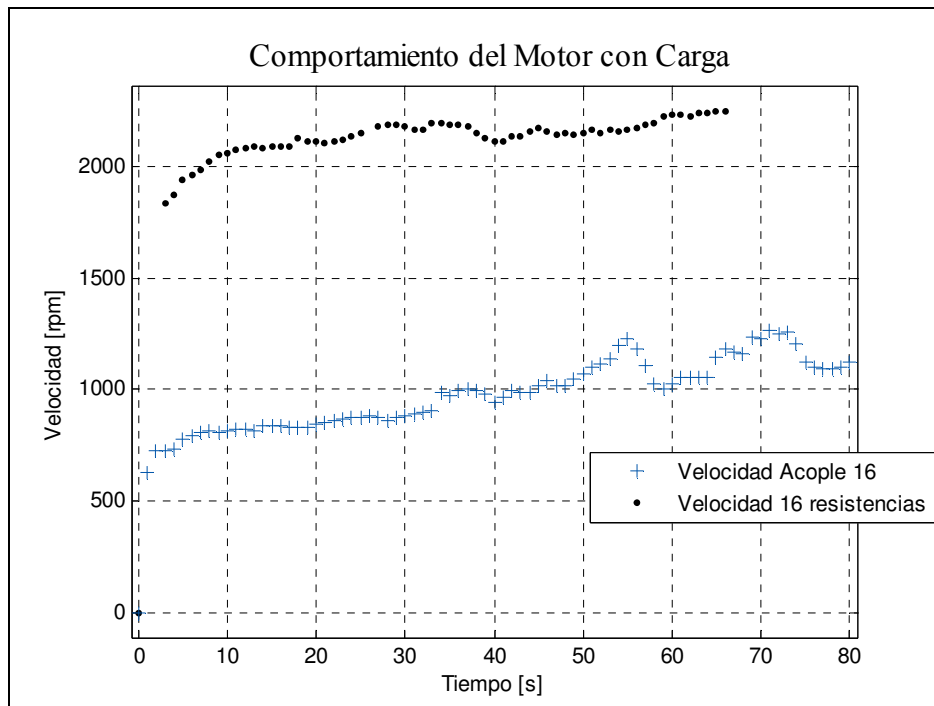


Figura 49: Efecto de la carga en el prototipo

#### 4. APLICACIONES

Son pocas las aplicaciones que pueden encontrarse de este tipo de máquinas, dada la falta de divulgación y sus características eléctricas. Como generador, produce alta corriente (de décimas a miles de Amperes) y baja tensión (no supera los 500 V), de manera que se presenta una pérdida importante en los conductores, además de no ser ajustable a la mayoría de dispositivos; mientras que como motor es difícil encontrar fuentes de alimentación y controlar sus pérdidas. Aún así, se han construido diferentes máquinas por motivos principalmente académicos, algunas de ellas se presentan a continuación:

En 1912 la Westinghouse Corporation construyó un generador unipolar que libera una corriente continua de 7700 A, con un voltaje de 264V, este dispositivo nunca fue puesto en producción debido a la masificación de la corriente alterna que mostró ser mas eficiente en lo que a transmisión de la energía se refiere<sup>47</sup>.

Hacia 1960 los generadores homopolares fueron nuevamente empleados para proveer los elevados valores de corrientes continuas necesarias para operar bombas electromagnéticas (liquid metal pumps) en las cuales un metal líquido se mueve a través de un tubo por la acción de una fuerza generada por la interacción de una corriente alta que circula transversalmente a través del liquido, y un campo magnético perpendicular al tubo<sup>48 49 50</sup>. Aunque en esta época no hubo tal interés en los motores homopolares, se desarrolló el diseño y construcción de un pequeño motor para transformar la energía generada por un sistema termo-eléctrico

---

<sup>47</sup> MONTGOMERY, H. op.cit , p. 271.

<sup>48</sup> Blake, L.R., "Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals", P.I.E.E., 140a, p 49-69 (1957)

<sup>49</sup> Jaross, R.A., and Barnes, A. H., "Design and Operation of a 10000 GPM D.C. Electromagnetic Sodium Pump and 250000 A Homopolar Generator", A/Conf. 15/P/2157 (1958)

<sup>50</sup> K.A. Polzin, Liquid-Metal Pump Technologies for Nuclear Surface Power

(tensiones pequeñas y corriente altas), en una de uso práctico, al mover generadores convencionales u otras cargas mecánicas<sup>51</sup>.

