



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR
ELÉCTRICO PARA UN AEROGENERADOR DE BAJA
POTENCIA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA
FREDY GAONA HERNÁNDEZ**

**ASESOR
ING. ANA MARÍA MALDONADO ARCEO**

MORELIA, MICH., MARZO DEL 2010



Agradecimientos

Agradezco a mi asesora Ing. Ana María Arceo Maldonado y al Ing. Carlos Manuel Sánchez González, ya que sin su amistad, impulso y gran ayuda desinteresada esta tesis no habría sido posible.

El gran apoyo y ayuda desinteresada por parte del Laboratorio de Ing. Eléctrica.

A mi gran Universidad.

A mi querida Facultad.

A mis maestros con aprecio.

Y a todas aquellas personas que hicieron posible la elaboración de esta tesis.

Dedicatoria

*Gracias a ese Dios que me brindo la oportunidad de seguir mi labor
en este mundo y sobre todo estar con mis seres queridos.*

*Dedico este trabajo a mis padres la Sra. Vicenta
Hernández Onofre y al Sr. Gilberto Gaona Alejandre
Por darme la vida y brindarme su apoyo incondicional, ser un ejemplo,
que me inculcaron para ser un hombre de bien, no solo en lo académico sino en la vida
y decirles que ahora si termine la carrera.*

*A mis hermanos
Con cariño y se que esto les servirá de estímulo,
para que continúen con sus metas y objetivos,
como saben hay muchos tropiezos en la vida,
pero siempre hay que levantarse y seguir adelante.*

*A mi esposa
Rocío Talavera Piza
Por estar a mi lado y darme ese aliento de fuerza para seguir adelante,
ser la parte complementaria en mi vida,
saber comprenderme y dándome su amor siempre.*

Resumen

En el presente trabajo de tesis se describe el diseño y procedimiento de desarrollo de un Generador Eléctrico para acoplarse a un aerogenerador de baja potencia, el diseño se inició en base a un alternador de coche en desuso y utilizando imanes de última generación esto para reducir costos, tiempo y en el caso de los imanes para no alimentar con cd desde un banco de baterías o del propio sistema de generación.

En el transcurso de la tesis se describen los tipos de aerogenerador que existen, también los diferentes generadores eléctricos y los que más se utilizan para generación eólica, en el cual se eligió el alternador de coche que es un generador síncrono para el diseño. Consistiendo en el diseño el remplazo de las bobinas de campo por imanes de neodimio y modificar la constante de construcción que se logra aumentando el número de espiras por bobina del estator.

Finalmente se hicieron pruebas para obtener las características principales del generador, como son el comportamiento con cargas resistivas, eficiencia magnética y neta del generador.

Contenido

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Contenido.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xi
Lista de símbolos y abreviaciones.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Metodología.....	2
1.5. Contenido de la tesis.....	3
Capítulo 2. Energía Eólica.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Historia sobre los Generadores Eólicos.....	6
2.3 Capacidad instalada en la Actualidad.....	10
2.4 Tipos de Aerogeneradores.....	11
2.4.1 Máquinas eólicas de eje Horizontal.....	11
2.4.2 Máquinas eólicas de eje Vertical.....	13
2.4.3 Sistemas Especiales.....	15
2.4.4 Ventajas y Desventajas.....	15
Capítulo 3. Características del Potencial Eólico.....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2. Determinación y parámetros del Potencial eólico.....	17

3.3 Determinación de la velocidad media del viento.....	18
3.4 La velocidad y la potencia del viento.....	19
3.5 Potencia del viento aprovechable.....	20
3.6 Criterios generales para el emplazamiento de un aerogenerador de baja Potencia.....	21
3.7 Regiones con gran Potencial eólico en México.....	23
Capítulo 4. Tipos de Generador eléctrico.....	25
4.1 Introducción.....	25
4.2 Máquina Síncrona.....	26
4.2.1 Velocidad de rotación de un Generador Síncrono.....	26
4.2.2 El Voltaje interno Generado.....	27
4.2.3 Circuito equivalente de un Generador Síncrono.....	28
4.3 Motor de Inducción Jaula de Ardilla como Generador.....	29
4.3.1 Generador de Inducción Aislado.....	30
4.4 Generador de Imanes Permanentes.....	32
4.5 Generador de Cd.....	32
4.6 Generador Axial.....	34
4.7 Generador de Pasos.....	38
4.8 Generador de Reluctancia variable.....	38
Capítulo 5. Diseño y Construcción del Generador eléctrico.....	41
5.1 Introducción.....	41
5.1.1 Magnetismo.....	42
5.1.2 Propiedades de los materiales Magnéticos.....	43
5.1.3 Materiales Ferromagnéticos.....	43
5.1.4 ¿Qué es un imán?	46
5.1.5 Imanes de Tierras Raras.....	47
5.2 Diseño y Construcción del Rotor.....	47
5.2.1 Procedimiento de la modificación del Rotor.....	50
5.3 Diseño y Construcción del Estator.....	51
5.3.1 Procedimiento de la modificación del Estator.....	54

5.4 Otra opción en el Diseño y Construcción del Generador eléctrico.....	57
5.4.1 Diseño y construcción del Rotor.....	57
5.4.2 Procedimiento de la modificación del Rotor.....	58
5.4.3 Diseño del Estator.....	60
Capítulo 6. Pruebas realizadas al Generador.....	61
6.1 Introducción.....	61
6.2 Desarrollo.....	61
6.2.1 Metodología.....	63
6.3 Pruebas Realizadas.....	65
6.3.1 Prueba en vacío y de corto circuito con Rotor modificado.....	65
6.3.2 Prueba en vacío y de corto circuito con Rotor y Estator modificado.....	66
6.3.3 Obtención de la Eficiencia magnética del generador sin y con el Estator modificado.	67
6.3.4 Prueba con diferentes cargas con Rotor y Estator modificado.....	68
6.3.5 Prueba para la obtención de la Eficiencia neta del prototipo del Generador diseñado.	73
6.4 Caracterización del Aerogenerador para el Generador Diseñado.....	77
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos a Futuro.....	79
7.1 Conclusiones.....	79
7.2. Trabajos a Futuro.....	82
Referencias.....	83

Lista de Figuras

2.1 Molino de eje vertical tipo Chino conocido como Panémonas.....	6
2.2 Molino mediterráneo.....	6
2.3 Molino Holandés.....	7
2.4 Múltipala americano.....	7
2.5 Precursor de los actuales aerogeneradores.....	8
2.6 Aerogenerador Jacobs de 1kW.....	8
2.7 Muestra el grado de madurez de esta tecnología en la actualidad.....	9
2.8 Muestra las partes más cruciales del aerogenerador de eje horizontal.	13
2.9 Aerogenerador Savonius.....	14
2.10 Muestra el aerogenerador Darrieus.....	14
2.11 Muestra el aerogenerador Giromill.....	14
3.1 Acción del viento con el área A de las aspas.....	19
3.2 Regiones con Gran Potencial Eólico de México.....	24
4.1 a) Rotor de polos no salientes en una máquina síncrona y b) Rotor de seis polos salientes en una máquina síncrona.....	26
4.2 Circuito simple.....	28
4.3 Circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico.....	29
4.4 Generador de inducción aislado cuyo banco de capacitores suministra la potencia reactiva.....	30
4.5 Componentes del Generador axial.....	35
4.6 Clasificación de motores de flujo axial.....	35
4.7 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIPSR-NN.....	36
4.8 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIPI-NS.....	37
4.9 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIP.....	37
4.10 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIRG-NS,	

sección axial en el radio medio.....	37
4.11 Sección de una máquina de reluctancia variable.....	39
4.12 Esquema de aerogenerador con generador de reluctancia variable.....	40
5.1 Orientación los momentos de dominio magnético.....	44
5.2 Curva típica de Magnetización (B-H).....	45
5.3 Imán con sus polos magnéticos y líneas de fuerza.....	46
5.4 Muestra imanes de Neodimio de diferentes tamaños.....	47
5.5 Desarme y limpieza del alternador de 12 volts.....	50
5.6 Muestra el imán de neodimio tipo anillo.....	50
5.7 Se reemplazó la bobina de campo por imanes de neodimio tipo anillo.....	51
5.8 Identificación del estator.....	54
5.9 Muestra la eliminación de las bobinas.....	54
5.10 Muestra la terminación de la limpieza del núcleo.....	55
5.11 Creación de las bobinas con el nuevo calibre utilizado.....	55
5.12 a) Muestra el estator modificado y b) estator modificado y material utilizado....	55
5.13 Integración del estator modificado.....	56
5.14 Término del Generador diseñado.....	56
5.15 a) Muestra el bloque de aluminio en el torno dando las dimensiones que se ocupan, b) Muestra el eje con el bloque de aluminio.....	58
5.16 Muestra el trazo de inicio para el pegado de los imanes.....	59
5.17 Muestra el procedimiento utilizado para el pegado de los imanes en el bloque del rotor.....	59
5.18 Finalización del rotor construido con 16 imanes de Neodimio tipo bloque.....	60
6.1 a) Muestra la base donde se acoplaron el prototipo del Generador y el motor de CA con un inversor, b) Base de la fuente donde se fijaron los módulos de resistencias y los reóstatos y c) Base de la fuente de poder donde se fijaron el motor de CD y el electrodinámometro para sacar su eficiencia.....	64
6.2 Muestra la conexión implementada para obtener las mediciones de las pruebas en vacío y de corto circuito.....	65

6.3 Instalación de los módulos de resistencias para hacer las combinaciones necesarias para las pruebas previas.....	68
6.4 Conexión de los módulos de las resistencias con el prototipo del generador.....	69
6.5 Montaje y conexión para la obtención de la eficiencia del primotor.....	73
6.6 a) muestra la conexión del primotor con el generador y b) muestra los módulos de resistencias y aparatos de medición utilizados.....	75

Lista de Tablas

2.1 Clasificación de aerogeneradores para producción eléctrica en función de su potencia.....	5
2.2 Capacidad total de energía eólica producción por países.....	10
3.1 Clasificación de los vientos para determinar su potencia a diferentes alturas.....	21
5.1 Características del imán de Neodimio utilizado.....	48
5.2 Potencia Eléctrica Máxima.....	49
5.3 Generación de voltaje calculado con el nuevo calibre utilizado.....	53
5.4 Características del imán de Neodimio utilizado.....	57
5.5 Potencia Eléctrica Máxima.....	58
6.1 Datos obtenidos en las pruebas en Vacío y Corto circuito para el cálculo de impedancia interna.....	66
6.2 Datos obtenidos en las pruebas en Vacío y Corto circuito para el cálculo de impedancia interna.....	66
6.3 Muestra la comparación de la Eficiencia Magnética del Prototipo del Generador sin modificar el estator y modificado.....	67
6.4 Comportamiento del Voltaje, Corriente y Potencia a 14.....	69
6.5 Comportamiento del Voltaje, Corriente y Potencia a 18.5.....	70
6.6 Comportamiento del Voltaje, Corriente y Potencia a 24.2.....	71
6.7 Mediciones obtenidas para la obtención de eficiencia del primotor.....	74
6.8 Muestra el comportamiento de la eficiencia del generador.....	76
6.9 Número de palas en función del TSR.....	77

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolo	Descripción
K	kilo
M	mega
G	giga
T	tera
<i>m</i>	metros
W	watts
<i>Hz</i>	hertz
<i>W-h</i>	watt-hora
<i>m</i> ³	volumen
<i>t</i>	tiempo
ρ	densidad
ω	velocidad angular
φ	flujo
<i>K</i>	constante de construcción
Ω	ohms
τ	tao par
X	reactancia
R	resistencia
<i>Z_{int}</i>	impedancia Interna
V	voltaje
I	corriente
Vcd	voltaje cd
P	potencia real
rpm	revoluciones por minuto
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
AIE	Agencia Internacional de la Energía
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas

NREL	National Renewable Energy Laboratory
ANES	Asociación Nacional de Energía Solar
AMDEE	Asociación Mexicana de Energía Eólica
IEE	Instituto Eléctrica Electrónica
CIEMAT	Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbines
CO ₂	Bióxido de carbono
Fe ₃ O ₄	Magnetita o artificiales
NeFeB	Hierro, Neodimio y Boro

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia del desigual calentamiento de la superficie terrestre, el cual utilizamos como energía primaria para la producción de energía eléctrica, por lo que el aire posee masa, que al moverse en forma de viento lleva consigo energía cinética que mediante una turbina eólica puede transformarse en electricidad.

En México, la generación eléctrica basa la mayor parte de su producción en el uso de combustibles fósiles, esto desde sus inicios en generación eléctrica cuando se instaló la primera central termoeléctrica en 1879 en la ciudad de León, Guanajuato, para satisfacer las necesidades de empresas textiles. Por lo que desde inicios se utilizaron recursos “no renovables” que son los hidrocarburos y el carbón. En la actualidad la generación eólica en México se esta retomando, aunque solamente se explota en una cantidad pequeña.

A mediados de 2006, la (CRE) Comisión Reguladora de Energía tenía vigentes 8 permisos para instalar más de 900 MW en plantas eoloeléctricas por el sector privado como plantas de autoabastecimiento.

A su vez, la (CFE) Comisión Federal de Electricidad tenía en Agosto de 2006, dos plantas eólicas en operación. La mayor es la Central eólica de La Venta I y II que se localizan aproximadamente a unos 30 kilómetros al noroeste de la ciudad de Juchitán, Oaxaca, y tiene una capacidad instalada de aproximadamente 90 MW. La otra es la Central eólica de Guerrero Negro y se ubica en las afueras de Guerrero Negro, Baja California Sur, dentro de la Zona de Reserva de la Biósfera de El Vizcaíno y tiene una capacidad de 0.6 MW en un solo aerogenerador.

1.2 Objetivo

El objetivo de esta tesis radica en realizar el diseño de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia, para el desarrollo de este se tienen ya elementos al alcance de nuestras manos como lo son la carcasa, ventilador de un alternador de coche en desuso y alambre magneto, remplazando las bobinas de campo del rotor por imanes de neodimio. Diseñar en base a la investigación teórica aplicada al desarrollo de máquinas en este caso el generador, así mismo detallar los factores que intervienen como lo son:

- Utilización del Imán de Neodimio.
- Posición del Imán de Neodimio.
- Modificación de la constante de construcción.

1.3 Justificación

En la actualidad el uso de la energía eólica ha tenido un crecimiento muy grande a nivel mundial, Para México el estudio y la utilización de esta energía renovable a sido media por parte de instituciones gubernamentales, educativas y el sector privado. Con el uso de imanes de última generación en generadores eléctricos de imanes permanentes se evita de energizar las bobinas de campo del rotor con corriente directa, aumentando la eficiencia del sistema, ya que este entregaría energía desde el inicio de su velocidad, con esto se logra conectar carga de manera directa si se quiere. Así en la presente investigación de tesis se propone diseñar y construir un generador eléctrico para fines eólicos utilizando imanes de neodimio partiendo de un alternador de coche en desuso.

1.4 Metodología

La metodología utilizada para el diseño parte primordialmente en la investigación documental, seguido por el material que se cuenta y se tiene al alcance para reducir el tiempo de diseño y abaratar los costos de construcción, posteriormente la construcción teniendo como base un alternador de coche en desuso, finalizando con pruebas y conclusiones.

1.5 Contenido de la tesis

En el capítulo 1 se da una breve introducción a este trabajo, se muestra la situación actual de la generación eólica en México y se resaltan los beneficios de esta energía renovable.

En el capítulo 2 se presenta la historia de los aerogeneradores, la capacidad instalada actualmente y los diferentes tipos de aerogeneradores.

En el capítulo 3 se presentan los factores que intervienen en el potencial eólico, también se presenta el estudio de la selección del lugar donde se pretende instalar para tener el mejor potencial.

En el capítulo 4 se presenta una introducción del funcionamiento del generador eléctrico y el estudio de los diferentes tipos de generadores que más se utilizan para la generación eólica.

En el capítulo 5 es de vital importancia ya que aquí se presenta el tipo de generador que se determinó utilizar para la investigación, así como el proceso de diseño y modificación, sustentada con la teoría documental y los diversos factores que intervienen en el mismo.

En el capítulo 6 se presentan las pruebas diversas para determinar sus características, como son la impedancia interna Z_{int} , eficiencia magnética, comportamiento ante diferentes cargas y su eficiencia neta.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones que son cruciales en la investigación, seguido de aportaciones y trabajos a futuro.

Capítulo 2

Energía Eólica

2.1 Introducción

Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia del desigual calentamiento de la superficie terrestre, siendo la fuente de energía eólica, o mejor dicho, la energía mecánica que en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento. Bajo la acción de la presión, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento.

Las causas principales del origen del viento son:

- La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos
- La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur
- Las perturbaciones atmosféricas.

Para la (AIE) Agencia Internacional de la Energía la visión contempla que en el año 2030 la demanda eléctrica mundial se duplique de seguir como hasta ahora. La energía eólica es la fuente de energía con mayor crecimiento a nivel mundial, habiendo registrado un aumento anual del 40% durante los últimos cinco años.

Se prevé una mayor demanda de electricidad en los países en vías de desarrollo, mientras que en los industrializados su crecimiento se estima únicamente en un 1,8% anual, lo que corresponde aproximadamente a 3500 TWh durante el mismo período de tiempo [CIE 2009].

El Protocolo de Kioto, con su especial atención a los problemas derivados del CO₂ y otros gases de efecto invernadero, muestra la gran preocupación mundial sobre el medio ambiente y subraya la importancia de las energías renovables.

La energía eólica posee un importante potencial de crecimiento, gran parte de la capacidad de generación está localizada en el mar, donde las altas velocidades medias del viento se traducen en una mayor producción de energía. La situación en el mar también

reduce el impacto sobre el medio ambiente local, dado que las turbinas están lo suficientemente alejadas para que no puedan ser vistas ni oídas.

Solo en EUA, del 2006 a 2007, se incrementó la capacidad instalada en 45% a ~17,000 MW. Las turbinas más populares en el presente son de 1.5 MW. En Texas ya se aprobó desarrollar el sistema de transmisión para soportar hasta 25,000 MW de energía eólica.

Como consecuencia directa de la disminución de los costos de instalación, operación y mantenimiento, además del incremento de la eficiencia y la disponibilidad de los aerogeneradores, se ha producido una importante reducción en los costos de producción, con lo que el costo medio del KWh. producido, se sitúa entre 0.04 – 0.08 USdls/KWh., los costos como término medio de una instalación varían entre 540 USdls/KW y 750 USdls/KW. Los costos totales de una instalación varían entre los 750 USdls/KW en tierra y los 1,050 USdls/KW en el mar, directamente ligados a la dificultad orográfica y de accesos al emplazamiento [AMEE 2009].

Hay una clasificación de los aerogeneradores en función de la potencia que estas generen, como ejemplo los aerogeneradores pequeños resultan de gran utilidad en casas aisladas, granjas, camping, sistemas de comunicación y otras aplicaciones para el autoconsumo, estas instalaciones consisten en pequeños aerogeneradores también llamados aerogeneradores de baja potencia, a continuación la tabla 2.1 muestra la clasificación [CIEMAT IDAE 2010].

Tabla 2.1 Clasificación de aerogeneradores para producción eléctrica en función de su potencia.

Denominación		Potencia (KW)	Utilización
Baja	Muy Baja	Microaerogeneradores < 1	Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc.
		Miniaerogeneradores 1-10	Granjas, viviendas aisladas (sistemas Eólico-Fotovoltaico), bombeo, etc.
		10-100	Comunidades de vecinos, PYMES (sistemas mixtos EODiesel), drenaje, tratamientos de aguas, etc.
Media		100-1000	Parques eólicos (terreno complejo)
Alta		1000-10000	Parques eólicos (terreno llano, mar adentro)
Muy Alta		> 10000	En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales. No antes del año 2010

2.2 Historia sobre los generadores eólicos

La energía del viento ha sido aprovechada desde tiempos remotos como fuerza motriz en la navegación, en molinos de granos y bombas de agua como energía mecánica. Los molinos de viento aparecieron en Persia, Irak, Egipto y China hace unos 17 siglos a. C., estos primeros molinos que se conocen eran de eje vertical y movían un par de piedras redondas sin emplear engranes. En China hay referencia de palas basándose en telas colocadas sobre una armazón de madera, que eran utilizados para el bombeo de agua conocidas como panémonas, las cuales fueron precursoras de los molinos persas y se muestra en la figura 2.1.

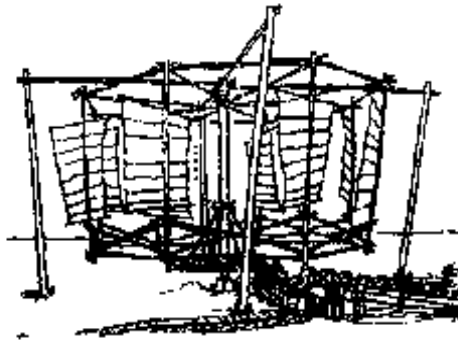


Figura 2.1 Molino de eje vertical tipo Chino conocido como Panémonas.

Los molinos de viento fueron utilizados en Europa en la Edad Media, comenzando a extenderse por Grecia, Italia y Francia. Desarrollando su propia tecnología ya que se imponen fundamentalmente los molinos de eje horizontal como lo muestra la figura 2.2, mientras que los molinos orientales eran de eje vertical.

