

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE MAGNETOS  
PERMANENTES**

**CARLOS ANDRÉS CASTILLO GONZÁLEZ  
HERNÁN DAVID IGUARÁN DAZA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS  
FALCULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE MAGNETOS  
PERMANENTES**

**CARLOS ANDRÉS CASTILLO GONZÁLEZ  
HERNÁN DAVID IGUARÁN DAZA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de  
ingeniero mecánico**

**Director  
ALFONSO SANTOS JAIMES  
Ing. Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS  
FALCULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del  
jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Bucaramanga, Enero 27 de 2012**

Al creador padre por concederme la sabiduría para enfrentar las adversidades y retos y así lograr esta meta, a mis padres Arturo Castillo y Amelia González por el apoyo y la fe incondicional que me brindaron durante esta etapa de la vida, a mis compañeros y amigos que estuvieron en cada uno de mis pasos transmitiéndome su sabiduría y su apoyo para por los senderos de la vida universitaria a todos y cada uno de ellos, gracias, mil y mil gracias. Que el señor les bendiga y les multiplique

**CARLOS ANDRÉS CASTILLO GONZÁLEZ**

Al señor Jesucristo en primer lugar, por permitirme llegar a estas instancias y cumplir un sueño más en mi vida, por haberme tendido su mano en muchos momentos difíciles y llenarme de sabiduría para alcanzar éste logro. A mis padres, David Iguarán Camargo y Melvis Daza Medina por su apoyo constante e incondicional desde mis primeros años y durante toda la carrera. A mis hermanas, Martha y María Iguarán Daza y demás familiares que se han interesado por mí para ser una persona exitosa en la vida. Al grupo de docentes que me brindaron una excelente educación académica y orientación, de veras, gracias. A todos mis compañeros y amigos con los que se compartieron momentos de tensión y alegría, con los cuales compartí voces de aliento. A aquellas personas que significaron mucho para mí y que en este momento no están, dedico también éste triunfo. A los que contribuyeron para que éste proyecto fuera una realidad, gracias.

**HERNÁN DAVID IGUARÁN DAZA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron a la realización de este proyecto:

A nuestros padres que por su apoyo económico y moral fue posible el desarrollo de este proyecto.

ARIEL, que por su infinito conocimiento en la rama de maquinas eléctricas, aportó sus conocimientos y destrezas al proyecto.

Al cuerpo docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica que gracias a su esfuerzo y dedicación a la transmisión de los conocimientos durante el transcurso de la carrera fue posible la culminación de este logro

Al ING. ALFONSO SANTOS, director del proyecto, por creer en nosotros y darnos la oportunidad de realizar este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	3
1 MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 GENERADOR DE ELECTRICIDAD.....	5
1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS GENERADORES ELÉCTRICOS.....	5
1.1.1.1 Generadores según el tipo de energía.....	6
1.1.1.2 Generadores según la señal eléctrica producida.....	6
1.2 GENERADORES DE IMANES PERMANENTES.....	7
1.2.1 Clasificación de los generadores imanes permanentes.....	9
1.3 IMANES.....	10
1.3.1 Clasificación de los imanes.....	11
1.3.1.1 Imanes permanentes.....	11
1.3.1.2 Electroimanes.....	11
1.3.2 Terminología asociada a los imanes .....	12

1.4 MATERIALES MAGNÉTICOS.....	14
1.4.1 Clasificación de los materiales ferromagnéticos.....	14
1.4.1.1 Materiales magnéticos blandos.....	14
1.4.1.2 Materiales magnéticos duros.....	15
1.4.2 Curva o ciclo de histéresis.....	16
1.5 FEM INDUCIDAD EN EL ESTATOR.....	17
1.6 EJES.....	20
1.6.1 Diseño de ejes .....	20
1.6.2 Diseño de ejes bajo carga estática .....	21
1.6.3 Diseño de ejes bajo carga cíclica .....	23
2 METODOLOGÍA.....	26
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.2 DESARROLLO DEL DISEÑO .....	27
2.3 PRUEBAS DEL GENERADOR.....	29
3 DISEÑO BASICO.....	31
3.1 DISEÑO DEL ESTATOR.....	32

3.2 DISEÑO BASICO DEL EJE.....	33
3.2.1 Esfuerzos alternantes.....	35
3.2.2 Esfuerzos medios.....	36
3.2.3 Sensibilidad a la muesca.....	36
3.3 ANÁLISIS MODAL.....	40
3.4 ANÁLISIS DE TEMPERATURA.....	42
3.5 PROBLEMAS DE GENERACIÓN.....	43
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	47
4.1 GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.....	47
4.2 TIPOS DE BOBINADO.....	49
4.3 CONEXIÓN DE BOBINA.....	50
4.3.1 Analisis de conexión de bobina.....	51
4.4 POTENCIA.....	53
4.4.1 Analisis de potencia.....	54
4.5 TORQUE.....	56
4.5.1 Analisis de torque.....	57

4.6 EFICIENCIA MAGNETICA.....	57
4.6.1 Analisis de la eficiencia magnética.....	59
4.7 EFICIENCIA NETA DEL GENERADOR.....	60
5 CONCLUSIONES.....	63
6 RECOIMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	67

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Transformación de energía en un generador.....	5
Figura 2. Generador mecánico (Dinamo).....	7
Figura 3. Generador de imanes permanentes .....	8
Figura 4. Clasificación de los generadores de imanes permanentes según el eje de giro.....	10
Figura 5. Curva de histéresis .....	16
Figura 6. Movimiento de los imanes con respecto a las bobinas.....	18
Figura 7. Interacción del campo magnético por bobina .....	19
Figura 8. Etapas de la metodología .....	26
Figura 9. Rotor convencional y rotor diseñado.....	27
Figura 10. Bobina original y bobina modificada .....	28
Figura 11. Generador de magnetos permanentes .....	28

Figura 12. Pruebas del generador en el torno .....	29
Figura 13. Resistencias de $80\Omega$ c/u .....	30
Figura 14. Resistencia de $11\Omega$ .....	30
Figura 15. Alternador seleccionado para la modificación.....	31
Figura 16. Diagrama de Cuerpo Libre del eje .....	34
Figura 17. Diagrama de cortantes y momentos flectores.....	35
Figura 18. Diagrama de cuerpo libre en la simulación.....	38
Figura 19. Deformación Total del eje .....	39
Figura 20. Factor de seguridad del eje .....	39
Figura 21. Deformación eje y porta imanes con frecuencia de $1243.8\text{ Hz}$ .....	41
Figura 22. Temperatura de los imanes .....	43
Figura 23. Interacción del campo magnético, con 14 imanes .....	45
Figura 24. Interacción del campo magnético con 12 imanes .....	46
Figura 25. Deterioro de los imanes de neodimio.....	60

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 .Factores de modificación a la fatiga.....	36
Tabla 2. Comparación factor seguridad .....	40
Tabla 3. Deformacion del sistema según frecuencia .....	40
Tabla 4. Frecuencias Naturales y sus velocidades de giro .....	41
Tabla 5. Datos obtenidos simulación de fluidos y temperaturas .....	42
Tabla 6. Potencia de entregada por cada rotor en la bobina modificada .....	48
Tabla 7. Potencia entregada por las bobinas bajo las mismas condiciones de carga y conexión.....	49
Tabla 8. Formas de conexión de la bobina .....	51
Tabla 9. Datos potencia eléctrica según tipo de conexión .....	52
Tabla 10. Datos potencia generador eléctrico .....	53
Tabla 11. Torque según carga.....	56
Tabla 12. Propiedades de los imanes.....	58

Tabla 13. Eficiencia magnética del generador con carga de $240 \Omega$ .....	59
Tabla 14. Eficiencia del generador según carga.....	61

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Potencia de entregada por cada rotor en la bobina modificada .....	48
Gráfica 2. Potencia entregada Bobina original .....	50
Gráfica 3. Potencia entregada Bobina Modificada.....	50
Gráfica 4. Potencia según tipo de conexión.....	52
Gráfica 5. Potencia producida según carga.....	54
Gráfica 6. Voltaje producido según carga.....	55
Gráfica 7. Corriente producida según carga.....	55
Gráfica 8. Torque según carga.....	57
Gráfica 9. Eficiencia con carga de 240 $\Omega$ .....	61
Gráfica 10. Eficiencia con carga de 26.6 $\Omega$ .....	62

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DATOS DE LA PRUEBA.....	70
ANEXO B. PLANOS DEL GENERADOR.....	75

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE MAGNETOS PERMANENTES

**AUTORES:** Carlos Andrés Castillo González  
Hernán David Iguarán Daza

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Alfonso Santos Jaimes

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se llevó a cabo la construcción y prueba de un Generador de Magnetos Permanentes de baja potencia, mediante un diseño básico de ingeniería, partiendo de un alternador de un vehículo (marca Dodge), del cual se realizó modificaciones a la parte eléctrica del alternador, sustrayendo el bobinado del rotor, adaptando uno de magnetos permanentes y probando diferentes calibres de alambre en el bobinado del estator, con la finalidad de obtener una potencia aproximada de 1KW. Para este fin, se desarrolló una serie de ensayos al generador, con las herramientas disponibles (multímetros, torquímetro, motor eléctrico), para así determinar las curvas de desempeño de la maquina, a partir de los datos adquiridos en las respectivas pruebas, las cuales se encuentran anexas en el presente documento.

### **PALABRAS CLAVES:**

Alternador Torquímetro

## **GENERAL ABSTRACT OF DIPLOMA WORK**

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PERMANENT  
MAGNETS GENERATOR

**AUTHORS:** Carlos Andrés Castillo González  
David Hernán Daza Iguarán

**FACULTY:** Faculty of Mechanical Engineering

**DIRECTOR:** Alfonso Santos Jaimes

### **ABSTRACT**

This work was carried out the construction and testing of a permanent magnet generator of low power, using a basic engineering design, starting from an alternator of a vehicle (Dodge), which was made modifications to the electrical alternator, subtracting the rotor winding, adapting a permanent magnet and trying different gauges of wire in the stator winding, in order to obtain an approximate power of 1KW. To this end, we developed a series of tests the generator, with the tools available (multimeters, torque wrench, electric motor), to determine the performance curves of the machine from the data acquired in the respective tests, which are attached herein.

### **KEYWORDS:**

alternator Torque Tester

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y ensayar un generador eléctrico de magnetos permanentes, por medio de un diseño mecánico básico, partiendo de un alternador de vehículo al que se le harán modificaciones, el cual será utilizado como aporte de investigación en el área de energías limpias y renovables de la facultad de ingeniería mecánica.

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el marco teórico que defina el estado actual de esta tecnología, a partir de consultas bibliográficas. **Resultado:** marco teórico. **Indicador:** las consultas se harán sobre fuentes reconocidas como libros especializados, proyectos relacionados o artículos científicos
- Realizar el diseño básico para seleccionar y construir los componentes que conforman un generador de imanes permanentes a partir de los análisis y cálculos realizados. **Resultado:** cálculos, planos y simulaciones. **Indicador:** que los parámetros de diseño cumplan con la generación de potencia esperada.
- Obtener curvas de desempeño del generador de magnetos permanentes para varios calibres de alambres de bobinado, por medio de medición de corriente y voltaje, para calcular la eficiencia a diferentes velocidades de giro. **Resultado:** curvas de desempeño del generador. **Indicador:** las curvas deberán estar respaldadas con los instrumentos de medición previamente calibrados.

## INTRODUCCIÓN

La producción de electricidad proveniente de tiempos remotos del hombre, para su propio beneficio, ha abierto varios caminos hacia diferentes campos de estudios acerca de la adquisición de energía eléctrica, dando así, formas inimaginables y productivas de generación cada vez más eficientes sin perjudicar el ecosistema. Uno de estos avances son los denominados generadores de magnetos permanentes, capaces de suministrar cantidades considerables de electricidad a partir de las denominadas energías limpias o renovables.

Esta tecnología se puede apreciar en los aerogeneradores, en donde la producción de energía está catalogada como de baja potencia, caso en donde los generadores de magnetos permanentes sobresalen, esto es debido a que según ensayos anteriormente efectuados por los investigadores especializados en dicha área, los generadores de imanes permanentes pueden llegar a ser tres veces más eficientes que los generadores convencionales, además que estos no necesitan altas revoluciones para producir energía eléctrica, esto se evidencia en uno de los proyectos, realizado por el ingeniero Alfonso Santos en su estudio de adaptación de un generador de imanes permanentes en la universidad de Los Andes.

Las fases de este informe están comprendidas por el marco teórico en el cual se plasma y sintetiza los temas relacionados en la construcción del generador tales como los conceptos básicos de electricidad, diseño de ejes y tipos de imanes.

La siguiente fase se comprende en la metodología, elaborada específicamente para la realización del proyecto basado y secuenciado en las expectativas planteadas en los objetivos específicos anteriormente mencionados.

Seguido a este se encuentra el desarrollo de las ecuaciones para el diseño por medio de los cálculos específicos y complementados con software de diseño y simulación como ANSYS y Solidworks, así como los análisis y resultados de los ensayos previamente realizados al generador.

Posteriormente se plasma las conclusiones y recomendaciones extraídas de los análisis y resultados del proyecto, con el fin de sintetizar el trabajo ejecutado, para así finalizar con los anexos y bibliografía con la finalidad de reforzar los temas mencionados.

El propósito de este proyecto está basado en la recopilación de estudios anteriores de los textos relacionados, para el análisis y diseño de un prototipo de generador de magnetos permanentes con características similares capaz de producir energía aplicable en cualquier tipo de labor, a su vez que se adquiere la recolección de los parámetros de operación tales como potencia, corriente, voltaje y eficiencia, para su debido registro y análisis.

Este trabajo, origina una base para el desarrollo de estudios dirigidos a la generación de energía eléctrica para el área de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga; para así lograr las oportunidades de continuar con la línea de investigación y mejora de los sistemas de producción de energía con el fin de disminuir al máximo el riesgo de polución al medio ambiente en general.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 GENERADOR DE ELECTRICIDAD

Un generador de electricidad es la fuente de energía de los sistemas eléctricos y electrónicos; proporciona potencia eléctrica (tensión y corriente). En todos los generadores se realiza una transformación de energía (figura 1), es decir, se parte de un tipo de energía bien sea mecánica, térmica, química o de cualquier otro tipo, hasta llegar a la eléctrica. <sup>[12]</sup>

Figura 1. Transformación de energía en un generador



Fuente. Autores del proyecto

**1.1.1 Clasificación de los generadores eléctricos** Estos generadores están divididos en dos secciones, según el tipo de energía y señal producida.

[12] HERMOSA DONATE, Antonio. Principios de electricidad y electrónica II. España: Editorial Marcombo, 1999. 1p

**1.1.1.1 Generadores según el tipo de energía.** Estos generadores se dividen en dos grupos: mecánicos y químicos.

- **Generadores mecánicos.** los generadores mecánicos comprende los Dinamos, los cuales trabajan con corriente continua, y los Alternadores, que operan con corriente alterna

- **Generadores químicos.** Los generadores químicos por su parte comprenden las pilas, las baterías y los acumuladores. [12]

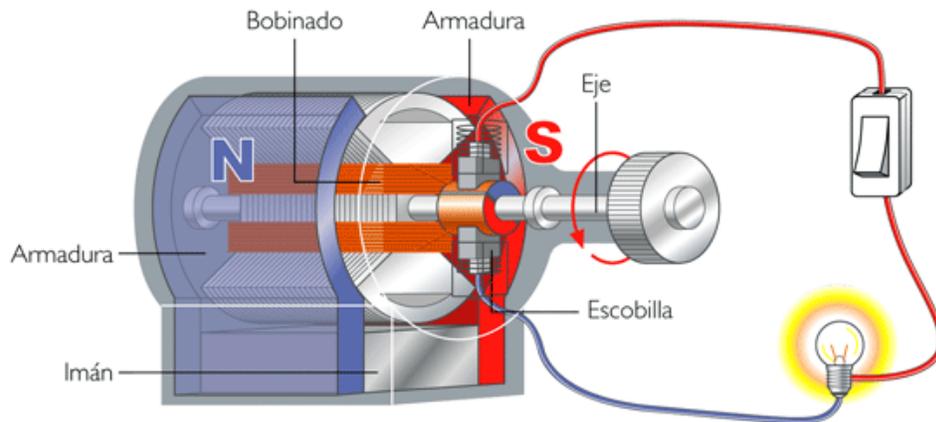
**1.1.1.2 Generadores según la señal eléctrica producida.** Estos se dividen en generadores de corriente continua y corriente alterna.

- **Generadores de corriente continua (CC).** Estos generadores llamados también Dínamos (figura 2) no son muy utilizados en aplicaciones de altas potencias ya que solo se pueden conectar a la red eléctrica a través de convertidores electrónicos que transforman la corriente continua en corriente alterna. Además de esta limitación antes mencionada, se encuentra también de por medio el factor económico puesto que este tipo de máquina suele ser costosa y lo mismo el mantenimiento de las mismas (cambios de escobillas.). [16]

- **Generadores de corriente alterna (AC).** Llamados también alternadores, son los más utilizados en las grandes centrales de generación de energía (Hidroeléctricas, Termoeléctricas, Parques Eólicos, etc.) debido a que se conectan directamente a las redes eléctricas. Dentro de los generadores de corriente alterna se puede establecer una clasificación de acuerdo a los generadores auto excitados (síncronos) bien sea con corriente eléctrica continua

inyectada en las bobinas del rotor o excitados mediante imanes permanentes Y los que son excitados a partir de la red eléctrica conectada a las bobinas del estator de la maquina (asíncronos). [16]

Figura 2. Generador mecánico (Dinamo)



Tomado de: <http://4.bp.blogspot.com/1600/dinamo.png>, [consulta: 10 julio 2011]

## 1.2 GENERADORES DE IMANES PERMANENTES

Un tipo de maquina eléctrica que es utilizada con más frecuencia en aplicaciones de turbinas de viento es el generador de imanes permanentes. Este es ahora el preferido en la mayoría de los pequeños generadores de turbinas eólicas de hasta por lo menos de 10 kilovatios de potencia, y también se pueden utilizar en turbinas de viento más grandes. En estos generadores (figura 3), los imanes permanentes proporcionan el campo magnético, por lo cual no hay la necesidad del uso de devanados de campo o el suministro de corriente a este. Por ejemplo, los imanes se integran directamente en un rotor de aluminio cilíndrico o bien sea otro metal.

La potencia es tomada por una armadura estacionaria, lo cual no hay necesidad de conmutadores, anillos colectores o cepillos.

Debido a que la construcción de la máquina es tan simple, el generador de imanes permanentes es muy robusto. Los principios de funcionamiento de los generadores de imanes permanentes son similares a los de la máquina síncrona. De hecho, se encuentran frecuentemente referenciados con el nombre de generadores síncronos de imanes permanentes, con las siglas en inglés PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator).<sup>[14]</sup>

Figura 3. Generador de imanes permanentes



Fuente: <http://www.magneticgenerator.com.au/wp-content/uploads/2011/04/Permanent-Magnetic-Generator.jpg>  
[Consulta: 10 julio 2011]

[16] RED RIGE-UTE, sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores, Montevideo (Uruguay) Consultada el 17 de noviembre de 2010, Disponible en internet: [www.ute.com.uy](http://www.ute.com.uy)

[14] MANWELL, James, MCWOWAN, Jon, Y ROGERS, Anthony. Wind energy explained. 2da Edición. United Kingdom: Editorial Wiley, 2009. 234-235p

**1.2.1 Clasificación de los generadores de imanes permanentes.** Según sea el eje de giro, los generadores son de dos tipos: de flujo axial, normalmente utilizados en aplicaciones de altas potencias, y de flujo radial. La principal diferencia entre ellos se encuentra en la dirección del flujo magnético (figura 4). [7]

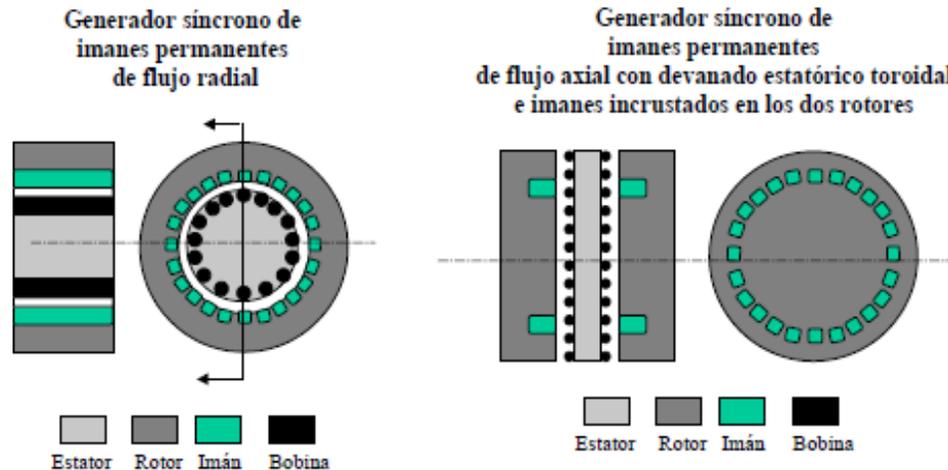
- **Generadores de flujo axial:** el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes. En estos generadores, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí el nombre de flujo axial, que realmente significa que el campo magnético es paralelo al eje de giro.