Con el desarrollo de los superconductores, el motor homopolar retomó el interés de los científicos, puesto que a tan bajas temperaturas los electrones se mueven por los conductores sin pérdidas, en 1977 se produjo el primer diseño de un motor homopolar de 3000 hp para un sistema de propulsión de un barco<sup>52</sup>, posteriormente se continuó la investigación mejorando el diseño de cada uno de sus elementos como lo muestra diversos artículos presentados en 1991 y 1997<sup>53</sup><sup>54</sup>, y así la construcción de estos motores cada vez gana mayor importancia.

En 2005 General Atomics fue contratada por la marina de Estados Unidos para realizar el diseño y construcción de un motor homopolar, que emplea superconductores para incrementar el campo magnético, aumentando así su potencia de salida. Este prototipo que trabaja a 125kW y 120rpm tiene múltiples ventajas con respecto a los motores de corriente alterna (AC). Dada su simplicidad de funcionamiento es necesario un menor número de partes que para cualquier otro motor, haciéndolo más pequeño, silencioso y liviano que un motor de AC; a su vez, debido a que trabaja con corriente continua su sistema de control es más simple y directo que los sistemas de los motores de corriente alterna<sup>55</sup>.

---

<sup>51</sup> BUKON, George John, A design study of a small homopolar motor

<sup>52</sup> R. A. Ackermann, R. L. Rhodenizer and C. O. Ward, A Superconductive Field Winding Subsystem for a 3000 hp homopolar motor

<sup>53</sup> Alan D. Crapo and Jerry D. Lloyd, Homopolar Dc Motor And Trapped Flux Brushless Dc Motor Using Hightemperature Superconductor Materials

<sup>54</sup> Michael J. Superczynski, Jr., Donald J. Waltman, Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings.

<sup>55</sup> <http://www.ga.com/atg/EMS/homopolar.php>

Actualmente las máquinas unipolares son percibidas como el futuro, puesto que son las mejoras en los materiales y el uso de otras formas de energía las que impulsan y garantizan su continuidad. Los motores han probado ser más ventajosos en los barcos y esto se debe principalmente al desarrollo de superconductores, mientras que los generadores son reconocidos actualmente en los reactores de fusión puesto que son la principal fuente de alimentación de los circuitos que producen campos magnéticos pulsantes.

## CONCLUSIONES

- Se cumplieron los objetivos planteados, puesto que el documento provee una completa descripción del motor unipolar, que incluye el seguimiento histórico, teorías de funcionamiento, modelos desarrollados, la implementación de un prototipo y la contrastación de los resultados.
- El motor unipolar es la única máquina que verdaderamente funciona con corriente continua, esto lo hace un dispositivo fácil de manipular y de construcción muy sencilla en comparación a otros. Está formado por muy pocos componentes, básicamente los necesarios para garantizar un campo magnético constante (iman) y un flujo continuo de corriente (escobillas); de esta manera existen varios tipos, entre los más usados están los de iman permanente en aplicaciones didácticas, mientras que en aplicaciones industriales se usan motores tipo tambor como el desarrollado empleando superconductores para un barco o el diseñado en el instituto de tecnología de Massachusetts para conversión de la energía termo-eléctrica.
- El prototipo construido mostró la validez del modelo matemático del motor unipolar (una resistencia y una fuente de tensión), puesto que al medir la velocidad alcanzada durante un intervalo de tiempo, se observó un crecimiento exponencial, tal y como lo predice la ecuación 1.48; si bien las ecuaciones no son exactamente iguales (en la ecuación 1.50 uno de sus coeficientes tiene un crecimiento exponencial mientras que en la ecuación 1.48 es constante) si se pueden aproximar puesto el crecimiento es mínimo ( su coeficiente es del orden de  $10^{-4}$ ), de manera que el modelo real del motor se acerca al ideal planteado, sin tener en cuenta ningún otro factor, como la temperatura, el flujo de dispersión producto del hecho de que la escobilla sea un líquido, o la formación de óxidos en la superficie, factores característicos del motor.