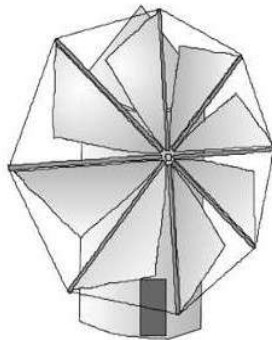


Figura 2.2 Molino mediterráneo.

En el siglo XVI Holanda perfecciona el diseño de los molinos y los utiliza para el drenaje. Una idea de la importancia que en el pasado adquirió la energía eólica nos da el

hecho de que en el siglo XVIII, los holandeses tenían instalados y en funcionamiento 20000 molinos, como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Molino Holandés.

Las primeras bombas eólicas aparecen en 1854, desarrolladas por Daniel Halladay, son rotores de múltiples álabes acoplados a una bomba de pistón a través de un sistema de biela-manivela. En 1883 aparece el pequeño múltipala americano diseñado por Steward Perry como lo muestra la figura 2.4.



Figura 2.4 Múltipala americano.

Como precursor de los actuales aerogeneradores, es necesario citar la aeroturbina danesa de Lacourt (1892), esta máquina utilizaba un rotor cuatripala de 25 metros de diámetro, capaz de desarrollar entre 5 y 25 KW, mediante un generador situado en la base de la torre de 24 metros de altura, el detalle de estos primeros aerogeneradores eléctricos era el de no contar con un medio de almacenamiento de energía al no estar conectados a la red, como lo muestra la figura 2.5.



Figura 2.5 Precursor de los actuales aerogeneradores.

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Estableciendo los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas. En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores al viento incidente.

Otro avance importante fue la introducción de los sistemas de regulación de paso variable, que permitían un mejor control de la potencia en las turbinas. A consecuencia de estos avances surge en los años veinte toda una nueva industria en relación con los aerogeneradores, como uno de los ejemplos más notables fue los pequeños aerogeneradores fabricados por la casa Jacobs Wind Electric en EUA, que fabricó miles de unidades de su modelo con una capacidad de 1 KW, como lo muestra la figura 2.6.

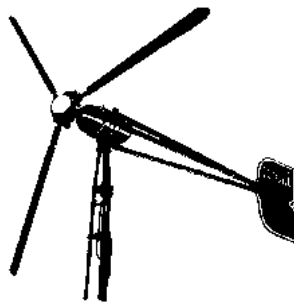


Figura 2.6 Aerogenerador Jacobs de 1KW.

El periodo de decline o pausa de este tipo de tecnología fue la de la irregularidad del viento y dificultades del almacenamiento de energía. Los combustibles fósiles, como lo es petróleo y el carbón, comenzaron a imponerse a ser la principal fuente de energía.

Con la primera Guerra Mundial la escasez de recursos para importar petróleo orilló a que el desarrollo de las turbinas eólicas tomara dos caminos de producción:

- La comercialización de aerogeneradores de baja potencia para la electrificación rural.
- El diseño, construcción y comercialización de aerogeneradores de alta potencia.

Una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial y como consecuencia del periodo de escasez que siguió, los países europeos elaboraron programas nacionales para elegir los emplazamientos más adecuados donde deberían instalarse las grandes plantas eólicas que se tenían proyectadas.

A esta etapa siguió otra de precios del petróleo altos que se prolongó hasta 1986 y que favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos.

En esta época, las redes de electrificación empezaban a ser lo suficientemente extensas como para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, por lo que también disminuyeron las ventajas de los aerogeneradores de baja potencia utilizados en zonas aisladas. Solamente en Francia, Dinamarca e Inglaterra se llevaron a cabo programas de cierta importancia.

En los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen sus costes, convergiendo hacia una nueva generación de aeroturbinas de 500 KW a 1.2 MW, como se muestra en la figura 2.7, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología.



Figura 2.7 Muestra el grado de madurez de esta tecnología en la actualidad.

2.3 Capacidad Instalada en la actualidad

El crecimiento de la energía eólica en el mundo ha ido en aumento constantemente, las causas pueden ser el alto costo de los hidrocarburos ó la escasez, por las emisiones de CO₂ ó por los problemas que tienen algunos países para importar el combustible que utilizan para generar electricidad, así que desarrollan o adoptan algún tipo de energía capaz de solventar la energía que ocupan. Teniendo así en los últimos años un crecimiento exponencial lo cual se ve en la gráfica 2.1:



Gráfica 2.1 Crecimiento de la energía eólica.

Teniendo al continente europeo como el que tiene el máximo desarrollo en esta tecnología lo cual queda sustentado en la tabla 2.1, que representa la potencia instalada hasta finales del 2006.

Tabla 2.1 Capacidad total de energía eólica producción por países.

País y su Posición		Capacidad en MW		
Posición	País	2006	2005	2004
1	Alemania	20622	18428	16628
2	España	11730	10028	8504
3	USA	11603	9149	6725
4	India	6270	4430	3000
5	Dinamarca	3136	3128	3124
6	China	2405	1260	764
7	Italia	2123	1717	1265
8	Reino Unido	1963	1353	888
9	Portugal	1716	1022	522
10	Francia	1567	757	386
	Total Mundial	73904	58982	47671

En la actualidad presentan eficacia, madurez tecnológica y sobre todo competitividad, hoy en día son varios fabricantes que existen en el mercado, estos ofrecen su tecnología con garantía de varios años que pueden ser de hasta 20 años, todas están certificadas con normas y estándares internacionales, con procedimientos y sobre todo con precios competitivos para el cliente.

2.4 Tipos de Aerogeneradores

Los aerogeneradores o turbinas eólicas son dispositivos que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, después a energía eléctrica por medio de un generador eléctrico. La captación de la energía eólica se realiza mediante la acción del viento sobre las palas, las cuales están unidas al eje a través de un elemento denominado rotor, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento y se pueden clasificar en:

- Aeroturbinas de eje horizontal y de eje vertical.
- Sistemas especiales.

2.4.1 Máquinas eólicas de eje Horizontal

HAWTs por sus siglas en ingles “horizontal axis wind turbines” o aeroturbinas de eje horizontal, se suelen clasificar según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor, aspectos que están íntimamente relacionados en rápidas y lentas; las primeras tienen un número de palas no superior a 4 y las segundas pueden tener hasta 24.

Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, son:

- a) Máquinas que generan un movimiento alternativo.*
- b) Máquinas múltipala.*
- c) Hélices con palas pivotantes que son de ángulo de ataque variable.*
- d) Hélices con palas alabeadas, que incluyen clapetas batientes y alerones de ángulo variable.*

La hélice puede presentar dos tipos de posiciones frente al viento, como son:

- a) Barlovento upwind* en la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás.

b) *Sotavento downwind* en la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice.

Componentes principales de un Aerogenerador de eje Horizontal

- **Torre y Cimiento**

Para garantizar la estabilidad de una turbina eólica se construyen los cimientos, que pueden ser superficiales o profundos. La torre se construye no solo para resistir el peso de la góndola y de los alabes del rotor, sino también debe absorber las cargas causadas por la variación de potencia del viento.

- **Rotor**

El rotor es el componente que ayuda a los álabes o palas a convertir la energía cinética del viento en movimiento mecánico rotacional.

- **Góndola y tren de fuerza**

La góndola soporta toda la máquina de la turbina y debe ser capaz de rotar para seguir la dirección del viento, por lo que se une a la torre mediante rodamientos.

- **Caja Multiplicadora**

La caja multiplicadora es un multiplicador de velocidad que convierte el movimiento rotacional de 18-50 rpm del rotor en aproximadamente 1750 rpm con que rota el generador.

- **Generador**

El generador de una turbina convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

- **Acoplamiento y frenos**

Entre el generador y la caja multiplicadora se instala un acoplamiento que suele ser flexible, igualmente se emplean frenos mecánicos en el tren de fuerza donde generalmente hay dos tipos de frenos: los sistemas de freno aerodinámico y los sistemas mecánicos.

- **Equipamiento eléctrico**

Está compuesto por el generador, el sistema de alimentación a la red y varios sensores, estos últimos se emplean para medir temperatura, dirección del viento, velocidad del viento y otros parámetros que pueden aparecer dentro de la góndola o en los alrededores, por lo que apoyan el control de la turbina y su monitoreo.

- **Otros componentes**

Finalmente, la turbina eólica contiene otros componentes no incluidos en los tópicos anteriores, elementos para enfriamiento y calentamiento, equipamiento para la protección contra descargas eléctricas, grúas y elevadores, y extintores de fuego.

A continuación la figura 2.8 que muestra las partes más cruciales de un aerogenerador de eje Horizontal.

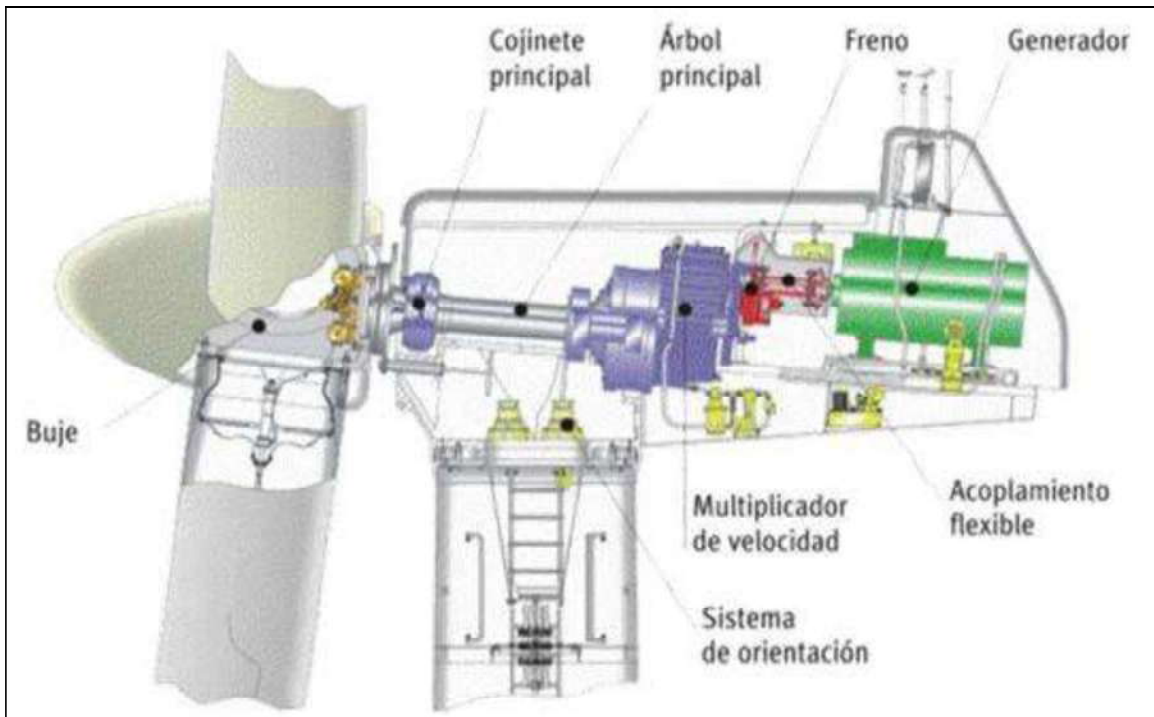


Figura 2.8 muestra las partes más cruciales del aerogenerador de eje horizontal.

2.4.2 Máquinas eólicas de eje Vertical

Entre las máquinas eólicas de eje vertical se pueden citar:

El aerogenerador Savonius

El aerogenerador Darrieus

El molino vertical de palas tipo Giromill o ciclógiro

El aerogenerador Savonius

Este fue inventado por el finlandés de igual nombre en 1924 y patentado en 1929. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro, de ejes paralelos acoplados al eje de giro y separados una cierta distancia. Este puede arrancar con poco viento, siendo muy

sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo, la figura 2.9 muestra este tipo de aerogenerador.

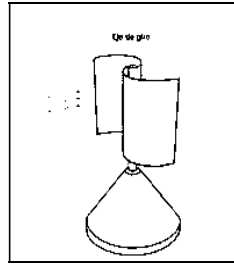


Figura 2.9 Aerogenerador Savonius.

El aerogenerador Darrieus

Es el más utilizado de esta clase, el inventor fue el francés Ingeniero Georges Darrieus, quien patentó el diseño en 1993. Requiere para un correcto funcionamiento, vientos de 4 a 5 metros por segundo como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro, un buen rendimiento y se construyen con 2 ó 3 hojas, la figura 2.10 muestra este tipo de aerogenerador.



Figura 2.10 Muestra el aerogenerador Darrieus.

El molino vertical de palas tipo giromill

Éste deriva del Darrieus y del Savonius, solo que las aspas son rectas y su orientación se modifica constantemente; tiene entre 2 y 6 palas. El rotor Savonius actúa durante el arranque y un rotor Darrieus sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento, la figura 2.11 muestra este tipo de aerogenerador.

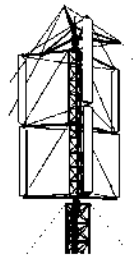


Figura 2.11 muestra el aerogenerador Giromill.

2.4.3 Sistemas Especiales

Conforme al desarrollo de los generadores de grandes potencias y por lo tanto de grandes dimensiones, se está en la búsqueda de nuevos modelos para generar potencias superiores a los 100 MW, como los que están a continuación:

Generador Andréu-Enfield.

Este tiene sus palas huecas, las cuales giran por la acción del viento exterior que incide sobre ellas como una máquina eólica normal, lo cual provoca la expulsión del aire que está contenido en ellas, saliendo despedido bruscamente por los extremos de las mismas, por efecto de la fuerza centrífuga originada por el giro, generando una depresión o vacío parcial en su interior, que permite la aspiración de aire por la parte inferior de la estructura, el cual hace girar una turbina eólica de eje vertical conectada a un alternador situado en su parte inferior.

Sistema tipo Tornado

Este difiere totalmente de los descritos anteriormente, el principio utilizado es el de los que generan los tornados, huracanes y ciclones por la naturaleza. El viento sopla tangencialmente sobre una torre cilíndrica y penetra en su interior a través de deflectores, produciendo un tornado en su interior, el vacío creado en el centro del vórtice produce una succión en el fondo de la torre, formándose una corriente vertical que se va acelerando en su movimiento ascendente, generando una depresión en su centro que mueve las turbinas axiales por el efecto de succión.

2.4.4 Ventajas y Desventajas

Los aerogeneradores de eje horizontal presentan las siguientes ventajas frente a las de eje vertical.

- Los de eje horizontal tienen un coeficiente de potencia C_p mayor.
- Los de eje horizontal presentan una velocidad de giro mayor que las de eje vertical, por lo que son más adecuadas para el accionamiento de generadores eléctricos que giran a 1000 o 1500 rpm.

- Los de eje horizontal permiten barrer mayores superficies que las de eje vertical, por lo que alcanzan potencia mucho mayor.
- Los de eje horizontal aprovechan el efecto beneficioso del aumento de la velocidad del viento con la altura respecto del suelo. La configuración de las de eje vertical impide alcanzar alturas elevadas y por lo tanto no pueden aprovechar este efecto.

En cambio, las de eje vertical presentan las siguientes ventajas frente a las de eje horizontal.

- Dada su simetría vertical, no necesitan sistemas de orientación para alinear el eje de la turbina con la dirección del viento, como ocurre en las de eje horizontal.
- Su mantenimiento es más sencillo, dada su poca altura con respecto al suelo.
- Cuando el aerogenerador de eje vertical trabaja en una aplicación que requiere velocidad constante, no es necesario incorporar ningún mecanismo de cambio de paso.
- Los de eje horizontal son las más usadas en la práctica. Las eólicas de eje vertical se utilizan básicamente para investigación.

Capítulo 3

Características del Potencial Eólico

3.1 Introducción

El potencial eólico determinado de cierta zona ó lugar es la magnitud del recurso energético eólico, ésta en términos de reservas probadas y probables, como capacidad instalable en GW. Su determinación es de vital importancia ya que es para definir la viabilidad técnico-económica para cualquier proyecto de energía eólica. En lo técnico, permite seleccionar el tipo del aerogenerador adecuado para las condiciones del viento en el sitio de instalación; esto es: capacidad en KW, dimensiones de palas y torre, distribución topográfica de los aerogeneradores, sistema de control, frenado, dirección, etc. En el lado económico se determina la factibilidad en términos de costos de instalación, operación, mantenimiento, tiempo de recuperación de inversión inicial y gastos administrativos.

El éxito del proyecto tanto en lo técnico como lo económico es que se tenga un estudio muy exhaustivo y detallado como lo es la velocidad media del viento, dirección y estacionalidad. Para no tener errores como ejemplo por falta de viento o que exija mayor velocidad de este.

3.2 Determinación y Parámetros del Potencial Eólico.

Para determinar las características del potencial eólico para una zona específica consiste siguiendo una metodología, se requiere la elaboración de un inventario de cuencas eólicas y su caracterización, precisando los sitios, su extensión superficial en hectáreas, sus características topográfico-eólicas y rumbos dominantes, esto permite configurar la distribución topográfica de los aerogeneradores y determinar un índice de capacidad instalable por hectárea. La velocidad media del viento juega un papel importante ya que es un indicativo en el sitio para la generación bruta de GW por año, esto cuantificaría reservas probables, la caracterización detallada a nivel factibilidad demostraría una reserva probada.

Para determinar las características específicas del viento y poder analizar las posibilidades y condiciones de su aprovechamiento, al ser una fuente energética variable y

aleatoria, es necesario realizar análisis estadísticos de los datos. Los valores estadísticos son: la velocidad, la dirección del viento, la temperatura y la presión atmosférica. En la toma de datos intervienen factores como son: aparatos de medida, procedimiento de toma de datos y métodos de tratamiento de datos

3.3 Determinación de la Velocidad Media del Viento.

La velocidad media del viento juega un papel importante para la determinación del potencial eólico en el sitio propuesto para la instalación del aerogenerador. El cálculo pertinente se realiza por medio y en base a los datos proporcionados por un anemómetro que este monitorea, tomando lecturas al menos cada hora durante las 24 horas durante los 365 días del año, en base a los datos obtenidos se obtienen gráficas, que son el comportamiento de la velocidad del viento, estas pueden ser semanales, mensuales o anuales.

Para la captura de datos se necesita tener un equipo especial para el procesamiento de datos, teniendo un intervalo pequeño el cual ayuda a que el resultado final sea más exacto. Junto con los datos se debe monitorear la dirección del viento como complementación.

El anemómetro deberá instalarse a una altura de no menos 8 m para obtener mejores resultados. Con los datos medidos, lo siguiente es calcular la velocidad media del viento usando la ecuación 3.1:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (3.1)$$

Donde la expresión es la sumatoria de los valores medidos en N lecturas hechas por el anemómetro a lo largo de los 12 meses de muestreo. Para la exactitud del cálculo final es necesario mencionar que deberán excluirse del cálculo aquellas mediciones con valores anormales como son huracanes, fallas del equipo de medición y cualquier alteración física o climatológica.

3.4 La Velocidad y la Potencia del Viento.

Es importante describir la variación de las velocidades del viento, tanto para el diseño de aerogeneradores, como para estimar la producción de electricidad. Las velocidades del viento varían en función de la altura sobre el nivel del suelo y durante el día y a lo largo del año. El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad.

La fórmula para la potencia del viento que pasa perpendicularmente a través del área de barrido de un rotor se expresa con la ecuación 3.2.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2 \quad (3.2)$$

Donde: P =potencia del viento en Watts.

ρ =es la densidad del aire seco (1.225 kg/m³).

v =su velocidad en m/s.

r =el radio del rotor en m.

π = 3.1416

La figura 3.1 muestra los parámetros que intervienen para la obtención de potencia en un aerogenerador.

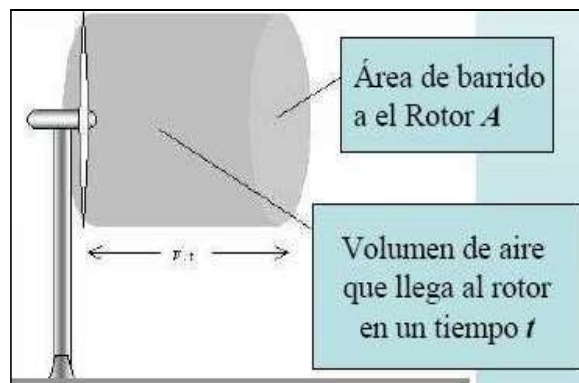
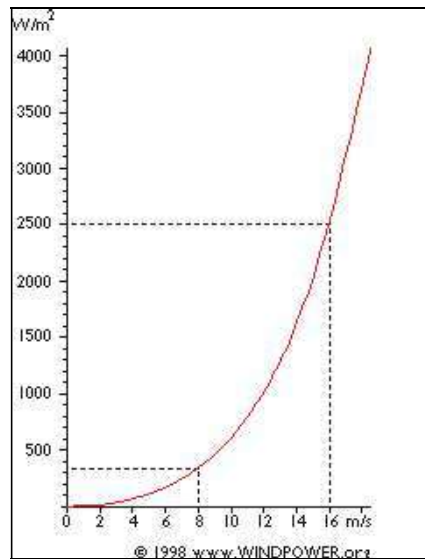


Figura 3.1 Acción del viento con el área A de las aspas.

La cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo de la velocidad media del viento. Por ejemplo si la velocidad del viento se duplica, la cantidad de energía que contenga será: $2^3 = 8$ esto es ocho veces más energía.

La gráfica 3.1 muestra que para una velocidad del viento de 8 m/s se obtiene una potencia de 314 w por cada metro cuadrado expuesto al viento e incidiendo

perpendicularmente al área del rotor. Si la velocidad del viento se incrementa al doble, que es 16 m/s la potencia llega a 2500 w/m² esto es ocho veces más la potencia.



Gráfica 3.1 Curva de obtención de Potencia por área barrida a varias velocidades.

3.5 Potencia del Viento Aprovechable.

Esta potencia aprovechable se refiere a la potencia mecánica en el eje del rotor y no a la potencia eléctrica final. Las pérdidas debidas a eficiencia mecánica de la transmisión y eficiencia eléctrica del generador deben ser contabilizadas aparte. La potencia aprovechable por un aerogenerador de área A frente a un flujo de aire de velocidad v y densidad ρ se representa con la ecuación 3.3:

$$P_{eje}(v) = \frac{1}{2} C_p(v) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.3)$$

Donde $P_{eje}(v)$ es la potencia eléctrica en función del viento.

C_p es el coeficiente de potencia este expresa la fracción de potencia extraída del rotor en función del viento y es igual 59.9% este es el valor de rendimiento máximo, establecido a partir de la teoría del rotor.

Las estimaciones exactas de la velocidad del viento son críticas al momento de evaluar el potencial de la energía eólica en cualquier localización. Los recursos eólicos son caracterizados por una escala de clases de viento según su velocidad, que se extiende desde la clase 1 que es la más baja y la clase 7 que es la más alta, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Clasificación de los vientos para determinar su potencia a diferentes alturas

Clase	A 30 m de altura		A 50 m de altura	
	Velocidad del Viento m/s	Potencia del Viento W/m ²	Velocidad del Viento m/s	Potencia del Viento W/m ²
1	0-5.1	0-160	0-5.1	0-200
2	5.1-5.9	160-240	5.1-5.9	200-300
3	5.9-6.5	240-320	5.9-6.5	300-400
4	6.5-7.0	320-400	6.5-7.0	400-500
5	7.0-7.4	400-480	7.0-7.4	500-600
6	7.4-8.2	480-640	7.4-8.2	600-800
7	8.2-11.0	640-1600	8.2-11.0	800-2000

Los desniveles de la superficie a través de la cual sopla el viento antes de llegar a una turbina determina la cantidad de turbulencia que ésta experimentará. Los vientos turbulentos ejercen mayores tensiones sobre el rotor y se elevan, reduciendo consecuentemente la expectativa de vida de la turbina. Así, la mayoría de granjas del viento están ubicadas en localizaciones rurales, lejos de edificios, de árboles y de otros obstáculos.

3.6 Criterios Generales para el emplazamiento de un Aerogenerador de baja Potencia.

Los promotores eólicos dedican entre uno y dos años a estudiar los emplazamientos más favorables y rentables tanto para la empresa como para los propietarios de los terrenos, antes de comenzar la construcción. El sólo hecho de observar la naturaleza resulta de excelente ayuda a la hora de encontrar un emplazamiento apropiado para el aerogenerador. Los árboles, matorrales y erosión de la zona serán una buena pista para saber cual es la dirección de viento dominante. Condiciones del suelo, la viabilidad tanto de realizar las cimentaciones de las turbinas como de construir carreteras que permitan la llegada de camiones pesados hasta el emplazamiento deben tenerse en cuenta en cualquier proyecto de aerogenerador.

Los aerogeneradores de pequeña potencia han sido usados recientemente para la electrificación rural en sistemas híbridos eólico-solares. A continuación se mencionan los principales criterios de selección que se han usado para determinar la factibilidad de instalación de aerogeneradores de pequeña potencia para uso rural, así como la cronología de implementación del mismo.

Para el presente ejemplo se considerará el uso de aerogeneradores de baja potencia con una capacidad de 250-900 w nominales a 12 m/s.

- Se deberá hacer una medición del recurso eólico y sus características durante 3 meses como mínimo antes de instalar el primer aerogenerador, ubicando en la comunidad al menos 6 unidades de medición y registro de velocidad y dirección del viento.
- Se elaborará un mapa destacando las principales características topográficas del lugar.
- Se hará un censo de los consumos actuales de energía eléctrica en la comunidad para detectar las necesidades particulares del lugar.
- El promedio anual de velocidad del viento en el sitio de instalación deberá ser al menos de 5 m/s a 10 m de altura, sin obstrucciones.
- Las velocidades instantáneas del viento no deberán ser superiores a los 40 m/s.
- La instalación del primer aerogenerador piloto se decidirá después de hacer un análisis detallado de los datos recabados por las unidades de medición y registro durante los primeros 4 meses.
- Una vez instalado el primer aerogenerador se monitoreará constantemente su rendimiento. Paralelamente se continúa con el registro y medición de las condiciones anemométricas.
- A los 12 meses se hace un nuevo análisis de los datos anemométricos para determinar el promedio anual de velocidad del viento y se analiza el desempeño del proyecto piloto. Si el resultado es favorable se instala un segundo aerogenerador piloto.
- A los 18 meses se hace un análisis del desempeño del segundo piloto y de las condiciones anemométricas. Si los resultados son iguales o mejores que los del primer piloto se continúa con la instalación de aerogeneradores en mayor escala. Si los resultados son negativos se da por terminado el proyecto.

3.7 Regiones con gran Potencial Eólico en México.

En México se han realizado prospecciones del recurso energético eólico a un nivel exploratorio y de reconocimiento puntual, con pequeñas redes anemométricas realizadas por parte de instituciones federales mexicanas como por ejemplo el proyecto Plan de Acción Eólico que lleva a cabo el IIE y CFE, los estudios de National Renewable Energy Laboratory (NREL) y otros como ANES, AMDEE y IEE han cuantificado un potencial superior a los 40,000 MW, siendo las regiones con mayor potencial el Istmo de Tehuantepec y las penínsulas de Yucatán y Baja California, que a continuación se nombrarán en orden de mayor a menor potencial:

- **Sur del istmo de Tehuantepec con un potencial de 2000-3000 Mw.** Esta región contiene un área del orden de 1000 kilómetros cuadrados expuesto a vientos muy intensos, dado a un fenómeno monzónico entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec. En esa zona se ubica actualmente la primera central eoloelectrica de México en La Venta, Oaxaca (1994).
- **Península de Baja California con un potencial de 1500-2500 Mw.** Su extensión geográfica, baja densidad poblacional y alimentada por sistemas aislados.
- **Península de Yucatán con un potencial de 1000-2000 Mw.** Como es Cabo Catoche, la costa de Quintana Roo y el oriente de Cozumel, zonas con potencial eólico interesante para contribuir significativamente en la energía eléctrica de la península.
- **Altiplano Norte con un potencial de 800-2000 Mw.** Desde la región central de Zacatecas a la frontera con Estados Unidos al norte del país, da lugar a innumerables sitios con potencial explotable.
- **Región Central.** En la región central del altiplano prevalecen los vientos alisios del verano, desde Tlaxcala hasta Guanajuato, siendo más intensos en la zona de Pachuca. Estos vientos complementan estacionalmente a los del Altiplano Norte y los del sur del Istmo de Tehuantepec. En esta región ya se han establecido con éxito pequeños proyectos eólicos e híbridos para electrificar comunidades rurales remotas.
- **Las costas del país con un potencial de 1000-1500 MW., por costa.** El extenso litoral mexicano y sus islas, presentan por lo menos condiciones para generación en

pequeña escala y almacenamiento en baterías, sistemas híbridos diésel-eólicos y en otras generaciones interconectadas. La generación eólica en gran escala en las costas para la producción de hidrógeno, constituirá una de las principales aplicaciones a futuro.

En la figura 3.2 se muestran las zonas con potenciales eólicos y económicamente viables en las regiones anteriormente mencionadas, como son Laguna Verde en Veracruz y la Isla del Carmen ubicada en Laguna de Términos, en Campeche, entre otras.

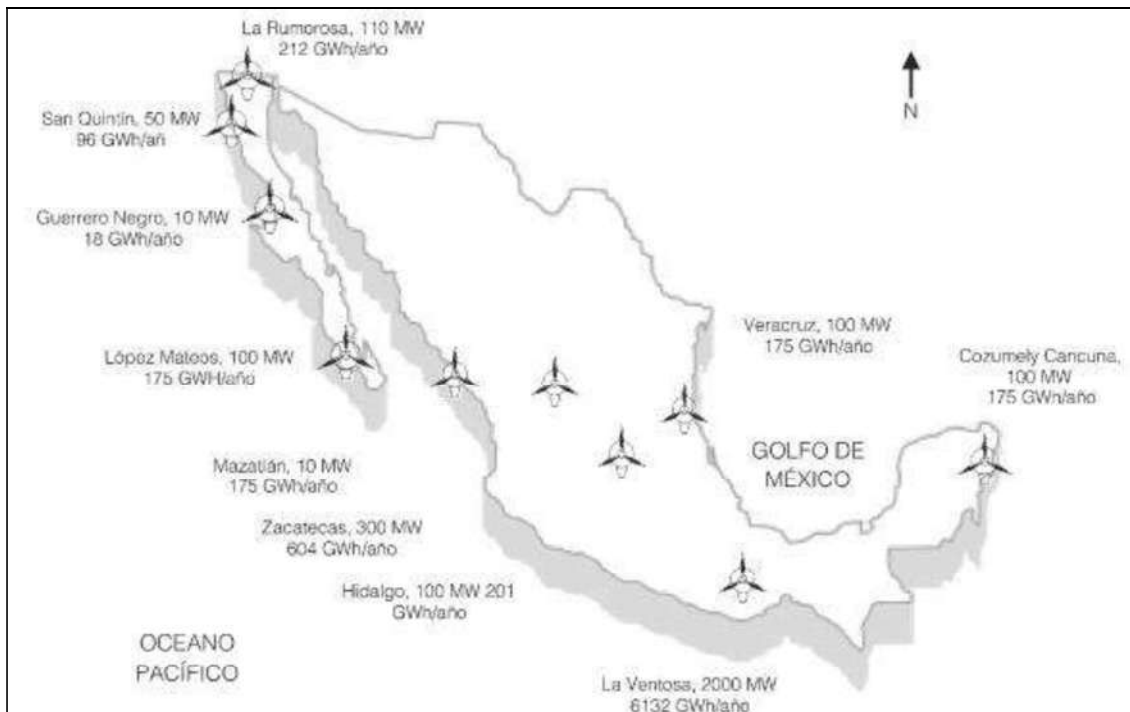


Figura 3.2 Regiones con Gran Potencial Eólico de México.

Capítulo 4

Tipos de Generador Eléctrico

4.1 Introducción

El generador eléctrico es un dispositivo ó máquina eléctrica que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, para ello, el procedimiento habitual es utilizar la inducción electromagnética. Según el tipo de máquina, la corriente generada puede ser continua o alterna. Para la integración de aerogeneradores se utiliza generador eléctrico asíncrono, síncrono, generador de CD especial y generador axial. La energía mecánica procede de una reciprocidad que en este caso es un aerogenerador que esta acoplado al generador eléctrico.

El generador eléctrico puede ser de distinto tipo dependiendo del tipo de aerogenerador y su modo de operación, esta operación consiste en la velocidad de rotación del rotor casi constante o a velocidad de rotación variable. La velocidad de rotación típica del rotor de un aerogenerador se encuentra en el rango de 20 a 100 rpm para aerogeneradores de gran potencia y de entre 100 y 400 rpm para aerogeneradores de pequeña potencia. Las máquinas eléctricas convencionales cuentan por lo regular con bajo número de polos suelen tener velocidades de sincronismo de entre 750 y 3000 rpm. La solución de acoplamiento pasa por utilizar una transmisión o caja multiplicadora que acople la relación par/vueltas del rotor de la turbina y del generador eléctrico o utilizar generadores eléctricos específicos que tengan velocidades de sincronismo bajas equivalentes al rango de velocidades de rotación del rotor, donde estos generadores cuentan con un gran número de polos.

Los requerimientos para seleccionar el tipo de generador son: el costo, en este caso condiciones de operar a baja velocidad, la potencia que pueden entregar las aspas del aerogenerador y el tipo de carga que se va a alimentar.

4.2 Máquina Síncrona

Para saber su comportamiento, en un generador síncrono se aplica una corriente de CD al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético. En seguida, el rotor del generador gira mediante un motor primario, y produce un campo magnético giratorio dentro de la máquina. Este campo magnético giratorio induce un conjunto de voltajes trifásicos dentro de los devanados del estator del generador. El rotor de un generador síncrono es en esencia un electroimán grande, los polos magnéticos en el rotor pueden ser salientes como no salientes. El término polo saliente es un polo proyectado hacia fuera de la superficie del rotor y por otro lado polo no saliente, como se puede apreciar en la figura 4.1.

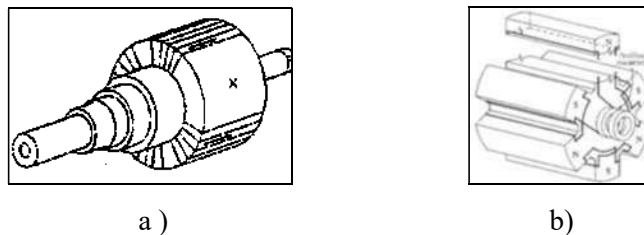


Figura 4.1 a) Rotor de polos no salientes en una máquina síncrona y
b) Rotor de seis polos salientes en una máquina síncrona.

4.2.1 Velocidad de rotación de un generador síncrono

El generador síncrono opera de la siguiente manera la frecuencia eléctrica se produce y entrelaza o sincroniza con la tasa mecánica de rotación del generador y la tasa de rotación de los campos magnéticos en la máquina está relacionada con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la ecuación 4.1.

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (4.1)$$

Donde f_e es la frecuencia eléctrica en Hz
 n_m es la velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad del rotor de una máquina síncrona)
 P es el número de polos

4.2.2 El Voltaje Interno Generado

La magnitud de voltaje inducido de fase de un estator se rige por la ecuación 4.2:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \phi f \quad (4.2)$$

Este voltaje depende del flujo ϕ en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina, esta ecuación se escribe de una manera más simple como se muestra en la ecuación 4.3:

$$E_A = K \phi \omega \quad (4.3)$$

Donde K es una constante que representa la construcción de la máquina

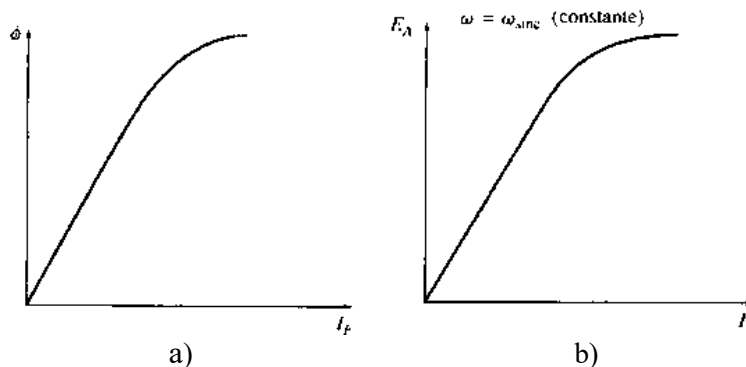
si ω se expresa en radianes eléctricos por segundo, entonces la ecuación 4.4 es:

$$K = \frac{N_C}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

si ω se expresa en radianes mecánicos por segundo, entonces la ecuación 4.5 es:

$$K = \frac{N_C P}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

El voltaje interno generado E_A es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en sí depende de la corriente que fluye por el circuito del campo del rotor. En la gráfica 4.1 a) se muestra la manera en que se relacionan el circuito de campo I_F y el flujo ϕ . Debido a que E_A es directamente proporcional al flujo, el voltaje interno generado E_A está relacionado con la corriente de campo, esto se puede observar en la gráfica 4.1 b). A esta gráfica se llama *curva de magnetización o característica de circuito abierto* de la máquina.



Gráfica 4.1 a) Gráfica del flujo vs. la corriente de campo para un generador síncrono.
b) Curva de magnetización del generador síncrono.

4.2.3 Circuito Equivalente de un Generador Síncrono

El voltaje E_A es el voltaje interno generado producido en una fase de un generador síncrono. Sin embargo, este voltaje E_A no es normalmente el que se presenta en los terminales del generador. El único momento en que el voltaje interno E_A es igual al voltaje de salida V_ϕ de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina.

La corriente que fluye en los devanados del estator produce su propio campo magnético. A este campo magnético del estator se le llama B_s y su dirección se obtiene por la regla de la mano derecha. El campo magnético del estator B_s produce su propio voltaje en el estator y a este voltaje se le llama E_{estat} .

Con dos voltajes presentes en los devanados del estator, el voltaje total en una fase es simplemente la suma del voltaje interno generado E_a más el voltaje de reacción del inducido E_{estat} , como muestra la ecuación 4.6:

$$V_\phi = E_A + E_{estat} \quad (4.6)$$

Por lo tanto, la ecuación 4.6 para el voltaje en una fase es:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad (4.7)$$

Obsérvese el circuito siguiente que se muestra en la figura 4.2.

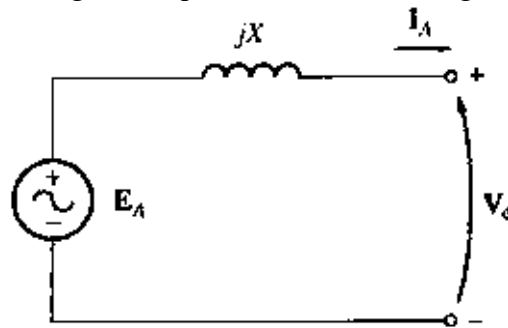


Figura 4.2 Circuito simple.

La ecuación 4.8 de la ley de voltajes de Kirchhoff para este circuito es:

$$V_\phi = E_A - jXI_A \quad (4.8)$$

Por lo tanto, se puede modelar el voltaje de reacción del inducido como un inductor en serie con un voltaje interno generado.

Además de los efectos de la reacción del inducido, las bobinas del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si L_A es la autoinductancia del estator (y se llama X_A a su reactancia correspondiente), mientras que a la resistencia del estator se le llama R_A ,

entonces la diferencia total entre E_A y V_ϕ esta dada por la ecuación 4.9:

$$V_\phi = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (4.9)$$

Tanto los efectos de la reacción del inducido como la autoinductancia en la máquina se representan por medio de las reactancias y se acostumbra combinarlas en una sola llamada reactancia síncrona de la máquina como lo muestra la ecuación 4.10:

$$X_S = X - X_A \quad (4.10)$$

Por lo tanto, la ecuación final es la ecuación 4.11:

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (4.11)$$

En la figura 4.3 se aprecia el circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico.

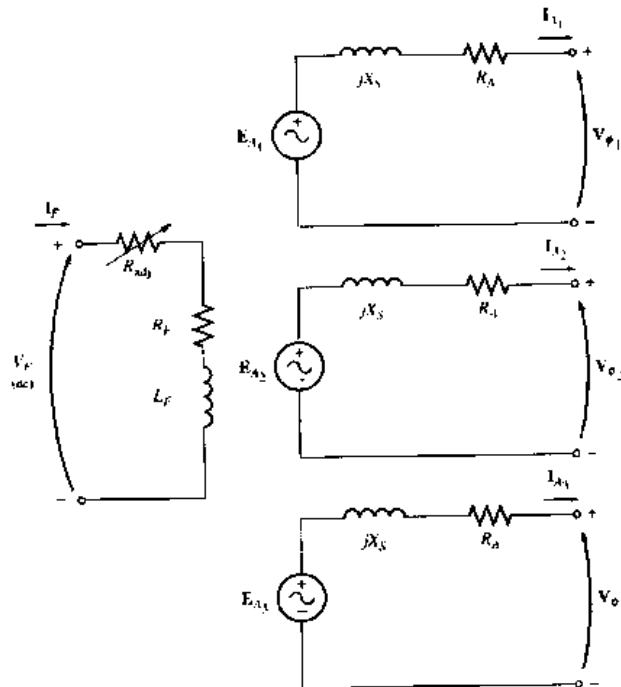
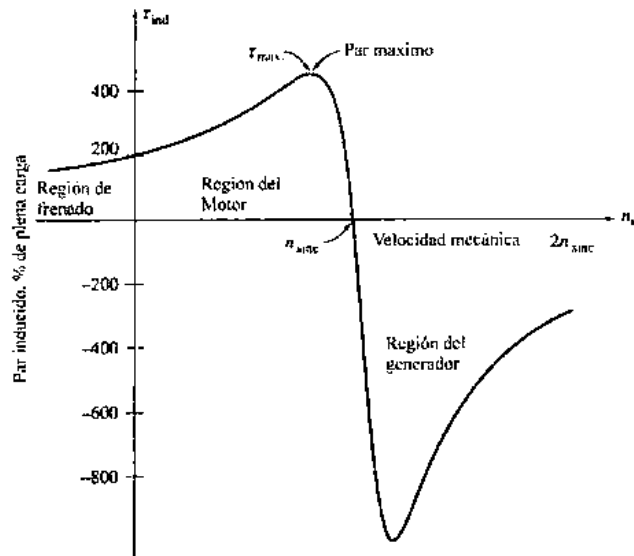


Figura 4.3 circuito equivalente completo de un generador síncrono trifásico.