- **Generadores de flujo radial:** en estos generadores el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes. En los generadores de flujo radial, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por lo tanto va en dirección radial, y es por eso que se usa la frase flujo radial lo cual realmente significa que el campo magnético se encuentra en dirección perpendicular al eje de giro. [7]

---

[7] NAVASQUILLO, Joaquín H, funcionamiento de un generador de imanes permanentes usando la expresión de Lorentz. Valencia (España). Disponible en internet: <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>

Figura 4. Clasificación de los generadores de imanes permanentes según el eje de giro



Tomada de: <http://www.ute.com./EnergiasRenovableseolicaActividad2002Eolica/Generadores.pdf> [consulta: 4 julio 2011]

### 1.3 IMANES

Un imán es un objeto hecho de ciertos materiales que tienen la propiedad de crear un campo magnético externo. <sup>[5]</sup>

Los imanes los hay de diversas formas, bien sean rectangulares, cilíndricos, de herradura o cualquier otra, y por extraña que esta sea, todos los imanes tienen dos extremos o caras llamados polos, donde el efecto magnético se hace más intenso.

Si se toma un imán en forma de barra y se suspende de la mitad por medio de una cuerda delgada, al dejarlo girar libremente se aprecia que un polo del imán siempre apuntará hacia el norte.

[5] DOUGLAS C, Giancoli, OLGUIN C, Victor. Física: principios con aplicaciones, volumen 2. 6ta Edición. México: Editorial Pearson Educación, 2007. 554-555p

El polo de un imán suspendido que apunta libremente hacia el polo norte geográfico se llama polo norte del imán. El otro polo apunta hacia el sur y se llama polo sur. Cuando se acercan dos imanes entre sí, cada uno ejerce una fuerza sobre el otro. Esta fuerza puede ser atractiva o repulsiva dependiendo de las polaridades. Si dos imanes de igual polaridad se acercan, su fuerza es repulsiva (repelen), y si tienen distintas polaridades se atraen, es decir los polos opuestos se atraen y los iguales repelen. [5]

**1.3.1 Clasificación de los imanes** Los imanes pueden ser de dos clases: imanes permanentes y electroimanes.

**1.3.1.1 Imanes permanentes.** Los imanes permanentes son aquellos materiales que presentan la cualidad de ser magnetizados permanentemente debido a su capacidad para retener los polos magnéticos y la magnetización inducida después de remover el campo externo aplicado. La energía magnética almacenada en este tipo de imanes puede permanecer constante en un periodo de tiempo indefinido. Estos imanes, que se caracterizan por tener una alta inducción magnética, por presentar una alta resistencia a la desmagnetización, y un gran contenido de energía, incluyen una variedad de aleaciones, compuestos intermetálicos y cerámica. [4] [6]

**1.3.1.2 Electroimanes.** A diferencia de los imanes permanentes, estos imanes solo presentan cualidades magnéticas cuando existe la presencia de una fuerza magnetizante producida por una corriente eléctrica. Esta energía magnética inducida es función de la intensidad, del sentido, y de la duración de corriente en ciertos casos. [6]

**1.3.2 Terminología asociada a los imanes.** Existe una amplia terminología que caracteriza a un material magnético. A continuación se mencionaran algunas de ellas:

- **Densidad de flujo:** es una manera de definir el campo de inducción como el número de líneas de fuerza por unidad de área  $B = \Phi/A$

- **Flujo:** es el número de líneas magnéticas de fuerzas medido en Gauss o Teslas.

- **Fuerza coercitiva  $H_c$ :** también llamada coercitividad, es el campo magnético  $H_c$  necesario para reducir la inducción  $B$  o la imantación  $M$  a cero. Se mide en Oersteds o Amperio/metro y sirve para medir la resistencia de un material magnético a su desimantación.

- **Gauss:** es la unidad de medida de la inducción  $B$  en el sistema gaussiano.  $1G = 10^{-4} T$

- **Inducción magnética:** es la fuerza de imantación o desimantación, medida en Oersteds, que determina la capacidad de una corriente eléctrica, o un material magnético, de inducir un campo magnético en una zona o punto particular.

- **Oersteds (Oe):** es una unidad de fuerza del campo magnético,  $H$ , en el sistema GSM.  $1 \text{ Oersted} = 0,8 \text{ A/cm}$

---

[4] DAVIS, Joseph R. ASM materials engineering dictionary. United States of America: Editorial Kathleen Mills, 1992.

[6] FINK, Donald G, BEATY, H. Wayne, CAROLL, John M. Manual práctico de electricidad para ingenieros. España: Editorial Reverté, 1981.

• **Permeabilidad:** es la relación entre el campo magnético (H) aplicado, y el flujo magnético (B)  $\mu=B/H$ . También se define como la mayor o menor facilidad que tiene un material para ser magnetizado.

• **Producto de Energía (BH) Max:** es la energía que un material magnético puede proporcionar a un circuito magnético externo al operar en un punto de su curva de desmagnetización. Las unidades en que se mide pueden ser megaGauss-Oersteds, MGOe, ó  $\text{KJ/m}^3$

• **Reluctancia:** es la inversa de la permeabilidad, y se define como la oposición que presenta un material al flujo magnético, y por tanto a ser magnetizado.

• **Remanencia (Br):** es la imantación residual del imán que ha sido magnetizado hasta la saturación en un circuito cerrado, y corresponde a la inducción magnética que queda en el material magnético después de ser imantado hasta la saturación y preparado para su uso final. En otras palabras es la capacidad que tiene un material de retener el magnetismo que se le ha inducido. La remanencia se mide en Teslas (T) o en Gauss (G).

• **Retentividad:** es la capacidad que tiene un material ferro magnético de mantener cierta cantidad de magnetismo residual.

• **Saturación:** es el máximo valor de la imantación, referido al descenso de la permeabilidad con fuerza de magnetización creciente.

• **Temperatura de Curie (Tc):** es la temperatura máxima a la que puede llegar un material magnético sin perder sus propiedades magnéticas permanentes. Un material ferro magnético se convierte en paramagnético si se llega a superar ésta temperatura (Tc).

• **Temperatura máxima de trabajo:** es la temperatura máxima de exposición que un imán puede resistir sin que se produzcan cambios estructurales o inestabilidades en sus propiedades.

• **Teslas:** es la unidad para la densidad del flujo magnético en el sistema MKSA (SI). 1 Tesla=10000 Gauss. [13] [9]

## 1.4 MATERIALES MAGNÉTICOS

**1.4.1 Clasificación de los materiales ferromagnéticos.** Los materiales ferromagnéticos se encuentran clasificados como blandos y duros, en función de coercitividad  $H_c$ .

**1.4.1.1 Materiales magnéticos blandos.** Los materiales blandos se caracterizan por tener una alta permeabilidad y una baja coercitividad ( $H_c < 1000 \text{ A/m}$ ), lo cual facilita la magnetización y la desmagnetización.

Los materiales blandos son usados como conductos de flujo, para retener el flujo y su dirección, como amplificadores de flujo, para amplificar la densidad de flujo a través de una región, y como escudos magnéticos para proteger la región de un campo magnético externo. Entre los materiales blandos más comunes se encuentran en hierro, aleaciones de hierro-silicio, níquel-hierro, y ferritas blandas. Además los podemos encontrar en muchos dispositivos, como por ejemplo, transformadores, motores, inductores y electroimanes.

---

[9] GOMEZ, Eduardo. Corrientes inducidas nivel II. España: Editorial Fundación Confemetal, 2004. 47-53p

A la hora de seleccionar un material blando, se debe tener en cuenta la permeabilidad, la magnetización de saturación, la resistencia, y la coercitividad. Una alta permeabilidad, y alta magnetización de saturación, se desean para retener y concentrar el flujo. Una elevada resistencia y coercitividad son importantes para aplicaciones de altas frecuencias. [11]

**1.4.1.2 Materiales magnéticos duros.** A diferencia de los materiales blandos, los materiales magnéticos duros se caracterizan por tener una baja permeabilidad y una alta coercitividad, generalmente  $> 10000$  A/m. Ésta última propiedad hace que sea difícil magnetizar y desmagnetizar un material. Dichos materiales se conocen como imanes permanentes, porque una vez magnetizados, tienden a permanecer así, es decir resulta difícil desimantarlos.

Los imanes permanentes son usados como componentes que suministran el campo magnético en una amplia gama de productos como equipos electrónicos, computadores, dispositivos de almacenamiento de datos, dispositivos electromecánicos, equipos de telecomunicación, y aparatos biomédicos.

Las propiedades más importantes a la hora de seleccionar un imán son esas que definen la magnitud y estabilidad del campo que éste puede suministrar. Estas incluyen la coercitividad  $H_c$ , magnetización de saturación  $M_s$ , y remanencia  $B_r$ , así como el comportamiento de la curva de histéresis en el segundo cuadrante. Esta zona en el ciclo de histéresis es comúnmente conocida como curva de desmagnetización. [13]

---

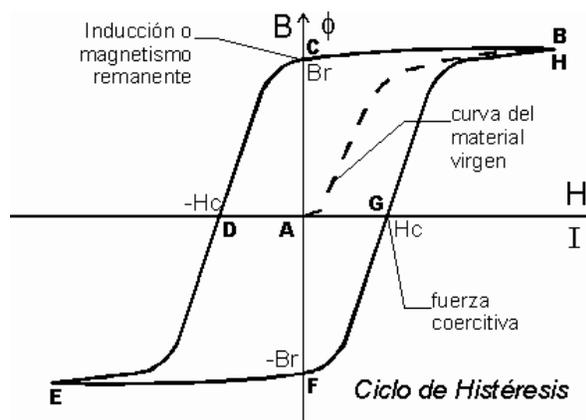
[11] HERMAN, Stephen L. Delmar's standard textbook of electricity. 3ra Edición. United States of America: Editorial Thomson, 2004. 99p

[13] IMA, Ingeniería magnética aplicada. Información técnica sobre imanes de neodimio. España. Disponible en internet: <http://www.ima.es/upload/documentos>

**1.4.2 Curva o ciclo de histéresis.** La relación entre la densidad de flujo magnético (o inducción),  $B$ , en un imán permanente y la fuerza magnetizante de campo,  $H$ , se puede representar en una curva de histéresis. En la figura 7 se puede apreciar el famoso ciclo de histéresis, o características  $B$ - $H$ , de un material magnético. Esta representa una curva en la cual se presenta una variación en la densidad del flujo magnético debido al cambio en la fuerza de magnetización.

El punto  $O$  de la figura 5, representa el estado no magnetizado de un material magnético, y la curva de magnetización inicial se representa por los puntos  $OACD$ . La curva  $AEFGHIA$ , es un ciclo de histéresis pequeño, el cual se obtiene cuando el imán no es magnetizado hasta alcanzar la saturación. El punto  $C$ , corresponde a la saturación magnética de un material, es decir, ya el imán no contribuye con algún incremento en la densidad de flujo. Cualquier incremento en  $B$  se atribuye a la relación entre la fuerza de campo magnetizante y la densidad de flujo del espacio, que es coincidente con el imán. El valor de  $B$  cuando  $H=0$  se da en los puntos  $OE$  y es llamado magnetización remanente, y el valor de  $H$  cuando  $B=0$ , el cual se representa en los punto  $OF$ , es llamado fuerza coercitiva. [1]

Figura 5. Curva de histéresis



Fuente. Electrónica básica escrito por Ángel cetina. Editorial imusa. México. 2004

El ciclo de histéresis con el área más grande se conoce como ciclo de histéresis mayor, y en la figura 6 se representa por los puntos BCDEFGH de la gráfica. Si el imán está magnetizado en su valor de saturación  $B_{sat}$ , entonces el punto B corresponde al estado de magnetización del material cuando la fuerza magnetizante se reduce a cero.

El valor de la densidad de flujo en el punto B se conoce como densidad de flujo remanente,  $B_r$ , y es una gran parte del valor de  $B_{sat}$ . Si la fuerza magnetizante se incrementa en la dirección negativa, la densidad de flujo se reduce hasta que la coercitividad  $H_c$  sea cero. La saturación del imán en la dirección contraria,  $-B_{sat}$ , se alcanza en el punto E por el aumento de la fuerza magnetizante aun en la dirección contraria. Al incrementar de nuevo la fuerza magnética hasta el punto cero, la densidad de flujo alcanza el valor de  $-B_r$ . Si la fuerza magnética se aumenta gradualmente en la dirección positiva, la densidad de flujo sigue la curva pasando por cero a el valor de  $+B_{sat}$ , en el punto D. Este ciclo que se obtiene es la mejor curva de histéresis del material. [1]

## 1.5 FEM INDUCIDA EN EL ESTATOR

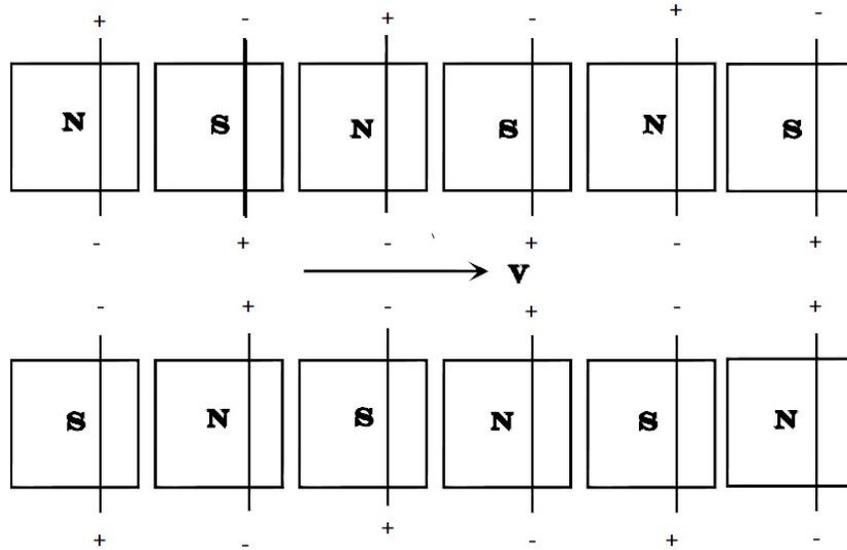
Para determinar la fem inducida en la bobina del estator mediante el método de Lorentz, primero se debe tener en cuenta el tipo de generador en el cual se está trabajando, para nuestro caso se trabaja sobre un generador de flujo radial. De este modo se supone un conjunto de imanes separados equitativamente entre sí viajando a una velocidad angular constante de manera paralela entre un conjunto de bobinas espaciadas uniformemente tal y como se muestra en la figura 6. [7]

---

[1] BASAK, Amitava. Permanent-magnet DC linear motors. United States of America: Editorial Oxford University Press, 1994. 43-47p

[7] NAVASQUILLO, Joaquín H, funcionamiento de un generador de imanes permanentes usando la expresión de Lorentz. Valencia (España). Disponible en internet: <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>

Figura 6. Movimiento de los imanes con respecto a las bobinas



Fuente. <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>

Para determinar la fem total sobre el bobinado del estator, se deben tener en cuenta varios parámetros de la geometría de la bobina general tales como:

- Numero de bobinas por fase
- Numero de vueltas por bobina
- Longitud de la bobina

El diámetro del alambre no se tiene en cuenta debido a que el número de vueltas por bobinas es inversamente proporcional a diámetro del alambrado, es decir, entre más grande el diámetro del alambre, menor será las vueltas del alambre por bobina, y viceversa.

Esto se deduce en que la fem inducida en el estator es igual a la suma de las fem inducidas en la cada una de las bobinas de las fases, por ende la ecuación de la fem inducida en el estator se define en la ecuación 1 como:

$$\mathcal{E} = n(v * 2B * l * k) \text{ (Ecuación 1)}$$

En donde:

$n$  = numero de bobinas

$v$  = velocidad lineal de los imanes

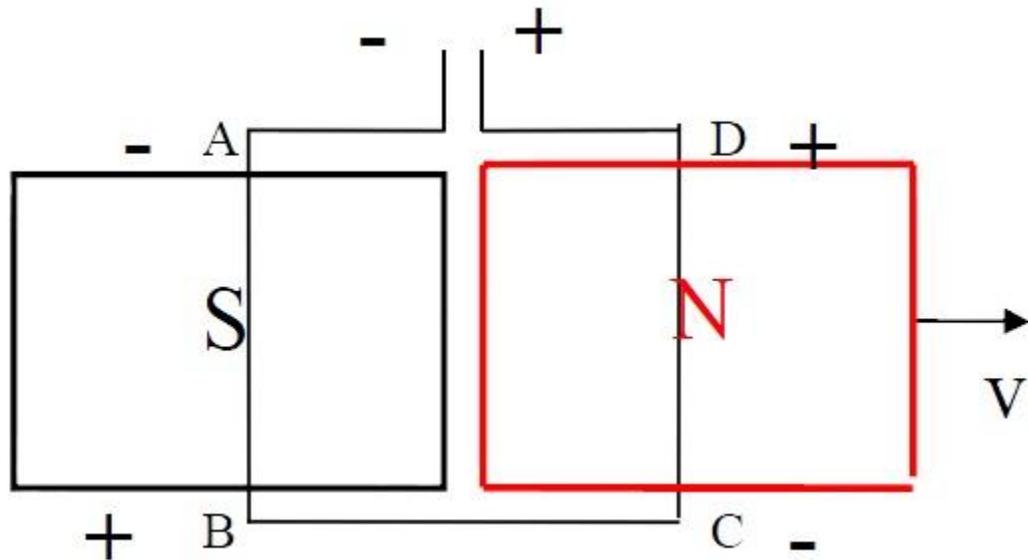
$B$  = campo magnetico por bobina

$l$  = longitud de la bobina perpendicular a la velocidad de giro de los imanes

$k$  = numero de vueltas por bobina

El campo magnético por bobina se duplica debido a que hay dos imanes interactuando a la vez en una bobina, por ende el campo magnético se duplica (figura 7).