- La leve diferencia entre la ecuación general de ajuste obtenida, puede ser explicada al recordar que en el análisis de la dinámica del motor no se tienen en cuenta todos los parámetros que intervienen; como se observó en la sección 3.1.2.2 el crecimiento exponencial atípico se presume es producto de las características de descarga de la batería, puesto que al ser sometida a una corriente de descarga elevada y variable durante los primeros segundos de operación, se presenta un incremento en la tensión entregada durante el periodo de trabajo.
- La función de transferencia del motor es de primer orden, justo como se esperaba dado que carece de elementos como bobinas o capacitores; sin embargo tarda de treinta a cuarenta segundos alcanzar el estado estable. Esto se debe según el modelo planteado a la resistencia interna de este dispositivo.
- El control de este tipo de motores es difícil puesto que sería necesario mantener estable la resistencia interna, la cual irremediablemente está sometida a cambios, puesto que habría que garantizar condiciones como un fluido lineal y no turbulento (el mercurio en todo momento se mantendría en contacto con el imán); mantener la superficie del mercurio lo más limpia posible y controlar la temperatura dado que esta disminuye la viscosidad además de aumentar las pérdidas en los otros metales.
- La eficiencia del prototipo, obedece principalmente a la calidad del contacto de la escobilla, dependiendo de qué tan limpia se encuentre, se obtendrá una mayor velocidad. Esto fue observado en las pruebas; con un mismo número de resistencias en paralelo la velocidad del motor era diferente (en un caso cayó casi un 23.7% entre una prueba y la otra) y lo único que cambió fue el estado de la escobilla.

- El mejor y más prometedor campo de aplicación de estos motores es en el sistema de propulsión de un barco, con el desarrollo de los superconductores este dispositivo exhibe mayores ventajas que uno de corriente alterna (el ruido que produce, el peso y el mantenimiento que necesita son mínimos puesto que esta constituido por pocos elementos).
- El motor unipolar aún es desconocido y se ha omitido de la mayoría de libros de máquinas puesto que su funcionamiento no está completamente entendido; actualmente se desconoce la razón por la cual el giro del imán no afecta el campo magnético y hay controversia en el lugar donde se origina la fuerza, aunque es de general aceptación que es el movimiento de los electrones en el imán los que inducen la fuerza. El experimento desarrollado en el 2002 por el profesor Guala-valverde, desafía aparentemente esta teoría, mostrando resultados contrarios a los esperados, éstos le permitieron afirmar que la fem se produce en los conductores y se debe a que ambos (campo magnético y cargas eléctricas) se encuentran en movimiento relativo. Sin embargo, en el artículo "Some Comments on J.Guala-Valverde's Experiments on Unipolar Induction", H. Montgomery cuestiona la validez misma del experimento como prueba irrefutable del movimiento relativo de la inducción homopolar, por lo que el debate continúa.

## RECOMENDACIONES

- El diseño de futuros dispositivos debe orientar sus esfuerzos hacia la optimización de las escobillas, puesto que el control de las pérdidas es un factor crítico en la eficiencia del motor.
- El control de las reacciones químicas del mercurio con los distintos metales del dispositivo, es un factor a considerar, puesto que disminuyen la eficiencia del motor dado que el contacto pasa de ser metálico a cuasi-metálico y la conducción pasa de ser directa a producirse por efecto túnel. De esta manera deben tomarse precauciones al elegir los elementos que estarán en contacto con el mercurio, en el caso del prototipo desarrollado se propone cambiar el cable de conductor que hace contacto con el mercurio y a su vez recubrir el imán con un nuevo metal, con el que no se produzca reacción química a la temperatura de trabajo.
- Se debe vigilar factores como la temperatura, el flujo turbulento producto del hecho de que la escobilla sea un líquido y la formación de óxidos en la superficie del mercurio, puesto que el funcionamiento del motor es muy sensible a la variación de alguno de estos parámetros.
- La implementación de la inducción homopolar debe dirigirse a la construcción de dispositivos de media o alta potencia, donde las pérdidas no influyen en gran medida en el comportamiento del motor, como lo muestran los dispositivos actualmente empleados en la industria.

## BIBLIOGRAFÍA

AMPERE, A. Reponse A La Lettre De M. Van Beck Sur Une Nouvelle Experience Electro-Magnetique. En: Journal de Physique. 1821. T. XCIII; [consultado 5 de diciembre de 2007]. Disponible en Internet: <http://sidam.at.tut.by/en.html>.