4.3 Motor de Inducción Jaula de Ardilla como Generador

El motor de inducción jaula de ardilla como generador, su operación se puede observar claramente en la gráfica 4.2 que es la curva característica curva par-velocidad, en lo cual muestra que si un motor primario externo que puede ser una turbina de gas, hidráulica o como en este caso por medio de un aerogenerador este acciona un motor de inducción a una velocidad mayor a n_{sinc} , se invertirá la dirección de su par inducido y

comenzará a operar como generador. Conforme se incrementa el par que aplica el motor primario a su eje, se incrementa la cantidad de potencia producida por el generador de inducción. También se puede apreciar un *par inducido máximo* posible en el que si un motor primario aplica al eje de un generador de inducción un par mayor que el máximo del generador este adquirirá una velocidad excesiva.



Gráfica 4.2 Curva característica par-velocidad de un motor de inducción que muestra los rangos extendidos de operación.

Como generador no puede producir potencia reactiva, de hecho la consume y se debe conectar una fuente externa de potencia reactiva en todo momento para mantener el campo magnético de su estator y a la vez controlar el voltaje en terminales del generador, pues si no hay corriente de campo un generador no puede controlar su propio voltaje de salida. Este no requiere un circuito de campo separado y no tiene que operar continuamente a una velocidad fija, siempre y cuando la velocidad de la máquina sea mayor a n_{sinc} del sistema de potencia al que esta conectado, éste funcionará como generador.

4.3.1 Generador de Inducción Aislado

Para funcionar aisladamente se conecta un banco de capacitores para que estos entreguen la potencia reactiva que requiere el mismo generador y las cargas conectadas. En la figura 4.4 se observa un generador de inducción aislado.

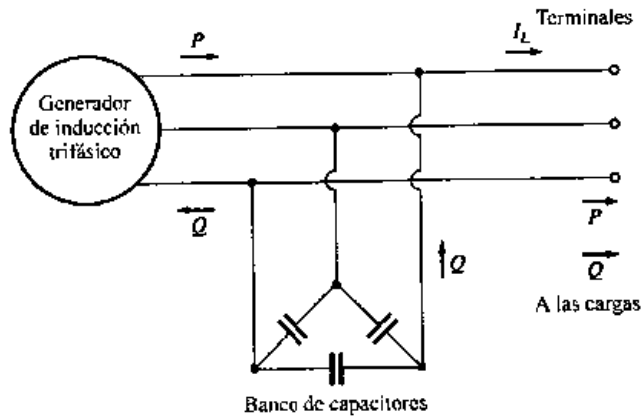
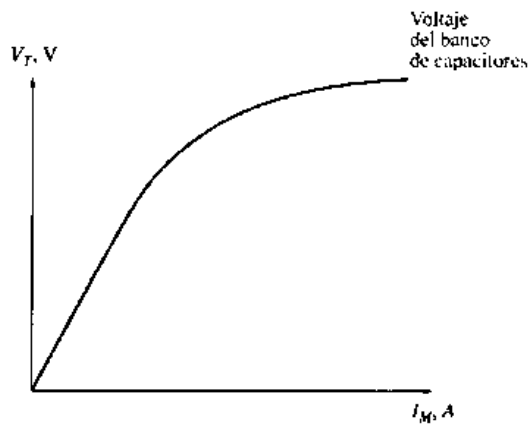


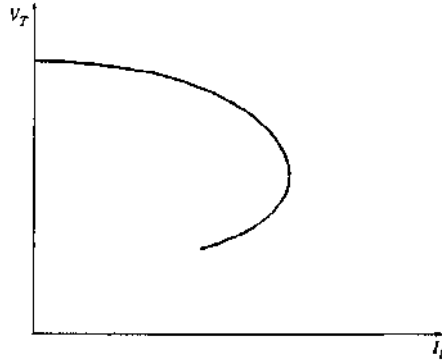
Figura 4.4 Generador de inducción aislado cuyo banco de capacitores suministra la potencia reactiva.

Para lograr cierto nivel de voltaje en un generador de inducción, los capacitores externos deben suministrar la corriente de magnetización que corresponda a ese nivel. En la gráfica 4.3 se puede observar la gráfica que muestra una curva de magnetización de una máquina de inducción. La corriente de magnetización I_M que requiere una máquina de inducción en función del voltaje en los terminales se puede encontrar si se opera la máquina como motor en vacío y se mide la corriente del inducido en función del voltaje en los terminales.



Gráfica 4.3 Curva de magnetización de una máquina de inducción.

El problema más grave para este tipo de generador es que su voltaje varía ampliamente con cambios en la carga, en particular en la carga reactiva. En la gráfica 4.4 se aprecia las típicas características en los terminales de un generador de inducción que opera aislado con capacitancia constante en paralelo. Se puede notar que con cargas inductivas el voltaje se colapsa muy rápido.



Gráfica 4.4 Característica voltaje-corriente de los terminales de un generador de inducción para una carga con factor de potencia en atraso.

4.4 Generador de Imanes Permanentes

El generador de imán permanente ha sido usado mas frecuentemente en aplicaciones relacionadas con turbinas de viento. En la actualidad es la mejor opción en la mayoría de los pequeños generadores de turbina de viento, generando hasta 10 KW. En estos generadores los imanes permanentes proporcionan el campo magnético, así no hay ninguna necesidad de devanados o suministro de corriente al campo.

Los principios de operaciones del generador de imán permanente son similares a las de las máquinas síncronas, pero estas máquinas son controladas asincrónicamente, es decir generalmente no son conectados directamente a la red. La potencia producida por el generador es inicialmente variable por el voltaje y la frecuencia en corriente alterna, esta corriente alterna comúnmente es rectificadas inmediatamente a corriente continua. La potencia de corriente continua es dirigida entonces a cargas o almacenada en baterías y la otra parte es invertida a corriente alterna con voltaje y frecuencia fija.

Por ejemplo, los imanes están integrados directamente en un rotor cilíndrico de aluminio, la potencia es tomada de la armadura inmóvil, así no hay ninguna necesidad del conmutador, anillos deslizantes, o escobillas. Como la construcción de la máquina es tan simple el generador de imán permanente puede ser bastante robusto.

4.5 Generador de CD

En estos generadores el campo está sobre el estator y la armadura está sobre el rotor, si una armadura gira entre dos polos de campo fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra

mitad. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección, o continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. Toda la corriente generada debe pasar a través del conmutador y las escobillas. Un conmutador que está sobre el rotor lleva a cabo la rectificación de la potencia generada a corriente continua.

En las máquinas antiguas esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal partido montado sobre el eje de una armadura. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y servían como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantenían en contra del conmutador, que al girar conectaba eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura giraba, cada escobilla estaba en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invertía su dirección dentro de la bobina de la armadura. Así se producía un flujo de corriente de una dirección en el circuito exterior al que el generador estaba conectado. Los generadores de corriente continua funcionan normalmente a voltajes bastante bajos para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto desarrollado para este tipo de generadores suele ser de 1.500 V. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando la electrónica de potencia, por ejemplo rectificadores de diodo.

Los generadores modernos de corriente continua utilizan armaduras de tambor, que suelen estar formadas por un gran número de bobinas agrupadas en hendiduras longitudinales dentro del núcleo de la armadura y conectadas a los segmentos adecuados de un conmutador múltiple. Si una armadura tiene un solo circuito de cable, la corriente que se produce aumentará y disminuirá dependiendo de la parte del campo magnético a través del cual se esté moviendo el circuito. Un conmutador de varios segmentos usado con una armadura de tambor conecta siempre el circuito externo a uno de cable que se mueve a través de un área de alta intensidad del campo, y como resultado la corriente que suministran las bobinas de la armadura es prácticamente constante. Los campos de los generadores modernos se equipan con cuatro o más polos electromagnéticos que aumentan el tamaño y la resistencia del campo magnético. En algunos casos, se añaden interpolos más pequeños para compensar las distorsiones que causa el efecto magnético de la armadura en el flujo eléctrico del campo.

Los generadores de corriente continua se clasifican según el método que usan para proporcionar corriente de campo que excite a los devanados del mismo, los más mencionados como generador son los siguientes:

- Un generador con excitación en serie tiene su campo en serie respecto a la armadura.
- Un generador con excitación en derivación shunt, tiene su campo conectado en paralelo a la armadura, estos fueron usados alguna vez en pequeñas cantidades, cargando baterías con turbinas de viento. El campo eléctrico es creado por corrientes que pasan directo al devanado de campo que está en conexión derivación shunt paralelo con el devanado de armadura.
- Un generador con excitación combinado tiene parte de sus campos conectados en serie y parte en paralelo.

Los dos últimos tipos de generadores tienen la ventaja de suministrar un voltaje relativamente constante, bajo cargas eléctricas variables. El de excitado en serie se usa sobre todo para suministrar una corriente constante a voltaje variable. En estos generadores la corriente de campo y el campo magnético hasta un punto, aumentan con la velocidad de operación. El voltaje de armadura y el momento de rotación eléctrico también aumentan con la velocidad. La velocidad real de la turbina es determinada por un equilibrio entre el momento de rotación del rotor de la turbina y el momento de rotación eléctrico. Los generadores de corriente continua de este tipo raras veces son usados hoy en día debido a los altos costos y mantenimiento a causa de las escobillas.

4.6 Generador Axial

Los generadores axiales se llaman así porque consisten en una plancha redonda de imanes permanentes, los que consistirán en el rotor del aerogenerador y están acoplados a las palas, un estator que contiene bobinas en igual número de imanes que tiene cada uno de los discos, como se muestra en el esquema de la figura 4.5.

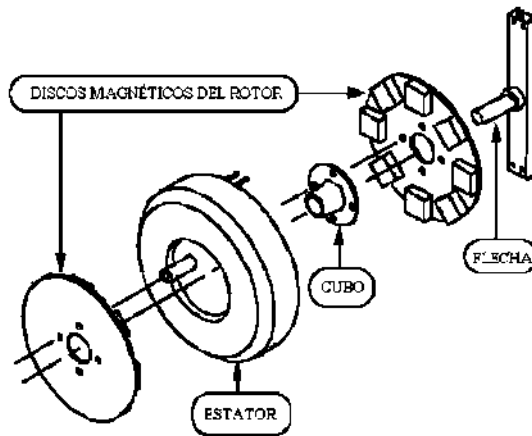


Figura 4.5 Componentes del Generador axial.

Como antecedente de los motores que aquí presentamos está el GFA de CD sin escobillas (brushless-DC generator) con rotor de imanes permanentes y con devanado toroidal en un estator no ranurado. Como se puede apreciar este tipo de alternador es de flujo axial, esto se determina porque el campo magnético resultante de un determinado generador rota paralelo al eje y concéntrico respecto a él, entonces el generador es de flujo axial (GFA). Se presenta la figura 4.6 que representa la clasificación de los motores de flujo axial.

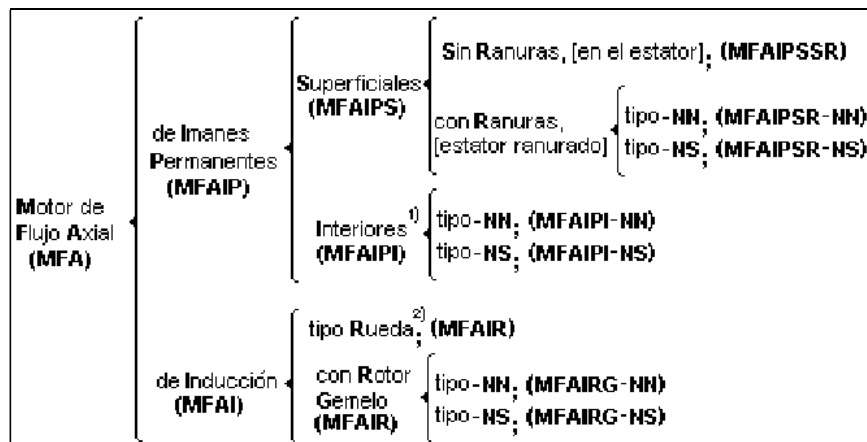


Figura 4.6 Clasificación de motores de flujo axial.

- 1) También conocido como motor Sincrónico de flujo Axial de imán permanente.
- 2) También conocido como motor tipo Rueda.

En la familia de MFAIP se utilizan en la actualidad imanes permanentes logrados por la aleación de NdFeB (Neodimio-Hierro-Boro), descubierto en 1983 por Sumitomo Special Metals en los que se logra una Inducción Magnética Residual (Br), mucho mayor que su antecesor de Samario-Cobalto, que se utilizaba en los motores de CD sin escobillas, con un precio relativamente alto, por lo caro de la materia prima para lograr el imán. Cuando estos

imanes se utilizan en MFA (motor de flujo axial) los mismos garantizan un B_r en el orden de 1,25T (teslas) y una coercitividad de 1200kA/m. Todos los experimentos que se han hecho con este tipo de generadores demuestran que los generadores de imanes permanentes (IP) son los más potentes a todas sus velocidades, tanto bajas como altas.

Un MFAIP (motor de flujo axial de imán permanente) en el que se utilice este novedoso imán, no sólo es mucho más pequeño de menor volumen, peso y más eficiente, que un motor de inducción convencional MFRI (motor de flujo radial de inducción) debido a la mejor utilización de los materiales activos, si no que también compite con la familia de los MFAI (motor de flujo axial de inducción).

A modo de ejemplo se brinda a continuación algunos esquemas elementales que ilustran la estructura de 3 de las variantes de MFA antes presentadas, así como algunas de las trayectorias del flujo magnético.

En la Figura 4.7 a) se dibujan en forma representativa sólo algunas ranuras donde se alojará el devanado del estator. Los rotores están unidos rígidamente al eje, lo mismo ocurre en la Figura 4.8 a).

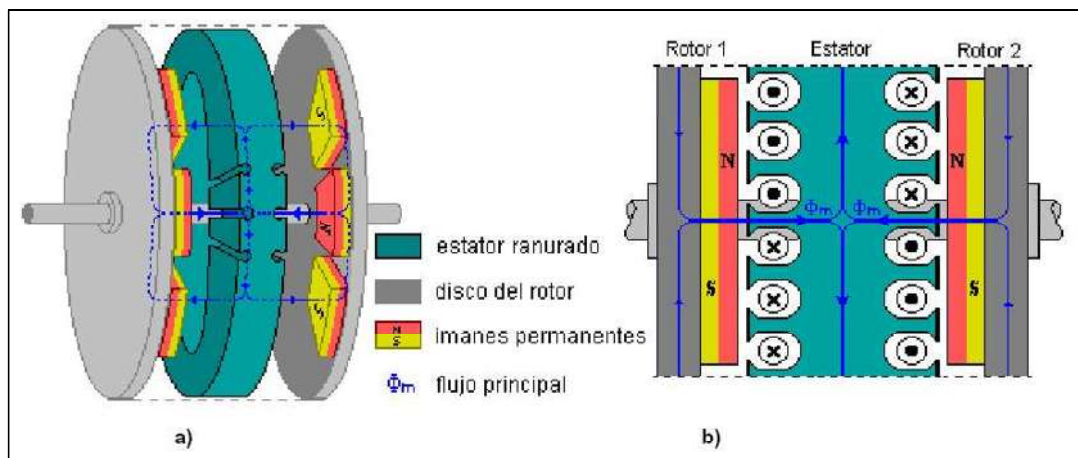


Figura 4.7 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIPSR-NN
a) Vista ilustrativa del estator y rotores.
b) Sección axial en el radio medio del motor.

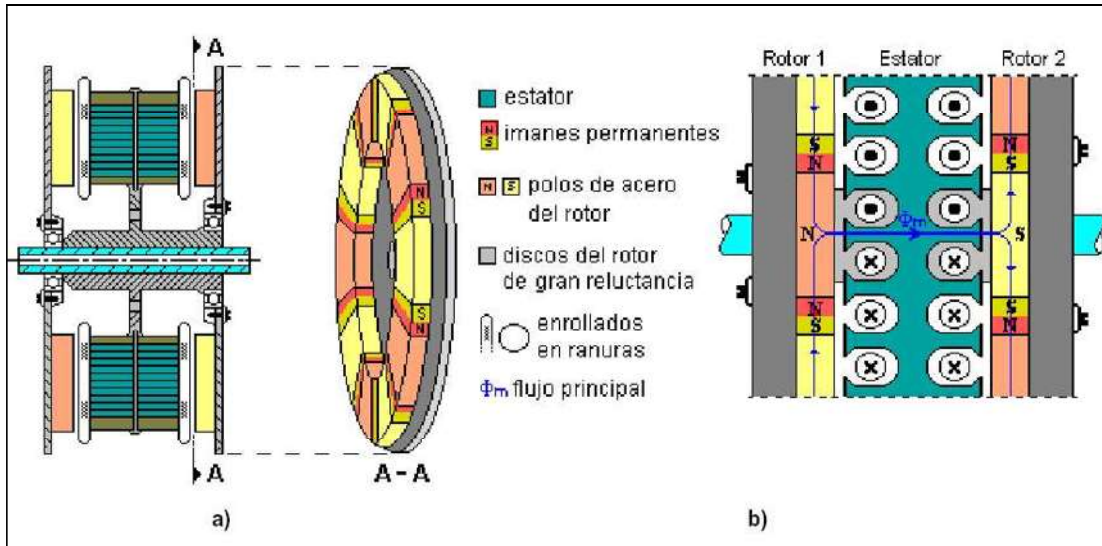


Figura 4.8 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIPI-NS
 a) Corte axial ilustrativo del motor y vista básica A-A del rotor.
 b) Sección axial en el radio medio del motor.

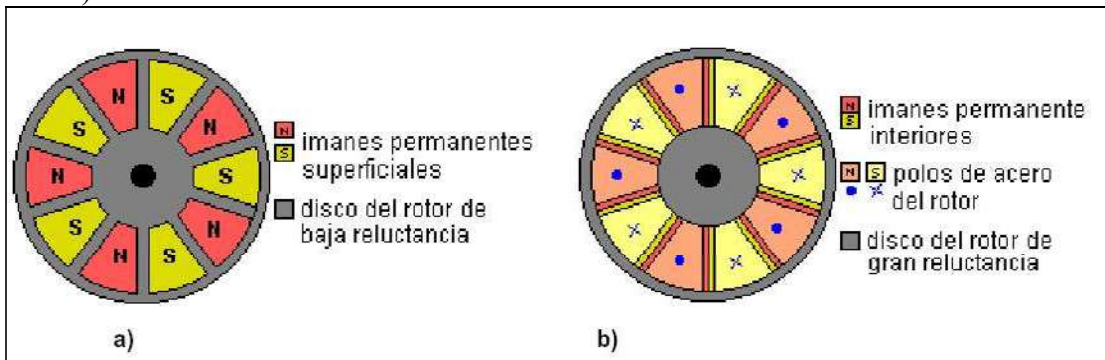


Figura 4.9 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIP
 a) Rotor con imanes permanentes superficiales de los MFAIPS
 b) Rotor con imanes permanentes interiores de los MFAIPI

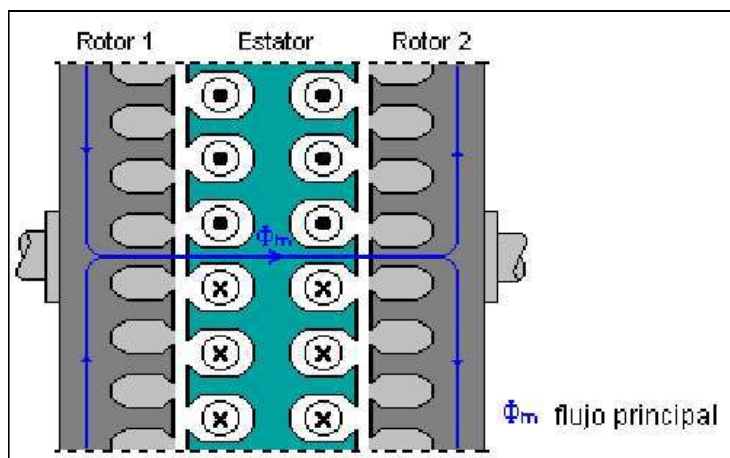


Figura 4.10 Comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIRG-NS, sección axial en el radio medio.

En todos estos motores el devanado del estator es trifásico distribuido, con una disposición particular en dependencia del tipo que se trate. En la figura 4.8 se muestra el comportamiento del flujo de la estructura aproximada del MFAIP, tanto con imanes permanentes superficiales del tipo MFAIPS, como con imanes permanentes interiores del tipo MFAIPI donde estos se representan en la figura 4.9. En la versión del MFAIRG de la figura 4.10 el devanado de los rotores es del tipo jaula y su estructura general es semejante a la mostrada en la figura 4.7 a) con la salvedad de que cada rotor tiene su eje, pudiendo trabajar cada uno con velocidades distintas.

Después de analizar su comportamiento se tiene que tomar en cuenta las ventajas que estos nos ofrecen entre las cuales se tienen: que el volumen sea menor, un menor peso y un par mucho mayor que en un alternador convencional o del rotor modificado.