Figura 7. Interacción del campo magnético por bobina



Fuente. <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>

Como los imanes giran alrededor del estator, la velocidad lineal de estos está definida como el producto de la velocidad angular por el radio de giro, entonces se deduce en la ecuación 2 que:

$$\varepsilon = 2\omega rnBlk \text{ (Ecuación 2)}$$

Como normalmente la velocidad angular se representa en rpm, en la ecuación 3 se tiene que:

$$\varepsilon = \frac{4\pi}{60\sqrt{2}}(rpm)rBnl = 0.148(rpm)rBnlk \text{ (Ecuación 3)}$$

## 1.6 EJES

Un eje es un elemento que puede ser rotatorio o estático y que dependiendo de su funcionalidad puede denominarse árbol o eje. Un árbol es aquel en donde los sistemas de transmisión de potencia se acoplan y giran conjunto a este, mientras que un eje es aquel en donde se posicionan los elementos de transmisión de potencia y giran alrededor de este, es decir el eje es estático. Esta tecnología se remonta a épocas anteriores en donde el hombre en su afán y destreza por crear y facilitar los trabajos dio origen a un sistema de transmisión de potencia eficaz cuyo funcionamiento fuese simple pero efectivo, creando camino a la evolución tecnológica.<sup>[10]</sup>

**1.6.1 Diseño de ejes.** Para el diseño de un eje se necesita determinar los parámetros de operación, además de los esfuerzos generados en este, debido a las cargas otorgadas por los elementos asociados a este tales como engranes y poleas, ya que generalmente los ejes trabajan con un movimiento el cual genera una torsión el cual este debe ser capaz de resistir además de las cargas

producidas, tanto por el peso de los componentes como las cargas transmitidas por estos. Según del libro elementos de maquinas de Bernard Hamrock el procedimiento adecuado para el diseño del eje es el siguiente:

- Desarrollar un diagrama de cuerpo libre reemplazando los componentes soportados por el eje (poleas engranes, volantes) por sus respectivas cargas
- Ilustrar el diagrama de los momentos flexionantes en los diferentes planos en donde actúen dichos momentos. El momento interno resultante en cualquier sección a lo largo del eje se expresa en la ecuación 4 como:

$$M_x = \sqrt{M_{xy}^2 + M_{xz}^2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

- Desarrollar el diagrama de torsión, el par torsor que desarrolla entre los elementos transmisores debe balancearse entre sí.
- Se establece la sección transversal crítica o la localización x en donde el par torsor y el momento flexionante son mayores.
- Para materiales dúctiles se utiliza la teoría del esfuerzo cortante máximo, mientras que para materiales frágiles se utiliza la teoría del esfuerzo normal máximo.<sup>[10]</sup>

**1.6.2 Diseño de ejes bajo carga estática.** Se tienen diversas consideraciones para el diseño del eje bajo cargas, durante los análisis y cálculos a realizar el objetivo principal es determinar el mínimo diámetro admisible para las condiciones necesarias, o dependiendo del factor de seguridad establecido.

Se ha de Calcular los momentos flexionantes y torsores y las fuerzas axiales que actúan sobre el eje a diseñar. El momento flector se genera cuando existe una carga transversal en el eje para lo cual se utiliza la ecuación 5.

$$\sigma_{xm} = \frac{M*c}{I} \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde  $c = \text{radio} = \frac{d}{2}$   $I = \text{momento de inercia} = \frac{\pi d^4}{64}$   $M = \text{momento maximo}$

Para el par torsor se utiliza la siguiente ecuación6.

$$\tau_{xy} = \frac{Tc}{J} \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde  $J = \frac{\pi d^4}{32}$   $T = \text{torque maximo}$   $c = \text{radio} = \frac{d}{2}$

Para la fuerza axial se utiliza la siguiente ecuación 7.

$$\sigma_{xa} = \frac{F}{A} \text{ (Ecuación 7)}$$

Donde  $F = \text{fuerza axial}$   $A = \text{area de la seccion transversal} = \pi * r^2$

Una vez obtenido los esfuerzos de flexión y torsión y siguiendo la ecuación 8, se obtiene los esfuerzos normales principales sobre el eje, es decir, los esfuerzos producto de la combinación del esfuerzo flexionante y el esfuerzo cortante. [10]

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_{xm} + \sigma_{xa}}{2} \pm \sqrt{(\frac{\sigma_{xm} + \sigma_{xa}}{2})^2 + \tau_{xy}^2} \text{ (Ecuación 8)}$$

Una vez obtenido los esfuerzos principales y obteniendo el factor de seguridad, (dependiendo del diseñador o las especificaciones del sistema), puede utilizarse dos caminos para hallar los cálculos deseados, la teoría de la energía de distorsión (DET) y la teoría del esfuerzo cortante máximo (MSST).

Utilizando la ecuación (DET) (ecuación 9) se obtiene que:

$$(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2)^{1/2} \geq \frac{S_y}{\eta_s} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Utilizando la ecuación (MSST) (ecuación 10) se obtiene que:

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \geq \frac{S_y}{\eta_s} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde

$S_y = \text{resistencia a la fluencia del material del eje}$        $\eta_s = \text{factor de seguridad}$

**1.6.3 Diseño de ejes bajo carga cíclica.** El diseñar un eje bajo carga cíclica es un tanto más complejo que el de carga estática, pero es el más esencial, ya que el objetivo de la mayoría de ejes es transmitir potencia a partir de las revoluciones, lo cual en la mayoría de los casos esto hace que la variación de las cargas fluctúe con el tiempo, esto debido a diversos factores, como la desalineación o el balanceo de los componentes asociados a este. Este a su vez se divide para materiales frágiles como las fundiciones y los dúctiles, aquellos que han pasado por tratamientos especiales. Para nuestro alcance nos enfocaremos en las ecuaciones necesarias para diseñar un eje con materiales dúctiles. [10]

En este tipo de diseño se tiene en cuenta diversos factores claves en el desempeño del eje tales como:

- Factor de superficie
- Factor de confiabilidad
- Factor de tamaño

Estos factores modifican la resistencia a la fluencia del material durante el diseño para determinar las dimensiones mínimas de funcionamiento del eje. Antes de comenzar a diseñar el eje en condiciones cíclicas, se debe determinar los esfuerzos medios y los alternantes, es decir, el rango de variación del esfuerzo con respecto al tiempo, en pocas palabras se refiere a la amplitud del esfuerzo ya sea de flexión o de torsión. En este caso no se necesita obtener el esfuerzo resultante de la combinación de las dos cargas, ya que en este proceso se trabaja con las cargas independientes, es decir, necesitaremos los datos separados de los esfuerzos flexionantes y de torsión.

Como se mencionó anteriormente durante el diseño de ejes bajo cargas estáticas, en cargas cíclicas, también existen dos métodos de diseño el (MSST) y el (DET) previamente mencionados. [10]

Según el (MSST) para hallar el factor de seguridad se utiliza la ecuación 11.

$$\eta_s = \frac{\pi d^3 S_y}{32 \sqrt{\left(M_m + \frac{S_y}{S_e} K_f M_a\right)^2 + \left(T_m + \frac{S_y}{S_e} K_{fs} T_a\right)^2}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Pero si se desea hallar el mínimo diámetro se utiliza la ecuación 12, donde:

$$d = \left[ \frac{32 \eta_s}{\pi S_y} \sqrt{\left(M_m + \frac{S_y}{S_e} K_f M_a\right)^2 + \left(T_m + \frac{S_y}{S_e} K_{fs} T_a\right)^2} \right]^{1/3} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Según el (DET) para hallar el factor de seguridad se utiliza la ecuación 13.

$$\eta_s = \frac{\pi d^3 S_y}{32 \sqrt{\left(M_m + \frac{S_y}{S_e} K_f M_a\right)^2 + \frac{3}{4} \left(T_m + \frac{S_y}{S_e} K_{fs} T_a\right)^2}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Pero si se desea hallar el mínimo diámetro, se utiliza la ecuación 14 donde:

$$d = \left[ \frac{32 \eta_s}{\pi S_y} \sqrt{\left(M_m + \frac{S_y}{S_e} K_f M_a\right)^2 + \frac{3}{4} \left(T_m + \frac{S_y}{S_e} K_{fs} T_a\right)^2} \right]^{1/3} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

$M_m =$  Momento medio       $M_a =$  Momento alternante       $T_m =$  Torque medio

$T_a =$  Torque alternante       $S_e =$  Resistencia a la fluencia modificada

$K_f =$  Sensibilidad a la muesca  $= 1 + (K_c - 1)q_n$

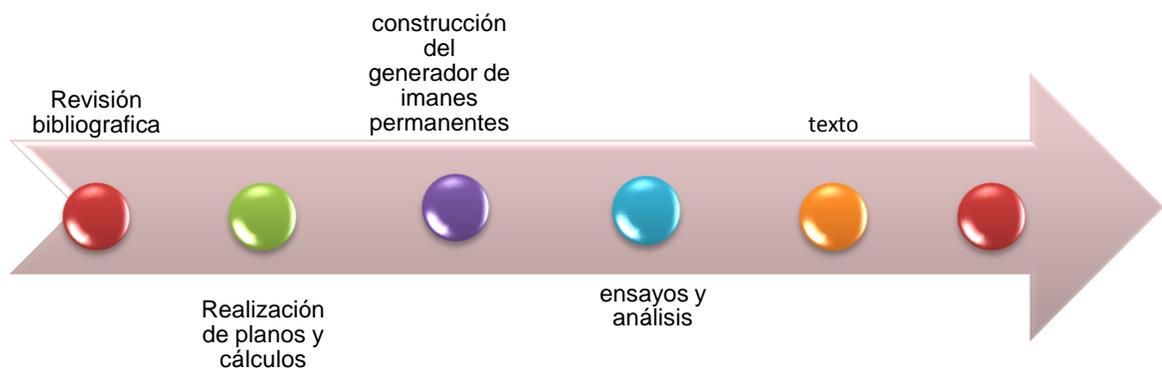
---

[10] HAMROCK BERNARD elementos de maquinas. McGraw Hill 1999. Capitulo 11 ejes y partes asociadas

## 2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta tesis, se siguió con una metodología compuesta por múltiples etapas para cumplir con los objetivos trazados en el presente trabajo de grado. En la figura 8, se aprecia paso a paso el orden de esta:

Figura 8. Etapas de la metodología



Fuente. Carlos Andrés Castillo, Hernán David Iguarán, 2012

### 2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realizó una consulta bibliográfica respecto a los generadores de energía eléctrica, en especial a los generadores de imanes permanentes, con la finalidad de obtener la información necesaria para proceder con la construcción del generador. Para este fin, fue necesario recopilar toda la información concerniente

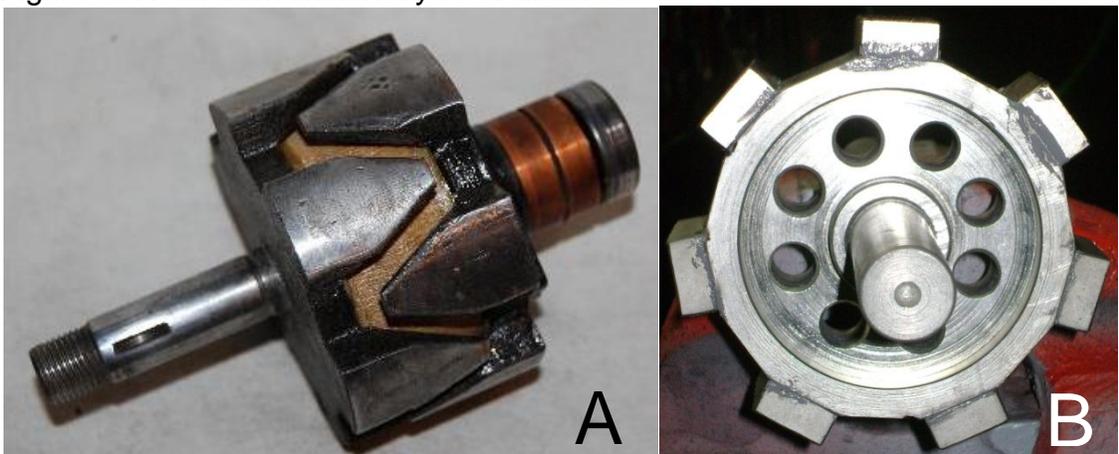
a estos tipos de generadores, asimismo, fue llevado a cabo una investigación exhaustiva sobre las partes fundamentales del generador de imanes permanentes, Además de la exploración sobre el estado actual de la tecnología de estos sistemas de generación, así como también empresas líderes en este sector a nivel mundial.

## 2.2 DESARROLLO DEL DISEÑO

Una vez realizada la consulta bibliográfica necesaria para la elaboración del proyecto, se procede al desarrollo de los cálculos necesarios para la construcción del generador de magnetos permanentes, los cuales son esenciales para el funcionamiento del sistema.

Para este proyecto se requiere el cambio total del rotor convencional del generador, por un rotor especial, capaz de sostener los imanes de neodimio (figura 9), parte esencial en el sistema, debido a que sin estos magnetos es imposible la generación de electricidad.

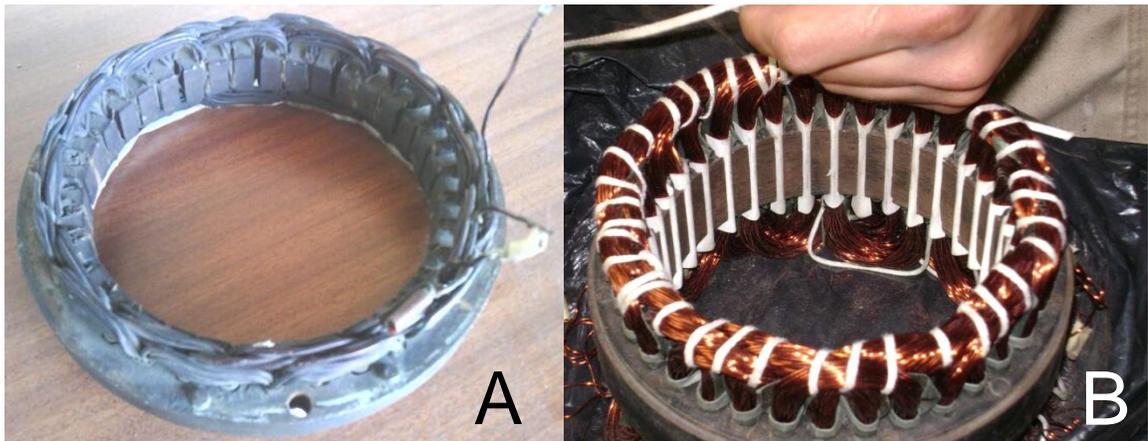
Figura 9. Rotor convencional y rotor diseñado



Fuente. Autores del proyecto. (B), [www.todocoleccion.net/rotor alternador-Renault](http://www.todocoleccion.net/rotor%20alternador-Renault) (A)

Además se realizó paralelamente la selección y fabricación de una segunda bobina según los parámetros deseados de generación (figura 10), debido a que la bobina original está diseñada para obtener la potencia considerable a revoluciones mayores a 3200 rpm. En la figura 11 se observa el generador de imanes permanentes.

Figura 10. Bobina original y bobina modificada



Fuente. Autores del proyecto

Figura 11. Generador de magnetos permanentes

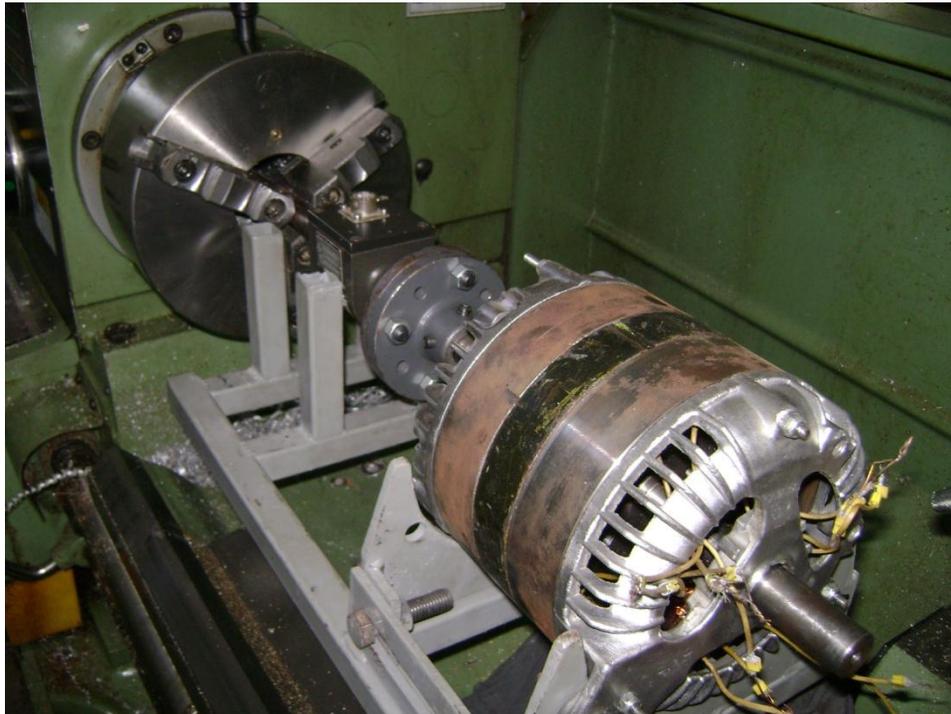


Fuente. Autores del proyecto

### 2.3 PRUEBAS DEL GENERADOR

Los ensayos pertinentes al generador de imanes permanentes se realizan en el torno situado en el laboratorio de procesos industriales de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga (figura 12), para determinar la máxima potencia eléctrica que puede entregar dicha máquina, asimismo se realiza la recolección de los datos necesarios, para la elaboración de las curvas del comportamiento de la máquina para así obtener su desempeño, tanto de los imanes como del generador. Estas pruebas se realizan con bancos de resistencias de 80 Ohmios (figura 13) y 11 ohmios (figura 14), para determinar el comportamiento de este, además de la utilización de diversas conexiones que se pueden crear en el bobinado del estator.

Figura 12. Pruebas del generador en el torno



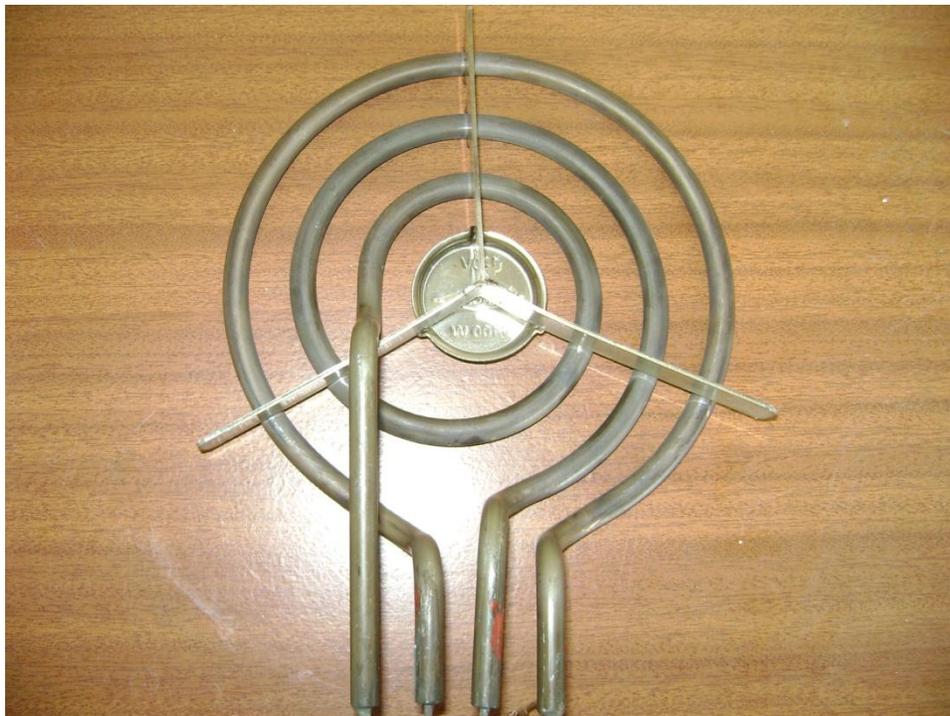
Fuente. Autores del proyecto

Figura 13. Resistencias de  $80\Omega$  c/u



Fuente. Autores del proyecto

Figura 14. Resistencia de  $11\Omega$



Fuente. Autores del proyecto

### 3. DISEÑO BASICO

Existen diversos problemas que se pretenden corregir con la construcción de un generador de imanes permanentes tales como un óptimo funcionamiento a bajas revoluciones, para los cuales estos sistemas están diseñados, además de la disminución de la contaminación debido a que los generadores convencionales requieren consumos mayores de energía, energía que adquieren de su propia generación, puesto que estos deben suministrar corriente eléctrica a los rotores para producir un campo magnético en él. El diseño parte de la utilización de un alternador de un vehículo convencional (figura 15) perteneciente a la marca Dodge.

