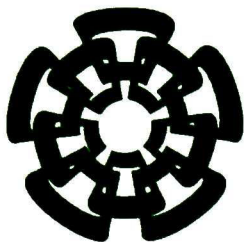


CT-840-SS1
000. 2015



Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional
Unidad Guadalajara

Diseño e Implementación de un Aerogenerador de Eje Vertical

Tesis que presenta:

Javier de la Cruz Soto

para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias

en la especialidad de:

Ingeniería Eléctrica

Directores de Tesis

Dr. José Luis Leyva Montiel

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo

CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
LIBROS

CLASIF..	CT00741
ADQUIS..	CT-840-551
FECHA:	19-06-2015
PROCED..	Dow.-2015
\$	

Diseño e Implementación de un Aerogenerador de Eje Vertical

**Tesis de Doctorado en Ciencias
Ingeniería Eléctrica**

Por:

Javier de la Cruz Soto

M. C. en Ingeniería Eléctrica

Instituto Tecnológico de Morelia 2008-2009

Directores de Tesis

Dr. José Luis Leyva Montiel

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Julio de 2014.

**A mí amada esposa por su cariño
y eterna compañía.**

Agradecimientos

A mi padre, por ser el primero de mis maestros; quien me enseñó a trabajar y a disfrutar el trabajo, quien siempre me puso metas altas, de quien aprendí el valor de la amistad y la lealtad, y quien representa una de las motivaciones para ser mejor cada día.

A mi madre, por su incansable lucha en la vida, por su perseverancia y tenacidad que significan un ejemplo para cada uno de sus hijos, y por ser uno de los pilares de nuestra familia.

A mis hermanas, por su apoyo a lo largo de mi formación personal y académica.

A mi asesor, el Dr. José L. Leyva Montiel, por brindarme su confianza, su orientación y los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto.

A mi co-asesor, el Dr. Juan M. Ramírez Arredondo, por su apoyo y confianza a lo largo del trabajo de investigación.

A los doctores del grupo de diseño electrónico, por facilitar el equipo de cómputo y las herramientas utilizadas durante el proyecto.

A mis compañeros de maestría y doctorado que hicieron más amena mi estancia en el Cinvestav.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por el apoyo económico para la realización de mis estudios de Doctorado, como becario con registro No. 214363.

Resumen

La generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable presentó un crecimiento exponencial en la última década. Este crecimiento fue fomentado gracias a políticas regulatorias y subsidios implementados por los países más industrializados.

Debido a estas políticas, las tecnologías de generación que utilizan las fuentes renovables han mejorado su eficiencia de conversión y se ha disminuido el costo por kW instalado.

La energía eólica es la fuente de energía renovable que ha tenido mayor uso en la última década, gracias a su rentabilidad financiera al instalar parques eólicos a gran escala.

En el diseño y construcción de aerogeneradores existe una tendencia de utilizar generadores de accionamiento directo, sin uso de transmisión mecánica, para disminuir el mantenimiento, el peso y el costo del aerogenerador.

En este proyecto se presenta una metodología de diseño y construcción de aerogeneradores con generadores de accionamiento directo, en particular de un aerogenerador de eje vertical que aprovecha el viento producido por vehículos que circulan en vialidades de doble sentido.

Como resultado del presente trabajo se tiene dos prototipos y sus metodologías de diseño y construcción. El primero es un aerogenerador de eje vertical de 100 W. El segundo es un aerogenerador de eje horizontal de 5 kW que fue diseñado y construido a partir de la metodología de diseño desarrollada con el aerogenerador de 100 W.

Abstract

Electricity generation through renewable energy showed an exponentially growing in the last decade. This growing was encourages by regulatory schemes and subsidies implemented by industrialized countries.

Because of these policies, the generating technology that uses renewable energy has been increased their efficiency and has been decreased the cost per kW installed.