4.7 Generador de Pasos

Generador de paso directo son esencialmente las máquinas síncronas de diseño especial. La diferencia principal con las máquinas estándar, es que estos son construidos con un número suficiente de polos para que el rotor del generador pueda girar a la misma velocidad que el rotor de turbina de viento. Esto elimina la necesidad de una caja de cambio de velocidad. A causa del alto número de polos, el diámetro del generador es relativamente grande. Los Generadores de CC tipo tambor son frecuentemente usados en turbinas de viento, conjuntamente con los convertidores de electrónica de potencia. Esto proporciona alguna derivación en el voltaje y frecuencia para el requerimiento del generador en sí mismo.

4.8 Generador de Reluctancia Variable

La máquina de reluctancia variable aplicada en modo generador en aerogeneradores presenta múltiples ventajas frente a los demás tipos de generadores, siempre que la operación del aerogenerador sea a velocidad variable. Esta máquina presenta una sencillez, robustez y bajo peso similar a la máquina de inducción de jaula de ardilla. Además, su control es simple, mediante el uso de electrónica de potencia y su rango de velocidades de operación puede ser grande sin ningún problema.

Hasta hoy en día solo se han realizado prototipos de este sistema (20 KW 120 rpm) optimizados mediante métodos analíticos, aunque el más avanzado de ellos está a punto de

salir en firma comercial. Este tipo de máquina se utiliza como motor en múltiples aplicaciones pero no como generador, debido probablemente al ruido que produce y a su bajo factor de potencia.

Este tipo de motor se puede observar en la figura 4.11, el rotor es sencillamente una masa metálica laminada con múltiples polos salientes (en éste caso 6) y un estator que puede ser de múltiples fases, constituidas por varios polos también salientes (8 polos en éste caso). La máquina propuesta es una máquina de reluctancia conmutada 6/8. La excitación de ésta máquina se realiza a través de los bobinados del estator, en la figura 4.11 se puede ver una sección de una máquina de reluctancia conmutada. La máquina dispone de bobinas en los polos del estator, estando las bobinas diametralmente opuestas conectadas en serie formando los bobinados de cada fase.

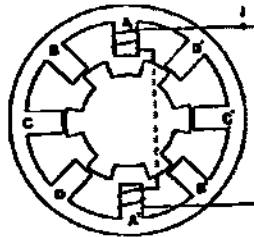


Figura 4.11 Sección de una máquina de reluctancia variable.

El principio de operación es simple. Si se energizan los polos D-D', la reacción del rotor será tendente a girar en el sentido de las agujas del reloj en línea con el eje del campo magnético. Si ahora energizamos los polos A-A', el rotor continuará girando en la misma dirección. La máquina estará actuando como motor convirtiendo energía eléctrica en movimiento. La operación como generador se obtiene simplemente cambiando la posición angular, en la cual se aplica la tensión, a los bobinados de cada fase. Si el rotor se está moviendo en el sentido de las agujas del reloj y partiendo de la situación propuesta anteriormente, energizando los polos B-B' se obtendrá un determinado par. Este modo de operación se consigue controlando los tiempos de conexión de la alimentación a los bobinados. Si nos fijamos en la fase C-C' los pares de polos del estator y del rotor están perfectamente alineados. Si pasa corriente a través de ésta fase, no se produce par alguno. Si el rotor se desalinea con respecto al estator como ocurre en la fase B-B' o D-D', aparece un par resistente que tiende a alinear los polos. En la posición de alineamiento, la inductancia está en su máximo valor, en éste caso la reluctancia magnética del camino del

flujo magnético es susceptible de saturación con valores de corriente normales, especialmente en el estator y en el laminado del rotor, debido a la baja reluctancia del entrehierro. Cuando el hueco interpolar del rotor esta alineado con el polo del estator se dice que la máquina está en posición de desalineamiento. Esta situación se ve en la fase A-A'. Cuando la corriente pasa por esa fase no se produce par, si el rotor se mueve en cualquier sentido, aparece un par que atrae al rotor a una posición de alineamiento. En la posición de desalineamiento, la inductancia de fase es mínima ya que la reluctancia magnética en el camino del flujo esta en su mayor valor. Asimismo, en la posición de desalineamiento, el camino del flujo no es susceptible de saturarse a no ser que las corrientes de fase superen el valor de diseño. Entre la posición de alineamiento y desalineamiento, existen distintas posiciones con distintos valores de la inductancia. Se afirma que el valor de la inductancia es directamente proporcional a la posición relativa de los polos. Esta afirmación solo es válida en análisis con modelos simplificados de la máquina ya que las curvas de flujo reales no son lineales. A continuación se muestra en la figura 4.12 el esquema del aerogenerador con generador de reluctancia variable con un control de carga.

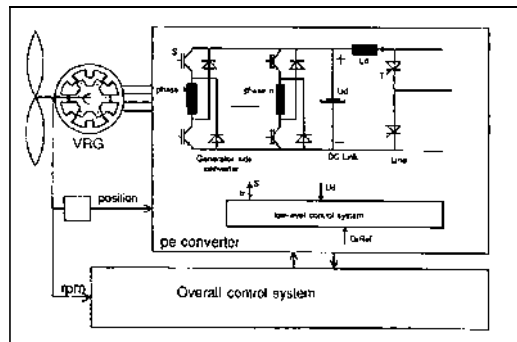


Figura 4.12 Esquema de aerogenerador con generador de reluctancia variable.

Para producir par motor se hace pasar corriente por la fase del bobinado, mientras el valor de la inductancia está creciendo que consiste en que el polo del rotor va camino de alinearse con el del estator. Para producir par generador, se energizarán las bobinas cuando el valor de la inductancia decrece que consiste en que el polo del rotor se aleja de la posición de alineamiento con el polo del estator.

Capítulo 5

Diseño y Construcción del Generador Eléctrico

5.1 Introducción

La obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una necesidad que se hace cada vez más evidente en nuestra sociedad, debido a esto los sistemas eólicos, han cobrado importancia en la actualidad.

En el desarrollo de máquinas actualmente se ha logrado llegar a tener eficiencias globales del 70% y magnéticas del 80% y permiten un optimo aprovechamiento de los recursos en sistemas de pequeña generación eólica, la cual pueden producir hasta un máximo de 100 kW.

Un generador de imanes permanentes funciona como un sistema sincrónico, la única diferencia es que el rotor donde están adheridos los imanes, se encuentra ubicado en la parte interna y el estator en la parte externa.

Contando ya con material disponible para ahorrar costos y tiempo de construcción para el diseño del generador, la investigación se enfoca nada más a la parte eléctrica y no en la mecánica ni en tecnología de materiales, con el cual se cuenta con un alternador de coche en desuso, ocupando la carcasa, rotor y ventilador, las características de este son:

- Alternador Marca Delco Remy Inc.
- Mod. 42704 Num. Serie 00F20049
- 12 Volts
- 55 Amperes
- 3600 rpm

Como se mencionó solo se abarca la parte eléctrica y lo que se quiere es igualar o aumentar la potencia del generador de sus condiciones originales, esto se logra aumentando la constante de construcción de la máquina.

En el diseño básicamente se utilizarán imanes de última generación que tienen una mayor fuerza magnética que los convencionales, aunque su costo sea caro actualmente comienzan a abarataarse por su demanda ya que no solamente se utilizan en generación.

En resumen, primeramente para la construcción se cuenta con material disponible, consistiendo en modificar el rotor del alternador reemplazando el devanado de campo por 5 imanes de neodimio, esto para eliminar la excitación con CD evitando el consumo de potencia eléctrica del sistema de generación. La característica principal del uso del imán de neodimio es que tiene una fuerza magnética de 7 a 10 veces superior a los imanes tradicionales.

Segundo, modificar la constante de construcción del generador eléctrico que en este caso es el alternador de coche en desuso, la cual consiste en una máquina síncrona, consistiendo la modificación en cambiar el devanado inducido con características geométricas diferentes al original, la cual significa disminuir el diámetro del alambre magneto para obtener un mayor número de vueltas por devanado, el motivo principal de esta modificación es aumentar el voltaje y la potencia generada para que sea entregada a velocidades bajas ya sea a una determinada carga o para cargar un banco de baterías y evitando la utilización de una caja multiplicadora que origina pérdidas para el sistema.

La principal desventaja con respecto a los sistemas convencionales es la baja velocidad de rotación, en la que el rango de operación es entre 300 a 1000 rpm (revoluciones por minuto), por lo cual para obtener el voltaje en terminales de salida requerido es necesario hacer los cambios antes mencionados a fin de captar una mayor potencia de entrada en el eje del generador y transformarla, por consiguiente entregar mejores condiciones de potencia a bajas velocidades.

5.1.1 Magnetismo

Magnetismo es la propiedad que tienen algunos cuerpos de atraer limaduras de hierro o acero. Se conoce desde la antigüedad, época en la que Tales de Mileto ya hablaba sobre la existencia de un óxido de hierro, llamado magnetita, que atraía el hierro con mayor o menor intensidad, lo que dependía de la distancia que separase a ambas materias. Al mismo tiempo observó que, después de estar en contacto con la magnetita, el hierro presentaba también características magnéticas, es decir, se había magnetizado. Los

extremos se denominan polos del imán, y la parte central, línea neutra. Por ello para poder aprovechar mejor la fuerza de los polos, se da normalmente forma de herradura a los imanes.

En el año 1820, el físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) descubrió que los imanes no son las únicas causas de creación de campos magnéticos, experimentalmente observó que una corriente que circula por un hilo conductor hace que una aguja imantada próxima sufra una desviación. Con esto, se ve que una corriente eléctrica también crea un campo magnético. Oersted ligaba, así, los fenómenos eléctricos y magnéticos, lo que constituyó una nueva disciplina: el electromagnetismo.

Joseph Henry (1797-1878) físico estadounidense y Michael Faraday (1791-1867) científico británico, realizando sus trabajos por separado, descubrieron que siempre que varía el flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado aparece en éste una corriente eléctrica inducida.

5.1.2 Propiedades de los materiales Magnéticos

Dentro del contexto de los dispositivos de conversión de energía, se consideran de suma importancia a los materiales magnéticos. A través del uso de estos materiales es posible obtener altas densidades de flujo magnético con relativamente bajos niveles de fuerza magnetizante. Ya que las fuerzas magnéticas y la densidad de energía aumentan con el incremento de la densidad de flujo, este efecto desempeña una parte importante en el funcionamiento de los dispositivos de conversión de energía. Estos materiales se utilizan en un transformador para maximizar el acoplamiento entre los devanados, así como para disminuir la corriente de excitación requerida para que éste opere.

5.1.3 Materiales Ferromagnéticos

Estos generalmente compuestos por hierro y aleaciones de hierro con cobalto, tungsteno, níquel y otros metales, son por mucho los materiales magnéticos más comunes. Los materiales ferromagnéticos están compuestos de una cantidad de dominios, por ejemplo, las regiones en donde los momentos magnéticos de todos los átomos son paralelos, dando lugar a un momento magnético neto para el dominio. En una muestra de material sin magnetizar, los momentos de dominio magnético se orientan al azar y el flujo

magnético neto resultante en el material es cero, como lo muestra la figura 5.1.

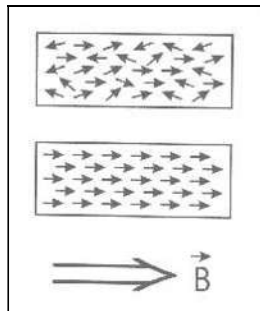


Figura 5.1 Orientación de los momentos de dominio magnético.

Cuando una fuente magnetizante externa se aplica a este material, los momentos magnéticos de los dominios tienden a alinearse con el campo magnético aplicado. Lo cual da como resultado que los momentos magnéticos de los dominios se añadan al campo aplicado, produciendo un valor mucho mayor que la densidad de flujo con respecto al que existiría debido únicamente a las fuerzas magnéticas. Así, la *Permeabilidad efectiva* μ , igual de la proporción del flujo magnético total de la intensidad del campo magnético aplicado, es mayor en comparación con la permeabilidad del espacio libre μ_0 . Al mismo tiempo que se incrementa la fuerza magnetizante, continua este comportamiento hasta que todos los momentos magnéticos se alinean con el campo aplicado; en este punto, los materiales no pueden seguir contribuyendo al incremento de la densidad de flujo magnético, entonces se dice que este material se encuentra totalmente *saturado*. Además de que pierden sus propiedades ferromagnéticas cuando su temperatura se eleva por encima de cierto nivel, al que se conoce como *temperatura de Curie* y se convierten en materiales paramagnéticos esto es en los materiales en que los campo magnéticos producidos por los electrones orbitales y su movimiento propio no se anulan completamente entre si.

Aun cuando la densidad de flujo $B = \mu_0(H+M)$ se cumpla para todos los materiales, inclusive los ferromagnéticos, la relación entre densidad de flujo B y la intensidad de campo magnético H depende de la magnetización previa de un material ferromagnético esto es su "*historial magnético*".

Es posible representar la relación densidad-intensidad por medio de una curva de magnetización o curva B-H que se observa en la figura 5.2, obsérvese la relación no lineal entre B-H. También en cualquier punto de la curva, μ la da la razón B/H y no la razón dB/dH , que es la pendiente de la curva.

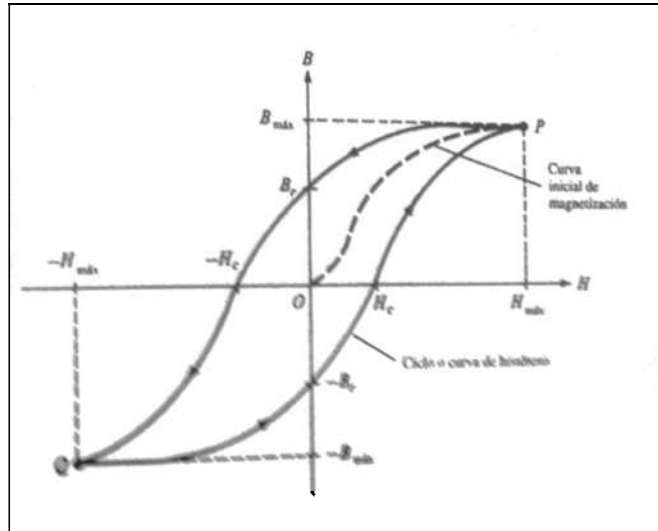


Figura 5.2 Curva típica de Magnetización (B-H)

Si suponemos que el material ferromagnético que corresponde a la curva B-H de la figura 5.2 no está inicialmente magnetizado, al aumentar H (debido al incremento de la corriente) de 0 a la intensidad de campo máxima aplicada $H_{máx}$, se produce la curva OP. A esta curva se le conoce como la *curva virgen* o de *magnetización inicial*. Después de llegar a la saturación en P, si disminuye H, B no sigue la curva inicial sino que tiene un atraso respecto a H. A este fenómeno de atraso de B con respecto a H se le llama *histéresis* (palabra en griego que significa “atrasarse”).

Si H se reduce a cero, B no se reduce a cero sino a B_r , cantidad que se conoce como densidad permanente de flujo. El valor de B_r depende de $H_{máx}$, la intensidad de campo máxima aplicada. La existencia de B_r es lo que permite tener imanes permanentes. Si aumenta H negativamente (al invertir la dirección de la corriente), B se vuelve cero al llegar el valor de H a H_c , cantidad que se conoce como intensidad coercitiva de campo. Los materiales para los cuales H_c es pequeña se dice son magnéticamente duros. El valor de H_c depende también de $H_{máx}$.

El incremento adicional de H en la dirección negativa para alcanzar Q y una inversión en su dirección para llegar a P da una curva cerrada que se llama *ciclo* o *curva de*

histéresis. La forma de los ciclos o formas de histéresis varía de un material a otro. Algunas ferritas, por ejemplo, tienen un ciclo de histéresis casi rectangular y se emplean en las computadoras digitales como dispositivos de almacenamiento de información magnética. El área de un ciclo de histéresis da la pérdida de energía (pérdida por histéresis) por unidad de volumen durante un ciclo de la magnetización periódica del material ferromagnético. Esta pérdida de energía se presenta en forma de calor. Es conveniente, por lo tanto, que los materiales utilizados en generadores eléctricos, motores y transformadores tengan ciclos de histéresis de buena altura, pero angostos a fin de que sean mínimas las pérdidas por histéresis.

5.1.4 ¿Qué es un imán?

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer al cobalto y al níquel). Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales, como la magnetita (Fe_3O_4) o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales.

En un imán la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan norte y sur, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos de la tierra, que es un gigantesco imán natural. La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán se llama campo magnético. Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas, que van del polo norte al polo sur, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste; se representa con la letra B, como lo muestra la figura 5.3

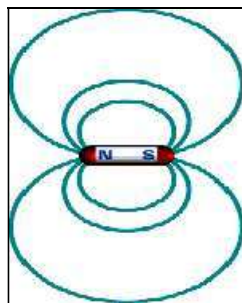


Figura 5.3 Imán con sus polos magnéticos y líneas de fuerza.

5.1.5 Imanes de tierras raras

Son imanes de apariencia metálica, con una fuerza de 7 a 10 veces superior a los materiales magnéticos tradicionales. Los imanes de neodimio/boro aleación NeFeB están formados por hierro, neodimio y boro; tienen alta resistencia a la desmagnetización. Son lo bastante fuertes como para magnetizar y desmagnetizar algunos imanes de alnico y flexibles. Se oxidan fácilmente, por eso van recubiertos con un baño de zinc, níquel o un barniz epóxico y son bastante frágiles. Están especialmente diseñados para reducir dimensiones y aumentar potencia, se pueden observar en la figura 5.4.



Figura 5.4 Muestra imanes de Neodimio de diferentes tamaños.

5.2 Diseño y Construcción del Rotor

El diseño consiste en solucionar el principal problema que el funcionamiento del generador sea adecuado aun en condiciones de baja velocidad, esto es por el diseño de los alternadores que operan a una velocidad de 3600 rpm cargando baterías de 12 volts, además se optó para disminuir costos por la utilización de materiales que se tienen al alcance de nuestras manos y comercialmente en nuestro mercado.

Partiendo de un alternador en desuso marca Delco Remy Inc., 12 volts, 55A a 3600 rpm, las cuales fueron las principales restricciones que se tienen en cuenta para el diseño y selección de los elementos a utilizar en la construcción del generador.

Para igualar o aumentar el flujo magnético hacia el estator, se reemplazó las bobinas de campo del rotor por 5 imanes de neodimio tipo anillo, se pretende con esto que el sistema entregue energía desde que inicie la velocidad, evitando tomar energía de este para alimentar con corriente directa los devanados de campo del rotor.

Dentro de los cálculos se determinará la energía que se puede extraer de los imanes y se notará si es viable su utilización para reemplazar las bobinas de campo del rotor. Las características geométricas y magnéticas del imán utilizado se encuentran mencionadas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Características del imán de Neodimio utilizado.

Modelo	Cobertura	Grado (MGOe)	Br (Gauss)	Prod. Max.E (J/m ³)	Diámetro Externo(mts)	Diámetro Interno(mts)	Espesor (mts)	Temperatura Trabajo (°C)
NA-0030	Ni-Cu-Ni	N35	11700-12100	278521	0.04445	0.01905	0.00635	-40 a 80

Estas características permiten determinar la Energía magnetostática Máxima que los imanes pueden entregar cuando son reemplazados en el generador, lo siguiente es el análisis para llegar a la ecuación final que es la ecuación 5.7 [referencia].

La densidad de energía magnetostática w_m (en J/m³) que se define como:

$$e_m = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (5.1)$$

Por lo tanto,

$$e_m = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{B^2}{2\mu} \quad (5.2)$$

En consecuencia, la energía existente en un campo magnetostático en un medio lineal es

$$E_m = \int e_m dv \quad (5.3)$$

o sea,

$$E_m = \frac{1}{2} \int B \cdot H dv = \frac{1}{2} \int \mu H^2 dv \quad (5.4)$$

$$E_m = \frac{1}{2} \int B \cdot H dv \quad (5.5)$$

Donde se saca la integral y la ecuación queda:

$$E_m = \frac{1}{2} (B \cdot H) \cdot V \quad (5.6)$$

Después se multiplica por el número de imanes que se incluyen para la modificación del rotor, donde queda finalmente la ecuación 5.7 que rige la Energía Magnetostática Máxima que entregan los imanes.

$$E_m = \frac{1}{2}(B \cdot H) \cdot V \cdot N \quad (5.7)$$

Donde N es el número de imanes montados en el generador y V es el volumen de un imán, sustituyendo los datos de las características del imán en la ecuación 5.7 se obtiene:

$$E_m = \frac{1}{2} \left(278521 \frac{J}{m^3} \right) \cdot 4.6237^{-6} m^3 \cdot 5$$

$$E_m = 3.2195J$$

Para encontrar la potencia eléctrica máxima que se puede producir, resulta de multiplicar la energía máxima de los imanes por la velocidad angular a la cual se encuentran girando, por medio de la ecuación 5.8[referencia].

Entonces las operaciones son:

$$P_{ElécMáx} = E_m \cdot \omega \quad (5.8)$$

Donde E_m es la energía magnetostática y es igual a 1.124J

Ω es la velocidad angular en rad/seg donde 100 rpm es igual a 10.4719 rad/seg

$$P_{ElécMáx} = 3.2195J \cdot 10.4719rad / s$$

$$P_{ElécMáx} = 33.714watts$$

La tabla 5.2 muestra la potencia eléctrica máxima a diferentes velocidades que se puede obtener de los imanes.

Tabla 5.2 Potencia Eléctrica Máxima.