Figura 15. Alternador seleccionado para la modificación



Fuente. Autores del proyecto

### 3.1 DISEÑO DEL ESTATOR

Las dimensiones del estator fueron obstáculos, debido a que inicialmente se deseaba construir un rotor con capacidad para 16 polos, pero debido a la limitante del espacio del núcleo del estator, se rediseñó el sistema para una capacidad máxima de 14 polos, para así obtener una mayor disponibilidad de energía por parte de los imanes. La ecuación 15, rige el comportamiento de la generación en los alternadores.

$$E = K * F_i * w \text{ (Ecuación 15)}$$

En donde:

*E = Voltaje generado*

*K = constante de construcción de la máquina*

*F<sub>i</sub> = Flujo magnético a través del estator*

*w = velocidad angular de giro*

De esto se deduce que para poder obtener una mayor cantidad de energía eléctrica a una velocidad de giro relativamente baja, se necesita aumentar el flujo magnético en el estator, por lo cual como se ha mencionado anteriormente, al inicio se estableció la construcción de un rotor con 16 polos (imanes), pero por efectos de las dimensiones del estator, el máximo número de polos debe ser de 14. No obstante para compensar la falta del campo magnético de los dos imanes, y para la obtención de una mayor producción de energía eléctrica, se decide aumentar la constante de construcción *K* de la máquina, cambiando el bobinado del estator por un calibre y un número de vueltas por bobina mayor dando como resultado una bobina con un alambre de calibre 20 y un total de 40 vueltas por bobina. El estator está conformado por tres fases, las cuales cada fase alberga 9 bobinas, por consiguiente existen 27 bobinas en el estator.

Usando la ecuación 3 se tiene que:

$$k = 40 \text{ vueltas}$$

$$n = 27 \text{ bobinas}$$

$$B = 2.4 \frac{Vs}{m^2}$$

$$l = 0.05 \text{ m}$$

$$\varepsilon = 0.148 * 1250 \text{ rpm} * 0.049\text{m} * 2.4 \frac{Vs}{m^2} * 27 * 0.05\text{m} * 40$$

$$\varepsilon = 1174.8 \text{ voltios} = E$$

De la ecuación 15 se deduce que:

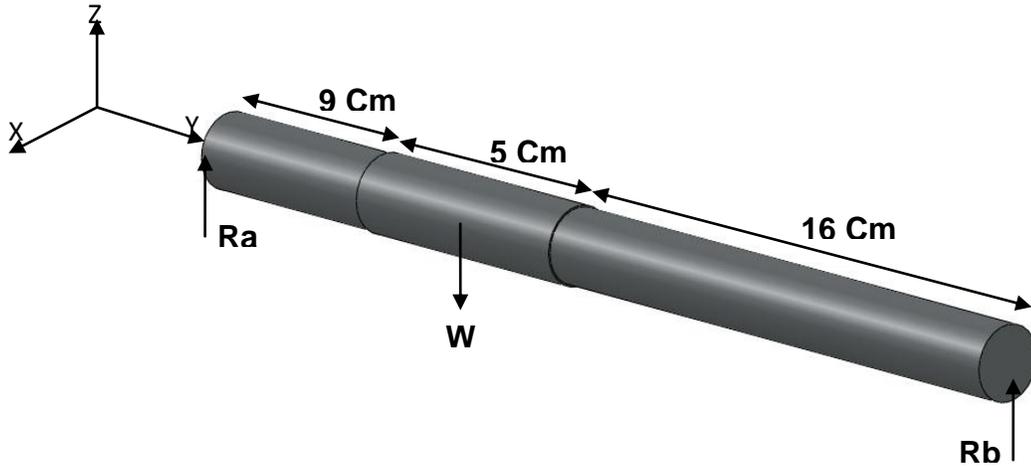
$$k = \frac{E}{Fi * \omega} = \frac{1174.8 \text{ V}}{130.89 \text{ rad/s} * 16.8 \text{ Vs}} = 0.53$$

Para un alambre de calibre 20, la constante de construcción k del generador que se puede obtener es de 0.53, el cual es un valor sobresaliente ya que normalmente las constantes de construcción de la mayoría de las maquinas eléctricas (motores ó generadores) son de aproximadamente 0.2, debido a que estos trabajan con calibres menores, es decir, con diámetros más gruesos y por ende con menos vueltas por bobina.

### 3.2 DISEÑO BÁSICO DEL EJE.

Para realizar el diseño básico del eje se procede a elaborar el diagrama de cuerpo libre (figura 16) en donde se aprecia las cargas soportada por el eje. El diseño básico del eje se adapta a las ecuaciones tomadas del libro de Hamrock Bernard capítulos 7 y 11

Figura 16. Diagrama de Cuerpo Libre del eje



Fuente. Autores del proyecto

Donde  $W$  es igual al peso combinado del porta imanes y los magnetos de neodimio, los cuales aportan un peso aproximado de 26,4 newtons.

Una vez realizado el diagrama de cuerpo libre, se procede a calcular las reacciones en los apoyos del eje, y posteriormente a realizar el diagrama de fuerzas cortantes y momentos flectores (figura 18).

Cálculo del momento plano YZ

$$\sum M_a = 0$$

$$(0.3m \cdot R_b) - (0.0115m \cdot 26.4N) = 0$$

$$R_b = \frac{0.0115m \cdot 26.4N}{0.3m} = 10.12N$$

Cálculo de las fuerzas plano YZ

$$\sum F = 0$$

$$R_a + R_b - w = 0$$

$$R_a = 26.4N - 10.12N = 16.28N$$

Figura 17. Diagrama de cortantes y momentos flectores

Diagrama de fuerzas

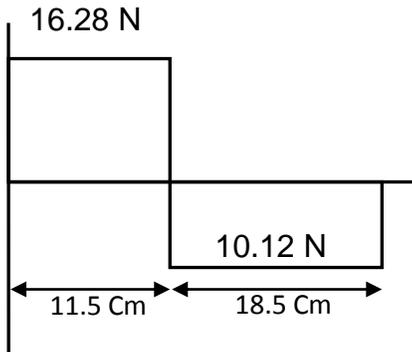
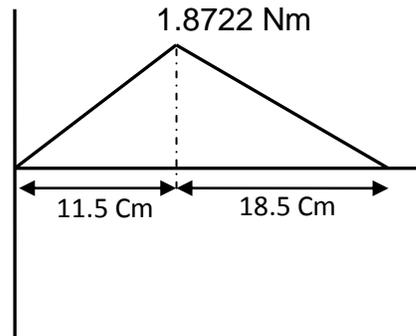


Diagrama de momentos



Fuente. Autores del proyecto

El generador está diseñado para suministrar una potencia aproximada de 1000 wattios, a 1200 rpm. De esto se deduce que:

$$P = T \cdot W$$

$$w = \frac{1200 \text{rpm} \cdot 2\pi}{60} = 40\pi \text{ rad/seg}$$

$$T = \frac{1000 \text{ wattios}}{40\pi \text{ rad/seg}} = 25\pi \text{ Nm}$$

**3.2.1 Esfuerzos alternantes.** Son generados por la fuerza ejercida debido al peso del porta magneto y los imanes.

$$\sigma_a = \frac{Mc}{I} = \frac{1.8722 \text{Nm} \cdot r}{\frac{\pi r^4}{4}}$$

La ecuación se deja en función del radio del eje, debido a que se hallará el diámetro mínimo, tomando como base un factor de seguridad igual a 2.

**3.2.2 Esfuerzos medios.** Son generados por el par torsor presente en el sistema.

$$\tau = \frac{Tc}{J} = \frac{25\pi r}{\frac{\pi r^4}{2}} \quad \sigma_m = \sqrt{3 \left( \frac{25\pi r}{\frac{\pi r^4}{2}} \right)^2}$$

Para el desarrollo de este diseño, se debe realizar las modificaciones correspondientes al límite de fatiga, según estudios realizados y evidenciados en la ecuación 7.16 del libro de Hamrock en la página 270, el límite a la fatiga se expresa como:

$$S_e = K_f K_s K_r K_t K_m S'_e \quad (\text{Ecuación 7.16})$$

Los factores de modificación a la fatiga se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 .Factores de modificación a la fatiga

AISI 4140					
$S_u$	$S_y$	$K_f$	$K_r$	$K_s$	$S'_e$
1050 Mpa	690 Mpa	0.69	0.9	$1.189(2r)^{-0.112}$	525 Mpa

Fuente. Hamrock Bernard. Elementos de maquinas

**3.2.3 Sensibilidad a la muesca.** Según la figura 6.5 (b) y (c), y la figura 7.6 del libro de Hamrock, páginas 225 y 272 respectivamente y asumiendo que:

$$r/d = 0.04 \quad D/d = 1.03 \quad K_c \text{ flexion} = 1.8$$

$$r/d = 0.04 \quad D/d = 1.09 \quad K_c \text{ Torsion} = 1.27$$

$$S_u = 1.05 \text{ Gpa} \quad q_n = 0.82$$

$$K_f = 1 + (1.8 - 1) * 0.82 = 1.656$$

Utilizando la línea de Goodman, estipulada en el libro de Hamrock, página 281, se tiene que:

$$\frac{1}{2} = \left( \frac{1.656 \left( \frac{1.8722 \text{ Nm} * r}{\frac{\pi r^4}{4}} \right)}{387.64 * 10^6 * 2r^{-0.112}} + \sqrt{\frac{3 \left( \frac{25\pi r}{\frac{\pi r^4}{2}} \right)^2}{1050 * 10^6}} \right)$$

$$\text{radio minimo} \approx 5.6 \text{ mm} \quad \text{Diametro minimo} \approx 11.2 \text{ mm} \approx \frac{7}{16}''$$

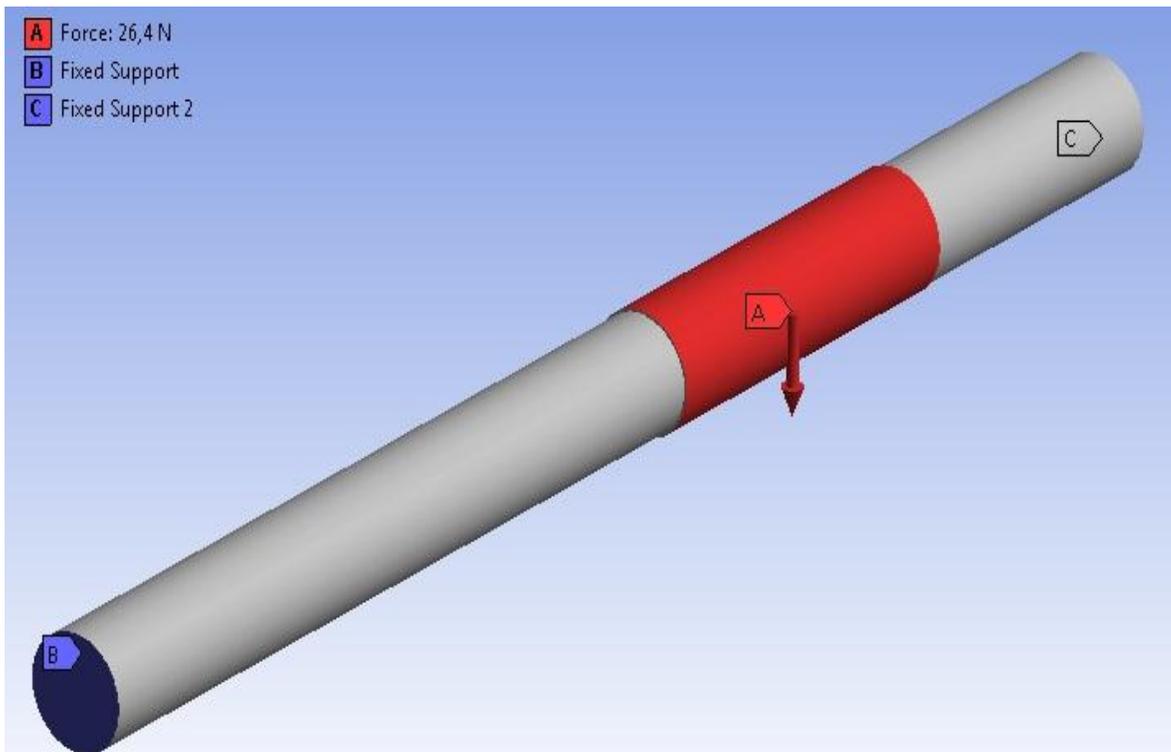
Inicialmente para el diseño del eje se escogió un diámetro de 7/8" (22.22 mm) con el fin de utilizar los rodamientos que se adaptan a la carcasa del generador. Esta medida es idónea para el trabajo, debido a esto, el factor de seguridad del eje es de:

$$\frac{1}{n_s} = \left( \frac{1.656 \left( \frac{1.8722 \text{ Nm} * 0.011}{\frac{\pi 0.011^4}{4}} \right)}{387.64 * 10^6 * 2 * 0.011^{-0.112}} + \sqrt{\frac{3 \left( \frac{25\pi * 0.011}{\frac{\pi 0.011^4}{2}} \right)^2}{1050 * 10^6}} \right)$$

$$n_s = 14.93$$

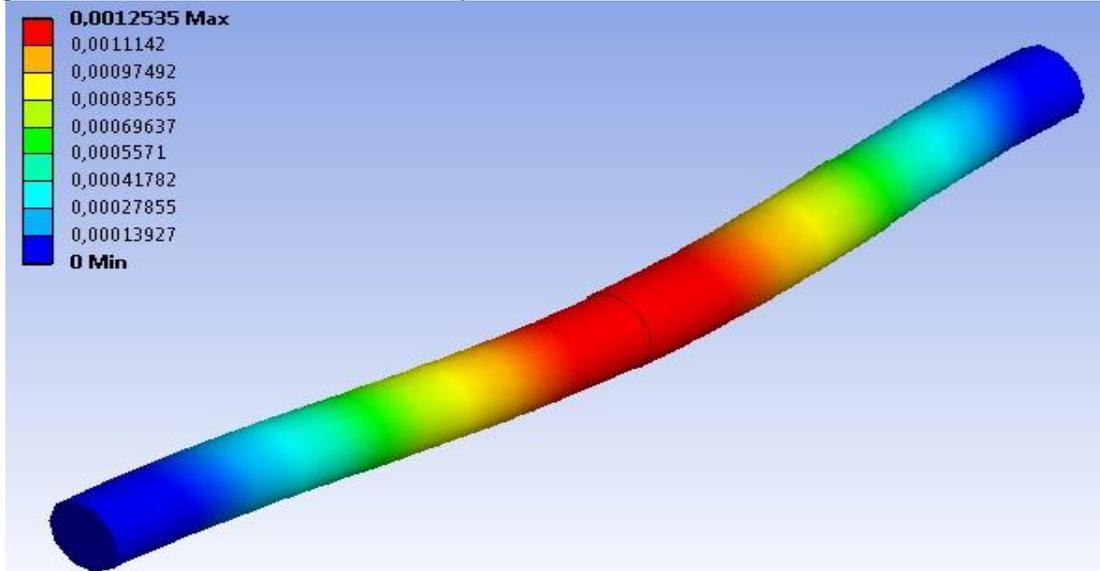
Para corroborar estos análisis, se procedió a realizar las simulaciones con ANSYS versión 12.0, Utilizando los procedimientos del análisis estructural, basado en un sistema de elementos finitos, con el fin de visualizar el posible comportamiento del eje bajo la carga. En la figura 18 se evidencia el diagrama de cuerpo libre del eje, en la figura 19, se observa la deformación del eje debido a la carga soportada. La deformación es mínima gracias a la alta resistencia que otorga el material AISI 4140, mientras que en la figura 20 se tiene el factor de seguridad del eje, el cual suministró un valor cercano al dato obtenido mediante los cálculos analíticos realizados...en la sección 3.2... En la tabla 2 se compara el factor de seguridad obtenido por medio de las formulas, y el de la simulación.

Figura 18. Diagrama de cuerpo libre



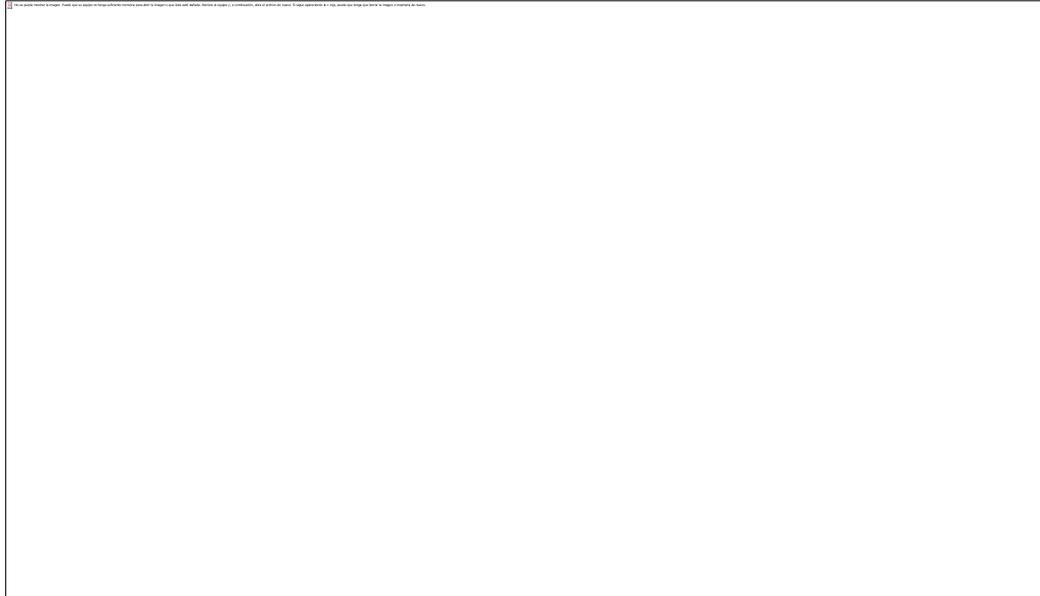
Fuente. Autores del proyecto.

Figura 19. Deformación Total del eje en milímetros



Fuente: Autores del proyecto

Figura 20. Factor de seguridad del eje



Fuente. Autores del proyecto

Tabla 2. Comparación factor seguridad

$N_s$ Calculado matemáticamente	$N_s$ calculado por ANSYS
14.93	15
Error = 0.46%	

Fuente. Autores del proyecto.

Con los resultados obtenidos tanto matemática, como computacionalmente, se determinó que el diámetro seleccionado, es idóneo para el trabajo estipulado por lo que se utilizará un eje AISI 4140 de 7/8" de diámetro.

### 3.3 ANÁLISIS MODAL

Una vez determinado las dimensiones del eje, se procede con los análisis computacionales para determinar las frecuencias naturales del eje y porta imanes y verificar que el sistema este apto para trabajar a velocidades angulares que se encuentran entre 0 y 1300 revoluciones por minuto. En la tabla 4 se observa algunas frecuencias naturales y las revoluciones a las cuales se encuentran, mientras que en la tabla 3, se evidencia las deformaciones producidas por cada una de las frecuencias. En la figura 21 se evidencia el fenómeno de deformación del sistema eje-porta imanes a una frecuencia de 1243,8 Hz, en la cual se aprecia una pequeña expansión radial del porta imanes.