The wind energy is the sort of renewable energy that has been having bigger use in the last decade, due to the financial profitability when large scale wind farm are installed.

In the design and building of wind turbines there is a tendency of use direct drive generator, without mechanical transmission, to decrease the maintenance, the weight and the cost of the wind turbine.

This project shown a methodology for designing and building wind turbines with direct drive generators, particularly a vertical axis wind turbine that uses wind produced by vehicles circulating on a road.

As a result of this work, we have two prototypes and the methodology for designing and building. The first prototype is a vertical axis wind turbine of 100 W. The second prototype is a horizontal axis wind turbine of 5 kW, designed and built with the methodology developed in the vertical axis wind turbine de 100 W.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Turbinas Eólicas en Pequeña Escala	3
1.2.1. Generadores eléctricos para TEPE	3
1.2.2. Tipos de Alabes en una TEPE	5
1.3. Estado del Arte	7
1.3.1. Torque en la Máquina.....	7
1.3.2. DAT del Voltaje.	8
1.3.3. Eficiencia.	9
1.4. Meta y objetivos	10
1.5. Organización de la tesis.....	11
Capítulo 2. Leyes y conceptos para el diseño de un GSIP.....	12
2.1. Energía Mecánica y Torque.....	12
2.1.1. Energía mecánica.....	12
2.1.2. Ecuación de Torque	13
2.2. Enlazamiento de Flujo e Inductancia	15
2.3. Fuerza electromotriz inducida.	16
2.3.1. Ecuación de voltaje en máquinas de CA	17
2.4. Pérdidas	19
2.4.1. Pérdidas en el núcleo	19
2.4.2. Pérdidas por histéresis.	20
2.4.3. Pérdidas parásitas	20
2.4.4. Pérdidas en el devanado	21
2.5. Eficiencia del generador eléctrico	21
2.6. DAT del Voltaje.	22
Capítulo 3. Ecuaciones para el cálculo de la temperatura en los imanes	23
3.1. Conducción.....	23
3.2. Convección	25
3.3. Radiación	25
Capítulo 4. Antecedentes sobre conversión de la energía eólica.....	26
4.1. Energía en el viento y límite Betz	26
4.2. Densidad de potencia eólica	27
4.3. Aerodinámica de los alabes	27
Capítulo 5. Medición del viento en sitio	29
5.1. Determinación del sitio.....	29
5.2. Programa de monitoreo del viento	30
5.2.1. Construcción de anemómetros.....	30
5.2.2. Calibración	31
5.2.3. Procedimiento de instalación.....	32
5.3. Recolección de datos y estimación de energía	33

Capítulo 6. Flujo de diseño.....	38
6.1. Requerimientos de diseño.....	39
6.2. Especificación técnica de diseño	39
6.3. Diseño.....	39
6.3.1. Diseño del GSIP	39
6.3.2. Diseño de los alabes	40
6.4. Construcción.....	42
6.4.1. Etapas de construcción del generador	42
6.4.2. Etapas de construcción de los alabes	42
6.5. Integración.....	42
6.6. Pruebas	42
6.6.1. Pruebas de laboratorio.....	42
6.7. Herramientas de diseño	43
6.7.1. Captura del diseño	43
6.7.2. Simulación.....	43
6.7.3. Documentos de fabricación	44
Capítulo 7. Requerimientos de diseño	45
Capítulo 8. Especificaciones técnicas de diseño	48
8.1. Sistema eólico.....	48
8.1.1. Alabes	49
8.1.2. GSIP	49
Capítulo 9. Diseño del aerogenerador	51
9.1. Diseño del GSIP	51
9.1.1. Cálculo de la velocidad de operación	51
9.1.2. Cálculo del número de polos	52
9.1.3. Longitud y diámetro de la máquina.....	53
9.1.4. Diseño de las ranuras.....	53
9.1.5. Determinación del número de conductores y voltaje de salida	54
9.1.6. Cálculo del calibre del conductor	56
9.1.7. Simulación del GSIP en vacío	56
9.1.8. Simulación del GSIP bajo carga.....	61
9.1.9. Análisis térmico.....	63
9.2. Diseño de los alabes	64
9.2.1. Análisis de fluidos	65
9.2.2. Análisis estructural	67
Capítulo 10. Construcción del aerogenerador	70
10.1. Construcción del GSIP	70
10.1.1. Construcción del estator	70
10.1.2. Construcción del rotor	71
10.1.3. Ensamble del GSIP	72
10.2. Construcción del Alabe.	73
10.2.1. Ensamble	75
Capítulo 11. Pruebas	76