Vel (RPM)	P. Eléctrica Máxima (W)	Vel (RPM)	P. Eléctrica Máxima (W)
100	33.714	600	202.287
200	67.429	700	236.002
300	101.144	800	269.716
400	134.858	900	303.431
500	168.573	1000	337.145

La anterior tabla muestra la máxima potencia que llegan a entregar los imanes con respecto a la velocidad, a más velocidad muestra claramente que aumenta la potencia.

5.2.1 Procedimiento de la modificación del Rotor

Primeramente se desarmó el alternador identificando sus partes, posteriormente se eliminó el devanado de campo, el núcleo, los anillos deslizantes, las escobillas, el puente rectificador que se encontraba ya dañado y se hizo una limpieza como se muestra en la figura 5.5.



Figura 5.5 Desarme y limpieza del alternador de 12 volts.

Continuando con el remplazo del devanado de campo, se optó por comprar imanes de neodimio tipo anillo como se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.6 Se reemplazó la bobina de campo por imanes de neodimio tipo anillo.

Posteriormente acoplando los imanes al eje, llenando el espacio ocupado por la bobina de campo, dejando los dedos polares para obtener un polo norte y un sur respectivamente como se muestra en la figura 5.7.



Figura 5.7 Se reemplazó la bobina de campo por imanes de neodimio tipo anillo, se optó por el imán de tipo anillo porque se tiene los dedos polares representando los polos.

5.3 Diseño y Construcción del estator

Para obtener el voltaje generado que se puede obtener con el nuevo calibre de alambre magneto a utilizar en el estator, se ocupó hacer una prueba en vacío para obtener el flujo magnético que los imanes generan, cabe recalcar que el devanado de campo se sustituye por los imanes de neodimio y que estos no están directamente hacia las bobinas del estator por lo que no se tendrá el máximo del flujo magnético que los imanes pueden generar, por consiguiente se tiene que obtener el valor real del flujo magnético que generan los imanes.

Antes de lo mencionado se tiene que definir el número de espiras por bobina con el nuevo calibre de alambre magneto a utilizar, para calcular el número de espiras se tiene el diámetro y el número de espiras del anterior alambre, así que si aumentamos el calibre el diámetro disminuye y por lo tanto aumentan el número de espiras por bobina.

Si se tiene que el diámetro del alambre magneto calibre 14 es de 1.732 mm y para encontrar su área es [referencia]:

$$Area_{Alambre} = \pi \cdot r^2 \quad (5.8)$$

$$Si \ r = \frac{D}{2} = 0.866mm$$

Entonces

$$Area_{Alambre} = 2.356mm^2$$

Si son 5 espiras por bobina entonces el área total es:

$$Area_{Total} = Area_{Alambre} \cdot N_{espiras} \quad (5.9)$$

Entonces

$$Area_{Total} = 12.27mm^2$$

Con esto se puede calcular el número máximo de espiras con el nuevo calibre a utilizar. Se tiene el alambre magneto calibre 24 con un diámetro de 0.5106 mm, entonces para encontrar el número de espiras máximo es:

$$Area_{Alambre} = \pi \cdot r^2$$

$$Si \ r = \frac{D}{2} = 0.2553mm$$

Entonces

$$Area_{Alambre2} = 0.204mm^2$$

Despejando la ecuación 5.9 y sustituyendo el valor de $Area_{alambre}$ por $Area_{alambre2}$ se tiene:

$$N_{m\acute{a}x_espiras} = \frac{Area_{Total}}{Area_{Alambre2}}$$

$$N_{m\acute{a}x_espiras} = \frac{12.27mm^2}{0.204mm^2}$$

$$N_{m\acute{a}x_espiras} \cong 60_espiras_por_bobina$$

Teniendo definido el número de espiras por bobina, el siguiente cálculo es el flujo magnético, partiendo de la ecuación 4.3 del capítulo 4, donde k es la constante de construcción de la máquina que es igual al N_c número de espiras, aclarando que en el diseño solamente se está tomando la parte eléctrica y queda expresada en la ecuación 5.10.

$$E_A = N_c \phi \omega \quad (5.10)$$

Donde N_c es igual a 35 como son 5 espiras por 7 bobinas por fase.

ϕ es el flujo magnético que se mide en webers.

Que se obtiene por medio de la ecuación 5.11

$$\phi = A \cdot B \quad (5.11)$$

Donde A es el área de las espiras que es igual a $0.001176m^2$

B que es el campo magnético que se mide en Teslas (T).

Donde la ecuación 5.11 se sustituye en la 5.10 y despejando B , queda la ecuación 5.12.

$$B = \frac{E_{\max}}{Nc \cdot A \cdot \omega} \quad (5.12)$$

Donde el valor E_{\max} es igual a $7.756V_{\text{pico}}$ que es el voltaje generado por una fase, recordando que son 7 bobinas por fase y que se obtuvo en la prueba de circuito abierto, desarrollada para calcular el campo magnético que realmente entregan los imanes, donde el dato se obtuvo al máximo de velocidad que el primotor entrega que es a 319.395 rad/s .

Sustituyendo E_{\max} y los datos anteriores en la ecuación 5.12 se obtiene:

$$B = \frac{7.756V_{\text{pico}}}{35\text{vueltas} \cdot 0.001176\text{m}^2 \cdot 319.395 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}}$$

$$B = 0.59 \text{ _Teslas}$$

Teniendo el valor de B que realmente entregan los imanes lo que prosigue es encontrar el flujo magnético ϕ que se obtiene sustituyendo el área de las espiras por el valor de campo magnético como lo muestra la ecuación 5.11.

$$\phi = 0.001176\text{m}^2 \cdot 0.59T$$

$$\phi = 0.0006938\text{webers}$$

Obtenido el dato de flujo magnético que entregan los imanes y teniendo el número de espiras por bobina del nuevo calibre que se utilizó y recordando que son 7 bobinas por fase, ahora se puede calcular el voltaje que puede generar que en este caso es a 100 rpm que es igual a 10.472 rad/s y sustituyendo los datos en la ecuación 5.10.

$$E_{\max} = (60\text{vueltas} * 7\text{bobinas}) \cdot 0.0006938\text{wb} \cdot 10.472 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$E_{\max} = 3.051\text{volts _pico}$$

Entonces el voltaje generado a diferentes velocidades con el nuevo calibre en el estator del alternador se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Generación de voltaje calculado con el nuevo calibre utilizado.

RPM	Em pico por bobina	RPM	Em pico por bobina
100	3.051	1800	54.926
200	6.102	2000	61.029
400	12.205	2200	67.132
600	18.308	3000	91.544
1000	30.515	3200	97.647
1400	42.721	3300	100.699

5.3.1 Procedimiento de la modificación del Estator

Como se mencionó se desarmó el alternador identificando el estator con sus características físicas originales como son el tipo de conexión que es en estrella y con un calibre 14 de alambre magneto, en lo que respecta las bobinas se tiene que son 7 por fase, con 5 espiras por bobina, como se muestra en la figura 5.8.



Figura 5.8 Identificación del estator.

Posteriormente se eliminaron las bobinas quitando los táquetes y micas de protección para darle una limpieza al núcleo como se muestra en la figura 5.9.



Figura 5.9 Muestra la eliminación de las bobinas.

En la limpieza se utilizó thinner para quitar las basuras y lo oxidado por la humedad, quedando el núcleo como se muestra en la figura 5.10.



Figura 5.10 Muestra la terminación de la limpieza del núcleo.

Para la creación de las bobinas con el calibre 14 de alambre magneto, se hizo un molde donde se construyeron en serie para evitar hacer una por una y posteriormente soldarlas, como se muestra en la figura 5.11.

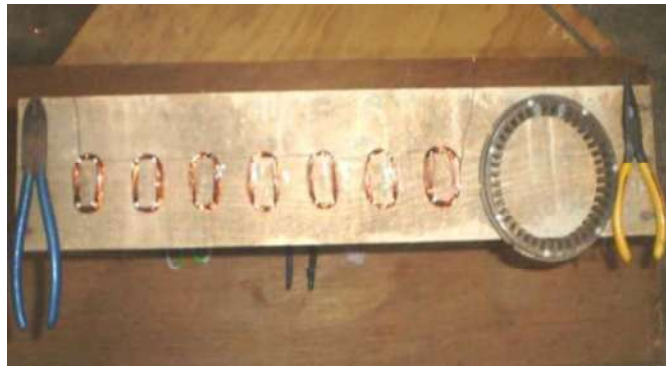


Figura 5.11 Creación de las bobinas con el nuevo calibre utilizado.

A continuación la figura 5.12 a) y b) muestran el estator con el embobinado de alambre magneto calibre 24 de 60 espiras por bobina y con conexión estrella:



a)



b)

Figura 5.12 a) Muestra el estator modificado y b) estator modificado y material utilizado.

La figura 5.13 muestra la integración del estator en el alternador y su ensamble:



Figura 5.13 Integración del estator modificado.

Finalizando con la figura 5.14 donde muestra el término del generador diseñado con sus respectivas modificaciones en este caso el alternador de coche.



Figura 5.14 Término del Generador diseñado.

5.4 Otra opción en el Diseño y Construcción del generador

5.4.1 Diseño y Construcción del Rotor

En este diseño es una opción más que presento en esta investigación de tesis, cabe aclarar que este diseño no terminó en forma, nada más se presenta como otra opción de la utilización con los imanes de neodimio.

De igual manera este diseño consiste en solucionar el principal problema, que el funcionamiento del generador sea adecuado en condiciones de baja velocidad. Para igualar o tratar de aumentar el flujo magnético hacia el estator, se reemplazó las bobinas de campo del rotor por 16 imanes de neodimio tipo bloque, se pretende con esto que el sistema entregue energía desde que inicie la velocidad, evitando tomar energía de este para alimentar con corriente directa los devanados de campo del rotor.

En los próximos cálculos se determinará la energía que se puede extraer de los imanes y se notará si es viable su utilización para reemplazar las bobinas de campo del rotor.

Partiendo de un alternador nuevo marca RCPInc, Modelo 42704, 24 volts, 65A a 3600 rpm y con N. de Serie 00F20049 y las características geométricas, magnéticas del imán utilizado se encuentran mencionadas en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Características del imán de Neodimio utilizado.

Modelo	Cobertura	Grado (MGOe)	Br (Gauss)	Prod. de Max. E (KJ/m ³)	Largo (mts)	Ancho (mts)	Espesor (mts)	Temperatura de Trabajo °C
NB-0017-42	Zinc	N42	13000 a 13200	318 a 342	0,02223	0,0127	0,00584	-40 a 80

Las características anteriores permiten determinar la Energía Magnetostática Máxima que los imanes pueden entregar, sustituyendo datos en la ecuación 5.7 se obtiene:

Y donde N es el número de imanes que es igual a 16 y V es el volumen del imán.

$$E_m = \frac{1}{2} \left(318000 \frac{J}{m^3} \right) \cdot (0.02223 \cdot 0.0127 \cdot 0.00584) m^3 \cdot 16$$

$$E_m = 4.1657J$$

La potencia eléctrica máxima que se puede producir, resulta de multiplicar la energía máxima de los imanes por la velocidad angular a la cual se encuentran girando, por medio de la ecuación 5.8. Entonces las operaciones pertinentes son:

$$P_{ElécMáx} = E_m \cdot \omega$$

Donde E_m es la energía magnetostática y es igual a 4.165J

ω es igual a 100 rpm convertidos a 10.4719 rad/s.

$$P_{ElécMáx} = 4.165J \cdot 10.4719rad / s$$

$$P_{ElécMáx} = 43.623watts$$

La tabla 5.5 muestra la potencia eléctrica máxima a diferentes velocidades que se puede obtener de los imanes.

Tabla 5.5 Potencia Eléctrica Máxima.

Vel (RPM)	P. Eléctrica Máxima (W)	Vel (RPM)	P. Eléctrica Máxima (W)
100	43.623	600	261.738
200	87.246	700	305.362
300	130.869	800	348.985
400	174.492	900	392.608
500	218.115	1000	436.231

La anterior tabla muestra la máxima potencia que llegan a entregar los imanes con respecto a la velocidad, a más velocidad muestra claramente que aumenta la potencia.

5.4.2 Procedimiento de la modificación del Rotor

Para el reemplazo de los imanes por el devanado de campo se optó mandar construir un eje con las mismas dimensiones que el original ya que el alternador es nuevo y si se requiere de él en un futuro nada más se quita el rotor de los imanes y se fija el original, después se fijo un bloque de aluminio con la característica de que tiene una alta reluctancia, las dimensiones son iguales angularmente al original para que el entrehierro sea menor entre el rotor y el estator, como lo muestran las figuras a) y b) 5.15.

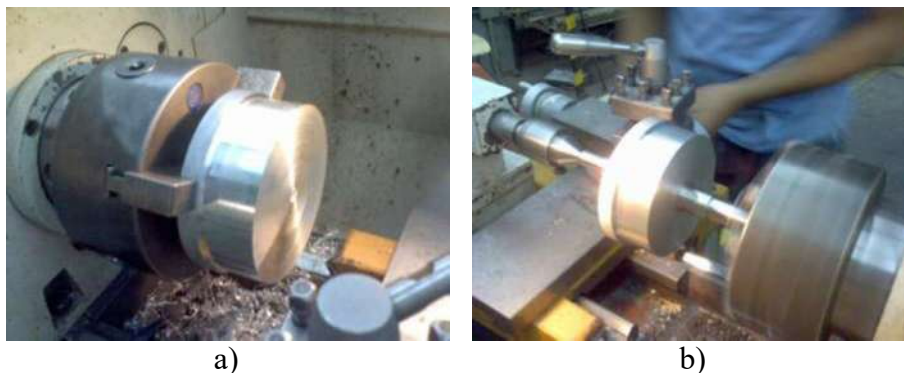


Figura 5.15 a) Muestra el bloque de aluminio en el torno dando las dimensiones que se ocupan, b) Muestra el eje con el bloque de aluminio.

El canal que se hizo en el aluminio es para el espaciado de los imanes de neodimio para ser pegados y fuesen incluidos a la misma distancia entre ellos. Esto para

facilitar el procedimiento de incluir los imanes y que se tuviera más agarre a la hora del pegado de estos en el canal, ya que tienen una fuerza magnética muy grande y lo que se quiere es que estén distribuidos y muy bien pegados en el bloque.

Se puede observar en la figura 5.16 el trazo del espaciamiento para que los imanes sean pegados posteriormente.



Figura 5.16 Muestra el trazo de inicio para el pegado de los imanes.

Para el procedimiento de pegado de los imanes se tienen que fijar uno con cara polar norte seguido de uno con cara polar sur después se repite hasta pegar los 16 bloques y teniendo mucha cautela ya que son muy frágiles, para que no fuera tanto la atracción de los imanes primero se pegaron los bloques con cara polar norte, se utilizó resina epóxica, dejando un periodo de secado por cada imán de 8 minutos, como lo muestra la figura 5.17.



Figura 5.17 Muestra el procedimiento utilizado para el pegado de los imanes en el bloque del rotor.

Finalizando con el pegado de los imanes con cara polar sur, donde se utilizaron táquetes para separarlos debido a la atracción muy fuerte con los de cara polar norte, de igual manera se pegaron con resina epóxica pero ahora el tiempo de secado aumento a 12 minutos y dejándolo terminado con la incrustación de todos los imanes de neodimio como lo muestra la figura 5.18.



Figura 5.18 Finalización del rotor construido con 16 imanes de neodimio tipo bloque.

5.4.3 Diseño del estator

Ahora teniendo que considerar que tipo de uso es que se le va dar al generador, hay varias vertientes una es teniendo el alambre magneto calibre 24, es calcular el valor de voltaje y potencia máxima que este puede generar, otra es utilizar el generador para cargar un banco de baterías y estas alimenten una casa-habitación teniendo que convertir el voltaje a ca por medio de inversores, para esto se debe calcular el diámetro del calibre a utilizar con el número de espiras por bobina que debe tener el estator para modificar la constante de construcción y este entregue el voltaje requerido para la carga de las baterías y la ultima es conectar directamente una carga en especifico por ejemplo un motor para bombear agua, con esto se puede calcular el diámetro que debe llevar las bobinas del estator para que entregue el voltaje deseado para que pueda operar.

Seleccionando el uso que va tener, se prosigue al cálculo del calibre a utilizar para aumentar la constante de construcción y es aquí donde esta opción del proyecto continúa para su posterior investigación.

Capítulo 6

Pruebas Realizadas al Generador

6.1 Introducción

En la trayectoria de este capítulo se presentan las diferentes pruebas que habitualmente se desarrollan para sacar las características de la máquina síncrona, que en este caso es al prototipo del generador, como son: las Pruebas en Vacío y Corto Circuito, la prueba del comportamiento con cargas resistivas y de Eficiencia Magnética con rotor modificado también con rotor y estator modificado, finalizando con la Eficiencia neta del prototipo del generador, los resultados de estas pruebas se observan en las diferentes tablas y gráficas que se presentan durante el desarrollo de este capítulo.

6.2 Desarrollo

Para tener los elementos necesarios para este capítulo, se ocupó de material y equipo de laboratorio para hacer los cambios pertinentes como son físicos o acondicionamientos para la medición, acople del prototipo generador con el primotor o con el electrodinamómetro para realizar las pruebas. Hago constar las facilidades del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica del tiempo y préstamo del equipo necesario para la realización de las pruebas.

El paso siguiente es la identificación de las variables que intervienen para la obtención de las mediciones y que estas sean lo más precisas para describir el comportamiento del prototipo del Generador, las diferentes variables que se obtuvieron para este caso fueron las siguientes:

- Voltaje (V).
- Corriente (I).
- Potencia (P).
- Velocidad angular (ω).
- Par desarrollado por el rotor (τ).
- Impedancia (Z).

Para la obtención de datos se ocuparon equipos de medición, material, dispositivos y módulos que a continuación se detallan:

- Multímetro.
- Tacómetro óptico.
- Rectificador CD de 45A.
- Múltiples Cables de conexión.
- Material y Herramientas diversas.
- Máquina de CD.
- Electro-dinamómetro.
- Banda de acople.
- Módulo base para acoplar.
- Módulo de Resistencias
- Módulo de Reóstatos.
- Cámara fotográfica.

Para realizar las pruebas se tienen que acoplar el primotor utilizado y el generador en una base. En este caso es sobre un módulo de las fuentes de poder del Laboratorio de Eléctrica por medio de una banda, como se muestra en la figura 6.1, en algunas pruebas se adaptó una base para el acople y se dejó bien ajustado para que las mediciones fueran lo más precisas. Los equipos y aparatos de medición más importantes que se utilizaron se mencionan a continuación:

Multímetro se utilizó para medir Voltaje recordando que este se conecta en paralelo y para corriente este se conecta en serie.

El tacómetro óptico se utilizó para obtener las mediciones de velocidad angular en revoluciones por minuto (rpm).

Máquina de CD se utilizó como primotor para hacer girar el Generador.

El electrodinamómetro se utilizó para saber la potencia que entrega el primotor hacia el eje del Generador.

Módulo de Resistencias se utilizaron para conectar carga en el Generador como su nombre lo indica creando combinaciones de resistencias.

Módulo de Reóstatos se utilizaron para conectar carga en el Generador variando el reóstato y fijar una magnitud de resistencia.

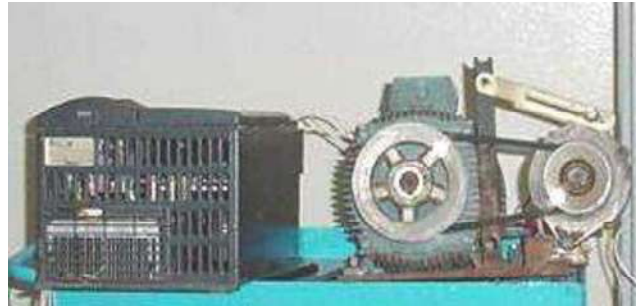
Cámara fotográfica para capturar las imágenes más importantes de las lecturas tomadas de los diversos aparatos utilizados en las pruebas realizadas y presentarlas posteriormente.

6.2.1 Metodología

La metodología para la realización de las pruebas fue de la siguiente manera:

1. Se fijó el generador y el primotor en este caso un motor más grande en la base como se muestra en la figura 6.1 a), las bases de las Fuentes de Poder fueron utilizadas para fijar los módulos de resistencias como se muestra en la figura 6.1 b), donde también la máquina de CD y el electrodinamómetro se fijaron y se acoplaron con una banda como se ve en la figura 6.1 c).
2. La instrumentación se colocó de la siguiente manera; un multímetro conectado en paralelo para medir Voltaje, un multímetro conectado en serie para medir Corriente. Para la medición de velocidad angular fue manual con el tacómetro óptico, se proyecta el haz de luz infrarrojo hacia la polea que tiene una cinta reflejante.
3. Se efectuó la prueba en Vacío y de Corto Circuito únicamente con la modificación del rotor para obtener la impedancia interna del circuito que representa la máquina síncrona en este caso del Generador.
4. Se realizó la prueba de comportamiento a diferentes cargas resistivas, donde se observan las gráficas de V, I y P.
5. Se efectuó la prueba en Vacío y de Corto Circuito ahora con la modificación del rotor y estator para obtener la impedancia interna del circuito que representa la máquina síncrona en este caso del Generador.
6. Se realizó la prueba de comportamiento a diferentes cargas resistivas, donde se observan las gráficas de V, I y P.
7. Se realizó la prueba para determinar la eficiencia (η) magnética.
8. Para la prueba de eficiencia del primotor se utilizó, en este caso la máquina de CD para la posterior obtención de la eficiencia neta del Generador.
9. Se realizó la prueba para determinar la eficiencia (η) neta del prototipo del Generador.