Tabla3. Deformación del sistema según frecuencia

Frecuencia (Hz)	1243,8	4494,4	4505	4774	4777
Deformación mínima (mm)	0				
Deformación máxima (mm)	0,0318	0,0491	0,0499	0,0308	0,0304
Deformación mínima (mm)	Eje				
Deformación máxima (mm)	porta imanes				

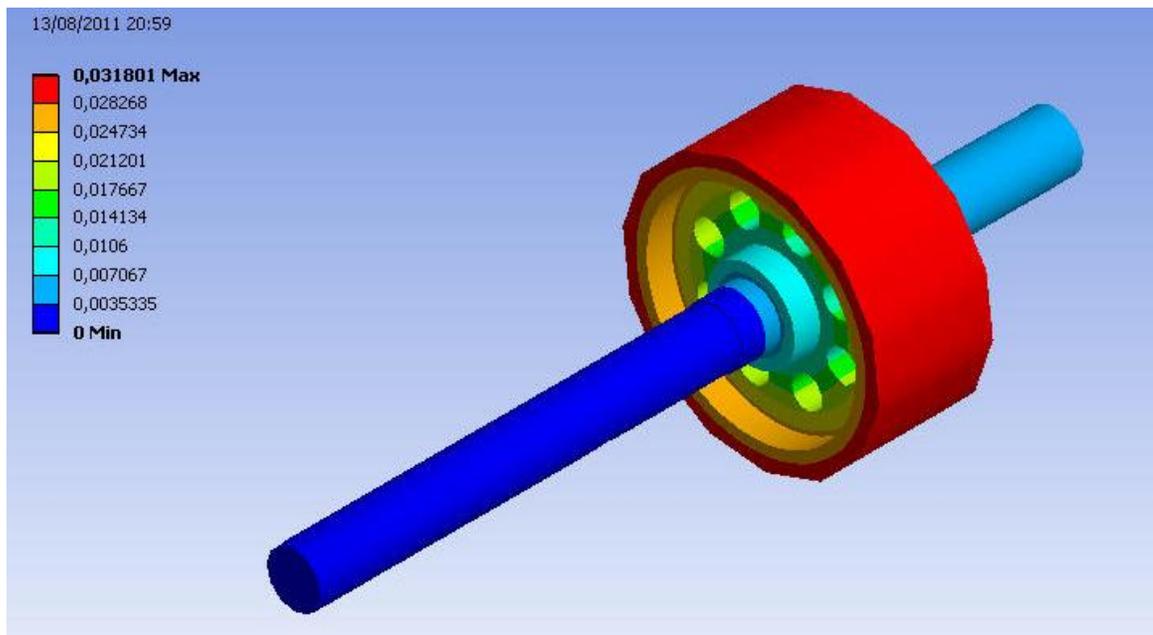
Fuente. Autores proyecto.

Tabla 4. Frecuencias naturales y sus velocidades de giro

Modo	Frecuencia [Hz]	Rpm
1,	1243,8	74628
2,	4494,4	269664
3,	4505	270300
4,	4774	286440
5,	4777	286620
6,	6586,7	395202

Fuente. Autores del proyecto.

Figura 21. Deformación eje y porta imanes con frecuencia de 1243.8 Hz



Fuente. Autores del proyecto.

Con los análisis previamente realizados y observados, se determina que el ensamble es apto para trabajar dentro de los parámetros de diseño acordados para la generación de energía eléctrica.

### 3.4 ANÁLISIS DE TEMPERATURA

Este análisis se realizó con el fin de determinar la temperatura que pueden alcanzar los imanes durante el trabajo de generación, con el fin de evitar daños a estos, debido a que estos no pueden sobrepasar una temperatura de aproximada de 80 grados Celsius, porque al llegar a este valor, los magnetos pueden llegar a perder hasta un 80% de su energía magnética, por lo cual quedarán inservibles para este proceso de generación.

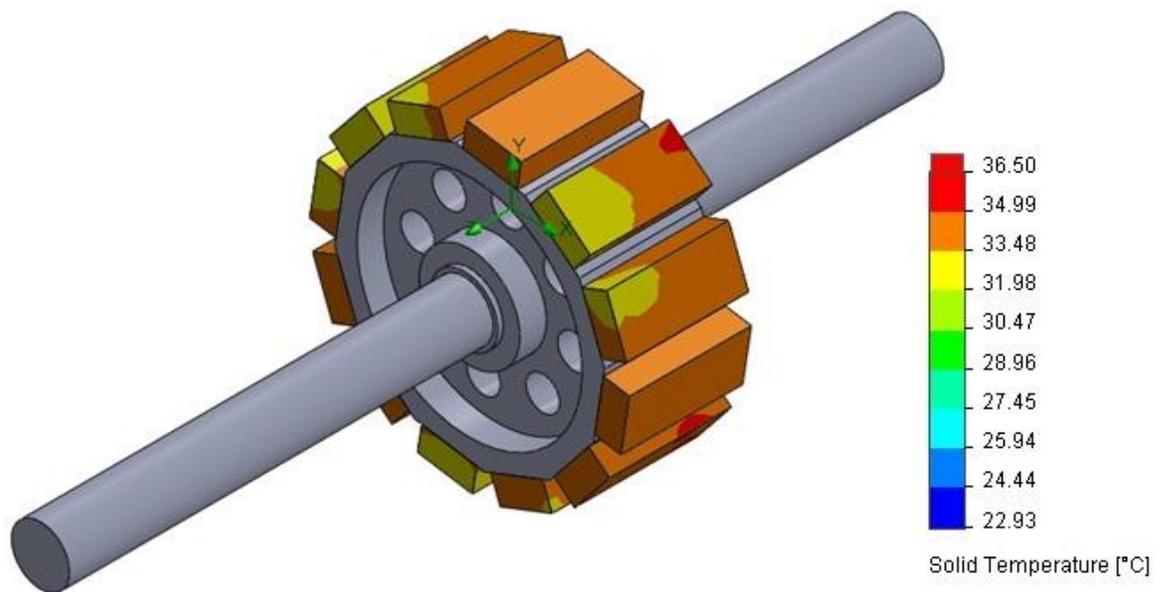
Este análisis se logró gracias al uso del software de simulación solidworks flow simulation versión 2011. En la tabla 5 se evidencia los datos globales del generador arrojados por la simulación. En la figura 22 se puede evidenciar la distribución de la temperatura en grados Celsius en cada uno de los imanes.

Tabla 5. Datos obtenidos simulación de fluidos y temperaturas

Concepto	Mínimo	Máximo
Presion [Pa]	101282.66	101381.77
Temperatura [°C]	23.90	221.44
Temperatura del fluido [°C]	23.90	221.40
Temperatura del sólido [°C]	24.97	221.44
Flujo de calor de la superficie [W/m <sup>2</sup> ]	-2920.789	492718.282
Coeficiente de transferencia de calor interno [W/m <sup>2</sup> /K]	0.016	22153.597
Flujo de calor [W/m <sup>2</sup> ]	42.190	611749.742

Fuente. Autores del proyecto

Figura 22. Temperatura de los imanes



Fuente. Autores del proyecto.

En las pruebas de simulación realizadas al generador, se puede apreciar una elevación en la temperatura de los imanes entre 31 y 37 grados Celsius, rango en el cual los magnetos pueden trabajar sin riesgo a sufrir una desimantación, puesto que este fenómeno tiene lugar al llegar aproximadamente a los 80 grados Celsius.

### 3.5 PROBLEMA DE GENERACIÓN

Al comenzar el desarrollo del proyecto, se estableció el parámetro de la utilización de 14 imanes en el rotor, como se menciona...en la sección 3.1... con el fin de obtener un mayor campo magnético y así conseguir una mayor producción de energía eléctrica. No obstante al transcurrir el tiempo, se determinó que el diseño de montaje de 14 imanes al rotor, no proporciona el campo magnético adecuado con el núcleo seleccionado, debido a que para la producción de un campo

magnético satisfactorio, tanto el núcleo como el rotor deben cumplir con un parámetro fundamental, parámetro que fue omitido durante los inicios de la construcción, debido al desconocimiento de la ecuación, la cual fue hallada en investigaciones recientes.

La ecuación 16 rige la relación entre el rotor y el núcleo y se define como:

$$Paso = \frac{\text{Número de casillas del núcleo}}{\text{Número de polos}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

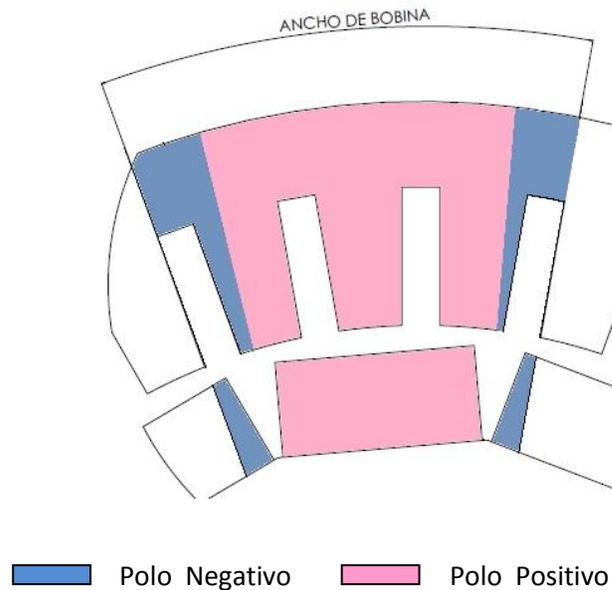
*paso = debe ser un número entero*

Debido a que el núcleo cuenta con 36 casillas, la relación entre el núcleo y el rotor con los 14 imanes no era el adecuado para producción de un campo magnético satisfactorio debido a que:

$$Paso = \frac{36}{14} = 2.57$$

Como consecuencia, en cada bobina de las fases, interactúa tres fuerzas magnéticas (Figura 23), ya sea negativo-positivo-negativo, o positivo-negativo-positivo, según sea el momento de interacción del imán, esta acción de tres fuerzas es la causante de la falta de un campo magnético ideal, puesto que en cada bobina solo deben haber dos fuerzas opuestas interactuando juntas.

Figura 23. Interacción del campo magnético, con 14 imanes



Fuente. Autores del proyecto.

La obtención de un núcleo con 42 casillas para ser válida la relación con el rotor de 14 imanes, es comercialmente difícil de conseguir, además de que se tendría que cambiar la carcasa del generador, es decir reconstruir todo el diseño desde el principio, lo cual conllevaría a un presupuesto elevado y tiempo, por lo cual se optó por la sustracción de dos imanes del rotor, y redistribuirlos uniformemente alrededor del mismo. De este modo se tiene que:

$$P = \frac{36}{12} = 3$$

Como resultado se obtiene una interacción de dos fuerzas magnéticas opuestas en la bobina (figura 24), y por consiguiente un campo magnético satisfactorio para la producción de energía eléctrica.

Como consecuencia de la sustracción de los imanes y la redistribución de estos, la separación de los imanes aumentó considerablemente, lo que ocasionará un debilitamiento del campo magnético debido al espacio vacío en donde no interactúan completamente las fuerzas magnéticas de los imanes, esto se resume en una disminución en la generación de potencia eléctrica.

Figura 24. Interacción del campo magnético con 12 imanes



Fuente. Autores del proyecto.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con base a los análisis estadísticos realizados, se determina el número de pruebas a realizar según el margen de error deseado obtenido de la ecuación 17.

$$e = Z \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \text{ (Ecuación 17)}$$

Donde:

*e* = *margen de error*

*Z* = *nivel de confianza*

*s* = *desviación estandard*

*n* = *número de pruebas*

### 4.1 GENERACIÓN DE ELETRICIDAD

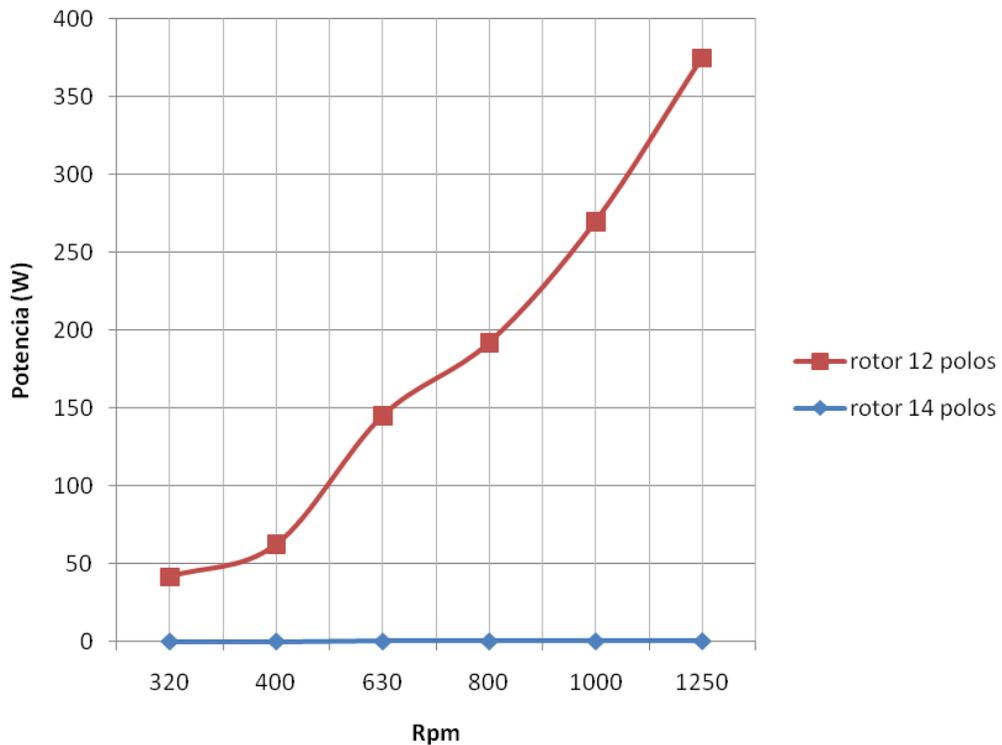
Como se mencionó...en la sección 3.5..., la obtención de energía eléctrica mediante el rotor con 14 imanes es matemáticamente imposible debido a la interacción de más de dos campos sobre las bobinas, debido a esto se rediseñó el rotor con 12 polos par la obtención de energía. Estos resultados, se encuentran tabulados en la tabla 6. En la grafica 1 se evidencia el comportamiento de cada uno de los rotores, bajo las mismas condiciones de carga, conexión y revoluciones.

Tabla 6. Potencia de entregada por cada rotor en la bobina modificada.

Potencia (W) con carga de $11\Omega$ , conexión en estrella simple		
rpm	Potencia Rotor 14 polos	Potencia Rotor 12 polos
320	0,001	41,4
400	0,0064	62,3
630	0,0234	144,8
800	0,0347	191,7
1000	0,0953	269,5
1250	0,1855	374,4

Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 1. Potencia entregada por cada rotor en la bobina modificada.



Fuente. Autores del proyecto.

Como se mencionó...en la sección 3.5... la interacción de más de dos fuerzas en una bobina, influye en la salida de potencia del generador, esto se puede evidenciar en la gráfica 1, en donde la curva generada por el rotor de 12 polos predomina sobre toda la gráfica produciendo más de 300 Vatios de potencia, mientras el rotor de 14 polos no es capaz de producir 1 Vatio de potencia.

## 4.2 TIPOS DE BOBINADOS

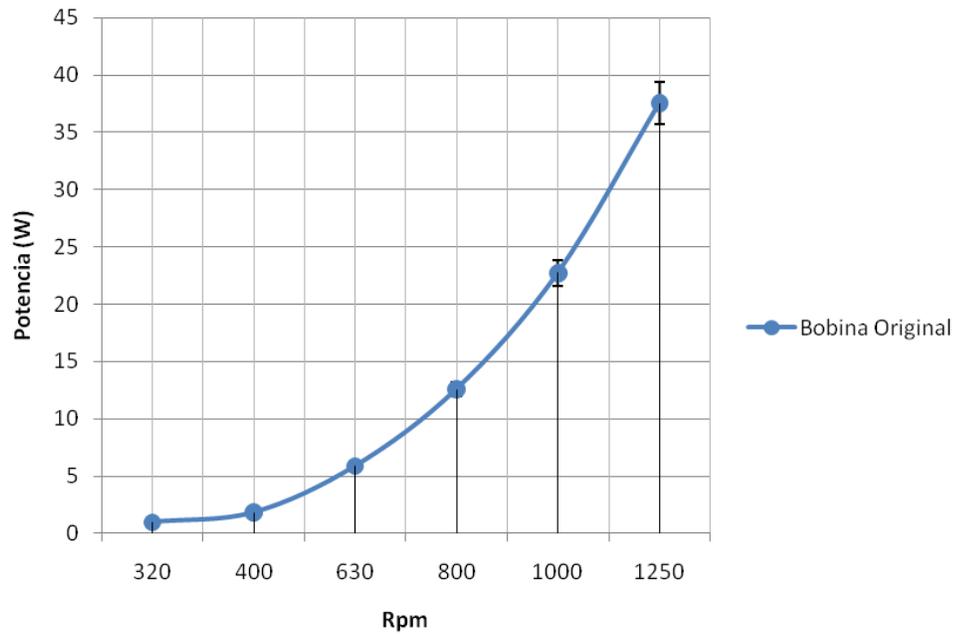
Dentro de los parámetros de recolección de datos se puso a prueba dos tipos de bobinas, una de ellas es la bobina original del alternador, y la otra es la bobina modificada, esto con el fin de determinar la capacidad de producción de energía de cada una de ellas bajo las mismas condiciones de carga (tabla 7), aunque no se pueden comparar los bobinados debido a que la constante de construcción  $k$ , es diferente para cada uno de los estatores. En la gráfica 2 se evidencia el comportamiento en la generación de cada una de las máquinas.

Tabla 7. Potencia entregada por las bobinas bajo las mismas condiciones de carga y conexión.

<b>RPM</b>	<b>BOBINA ORIGINAL (W)</b>	<b>BOBINA MODIFICADA (W)</b>
<b>320</b>	0,98	41,4
<b>400</b>	1,82	62,3
<b>630</b>	5,86	144,8
<b>800</b>	12,58	191,7
<b>1000</b>	22,73	269,5
<b>1250</b>	37,55	374,4

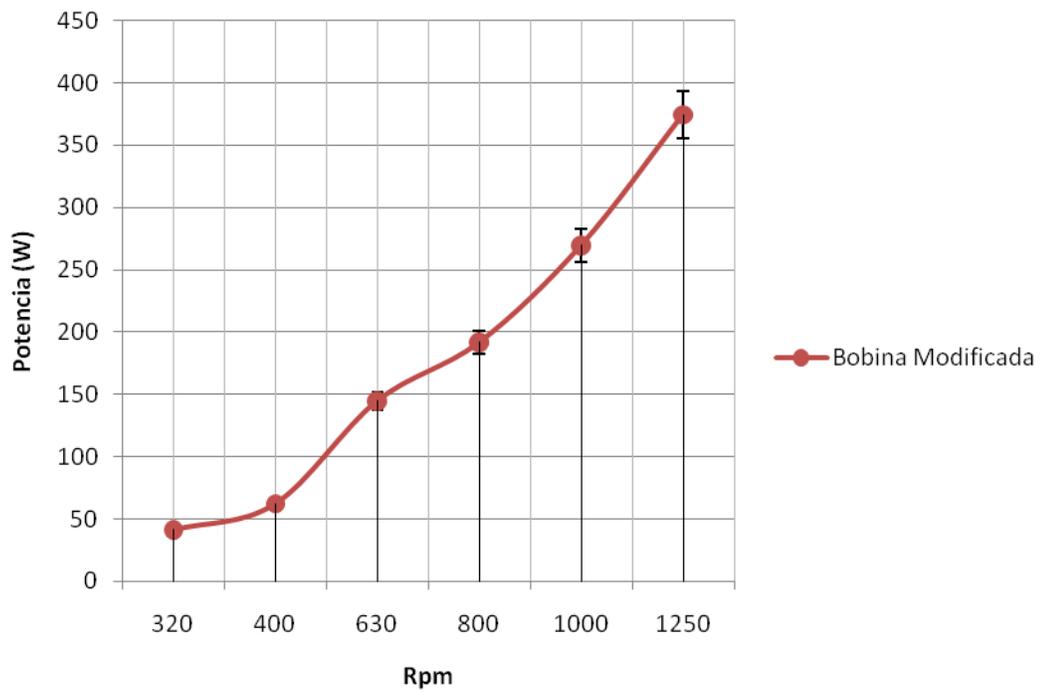
Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 2. Potencia entregada bobina original.



Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 3. Potencia entregada bobina modificada.



Fuente. Autores del proyecto

### 4.3 CONEXIÓN DE BOBINA

La bobina modificada del generador esta diseñada para realizar cuatro tipos diferentes de conexiones, las cuales se obtienen uniendo los cables enumerados tal y como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Formas de conexión de la bobina.