11.1. Pruebas de laboratorio del GSIP.....	76
11.2. Pruebas de campo del aerogenerador	79
Capítulo 12. Diseño de un generador de 5kW	81
12.1. Diseño del GSIP de 5 kW	81
12.1.1. Cálculo de la velocidad de operación	81
12.1.2. Cálculo del número de polos	82
12.1.3. Longitud y diámetro de la máquina.....	82
12.1.4. Diseño de las ranuras.....	83
12.1.5. Determinación del número de conductores y voltaje de salida	84
12.1.6. Cálculo del calibre del conductor	85
12.1.7. Simulación del GSIP en vacío.....	86
12.2. Determinar parámetros que mejoran el desempeño del GSIP.....	91
12.2.1. Modificación de parámetros	91
12.3. Mejorar DAT del Voltaje y torque en vacío.....	93
12.3.1. DAT del Voltaje	94
12.3.2. Torque en vacío	98
12.4. Mejorar la Eficiencia	99
12.4.1. Resultados.....	100
Capítulo 13. Correcciones al diseño del GSIP de 100 W	104
13.1. Correcciones al diseño del GSIP de 100 W.....	104
13.1.1. Simulación bajo carga	107
13.1.2. Análisis térmico.....	109
Capítulo 14. Conclusiones y Trabajos Futuros	111
14.1. <i>Conclusiones</i>	111
14.1.1. Trabajos futuros.....	113
Apéndice A.....	114
Apéndice B.....	115
Apéndice C.....	118
Apéndice D.....	120
Apéndice E.....	121
Apéndice F.....	123
Apéndice G.....	125
Apéndice H.....	126
Apéndice I.....	129
Apéndice J.....	130
Referencias.....	131