10. Se realizaron las diferentes tablas en las que se observa el comportamiento en cada una de las pruebas.
11. En cada prueba se obtuvieron tablas para su interpretación y posteriormente se llega a un resultado, en el cual se da una breve conclusión.



a)



b)



c)

Figura 6.1 a) muestra la base donde se acoplaron el prototipo del Generador y el motor de CA con un inversor, b) Base de la fuente donde se fijaron los módulos de resistencias y los reóstatos y c) Base de la fuente de poder donde se fijaron el motor de CD y el electrodinamómetro para sacar su eficiencia.

6.3 Pruebas Realizadas

Para las pruebas en vacío y de corto circuito se utilizó como primotor una máquina de CA y para las pruebas de obtención de eficiencia del Generador una de máquina de CD con el fin de agilizar y facilitar las pruebas.

6.3.1 Prueba en Vacío y de Corto Circuito con rotor modificado

Esta prueba es para determinar la característica de la impedancia interna (Z_{int}), para esto se tomaron los datos de medición como son la velocidad angular, el voltaje y corriente para su posterior análisis.

Para el desarrollo de esta prueba se acopla con una banda el Generador y el primotor conectando en sus terminales un voltímetro en paralelo sin conectar carga, el procedimiento fue aumentando la velocidad de giro desde 230 hasta 3100 rpm para ir tomando mediciones a incrementos por cada 200 rpm, como lo muestra la figura 6.2. Para la prueba de Corto Circuito como su nombre lo indica se cortocircuita las terminales poniendo en serie un amperímetro para medir corriente, la toma de datos fue a la misma variación anterior.



Figura 6.2 Muestra la conexión implementada para obtener las mediciones de las pruebas en vacío y de corto circuito.

Para el análisis correspondiente de las tablas para la obtención de la Z_{int} del Generador es obteniendo el promedio de la división entre el voltaje en Vacío y la corriente de Corto Circuito, donde este promedio representa la impedancia interna de la máquina, que también se utiliza para obtener posteriormente la eficiencia Magnética. Se llevó hasta el máximo de velocidad que entrega el primotor, censando la temperatura ya que esta es una

limitante para el imán, porque pueden perder hasta un 80% de su fuerza magnética y reducir la generación de potencia que entregarían.

Tabla 6.1 Datos obtenidos en las pruebas en vacío y corto circuito para el cálculo de impedancia interna.

Velocidad RPM	Vvacío (Vcd)	Iccto (A)	Impedancia $Z=V/I$ (Ω)
230	1.2	2.2	0.545
610	2.85	6.823	0.418
1000	4.57	17.976	0.254
1400	6.3	26.066	0.242
1820	8.2	30.85	0.266
2470	10.949	35.1	0.312
2825	12.49	36.346	0.344
3050	13.36	36.944	0.362
3100	13.706	37.07	0.37
		Promedio	0.336

La tabla 6.1 muestra las mediciones obtenidas y la operación correspondiente para el cálculo de la Z_{int} el cual es de 0.336Ω . Estos resultados permiten obtener la máxima potencia eléctrica que puede suministrar este prototipo para posteriormente calcular su eficiencia magnética.

6.3.2 Prueba en Vacío y de Corto Circuito con rotor y estator modificado

La conexión y desarrollo de igual manera que la anterior prueba, para esta prueba la diferencia es que el estator también se modificó. Igualmente el análisis es para determinar el cambio en el parámetro de impedancia interna y posteriormente encontrar la variación en la eficiencia magnética.

Tabla 6.2 Datos obtenidos en las pruebas en vacío y corto circuito para el cálculo de impedancia interna.

Velocidad RPM	Vvacío (Vcd)	Iccto (A)	Impedancia $Z=V/I$ (Ω)
230	9,93	0,782	12,701
620	26,42	1,902	13,89
1010	43,08	2,62	16,446
1400	59,98	2,91	20,612
1850	78,5	3,164	24,81
2500	106,2	3,479	30,526
2850	120,6	3,553	33,94
3320	143,4	3,648	39,309
		Promedio	21,03

La tabla 6.2 muestra las mediciones obtenidas y la operación correspondiente para el cálculo de la Z_{int} el cual es de 21.03Ω . Estos resultados permiten obtener la potencia eléctrica máxima que puede suministrar este prototipo para posteriormente calcular su eficiencia magnética.

6.3.3 Obtención de la Eficiencia Magnética del Generador sin y con el estator modificado

Para la obtención de la eficiencia magnética se tienen como datos la prueba en vacío y de corto circuito, en el cual el producto del voltaje y corriente se obtiene la potencia de máxima transferencia obtenidas, teniendo otra característica que es la tabla 5.2 del capítulo 5, que muestra la potencia eléctrica máxima que se puede obtener de los imanes a diferentes velocidades. Con estos datos se obtiene la eficiencia magnética del generador, el cual la operación a seguir es la ecuación 6.1 de eficiencia, los datos obtenidos de eficiencia magnética se muestra en la tabla 6.3.

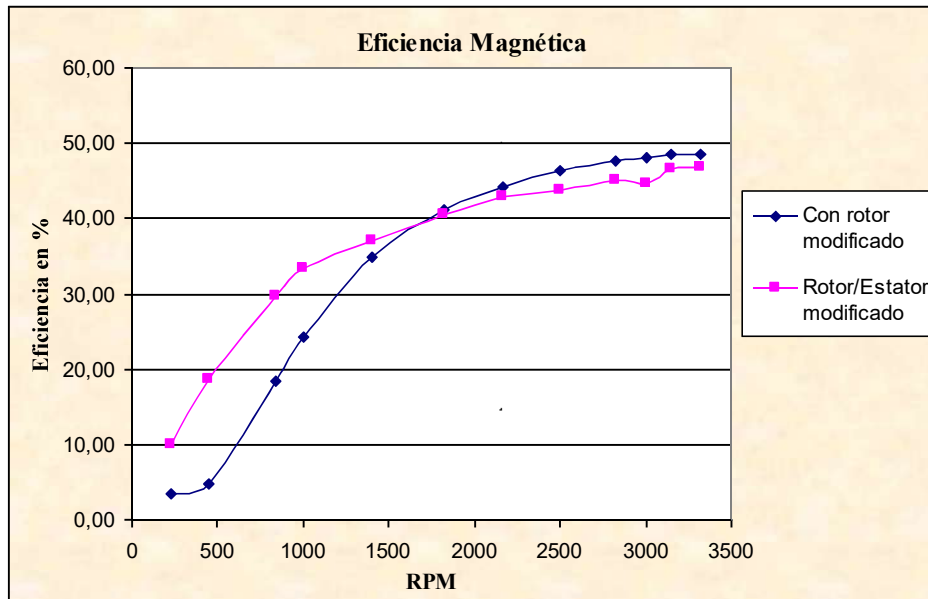
$$\eta_{Magnética} = \frac{P_{\max_transferencia}}{P_{Eléctrica_max}} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Tabla 6.3 muestra la comparación de la Eficiencia Magnética del Prototipo del Generador sin modificar el estator y cuando este modificado.

Velocidad	P Máxima Imán Watts	P MáxTransf. C/rotor modificado Watts	Eficiencia Magnética %	P MáxTransf. C/rotor y estator mod.	Eficiencia Magnética %
230	77.54	2.64	3.40	7.76	10.01
450	151.72	7.09	4.67	28.19	18.58
840	283.2	52.31	18.47	84.04	29.67
1000	337.4	82.15	24.37	112.45	33.35
1400	472	164.21	34.79	174.54	36.98
1820	613.6	252.96	41.23	248.37	40.48
2500	842.86	389.97	46.27	369.47	43.84
3000	1011.43	485.47	48.00	451.43	44.63

En la gráfica 6.1 se puede apreciar el comportamiento de la eficiencia magnética a diferentes velocidades sin y con el estator modificado, se nota que aproximadamente a 1500 rpm la eficiencia magnética aun es mayor con el rotor y estator modificado, que con el rotor

solamente modificado, esto es lo que se pretendía con la modificación para que operará a bajas velocidades.



Gráfica 6.1 muestra la eficiencia magnética del generador con y sin modificar el estator.

6.3.4 Prueba con diferentes cargas con rotor y estator modificado

En esta prueba se montaron sobre la base de la fuente de poder los módulos como se muestra en la figura 6.3, cabe señalar que en todas las pruebas se conectó en terminales del generador un rectificador de CD para obtener el voltaje en CD. Los datos de medición obtenidos son la velocidad angular, voltaje y corriente. Para esta medición se conectaron un voltímetro en paralelo y un amperímetro en serie con las resistencias, para obtener con el producto de los datos la potencia que entrega el generador con diferentes cargas respecto a la velocidad, para su posterior análisis.



Figura 6.3 Instalación de los módulos de resistencias para hacer las pruebas con cargas resistivas.

El desarrollo para esta prueba es la siguiente; las resistencias se conectaron en la salida del rectificador de CD, acoplando el primotor y se fueron tomando mediciones de 235 hasta 3300 rpm con incrementos de 100 rpm, como lo muestra la figura 6.4.



Figura 6.4 Conexión de los módulos de las resistencias con el prototipo del generador.

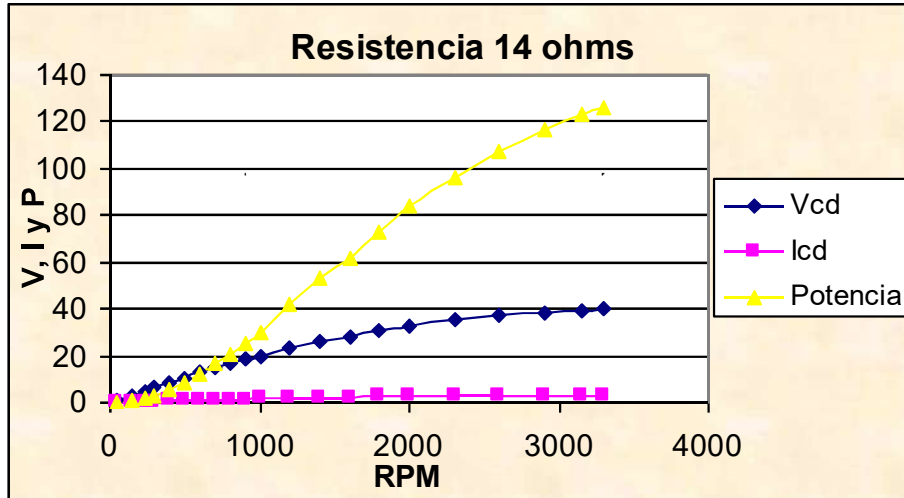
Prueba con 14 Ω

Las mediciones obtenidas se presentan en la tabla 6.4 y la gráfica 6.2 de Velocidad vs. Potencia que muestra el comportamiento con una carga de 14 Ω .

Tabla 6.4 Comportamiento del Voltaje, Corriente y Potencia a 14 Ω .

Velocidad RPM	z=14 Ω		Potencia
	Vcd	I	Watts
235	4.824	0.36	1.72
290	6.306	0.46	2.93
400	8.45	0.63	5.32
600	12.74	0.96	12.24
800	16.61	1.26	20.88
1000	19.84	1.52	30.077
1200	23.33	1.79	41.74
1600	28.28	2.19	61.9
2000	32.79	2.55	83.65
2600	37.01	2.89	107.107
2900	38.57	3.02	116.56
3150	39.66	3.11	123.42
3300	40.09	3.15	126.12

Donde la tabla 6.4 y la gráfica 6.2 muestran el comportamiento del voltaje, corriente y la potencia que al ir aumentando la velocidad desde 235 hasta la máxima velocidad que entrega el primotor es de 3300 donde el prototipo del generador entrega una potencia de 126.12 Watts.



Gráfica 6.2 Muestra el comportamiento de voltaje, corriente y potencia ante una de 14 Ω .

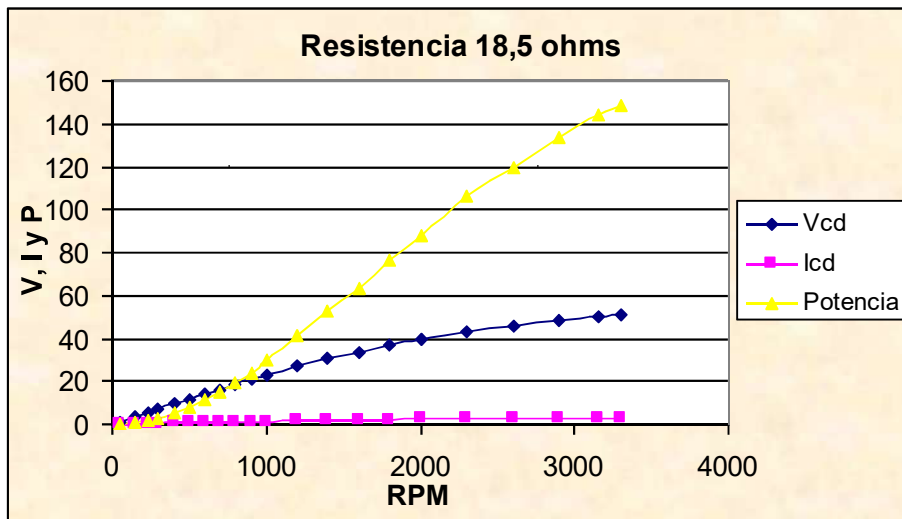
Prueba con 18.5 Ω

Las mediciones obtenidas se presentan en la tabla 6.5 y la gráfica 6.3 de Velocidad vs. Potencia que muestra el comportamiento ante el aumento de velocidad con una carga de 18.5 Ω .

Tabla 6.5 Comportamiento del Voltaje, Corriente y Potencia a 18.5 Ω .

Velocidad RPM	z=18.5 Ω		Potencia
	Vcd	I	Watts
235	5.439	0.303	1.648
290	6.65	0.409	2.72
400	9.32	0.523	4.87
600	14.31	0.805	11.52
800	18.4	1.037	19.08
1000	22.92	1.294	29.66
1200	27.14	1.532	41.58
1600	33.39	1.895	63.27
2000	39.33	2.242	88.178
2600	45.86	2.614	119.88
2900	48.4	2.759	133.53
3150	50.33	2.87	144.45
3300	51.04	2.91	148.52

Donde la tabla 6.5 y la gráfica 6.3 muestran el comportamiento del voltaje, corriente y la potencia que al ir aumentando la velocidad desde 235 hasta la máxima velocidad que entrega el primotor es de 3300 donde el prototipo del generador entrega una potencia de 148.52Watts.



Gráfica 6.3 Muestra el comportamiento de Voltaje, corriente y Potencia ante una de 18.5 Ω .

Prueba con 24.2 Ω

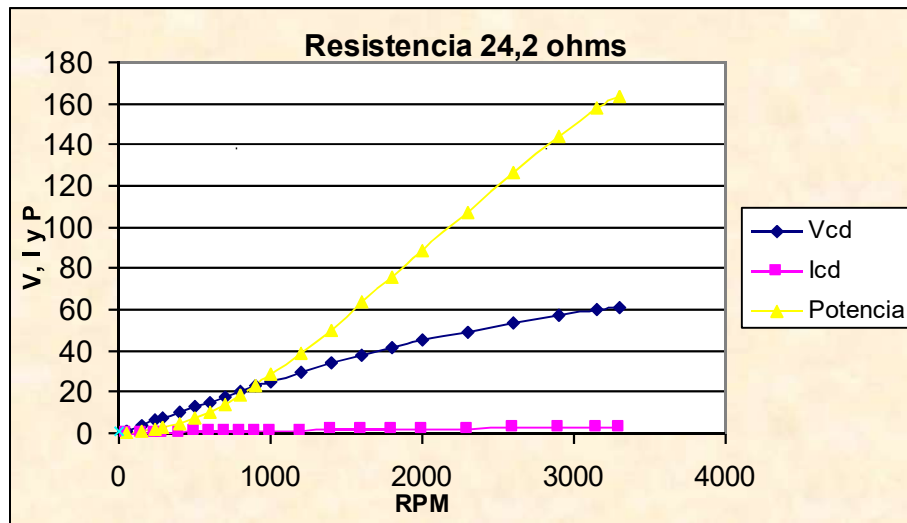
Las mediciones obtenidas se presentan en la tabla 6.6 y la gráfica 6.4 de Velocidad vs. Potencia que muestra el comportamiento ante el aumento de velocidad con una carga de 24.2 Ω .

Tabla 6.6 Comportamiento del Voltaje, Corriente y Potencia a 24.2 Ω .

Velocidad RPM	z=24.2 Ω		Potencia
	Vcd	I	Watts
235	6.07	0.27	1.62
290	7.27	0.32	2.32
400	10.05	0.44	4.44
600	15.15	0.66	10.09
800	20.5	0.90	18.5
1000	25.31	1.11	28.17
1200	29.64	1.30	38.65
1600	38.07	1.66	63.77
2000	44.84	1.98	88.56
2600	53.63	2.36	126.67
2900	57.26	2.52	144.41
3150	59.88	2.64	158.02
3300	60.9	2.68	163.45

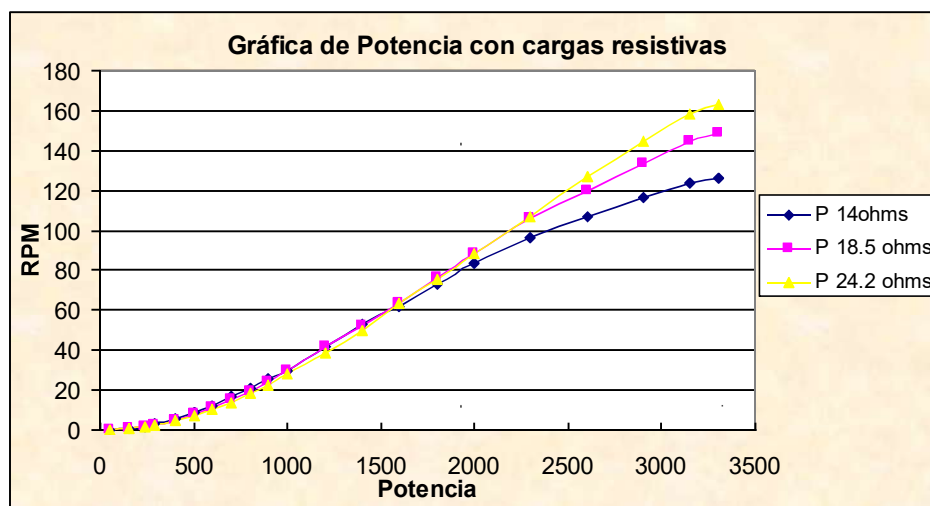
Donde la tabla 6.6 y la gráfica 6.4 muestran el comportamiento del voltaje, corriente y la potencia que al ir aumentando la velocidad desde 235 hasta la máxima velocidad que

entrega el primotor es de 3300 donde el prototipo del generador entrega una potencia de 163.45Watts.



Gráfica 6.4 Muestra el comportamiento de Voltaje, corriente y Potencia ante una de 24.2 Ω.

Teniendo el dato de impedancia interna que es igual a 21.03Ω obtenida con las pruebas en vacío y de corto circuito ya con las modificaciones pertinentes, se puede saber la carga que permita la máxima transferencia de potencia eléctrica por parte del generador. La gráfica 6.5 muestra el comportamiento de la potencia ante diferentes cargas resistivas, así puede notar que la carga más próxima a la Z_{int} que es de 18.5 Ω es la que mejor que se comporta en la entrega de potencia a bajas velocidades.



Gráfica 6.5 muestra el comportamiento ante diferentes cargas resistivas.

6.3.5 Prueba para la obtención de la Eficiencia neta del Generador diseñado

Para la obtención de la eficiencia neta del generador se necesita saber la potencia que entrega el primotor hacia el eje del generador, así lo que sigue es el proceso de obtención de eficiencia del primotor. En esta prueba el primotor se acopla con el electrodinamómetro por medio de una banda, montados en una base de la fuente de poder, como se muestra en la figura 6.5.

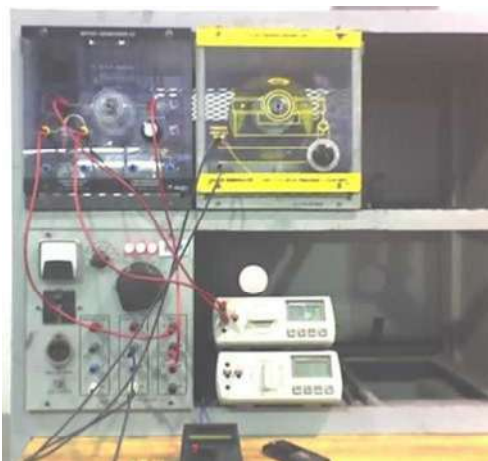


Figura 6.5 Montaje y conexión para la obtención de la eficiencia del primotor.