CONEXIÓN	CABLES A UNIR	SALIDA DE ENERGÍA
ESTRELLA	(4-7) (5-8) (6-9) (10-11-12)	1 – 2 – 3
DOBLE ESTRELLA	(10-11-12) (4-5-6) (1-7) (2-8) (3-9)	(1-7) (2-8) (3-9)
TRIÁNGULO	(4-7) (8-5) (6-9) (1-12) (2-10) (3-11)	(1-12) (2-10) (3-11)
DOBLE TRIÁNGULO	(1-7-6-12) (2-8-4-10) (3-9-5-11)	(1-7-6-12) (2-8-4-10) (3-9-5-11)

Fuente. Autores del proyecto.

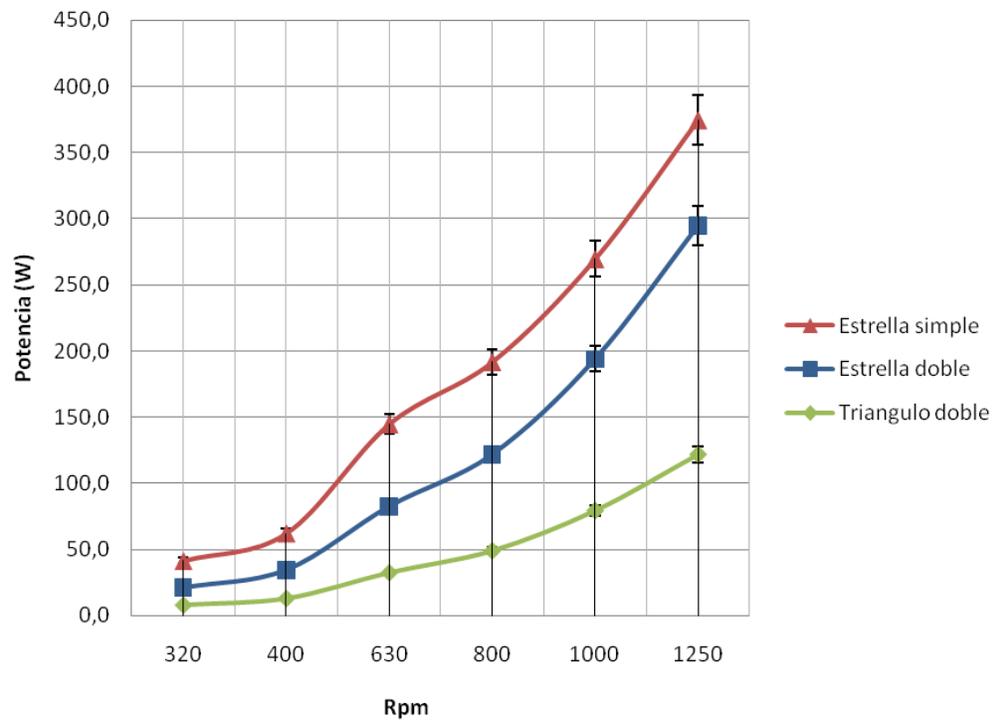
**4.3.1 Análisis de conexión de bobina.** Debido a que la bobina esta diseñada para obtener múltiples conexiones tales como: estrella, estrella doble, triángulo ó doble triángulo, se realizaron las pruebas pertinentes para determinar el tipo de conexión en la cual se obtiene la mejor adquisición de potencia eléctrica (tabla 9). En la gráfica 3 se evidencia el comportamiento de la bobina modificada según el tipo de conexión realizada.

Tabla 9. Datos potencia eléctrica según tipo de conexión.

	Potencia (W)		
	Resistencia de 11 $\Omega$		
RPM	Estrella Simple	Estrella Doble	Triángulo Doble
320	41,4	21	8,2
400	62,3	34,5	13,2
630	144,8	82,6	32,7
800	191,7	121,7	49,2
1000	269,5	193,9	79,6
1250	374,4	294,6	122

Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 4. Potencia según tipo de conexión.



Fuente. Autores del proyecto.

Según los datos obtenidos tras las pruebas, se determinó que la conexión en la que se obtiene la mejor carga de energía eléctrica es la de estrella simple, por consiguiente, se realizan las pruebas pertinentes del generador con dicha conexión.

#### 4.4 POTENCIA

En la tabla 10, se visualizan los resultados obtenidos de las pruebas del generador a diferentes valores de carga, tomando en cuenta el margen de error calculado para cada uno de los valores adquiridos, como se muestra en el siguiente ejemplo con una carga de 240 Ω a 320 rpm:

$$e = 1.96 * \left( \frac{3.9}{\sqrt{10}} \right) = 2.42$$

Tabla 10. Datos potencia generador eléctrico.

	<b>POTENCIA (W)</b>			
<b>RPM</b>	<b>240 Ω</b>	<b>26.6 Ω</b>	<b>8.63 Ω</b>	<b>4.5 Ω</b>
<b>320</b>	37.4 ± 2.42	32.7 ± 0.39	47 ± 0.23	40.5 ± 0.32
<b>400</b>	85.5 ± 3.22	51.6 ± 0.77	71.2 ± 0.13	57.6 ± 3.3
<b>630</b>	214.9 ± 5.9	118.8 ± 3.5	127 ± 0.93	119 ± 1.05
<b>800</b>	345.2 ± 5.42	168 ± 0.9	185 ± 3.8	159.2 ± 0.52
<b>1000</b>	462.7 ± 7.85	269 ± 6.42	249 ± 0.55	201,1 ± 3.12
<b>1250</b>	640.3 ± 16.33	390 ± 3.63	323 ± 5.72	258 ± 0.07

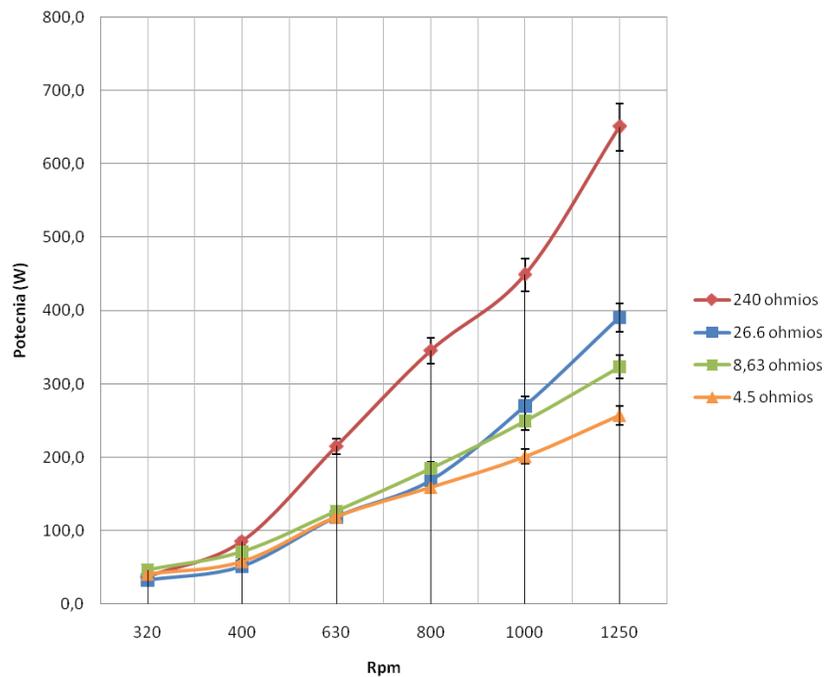
Fuente. Autores del proyecto.

El margen de error visualizada en la tabla 10, es producto de las variaciones de la energía durante los ensayos, debido a que las cargas utilizadas son denominadas cargas variables, puesto que estas resistencias al aumentar su temperatura, incrementan su resistencias eléctrica, además de la influencia de la longitud y el

diámetro ya que las resistencias utilizadas tienen formas y tamaños diferentes, lo que ocasionó las variaciones de los valores obtenidos.

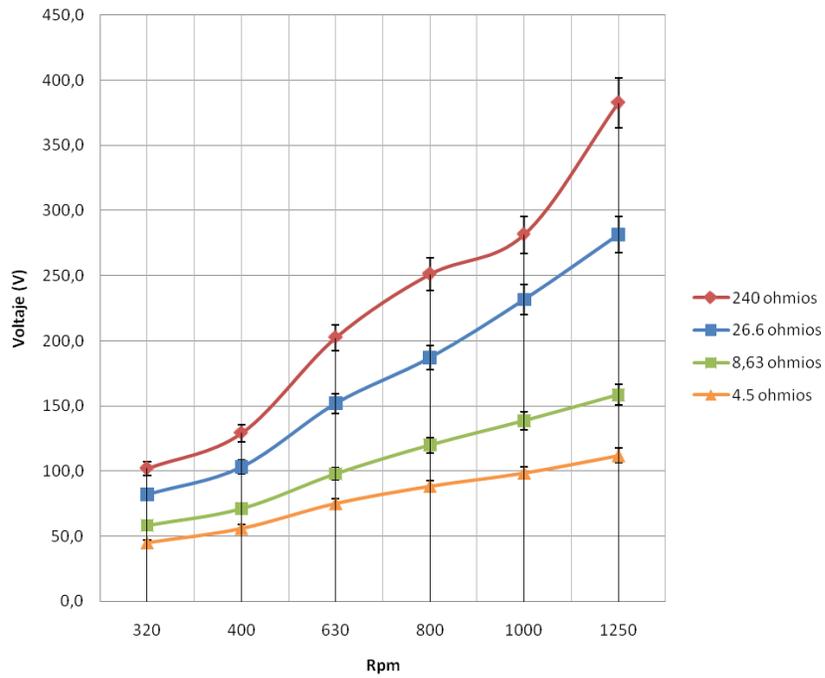
**4.4.1 Análisis de potencia.** En los datos adquiridos durante los ensayos (anexo A), se puede evidenciar un claro patrón en la generación de potencia eléctrica, en el cual se puede establecer que a mayor carga resistiva, mayor será la producción de energía eléctrica (gráfica 4) por parte del generador de imanes permanentes. Sin embargo al aumentar la carga, se produce una disminución de la corriente eléctrica (gráfica 6), pero un aumento del voltaje de salida (gráfica 5).

Gráfica 5. Potencia producida según carga.



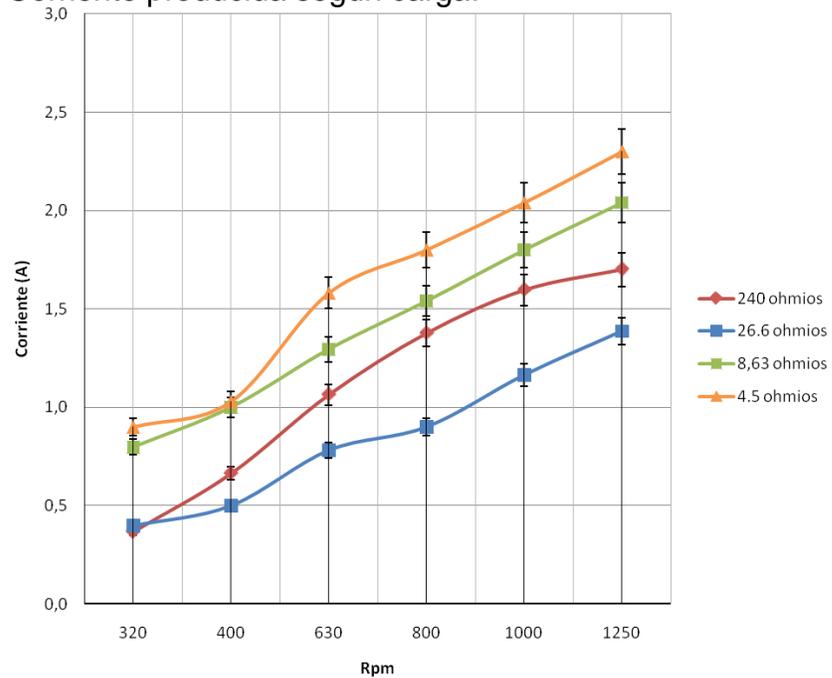
Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 6. Voltaje producido según carga.



Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 7. Corriente producida según carga.



Fuente. Autores del proyecto.

## 4.5 TORQUE

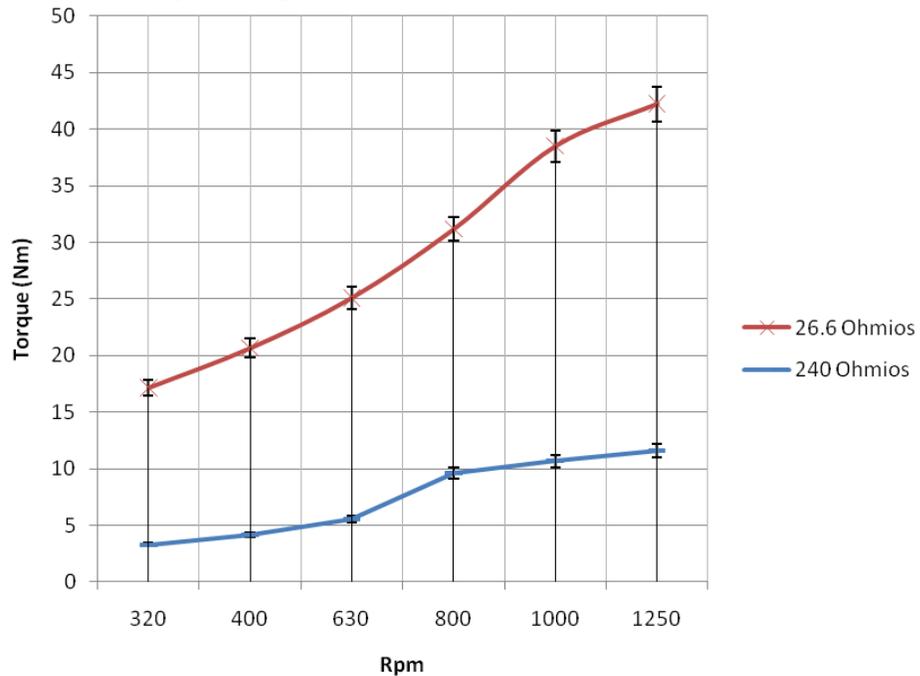
Inicialmente la recolección de datos del torque se realizó gracias a un pequeño banco de pruebas con un motor marca siemens de 1 caballo de fuerza y un variador de frecuencia, ambos propiedad de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Sin embargo el torque suministrado por el motor de 1 hp, no fue suficiente para generar energía eléctrica, por lo tanto las pruebas del torque fueron realizadas en un banco adaptado al torno del laboratorio de procesos industriales, con el fin de determinar, tanto el par tursor que consume la máquina para su funcionamiento, como la eficiencia neta del generador. En la tabla 11 se evidencia el torque según la carga resistiva, mientras que en la gráfica 7 se evidencia el comportamiento del torque a diferentes velocidades de giro en cada una de las resistencias.

Tabla 11. Torque según carga.

<b>Torque según carga (Nm)</b>		
<b>RPM</b>	<b>240 <math>\Omega</math></b>	<b>26.6 <math>\Omega</math></b>
<b>320</b>	3,3 $\pm$ 0,19	13,85 $\pm$ 0,25
<b>400</b>	4,16 $\pm$ 0,14	16,5 $\pm$ 0,26
<b>630</b>	5,55 $\pm$ 0,08	19,56 $\pm$ 0,16
<b>800</b>	9,6 $\pm$ 0,14	21,58 $\pm$ 0,6
<b>1000</b>	10,66 $\pm$ 0,12	27,85 $\pm$ 0,11
<b>1250</b>	11,63 $\pm$ 0,19	30,61 $\pm$ 0,15

Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 8. Torque según carga.



Fuente. Autores del proyecto.

**4.5.1 Análisis de torque.** Como se puede observar en la gráfica 7, se evidencia un aumento del torque a medida que disminuye la carga resistiva, esto ocurre debido al aumento del suministro de corriente eléctrica tal como se observa en la gráfica 6, debido a la interacción entre el campo magnético de los imanes y el producido por el núcleo del estator.

## 4.6 EFICIENCIA MAGNÉTICA

Para determinar la eficiencia magnética del generador se debe conocer la energía máxima que pueden proporcionar los magnetos, para ello se necesita el volumen de los magnetos y el producto de (B-H) máximo que poseen dichos imanes. En la tabla 12 se encuentran algunas propiedades de los imanes de neodimio.

Tabla 12. Propiedades de los imanes.

Propiedades de los imanes	
Producto (B-H) máxima	280 Kj / m <sup>3</sup>
Remanencia	11400 – 12000 Gauss
Temperatura de Curie	120 °C
Fuerza Campo coercitivo	930 Ka/m
Densidad	7.5 Kg /m <sup>3</sup>
Volumen	9360 mm <sup>3</sup>

Fuente. Adaptación de un generador eléctrico de imanes permanentes y flujo radial, Alfonso santos

La ecuación 17 rige este comportamiento.

$$E_{max} = \frac{(B-H)_{max} * Volumen \text{ iman} * \#polos}{2} \text{ (Ecuacion 17)}$$

Con estas características se procede a calcular la energía máxima otorgada por los imanes, de esto se deduce que:

$$Em = \frac{280 \frac{Kj}{m^3} * 9,66x10^{-6}m^3 * 12polos}{2} = 0,01622 Kj$$

Para determinar la potencia eléctrica máxima suministrado por los imanes solo se necesita multiplicarlo por la velocidad angular a la cual se encuentre girando, es decir, si la maquina se encuentra girando a 320 rpm, entonces la potencia eléctrica máxima entregada por los imanes será de:

$$P = \frac{320 rpm * 2\pi rad * 16,22 j}{60 s} = 543,53 \text{ Vatios}$$

**4.6.1 Análisis de la eficiencia magnética.** Con los resultados obtenidos se determina la eficiencia magnética de la máquina (tabla 13).

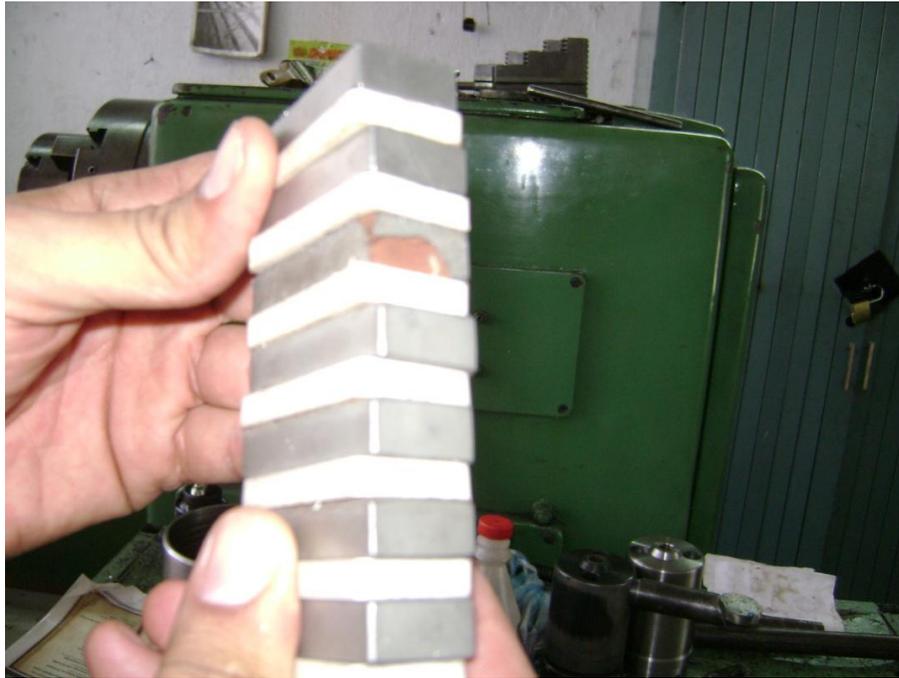
Tabla 13. Eficiencia magnética del generador con carga de 240  $\Omega$

<b>RPM</b>	<b>P. máxima (W)</b>	<b>P. producida (w)</b>	<b>Eficiencia magnética (%)</b>
<b>320</b>	543.53	37.373	6.87
<b>400</b>	679.42	85.51	12.58
<b>630</b>	1070	214.92	20.08
<b>800</b>	1358.84	331.377	24.38
<b>1000</b>	1698.55	462.7	27.24
<b>1250</b>	2123.19	645.92	30.42

Fuente. Autores del proyecto.