BLAKE,L.R.,"Conduction and Induction Pumps for Liquid Metals", P.I.E.E., 140a, (1957)

BUKOW JOHN,George. A Design Study of a Small homopolar motor (1958);

CRAPO, Alan D. y LLOYD, Jerry D., Homopolar Dc Motor And Trapped Flux Brushless Dc Motor Using Hightemperature Superconductor Materials

FARADAY, M. Description Of An Electro-Magnetical Apparatus For The Exhibition Of Rotatory Motion En: Quart. J. Sci. XII. (1822); [consultado 5 de diciembre de 2007]. Disponible en Internet: <http://sidam.at.tut.by/en.html>

FRIGERIO,Paz; LA BRUNA,Gimena.; LARREGUY, María y ROMANI, Julieta. Generador de Faraday de una sola pieza. Universidad Favaloro-Buenos Aires Octubre (2001)

G. FING Donald, Manual práctico de electricidad para ingenieros. fig 24.3 p 24-10

General Atomics [en línea]. San Diego, California: General Atomics [1955]. [Consultado 5 de septiembre de 2008] Disponible en Internet: <http://www.ga.com/atg/EMS/homopolar.php>

HAYT H, William. Teoría Electromagnética, Quinta Edición; p 298

JAROSS, R.A., y BARNES, A. H., "Design and Operation of a 10000 GPM D.C. Electromagnetic Sodium Pump and 250000 A Homopolar Generator",A/Conf. 15/P/2157 (1958)

JOACHIM SCHLICHTING, H y UCKE, Christian. Un Motor Eléctrico De Construcción Sencilla, Bajo Coste Y Alta Tecnología. En: Physik in unserer Zeit. Vol 35, (2004); p 272-273.

K.A. Polzin, Liquid-Metal Pump Technologies for Nuclear Surface Power

LÓPEZ NACIR, Diana y ACUÑA Guillermo Pedro. Motor-Generador Unipolar; p 2

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

Michael J. Superczynski, Jr., Donald J. Waltman, Homopolar Motor with High Temperature Superconductor Field Windings.

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

R. A. Ackermann, R. L. Rhodenizer and C. O. Ward, A Superconductive Field Winding Subsystem for a 3000 hp homopolar motor

SUPERCZYNSKI, Michael J y WALTMAN, Donald J. Homopolar motor with high temperature superconductor field windings. En: IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 7, NO. 2, JUNE 1997

VALONE, Thomas F. Armature Reaction in the Homopolar Generator; p 95

VALONE, Thomas. The Homopolar Handbook, A definitive guide to Faraday disk and n-machine technologies, p 1.

Wikipedia: la enciclopedia libre [en línea]. [consultado 9 de agosto de 2008]. Disponible en Internet: [http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto túnel](http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_túnel).

## ANEXO

### MAGNITUDES Y UNIDADES ELÉCTRICAS

Tabla 7. Magnitudes y unidades eléctricas

MAGNITUD	UNIDAD	RELACIONES
Carga (q)	Culombio (C)	
Corriente (I)	Amperio (A)	C/s
Tensión (V)	Voltio (V)	J/C
Densidad de Corriente (J)	A/m <sup>2</sup>	
Campo Eléctrico (E)	V/m	N/C
Resistividad	W m	Vm/A
Conductividad ( $\sigma=1/\rho$ )	1/[W m]	Siemens/m (S/m)
Resistencia (R)	Ohmio ( $\Omega$ )	V/A
Conductancia ( $G=1/R$ )	Siemens ( $S=\Omega^{-1}$ )	A/V
Inductancia (L)	Henrio (H)	Wb/A
Capacidad (C)	Faradio (F)	C/V
Inducción Magnética (B)	Tesla (T)	N/[Am]=Wb/m <sup>2</sup>
Flujo Magnético (f)	Weber (Wb)	J/A=Nm/A
Campo Magnético (H)	A/m	A-v/m
Fuerza	Newton (N)	
Reluctancia ( )	A/Wb	1/H
Permeabilidad ( $\mu_0$ )	4 $\pi$ 10 <sup>-7</sup> H/m	4 $\pi$ 10 <sup>-7</sup> Wb/[Am] (ó N/A <sup>2</sup> )