Lista de Figuras

Fig. 1-1. Parques eólicos en México.....	3
Fig. 1-2. (a) GSIP de rotor interno. (b) GSIP de rotor externo (c) Generador de flujo axial.....	4
Fig. 1-3. Clasificación de turbinas eólicas en pequeña escala.....	5
Fig. 1-4. Tipos de turbinas de eje horizontal.....	6
Fig. 1-5. Turbinas eólicas de eje vertical.....	7
Fig. 2-1. Interpretación de la ecuación de fuerza de Lorentz.....	14
Fig. 2-2. Núcleo magnético simplemente excitado y su circuito magnético.....	15
Fig. 2-3. Densidad de pérdidas magnéticas típicas de un material magnético.....	19
Fig. 2-4. Flujo de histéresis magnética.....	20
Fig. 2-5. Corrientes de Eddy.....	21
Fig. 3-1. Flujo de calor a través de una pared.....	24
Fig. 4-1. Coeficiente de potencia.....	28
Fig. 5-1. Sitio de monitoreo. (a) Vista superior. (b) Vista Isométrica.....	30
Fig. 5-2. Anemómetro construido.....	31
Fig. 5-3. Túnel de viento.....	31
Fig. 5-4. Calibración: (a) Anemómetro 1. (b) Anemómetro 2. (c) Anemómetro 3.....	32
Fig. 5-5. Instalación de anemómetros: (a) Configuración 1. (b) Configuración 2.....	33
Fig. 5-6. Anemómetros instalados en el periférico.....	33
Fig. 5-7. Anemómetro 1, instalado a 3.6 m. de altura.....	34
Fig. 5-8. Anemómetro 2, instalado a 2.6 m. de altura.....	34
Fig. 5-9. Anemómetro 3, instalado a 1.6 m. de altura.....	35
Fig. 5-10. Configuración 2: Anemómetros.....	35
Fig. 5-11. Anemómetro 1, instalado a 1.2 m. de altura.....	36
Fig. 5-12. Anemómetro 2, instalado a 1.2 m. de altura.....	36
Fig. 6-1. Flujo de diseño del aerogenerador.....	38
Fig. 6-2. Diagrama de flujo para el diseño del GSIP.....	40
Fig. 6-3. Diagrama de flujo para el diseño de los alabes.....	41
Fig. 6-4. Modificaciones geométricas en cada alabe.....	41
Fig. 6-5. Diagrama de flujo de la captura de diseño.....	43
Fig. 7-1. Propuesta a desarrollar.....	45
Fig. 8-1. Cadena de generación del aerogenerador.....	48
Fig. 8-2. Geometría de los alabes del eje vertical.....	49
Fig. 8-3. Geometría de un GSIP de rotor externo.....	50
Fig. 9-1. Medidas de las ranuras del estator (ver Tabla 9-3).....	54
Fig. 9-2. Geometría del GSIP de 100 W.....	57
Fig. 9-3. Simulación de la densidad de flujo magnético en el GSIP.....	58
Fig. 9-4. Conexiones del devanado: Fase A.....	59
Fig. 9-5. Circuito eléctrico para prueba en vacío del GSIP.....	59
Fig. 9-6. Voltaje en vacío del GSIP @ 220 rpm.....	60
Fig. 9-7. Componentes armónicas de la señal de voltaje.....	60
Fig. 9-8. Torque en vacío.....	61
Fig. 9-9. Circuito eléctrico para prueba bajo carga del GSIP.....	61
Fig. 9-10. Potencia producida por el GSIP.....	62
Fig. 9-11. Torque de entrada en el GSIP.....	62