Los datos nominales del primotor como motor son los siguientes que en este caso es la máquina de CD número 5 que pertenece al Laboratorio de Ingeniería Eléctrica:

- 120 volts
- 2 Amperes
- $\frac{3}{4}$ HP

Los datos nominales del electrodinamómetro número 3 que también pertenece al Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, son los siguientes:

- 120 volts
- 2 Amperes
- $\frac{3}{4}$ HP

El procedimiento para esta prueba es fijar un par en el electrodinamómetro y tomar lecturas de la velocidad, con estos datos se obtiene con la ecuación 6.2 una curva de comportamiento de la potencia entregada por el primotor y posteriormente obtener la

eficiencia por medio de la ecuación 6.3, donde la potencia de entrada es el producto del voltaje y la corriente que son medidos en las terminales de entrada del primotor con un voltímetro en paralelo y un amperímetro en serie, se previo llevar al límite la corriente de campo de la máquina de CD censándola con otro amperímetro para no sobrecalentar.

$$P_{salida_primotor} = \frac{1.59 \cdot \tau \cdot \omega}{100000} \cdot 746Hp \quad (6.2)$$

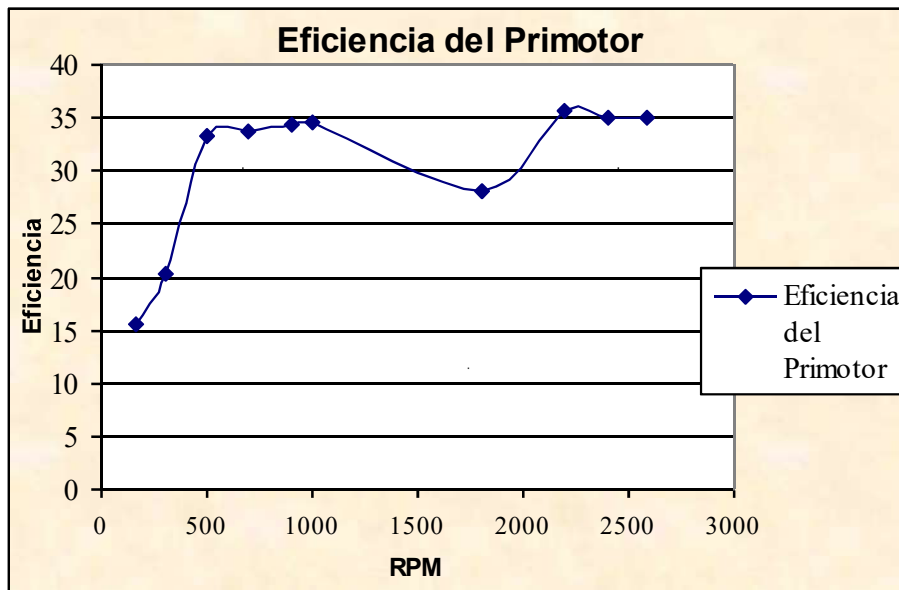
$$\eta_{primotor} = \frac{P_{salida_primotor}}{P_{entrada_primotor}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Los parámetros medidos se presentan en la tabla 6.7 junto con la operación correspondiente de potencia y eficiencia del primotor.

Tabla 6.7 Mediciones obtenidas para la obtención de eficiencia del primotor.

ω rpm	$V_{Línea}$ V	$L_{Línea}$ A	P_{in} W	τ Lbfm	$P_{sal Prim}$ W	η_{Prim}
160	13.03	0.94	12.25	1	1.898	15.495
300	18.24	0.96	17.51	1	3.558	20.32
500	30.23	1.18	35.67	2	11.86	33.25
700	39.93	1.236	49.35	2	16.606	33.65
900	49.85	1.245	62.06	2	21.35	34.4
1000	54.7	1.25	68.37	2	23.723	34.69
1800	103	1.48	152.44	2	42.7	28.01

Gráfica 6.5 que representa el comportamiento de la eficiencia del primotor respecto a varios puntos medidos de velocidad.



Gráfica 6.5 muestra el comportamiento de la eficiencia del primotor.

Teniendo la eficiencia del primotor en determinados puntos de velocidad, el siguiente paso para la obtención de la eficiencia del generador es acoplar ya directamente el primotor con el generador y conectar cargas en la salida del rectificador trifásico del generador, teniendo que igualar las condiciones iniciales de carga en los puntos donde se obtuvieron las mediciones para la eficiencia del primotor.

Los parámetros a medir son el voltaje para esto se conecto un voltímetro en paralelo en terminales del rectificador del generador con una carga, un amperímetro en serie con la carga para la corriente y la velocidad angular con un tacómetro óptico. Las mediciones se hicieron primero con una carga fija aumentado la velocidad e ir tomando los datos.

En la figura 6.6 a) muestra la conexión del primotor y el generador y b) muestra los módulos de resistencias y aparatos de medición.

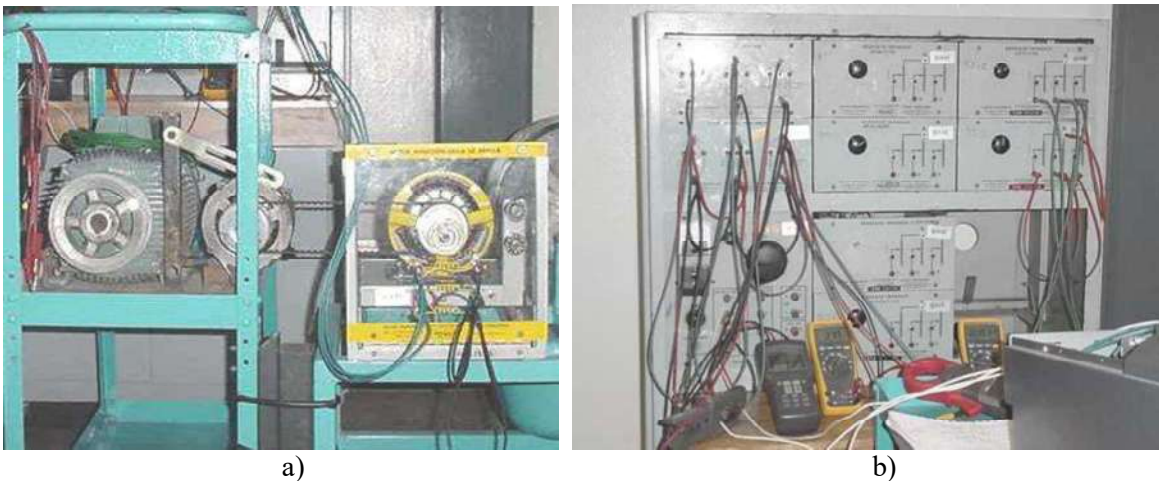


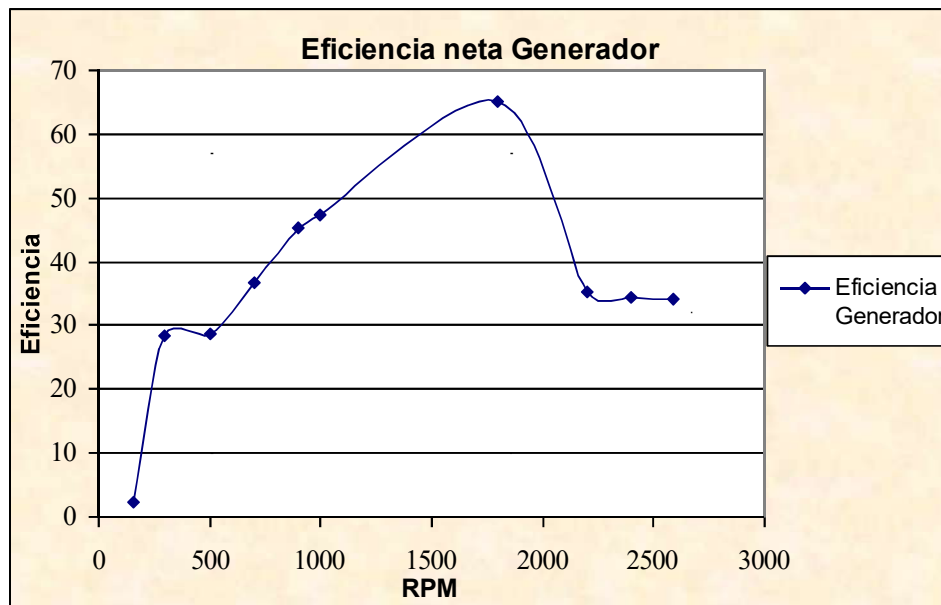
Figura 6.6 a) muestra la conexión del primotor con el Generador y b) muestra los módulos de Resistencias y aparatos de medición utilizados.

La tabla 6.8 muestra los datos obtenidos para posteriormente calcular la eficiencia y ver el comportamiento del generador a diferentes velocidades.

Tabla 6.8 muestra el comportamiento de la Eficiencia del Generador.

ω	P_{in}	P_{sal} Primotor	R	$V_{sal Gen}$	$I_{sal Gen}$	$P_{sal Gen}$	η_{neta} Gen
160	12.25	1.9	1	0.17	0.27	0.04	2.37
300	17.51	3.56	10	3.1	0.32	1.01	28.4
500	35.67	11.86	13.5	6.6	0.52	3.42	28.82
700	49.35	16.60	13.5	8.86	0.69	6.11	36.81
900	62.06	21.35	13.5	11.18	0.86	9.66	45.24
1000	68.37	23.73	40	21.56	0.54	11.3	47.30
1800	152.44	42.70	47.8	34.72	0.80	27.81	65.13
2200	219.47	78.28	11.39	17.76	1.56	27.68	35.37
2400	244.21	85.40	11.39	18.29	1,60	29.37	34.39
2590	262.44	92.16	11.34	18.85	1,66	31.35	34.01

En la gráfica 6.6 se puede apreciar el comportamiento de la eficiencia, al incrementar la velocidad no es lineal el aumento de la eficiencia, llegando el máximo aproximadamente a un 65.13% a 1800 rpm que después disminuye.



Gráfica 6.6 Muestra el comportamiento de la eficiencia neta del prototipo.

6.4 Caracterización del Aerogenerador para el Generador diseñado

Teniendo los datos característicos del generador diseñado, lo siguiente es tener la mejor opción para seleccionar el aerogenerador, entonces en función de la velocidad, la potencia obtenida por el generador y con la ecuación 6.4.

$$TSR = \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30 \cdot v} \quad (6.4)$$

Donde n es la velocidad en el eje en rpm.

r radio de la pala en m.

v velocidad del viento en m/s.

TSR que es el valor de la relación de velocidad específica o periférica,

El valor TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad veces mayor que la velocidad del viento. Para calcular este valor se propone el radio de las palas y la velocidad del viento incidente sobre estas, tras hacer varios cálculos para tener la mejor opción se concluyó que el valor del radio debe ser igual a 1 m, con un perfil alabeado y la velocidad óptima de operación es 6 m/s, entonces aplicando la ecuación 6.4 el valor TSR es:

$$TSR = \frac{\pi \cdot 1 \cdot 800}{30 \cdot 6}$$

$$TSR = 13.962$$

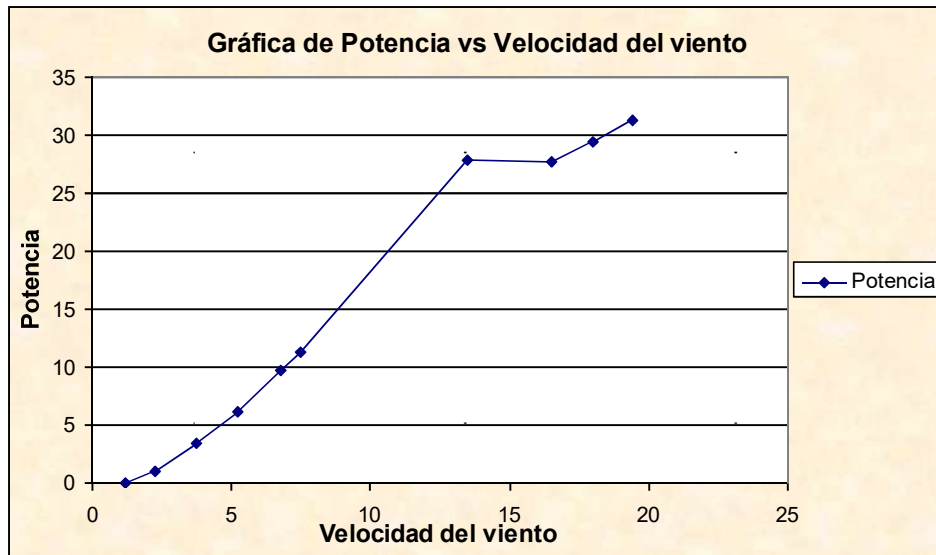
Obtenido este valor en condiciones reales se puede definir el número de palas con ayuda de la tabla 6.9, definiendo 2 palas.

Tabla 6.9 Número de palas en función del TSR.

TSR	1	2	3	4	5-8	8-15
Número de palas	6-20	4-12	3-8	3-5	2-4	1-2

La tabla 6.9 muestra el número de palas a diferente valor del TSR , esto ayuda a determinar las palas necesarias para su mejor aprovechamiento.

Lo siguiente es calcular la velocidad del viento, que podemos estimarla en función de la velocidad angular y el radio de las palas del aerogenerador, despejando la velocidad de la ecuación 6.4 se obtiene la gráfica 6.7.



Gráfica 6.7 Relación entre la Potencia, rpm y velocidad del viento.

Entonces los datos característicos de las palas del aerogenerador son:

- TSR igual a 13.962
- Radio de las palas 1 m.
- Número de palas 2
- Tipo de pala perfil alabeado

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos a Futuro

7.1 Conclusiones

Para la terminación de esta investigación es importante concluir y mencionar las partes cruciales que se tuvieron en el diseño, como los logros, trabas, aportaciones, mejoras y trabajos a futuro que se pueden tener en la investigación y hacer mención de los requerimientos para la manufactura de un generador eléctrico y donde este debe ser confiable.

Cabe destacar que los puntos siguientes de esta investigación, con anterioridad se abordaron, se detalló el procedimiento, desarrollo y algunas consideraciones para tener la mejor opción para la construcción del generador eléctrico. Se menciona también otra opción para el diseño y construcción del generador eléctrico en el que se utilizaron imanes tipo bloque, su utilización de estos es para colocarlos de una forma en que su fuerza magnética sea directa hacia las bobinas del estator y se tenga una mayor eficiencia magnética para que la transferencia de potencia sea mayor.

Algunos rasgos distintivos se mencionan a continuación:

1. Tipo de imán utilizado.
 - El imán de Neodimio utilizado es de tipo anillo, su utilización se debió para reducir el tiempo y costo de construcción.
 - Para la orientación el imán se colocó con la cara polar norte del lado del eje más pronunciado, como inicialmente estaba el campo.
 - Dentro de la investigación se modificó paralelamente un alternador nuevo marca RCP Inc. de 24 volts y 65 amperes, en la que se utilizó imanes tipo bloque. En este alternador el rotor original se dejó intacto por lo que se mandó construir en el laboratorio de Ing. Mecánica un eje de acero tratado con un bloque de aluminio para que asentarán los imanes y que la circunferencia sea de 2 a 3mm menor que el núcleo del estator.

- El aluminio es un material con características de reluctancia baja por lo cual se utilizó y en donde los imanes fueron pegados con resina epóxica.

2. Posicionamiento de los imanes.

- Respecto a la posición de los imanes tipo anillo se fijaron al eje original y se encerraron con los dedos polares, se tiene que mencionar que entre más cercanos estén los dedos polares las líneas de flujo magnético son cerradas y por lo tanto no hay tantos cortes de flujo por las bobinas.
- Para mejorar la eficiencia lo que se debe hacer es alejar los dedos polares para que las líneas de flujo aumenten, se tengan más cortes y por lo tanto más voltaje.
- Cabe mencionar que los imanes no están directamente hacia el estator lo que da lugar a una pérdida por reluctancia, por lo tanto su eficiencia no fue la más óptima como lo muestran las pruebas en el capítulo anterior.
- Dentro del imán tipo bloque se tiene que buscar la inclinación para que se tenga la mejor captación de líneas de flujo hacia las bobinas.
- En este proyecto que aún sigue, donde los imanes están directamente proyectados hacia el estator, es de esperar que su eficiencia magnética sea mayor que en el diseño con imanes tipo anillo.

3. Modificación de la constante de construcción.

- Dentro de la modificación que se hizo en el generador, se alteró la parte eléctrica aumentando el número de espiras por bobina y también se reemplazó las bobinas de campo por imanes, logrando evitar que extraiga energía del sistema para alimentar el devanado de campo, obteniendo un campo magnético creado por los imanes.
- El uso de este generador eléctrico para alimentar una carga directamente y constantemente resultaría difícil, por motivos de la variación del viento, entonces el uso de un banco de baterías sería más eficiente.

- Para el proyecto del imán tipo bloque se le hicieron las pruebas en vacío y en corto circuito con la misma constante de construcción y mostró un aumento considerable para la máxima transferencia de energía.
- Para elegir el uso del generador con el imán tipo bloque, se debe considerar la carga que se va a alimentar o si es para cargar un banco de baterías y así modificar su constante de construcción para que opere a bajas revoluciones, en lo que este proyecto continúa para su investigación.

4. Pruebas Realizadas.

- Cabe mencionar que el material usado es con el que se contaba al alcance de nuestras manos, en el cálculo del voltaje que puede producir el generador con los imanes, la constante de construcción modificados y con la prueba en vacío, en las tablas 5.3 y 6.2 se pueden observar las diferencias, esta diferencia se incrementa hasta 10 volts aproximadamente a 1000 rpm que es donde opera un aerogenerador, puede deberse esto a que no están directamente dirigidos los imanes hacia el estator.
- En las pruebas para determinar la eficiencia se repitieron algunos pasos, el motivo es que algunos equipos como el electrodinamómetro por su constante uso las mediciones al repetir los pasos no fueron las mismas.
- Para la obtención de la eficiencia del Generador se tuvieron algunos inconvenientes a la hora de poner en condiciones iniciales al primotor para representar la carga en algunos puntos, también aquí se repitieron algunos pasos para obtener las mediciones mas óptimas.
- La falta de resistencias de potencia de poca magnitud alargó el tiempo de las pruebas, al hacer varias combinaciones para establecer el punto óptimo de condiciones iniciales de carga en el primotor para obtener la eficiencia del generador.

7.2 Trabajos a Futuro

El camino de esta investigación sigue, por lo tanto se tienen algunos puntos de mejoramiento a tratar y son:

1. Ventilación ya que esta es muy importante por el motivo del calentamiento que afecta y es crucial para la vida útil de los imanes.
2. Tipos de carcasa que es para la disipación del calor, ya que esta investigación partió de un alternador de coche.
3. Otros tipos de Generador muy utilizados para fines de generación eólica de baja potencia, como lo son el generador axial, generador de inducción, servo y motor de pasos como generador.
4. Como este generador es de baja Potencia lo óptimo es de cargar un banco de baterías y estas alimentar cargas por medio de inversores.
5. Resultaría más eficiente hacer un sistema de generación híbrido, por ejemplo con otra fuente de energía renovable como lo son las celdas solares o con una picoturbina dependiendo si se cuenta con un flujo de agua como son las cuencas o ríos.

Referencias

Libro:

[Chapman 2005]

S. J. Chapman, Maquinas Eléctricas, USA: Mc-GrawHill, 2005.

[Fitzgerald 1992]

A. E. Fitzgerald, Maquinas Eléctricas, USA: Mc-GrawHill, 1992.

[HAYT 2006]

W. Hayt, Teoría Electromagnetica, Filadelfia: McGraw-Hill, 2006.

[KOSOW 1993]

I. L. KOSOW, Maquinas Eléctricas y Transformadores, USA: Prentice Hall, 1993.

[Manwell 1970]

J. F. Manwell, Wind Energy Explained, USA: Jonh Wiley & Sons, 2002.

[SADIKU 1998]

M. N. O. Sadiku, Electromagnetismo, Filadelfia: Continental, 1998.

Notas y Tesis:

[Sánchez 2004]

Ing. Carlos Manuel Sánchez G; “Notas de Maquinas Especiales”, UMSNH, 2004.

[Vargas 2004]

Ing. Jesús Vargas Villaseñor; Tesis “Diseño y Construcción de un Aerogenerador de Baja Potencia”, UMSNH, 2004.

Internet:

[AMEE 2009]

La Asociación Mexicana para la Economía Energética, 10 de abril del 2009.

http://www.economia-energetica.org.mx/p_mulas.pdf

[CFE 2009]

Comisión Federal de Electricidad, México, 10 de abril del 2009.

<http://www.cfe.gob.mx/es/>

[CIE 2009]

Centro de Investigación en Energía de la UNAM, 10 de abril del 2009.

http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf

[CIEMAT IDAE 2010]

Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas, 10 de enero del 2010.

http://www.fundacionconstruccionsolidaria.org/Tienda/documentos/aerogeneradores_baja_potencia.pdf

[CONAE 2009]

Comisión Nacional de Energía, 10 de abril 2009.

http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_612_energia_eolica

[IIE 2009]

Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 15 de Abril del 2009.

<http://www.iie.org.mx/>

[IPN 2009]

IPN. Querétaro, 18 de Mayo del 2009

<http://www.cicataqro.ipn.mx/en/tecnologia/VIN1A3.pdf>

[UNIANDÉS 2009]

DSpace en Universidad de los Andes 25 de Marzo del 2009

http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/224/1/mi_1187.pdf

[Windpower 2009]

Windpower, Dinamarca, 8 de abril del 2009.

<http://guidedtour.windpower.org/>