La eficiencia magnética es producto de las fuerzas que ejercen los imanes a las bobinas para así producir electricidad, la máxima eficiencia obtenida en los ensayos fue de alrededor del 30%. Esta eficiencia baja es consecuencia de la separación entre los imanes incrustados en el rotor, debido a la modificación realizada a este, al sustraer dos de los catorce imanes para la obtención de un campo magnético satisfactorio. Además del constante deterioro de los magnetos tanto por la fuerzas naturales de la oxidación (figura 25), como la dificultad del manejo de los mismos, ocasionado por la gran fuerza magnética que poseen. Por estas razones, la eficiencia magnética resultó en un valor bajo. No obstante el valor es aceptable, ya que se esperaba una eficiencia mínima del 50%, debido a que el generador está diseñado para obtener una potencia de 1 kw.

Figura 25. Deterioro de los imanes de neodimio.



Fuente. Autores del proyecto.

#### **4.7 EFICIENCIA NETA DEL GENERADOR**

Como se menciona...en la sección 4.5..., la medición del torque se realizó con el fin de hallar la eficiencia eléctrica del generador, para determinar que tan útil es la utilización de un sistema de generación de electricidad a base de magnetos permanentes la cual hoy en día es un campo nuevo en cuanto a adquisición de electricidad se refiere.

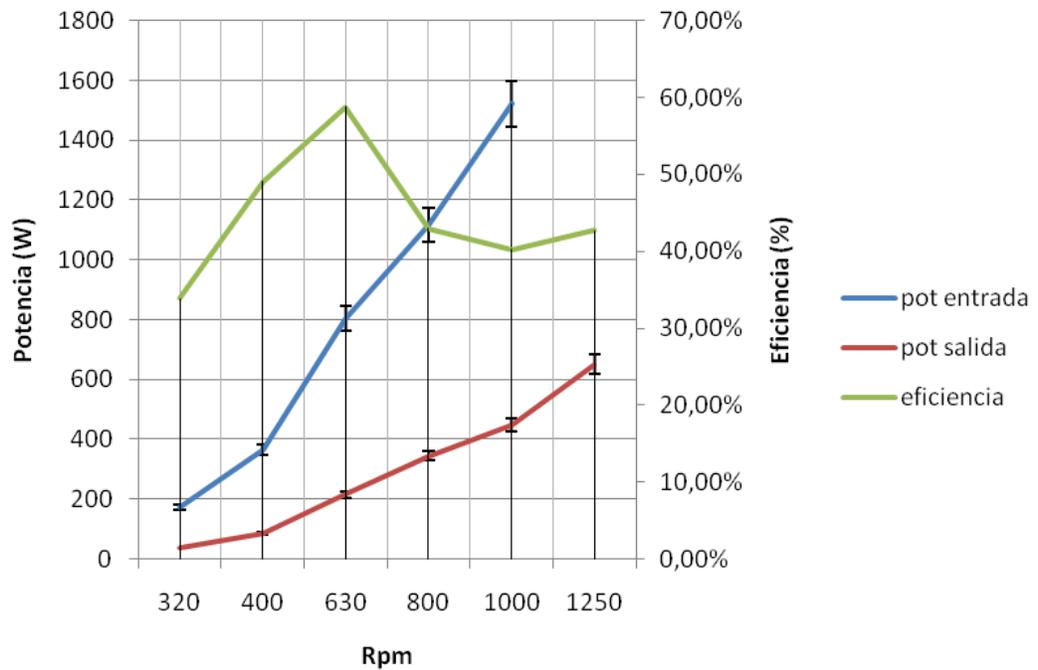
Con los datos adquiridos en las pruebas se determina la eficiencia de la máquina dependiendo de la carga resistiva acoplada, tal y como se observa en la tabla 14. Además en las gráficas 8 y 9 se observa el comportamiento de la máquina dependiendo de la resistencia adaptada a este.

Tabla 14. Eficiencia del generador según carga.

Eficiencia según carga						
	240 $\Omega$			26,6 $\Omega$		
RPM	Pot IN	Pot Out	Eficiencia	Pot IN	Pot Out	Eficiencia
320	110,5	37,4	33,8%	463,8	32,7	7,05 %
400	174,3	85,5	49%	690	51,6	4,47 %
630	365,9	214,9	58,7%	1289,9	118,8	9,21 %
800	803,8	345,2	42,9%	1806,9	168	9,3 %
1000	1116	448,7	40,2%	2914,9	270	9,26 %
1250	1520,9	649,9	42,7%	4005,1	390	9,74 %

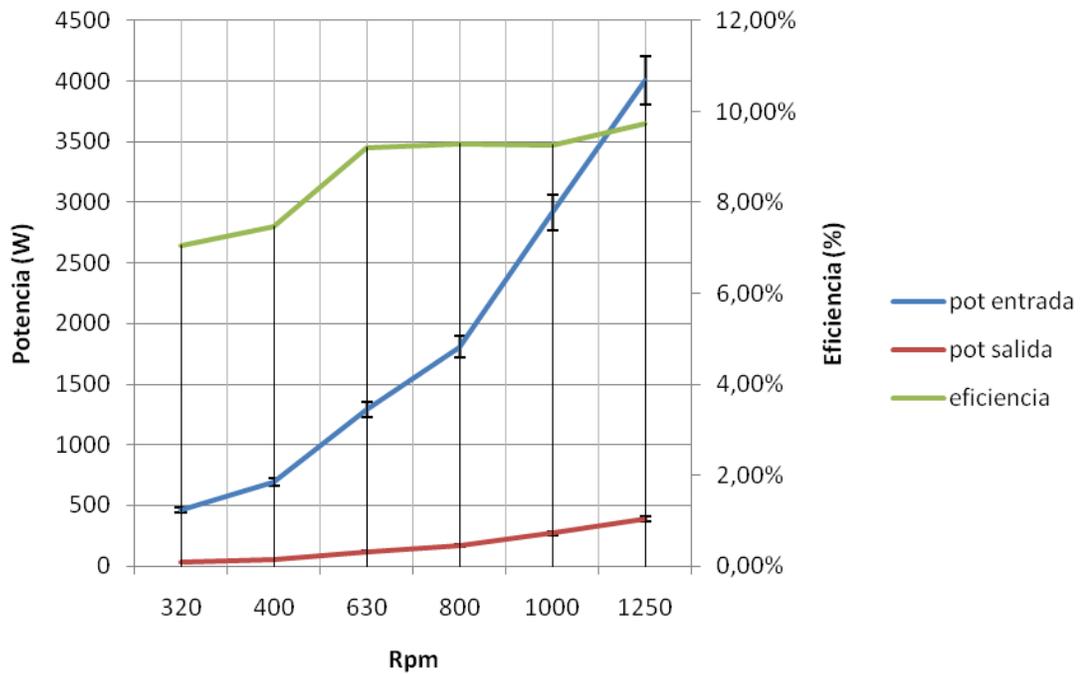
Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 9. Eficiencia con carga de 240  $\Omega$ .



Fuente. Autores del proyecto.

Gráfica 10. Eficiencia con carga de 26,6  $\Omega$ .



Fuente. Autores del proyecto.

Como se ha evidenciado en el transcurso del desarrollo de los resultados, la adquisición de energía depende del tamaño de la carga acoplada al sistema, esto se evidencia en las gráficas 8 y 9, en donde la carga de 240 ohmios genera una eficiencia del 42% a 1250 revoluciones por minuto, mientras que la carga de 26,6 ohmios proporciona una eficiencia del 9,74% a la misma revolución. Estas eficiencias bajas se atribuyen a los errores de construcción de la máquina, además del espacio entre los imanes ubicados en el rotor del generador el cual contribuye a un campo de generación bajo

## 5. CONCLUSIONES

- Al disminuir la carga resistiva conectada al generador ocasiona un aumento en la corriente de salida, pero un descenso considerable del voltaje de salida, de esto se espera una disminución de la potencia eléctrica debido al diámetro del alambre del bobinado y el tipo de conexión de las fases.
- La constante de construcción  $k$  de la maquina influye en la obtención de energía eléctrica, esto debido a las ecuaciones de Lorentz, ya que al aumentar el nivel de obtención de energía es necesario un aumento en el momento torsor que la maquina necesita para generar dicha potencia.
- La principal falla del generador se encuentra radicada en la generación de calor en el mismo debido a que este sistema no debe operar por encima de los 80 grados Celsius ya que ocasionara una avería de gran magnitud a los imanes de neodimio dejando la maquina parcial o completamente inservible.
- La eficiencia del generador depende de la carga adaptada, además de los diversos factores que afectan la adquisición de un buen campo magnético como el espacio entre los imanes del rotor, además del deterioro de estos.
- La producción de energía por parte del generador, depende en parte de la conexión suministrada por la bobina, ya sea estrella, doble estrella, triangulo o doble triangulo.

- la potencia eléctrica del generador depende en parte del calibre del alambre del bobinado, debido a que entre más delgado sea el alambre, mayor será las vueltas que este tendrá por bobina, por consiguiente mayor será la salida de potencia.

## 6. RECOMENDACIONES

- Para efectos de la seguridad mecánica y eléctrica del generador se recomienda no operarlo por encima de las 800 rpm, con el fin de evitar recalentamiento y posibles daños irreversibles a la máquina en general.
- No operar el generador durante periodos largos (mayor a 15 minutos) sin un sistema de refrigeración que respalde la seguridad térmica de la máquina.
- Se recomienda el intercambio de los rodamientos de la máquina por rodamientos con recubrimientos laterales ya sea de lata o caucho, para así evitar incrustaciones en estos, causando un daño mecánico del generador.
- Rediseñar el sistema de enfriamiento de la máquina, de modo tal que el flujo de aire originado sea distribuido uniformemente con el fin de evitar cortos circuitos por altas temperaturas además de suministrar la debida seguridad al operario.
- Mantener el generador en un ambiente controlado debido a la fragilidad de los magnetos frente al ambiente corrosivo puesto que estos imanes son ferriticos y aunque cuentan con un recubrimiento de cromo, estos se deterioran debido al oxido generado.

- Adaptar el generador de imanes permanentes a una estructura ideal para el óptimo funcionamiento, evitando así daños debidos a las vibraciones o mal alineamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] BASAK, Amitava. Permanent-magnet DC linear motors. United States of America: Editorial Oxford University Press, 1994. 43-47p

[2] BISWAL, Sadasiva. Basic electronics. India: Editorial Atlantic Books, 2001. 45-46p

[3] CAMPS, Gustavo, ESPI, José, MUÑOZ, Jordi. Fundamentos de electrónica analógica. España: Editorial Universidad de Valencia, 2006. 31p

[4] DAVIS, Joseph R. ASM materials engineering dictionary. United States of America: Editorial Kathleen Mills, 1992.

[5] DOUGLAS C, Giancoli, OLGUIN C, Victor. Física: principios con aplicaciones, volumen 2. 6ta Edición. México: Editorial Pearson Educación, 2007. 554-555p

[6] FINK, Donald G, BEATY, H. Wayne, CAROLL, John M. Manual práctico de electricidad para ingenieros. España: Editorial Reverté, 1981.

[7] NAVASQUILLO, Joaquín H, funcionamiento de un generador de imanes permanentes usando la expresión de Lorentz. Valencia (España). Disponible en internet: <http://www.uv.es/~navasqui/aero/Fungenper.pdf>

[8] FURLANI, Edward P. Permanent magnet and electromechanical devices. United States of América: Editorial Elsevier, 2001. 39-52p

[9] GOMEZ, Eduardo. Corrientes inducidas nivel II. España: Editorial Fundación Confemetal, 2004. 47-53p

[10] HAMROCK BERNARD elementos de maquinas. McGraw Hill 1999. Capitulo 11 ejes y partes asociadas

[11] HERMAN, Stephen L. Delmar's standard textbook of electricity. 3ra Edición. United States of América: Editorial Thomson, 2004. 99p

[12] HERMOSA DONATE, Antonio. Principios de electricidad y electrónica II. España: Editorial Marcombo, 1999. 1p.

[13] IMA, Ingeniería magnética aplicada Información técnica sobre imanes de neodimio. España. Disponible en internet: <http://www.ima.es/upload/documentos>

[14] MANWELL, James, MCWOWAN, Jon, Y ROGERS, Anthony. Wind energy explained. 2da Edición. United Kingdom: Editorial Wiley, 2009. 234-235p

[15] MUÑOZ, Roberto L. Generalidades sobres los imanes permanentes y su caracterización. Córdoba (Argentina). Instituto Nacional De Tecnología Industrial 28 de Octubre de 2008. Consultada el 23 de marzo de 2011 Disponible en internet [www.inti.gob.ar](http://www.inti.gob.ar)

[16] RED RIGE-UTE, sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores, Montevideo (Uruguay) Consultada el 17 de noviembre de 2010, Disponible en internet: [www.ute.com.uy](http://www.ute.com.uy)

**ANEXO A**  
**DATOS DE LAS PRUEBAS**

## PRUEBAS GENERADOR DON BOBINA MODIFICADA Y ROTOR DE 12 POLOS

Potencia con carga de 240 Ω												Potencia con carga de 26,6 Ω											
Rpm	320			400			630			Rpm	320			400			630						
	V	C	W	V	C	W	V	C	W		V	C	W	V	C	W	V	C	W				
1	102	0,4	40,8	129	0,7	90,3	203	1,1	223	1	82	0,4	33	103	0,5	51,5	152	0,8	122				
2	103	0,3	30,9	130	0,6	78	202	1	202	2	82,5	0,4	32	104	0,51	52,8	153	0,7	107				
3	102	0,35	35,7	130	0,7	91	203	1,1	223	3	82	0,4	33	103	0,49	50,5	152	0,75	114				
4	101	0,42	42,42	129	0,7	83,85	202	1,05	212	4	82,5	0,4	32	103	0,5	51,7	152	0,81	123				
5	100	0,39	39	128	0,7	89,6	201	1,1	221	5	82	0,4	34	103	0,48	49,4	152	0,77	117				
6	103	0,3	30,9	127	0,7	88,9	203	1	203	6	82,5	0,4	33	104	0,5	51,8	153	0,8	122				
7	102	0,4	40,8	130	0,6	78	200	1,13	226	7	82,2	0,4	32	103	0,49	50,6	151	0,8	121				
8	102	0,4	40,8	128	0,6	80,64	204	1	204	8	82,5	0,4	34	103	0,51	52,5	152	0,75	114				
9	101	0,36	36,36	130	0,7	84,5	203	1,1	223	9	82	0,4	33	103	0,5	51,7	152	0,82	125				
10	103	0,35	36,05	129	0,7	90,3	201	1,05	211	10	82	0,4	32	104	0,52	53,8	152	0,81	123				
<b>Promedio</b>	<b>101,9</b>	<b>0,4</b>	<b>37,4</b>	<b>129,0</b>	<b>0,7</b>	<b>85,5</b>	<b>202,2</b>	<b>1,1</b>	<b>214,9</b>	<b>Promedio</b>	<b>82,2</b>	<b>0,4</b>	<b>32,7</b>	<b>103,3</b>	<b>0,5</b>	<b>51,6</b>	<b>152,1</b>	<b>0,8</b>	<b>118,8</b>				
<b>Rpm</b>	<b>800</b>			<b>1000</b>			<b>1250</b>			<b>Rpm</b>	<b>800</b>			<b>1000</b>			<b>1250</b>						
1	251	1,4	351,4	280	1,7	476	303	2,2	667	1	187	0,9	168	232	1,2	278	282	1,4	395				
2	250	1,39	347,5	281	1,6	449,6	303	2,2	667	2	187	0,9	170	231	1,1	254	281	1,4	393				
3	252	1,4	352,8	282	1,7	465,3	304	2,1	637	3	187	0,9	167	232	1,15	267	282	1,4	394				
4	250	1,35	337,5	281,5	1,7	464,5	305	2	610	4	187	0,9	168	232	1,2	278	281	1,35	379				
5	251	1,4	351,4	282	1,7	479,4	303	2	606	5	188	0,9	169	232	1,2	278	282	1,4	395				
6	252	1,3	327,6	281	1,6	452,4	304	2,1	638	6	188	0,9	167	232	1,1	255	281	1,4	393				
7	251	1,4	350,7	282	1,6	448,4	304	2,2	669	7	186	0,9	171	232	1,21	280	282	1,35	380				
8	251	1,36	341,4	280	1,6	448	303	2	606	8	188	0,9	169	232	1,18	273	282	1,37	386				
9	251	1,41	353,9	282	1,7	479,4	303	2,1	636	9	187	0,9	166	232	1,2	278	281	1,4	393				
10	250	1,35	337,5	281,5	1,7	464,5	304	2,2	668	10	188	0,9	169	232	1,1	255	282	1,4	395				
<b>promedio</b>	<b>250,9</b>	<b>1,4</b>	<b>345,2</b>	<b>281,3</b>	<b>1,6</b>	<b>462,7</b>	<b>303,5</b>	<b>2,1</b>	<b>640,3</b>	<b>promedio</b>	<b>187</b>	<b>0,9</b>	<b>168</b>	<b>232</b>	<b>1,16</b>	<b>270</b>	<b>282</b>	<b>1,39</b>	<b>390</b>				

Potencia con carga de 4,5 Ω												Potencia con carga de 8,63 Ω											
Rpm	320			400			630			Rpm	320			400			630						
	V	C	W	V	C	W	V	C	W		V	C	W	V	C	W	V	C	W				
1	45,0	0,9	40,5	56	1,1	61,6	75	1,6	120	1	58,8	0,8	47,0	71	1	71	98	1,3	127				
2	45,0	0,9	40,5	55,7	1	55,7	75,5	1,55	117	2	58,0	0,8	46,4	71	1	71	98	1,3	127				
3	45,0	0,91	41,0	56,2	1,2	67,44	75,3	1,6	120	3	58,5	0,8	46,2	71,5	1	71,5	98	1,3	127				
4	45,1	0,92	41,5	55,7	1	55,7	75,6	1,6	121	4	58	0,8	46,4	71	1	71	98	1,3	127				
5	45	0,9	40,5	56	0,9	50,4	75,2	1,54	116	5	58,6	0,8	46,9	71,5	1	71,5	97	1,3	126				
6	44,9	0,89	40,0	56	1	56	75	1,58	119	6	58,7	0,8	46,4	71	1	71	98	1,3	127				
7	45,1	0,9	40,6	55,8	1,1	61,38	75	1,6	120	7	58,5	0,8	46,8	71	1	71	98	1,25	123				
8	45	0,88	39,6	56,1	1	56,1	75,2	1,59	120	8	58	0,8	46,4	71,4	1	71,4	98	1,3	127				
9	45	0,9	40,5	55,9	1,1	61,49	75,3	1,55	117	9	58	0,8	45,8	71,3	1	71,3	98	1,3	127				
10	45	0,91	41,0	56,1	0,9	50,49	75	1,6	120	10	58,5	0,8	46,8	71,4	1	71,4	98	1,3	127				
<b>Promedio</b>	<b>45</b>	<b>0,9</b>	<b>40,55</b>	<b>55,95</b>	<b>1</b>	<b>57,63</b>	<b>75,2</b>	<b>1,581</b>	<b>119</b>	<b>Promedio</b>	<b>58,4</b>	<b>0,8</b>	<b>47</b>	<b>71,2</b>	<b>1</b>	<b>71,2</b>	<b>97,9</b>	<b>1,3</b>	<b>127</b>				
Rpm	800			1000			1250			Rpm	800			1000			1250						
	V	C	W	V	C	W	V	C	W		V	C	W	V	C	W	V	C	W				
1	88	1,8	158,4	98,6	2	197,2	112	2,3	258	1	120	1,5	180	139	1,8	250	158	2	316				
2	88	1,8	158,4	98,6	2,1	207,1	112	2,3	258	2	120	1,6	192	138	1,8	248	159	2,1	334				
3	89	1,8	160,2	98,5	2	197	112	2,3	257	3	120	1,5	180	139	1,8	249	158	2	316				
4	88,8	1,8	159,8	98,7	2	197,4	112	2,3	257	4	120	1,6	192	139	1,8	250	158	2	316				
5	88	1,8	158,4	98,6	2,1	207,1	112	2,3	258	5	120	1,5	180	139	1,8	250	158	2	316				
6	89	1,8	160,2	98,7	2	197,4	112	2,3	258	6	120	1,5	179	139	1,8	250	159	2,1	334				
7	88,5	1,8	159,3	98,6	2	197,2	112	2,3	257	7	120	1,6	192	138	1,8	248	159	2,1	334				
8	89	1,8	160,2	98,6	2,1	207,1	112	2,3	258	8	120	1,5	180	139	1,8	250	158	2	316				
9	88	1,8	158,4	98,6	2	197,2	112	2,3	257	9	120	1,6	192	138	1,8	248	158	2	316				
10	88	1,8	158,4	98,5	2,1	206,9	112	2,3	258	10	120	1,5	180	138	1,8	248	159	2,1	334				
<b>promedio</b>	<b>88,4</b>	<b>1,8</b>	<b>159,2</b>	<b>98,6</b>	<b>2</b>	<b>201,1</b>	<b>112</b>	<b>2,3</b>	<b>258</b>	<b>promedio</b>	<b>120</b>	<b>1,5</b>	<b>185</b>	<b>139</b>	<b>1,8</b>	<b>249</b>	<b>158</b>	<b>2,04</b>	<b>323</b>				

## PRUEBAS PARA DETERMINAR TIPO DE CONEXIÓN CON ROTOR DE 12 POLOS Y BOBINA MODIFICADA

POTENCIA CON CARGA DE 11 $\Omega$ CONECTADO EN ESTRELLA SIMPLE									
RPM	V1	V2	V3	I1	I2	I3	V prom	I prom	W prom
320	65,8	65,7	65,8	0,7	0,7	0,6	65,8	0,6	41,4
400	80,9	80,9	80,8	0,8	0,8	0,7	80,9	0,8	62,3
630	119,0	119,0	119,0	1,2	1,2	1,2	119,0	1,2	144,8
800	136,0	136,8	137,0	1,4	1,4	1,4	136,6	1,4	191,7
1000	165,0	165,0	164,0	1,6	1,6	1,6	164,7	1,6	269,5
1250	188,0	187,5	188,0	2,0	2,0	2,0	187,8	2,0	374,4

POTENCIA CON CARGA DE 11 $\Omega$ CONECTADO EN ESTRELLA DOBLE									
RPM	V1	V2	V3	I1	I2	I3	V prom	I prom	W prom
320,0	46,5	46,6	46,7	0,4	0,5	0,5	46,6	0,5	21,0
400,0	58,4	58,5	58,5	0,6	0,6	0,6	58,5	0,6	34,5
630,0	90,7	90,8	90,7	0,9	0,9	0,9	90,7	0,9	82,6
800,0	110,0	111,0	111,0	1,1	1,1	1,1	110,7	1,1	121,7
1000,0	136,0	136,9	136,8	1,4	1,4	1,4	136,6	1,4	193,9
1250,0	168,0	169,0	168,0	1,8	1,8	1,7	168,3	1,8	294,6

POTENCIA CON CARGA DE 11 $\Omega$ CONECTADO EN TRIANGULO DOBLE DOBLE									
RPM	V1	V2	V3	I1	I2	I3	V prom	I prom	W prom
320,0	28,3	28,3	28,3	0,3	0,3	0,3	28,3	0,3	8,2
400,0	35,3	35,3	35,3	0,4	0,4	0,4	35,3	0,4	13,2
630,0	54,5	54,5	54,5	0,6	0,6	0,6	54,5	0,6	32,7
800,0	67,4	67,4	67,5	0,7	0,7	0,7	67,4	0,7	49,2
1000,0	84,3	84,4	84,4	0,9	1,0	0,9	84,4	0,9	79,6
1250,0	104,0	104,0	104,0	1,2	1,2	1,2	104,0	1,2	122,0

## DATOS ROTOR 14 POLOS

### Bobina modificada

POTENCIA CON CARGA DE 11 $\Omega$ CONECTADO EN ESTRELLA SIMPLE									
RPM	V1	V2	V3	I1	I2	I3	V prom	I prom	W prom
320	10,46	10,68	10,59	0,09	0,10	0,09	10,58	0,09	0,98
400	13,79	13,84	13,74	0,13	0,14	0,13	13,79	0,13	1,82
630	23,10	23,20	23,10	0,25	0,26	0,25	23,13	0,25	5,86
800	29,20	29,00	29,20	0,43	0,44	0,43	29,13	0,43	12,58
1000	37,30	37,20	37,30	0,61	0,62	0,60	37,27	0,61	22,73
1250	46,90	47,00	46,90	0,80	0,80	0,80	46,93	0,80	37,55

## Bobina original

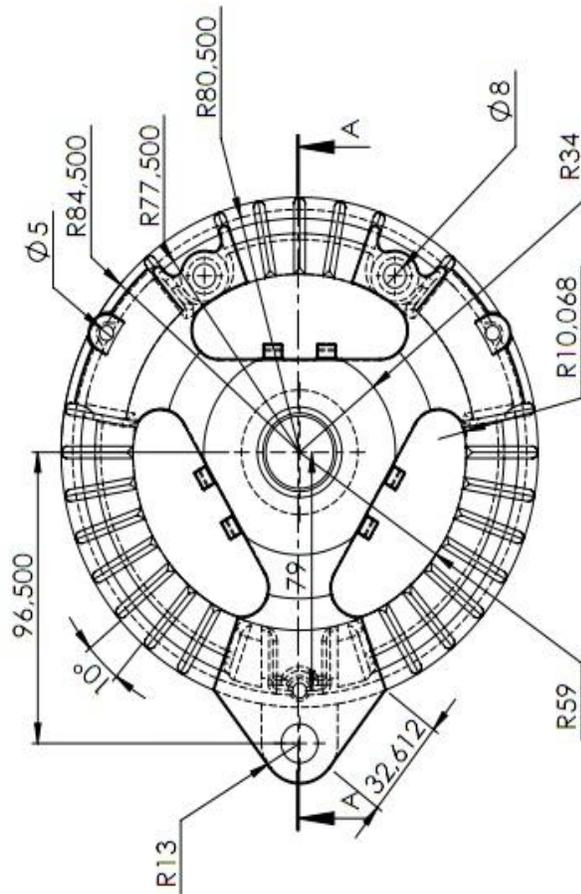
POTENCIA CON CARGA DE 11 $\Omega$ CONECTADO EN ESTRELLA SIMPLE									
RPM	V1	V2	V3	I1	I2	I3	V prom	I prom	W prom
320	0,15	0,14	0,14	0,010	0,000	0,010	0,143	0,0067	0,0010
400	0,19	0,20	0,19	0,035	0,030	0,035	0,193	0,0333	0,0064
630	0,28	0,29	0,29	0,080	0,085	0,080	0,287	0,0817	0,0234
800	0,35	0,35	0,34	0,100	0,100	0,100	0,347	0,1000	0,0347
1000	0,43	0,44	0,43	0,230	0,200	0,230	0,433	0,2200	0,0953
1250	0,53	0,53	0,53	0,350	0,350	0,350	0,530	0,3500	0,1855

## DATOS TORQUE PRODUCIDO

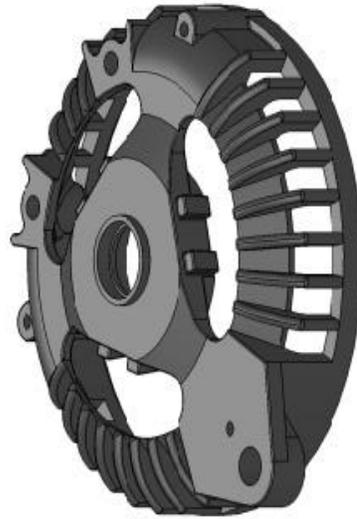
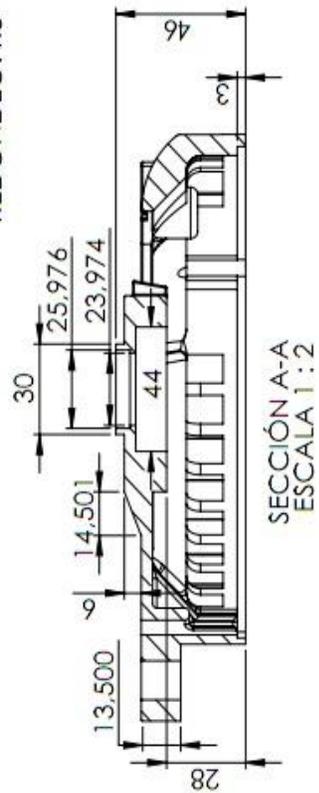
TORQUE (Nm) CON CARGA DE 240 $\Omega$									
RPM	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T Prom
320	3,40	2,80	3,40	3,00	3,50	3,40	3,50	3,40	3,30
400	4,10	4,00	4,20	4,00	4,50	4,40	4,10	4,00	4,16
630	5,60	5,50	5,80	5,50	5,40	5,50	5,60	5,50	5,55
800	9,80	9,40	9,60	9,70	9,40	9,40	9,70	9,80	9,60
1000	10,50	10,80	10,50	10,80	10,60	10,80	10,50	10,80	10,66
1250	11,90	11,50	11,50	11,40	11,90	11,50	11,50	11,80	11,63

TORQUE (Nm) CON CARGA DE 26,6 $\Omega$									
RPM	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T Prom
320	13,50	13,80	14,20	13,50	13,80	14,20	13,60	14,20	13,85
400	16,30	16,40	16,30	16,50	17,00	16,20	16,30	17,00	16,50
630	19,20	19,50	19,50	19,70	19,80	19,50	19,80	19,50	19,56
800	21,70	21,80	19,50	21,90	22,00	21,80	21,90	22,00	21,58
1000	27,70	28,00	27,80	27,70	28,00	27,90	27,70	28,00	27,85
1250	30,40	30,50	30,90	30,50	30,70	30,50	30,90	30,50	30,61

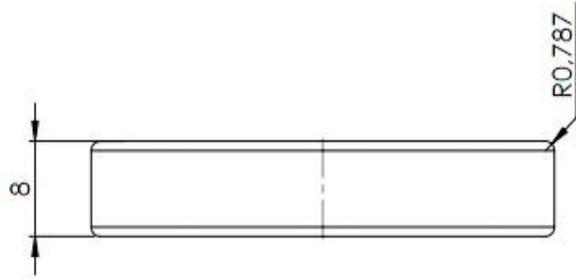
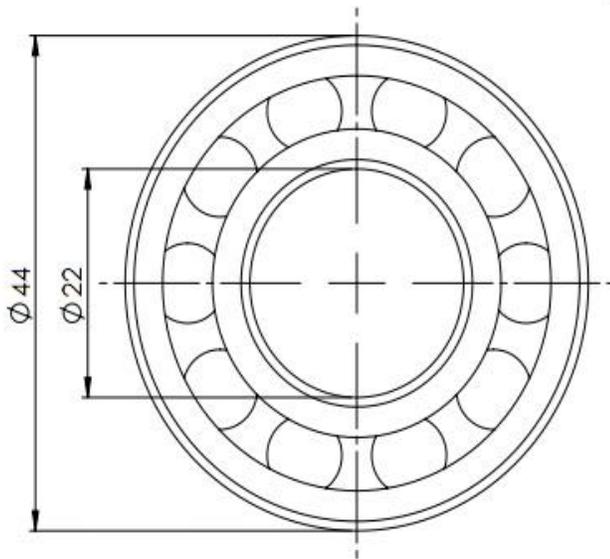
**ANEXO B**  
**PLANOS DEL GENERADOR**



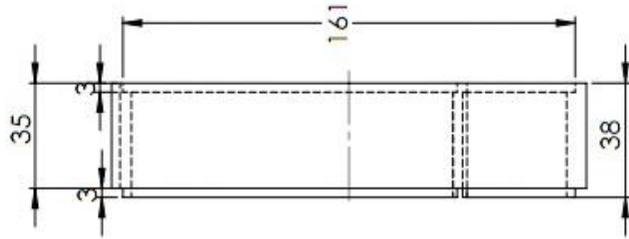
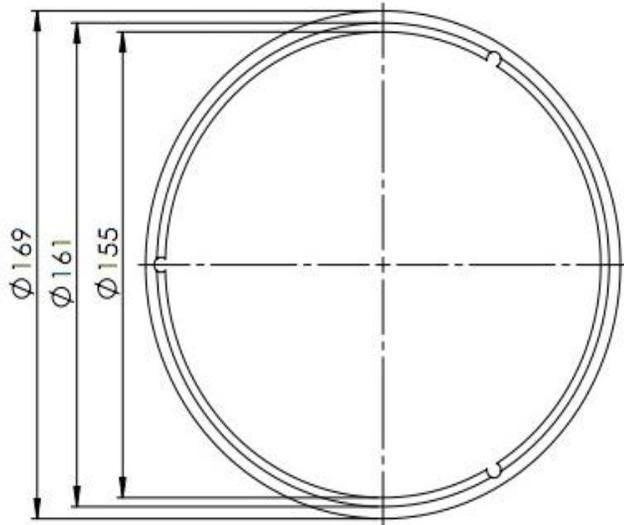
REDONDEO: R3



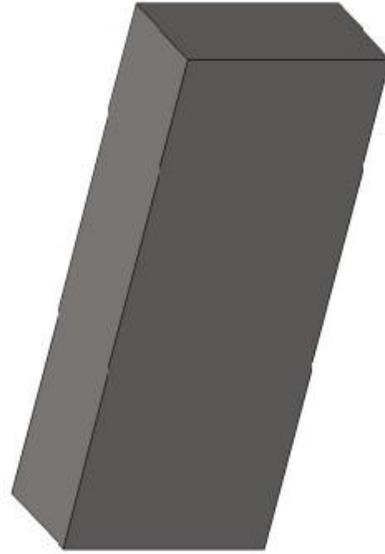
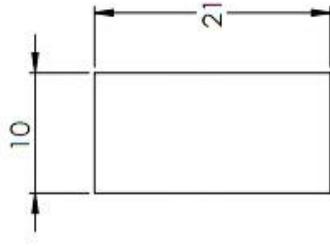
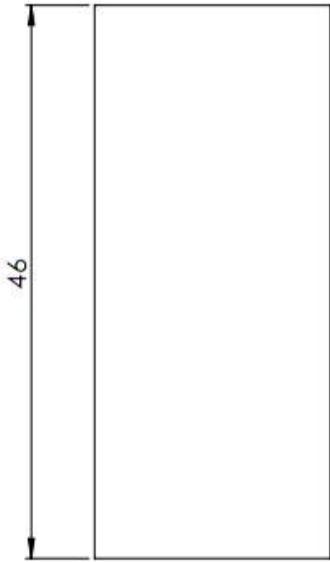
CORAZA GENERADOR	
NOMBRES	HERNAN DAVID IGUARAN
UNIDADES	CARLOS ANDRES CASTILLO
ESCALA	MILIMETROS 1 : 2
MATERIAL	ALUMINIO
N° PIEZAS	2



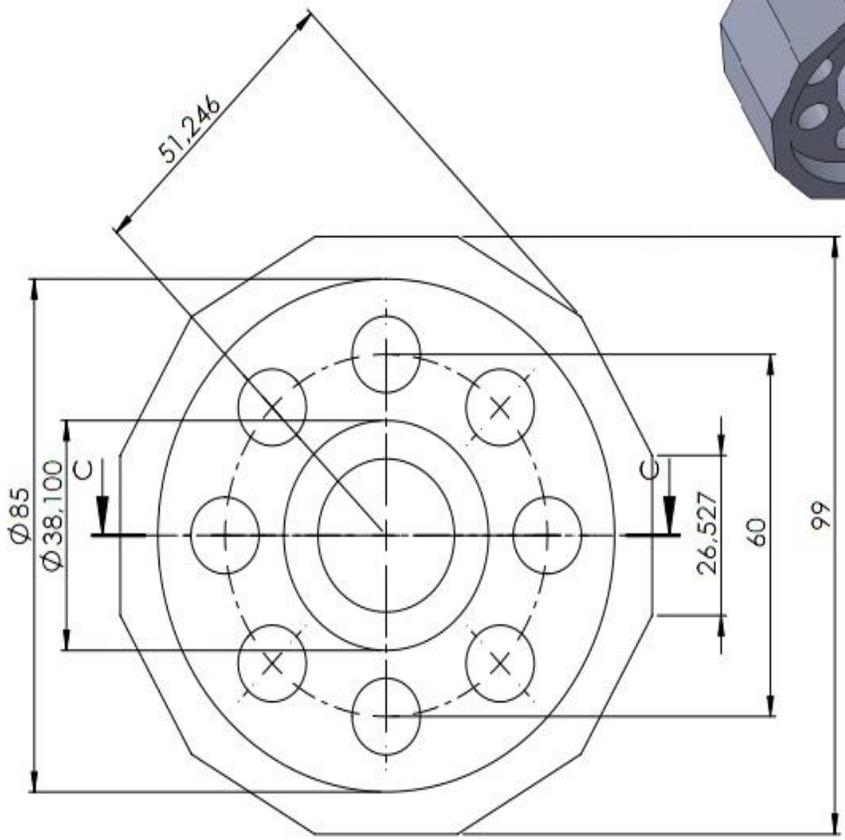
RODAMIENTO GENERADOR	
NOMBRES	HERNAN DAVID IGUARAN
UNIDADES	CARLOS ANDRES CASTILLO
ESCALA	MILIMETROS
MATERIAL	2 : 1
	Nº PIEZAS
	2



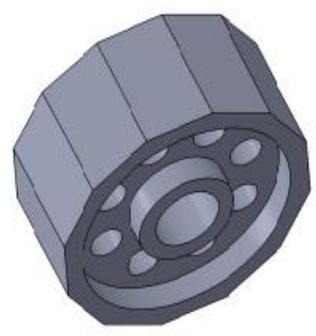
ANILLO EXTENSOR			
NOMBRES	HERNAN DAVID IGUARAN		
UNIDADES	CARLOS ANDRES CASTILLO		
ESCALA	MILIMETROS 1 : 2		
MATERIAL	AISI 1020	Nº PIEZAS	2



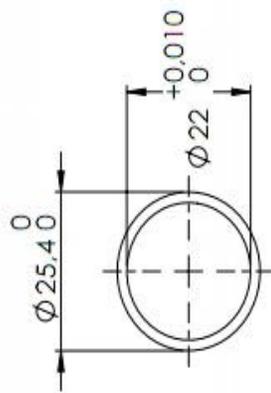
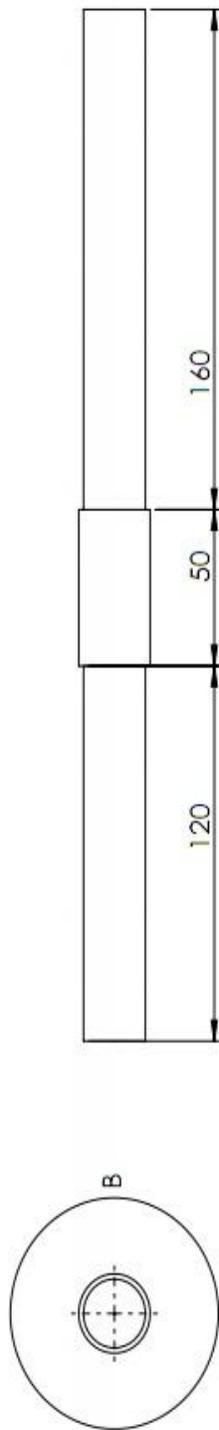
MAGNETO			
NOMBRES	HERNAN DAVID IGUARAN		
	CARLOS ANDRES CASTILLO		
UNIDADES	MILIMETROS		
ESCALA	2 : 1		
MATERIAL	NEODIMIO	Nº PIEZAS	12



SECCIÓN C-C  
ESCALA 1:1



PORTA MAGNETOS	
NOMBRES	HERNAN DAVID IGUARAN
UNIDADES	CARLOS ANDRES CASTILLO
ESCALA	MILIMETROS 1 : 1
MATERIAL	AISI 1045
Nº PIEZAS	1



DETALLE B  
ESCALA 1 : 1



EJE			
NOMBRES	HERNAN DAVID IGUARAN		
UNIDADES	CARLOS ANDRES CASTILLO		
ESCALA	MILIMETROS		
N° PIEZAS	1	MATERIAL	AISI 4140