Fig. 9-12. Análisis térmico del GSIP en Ansys.....	63
Fig. 9-13. Temperatura máxima en la máquina.....	64
Fig. 9-14. Alabe sin modificación geométrica.....	65
Fig. 9-15. Simulación en Ansys Fluent: Alabe sin modificación.....	66
Fig. 9-16. Torque a diferentes posiciones.....	66
Fig. 9-17. Cargas aplicadas en el alabe.....	67
Fig. 9-18. Deformación en el aerogenerador.....	67
Fig. 9-19. Esfuerzo en el alabe.....	68
Fig. 9-20. Esfuerzo en la carcasa del generador y la estructura de soporte del alabe.....	68
Fig. 9-21. Cargas aplicadas al mástil.....	69
Fig. 9-22. Deformación y esfuerzo en el mástil.....	69
Fig. 10-1. Corte laser del acero al silicio.....	70
Fig. 10-2. Apilamiento del laminado.....	71
Fig. 10-3. Estator embobinado.....	71
Fig. 10-4. Construcción del rotor.....	71
Fig. 10-5. Adhesión de los imanes.....	72
Fig. 10-6. Ensamble del GSIP.....	72
Fig. 10-7. GSIP: a) Rotor y Estator. b) Ensamble.....	73
Fig. 10-8. Molde para la fabricación de los alabes.....	73
Fig. 10-9. Alabes extraídas del molde.....	74
Fig. 10-10. Aspas construidas.....	74
Fig. 10-11. Ensamble del aerogenerador en el Cinvestav.....	75
Fig. 10-12. Aerogenerador instalado en el Cinvestav.....	75
Fig. 11-1. Prueba de laboratorio al prototipo.....	77
Fig. 11-2. Prueba 1: Voltaje vs Tiempo @ 196 rpm.....	77
Fig. 11-3. Prueba 2: Voltaje vs Tiempo @ 209 rpm.....	78
Fig. 11-4. Prueba 3: Voltaje vs Tiempo @ 155 rpm.....	78
Fig. 11-5. Aerogenerador instalado en el periférico.....	79
Fig. 11-6. Inversor instalado en el periférico.....	79
Fig. 12-1. GSIP de 5 kW (Medidas en Tabla 12-7).....	83
Fig. 12-2. Ángulo de inclinación de los polos.....	83
Fig. 12-3. Geometría del GSIP de 5 kW.....	87
Fig. 12-4. Simulación de la densidad de flujo magnético en el GSIP de 5 kW.....	88
Fig. 12-5. Conexiones del devanado: Fase A, GSIP de 5 kW.....	88
Fig. 12-6. Voltaje en vacío del GSIP @ 320 rpm.....	89
Fig. 12-7. Componentes armónicas de la señal de voltaje: GSIP de 5 kW.....	90
Fig. 12-8. Torque en vacío.....	90
Fig. 12-9. Curvas de magnetización utilizadas para el núcleo del estator.....	92
Fig. 12-10. Diagrama de flujo para el cálculo de la DAT y del Torque.....	93
Fig. 12-11. DAT del voltaje para cada caso de estudio.....	94
Fig. 12-12. Reluctancia vs densidad de flujo magnético.....	95
Fig. 12-13. Densidad de flujo magnético en el GSIP de 5 kW.....	95
Fig. 12-14. Saturación del material M14 (Acercamiento de la Fig. 12-9).....	95
Fig. 12-15. Formas de onda para el caso 1 y casos 17-19, reduciendo longitud.....	96
Fig. 12-16. Formas de onda para los casos que utilizan acero M14.....	97
Fig. 12-17. Armónicos en la señal de voltaje utilizando el acero M14.....	97
Fig. 12-18. Torque en vacío para todos los casos de estudio.....	98

Fig. 12-19. Circuito eléctrico para estimar eficiencia	99
Fig. 12-20. Diagrama de flujo para calcular la eficiencia	100
Fig. 12-21. Inductancia del estator en todos los casos de estudio	101
Fig. 12-22. Eficiencia de los casos de estudio.....	102
Fig. 12-23. Potencia de salida de los casos de estudio	102
Fig. 13-1. Geometría mejorada.....	104
Fig. 13-2. Densidad de flujo magnético en el GSIP: Geometría mejorada.	105
Fig. 13-3. Voltaje en vacío del GSIP @ 80 rpm.....	106
Fig. 13-4. Componentes armónicas de la señal de voltaje: Diseño mejorado.	106
Fig. 13-5. Torque en vacío: a) Diseño construido, b) Diseño mejorado.	107
Fig. 13-6. Potencia de salida del GSIP: a) Diseño construido, b) Diseño mejorado.	107
Fig. 13-7. Torque de entrada al GSIP: Diseño mejorado.	108
Fig. 13-8. Análisis térmico del GSIP en Ansys.....	109
Fig. 13-9. Temperatura máxima en la máquina.....	110
Fig. 14-1. Registros del viento para un periodo semanal	114
Fig. 14-2. Simulación del flujo al 50 % del paso polar	116
Fig. 14-3. Inversor de red	118
Fig. 14-4. Pendiente de operación del inversor	118
Fig. 14-5. Conexiones del devanado, máquina de 100 W	120
Fig. 14-6. Simulación en Ansys Fluent: Alabe torcida 45 grados.....	121
Fig. 14-7. Simulación en Ansys Fluent: Alabe torcida 90 grados.....	121
Fig. 14-8. Simulación en Ansys Fluent: Alabe torcida 135 grados.....	122
Fig. 14-9. Apilamiento de las láminas de acero al silicio.....	123
Fig. 14-10. Construcción del estator del GSIP de 5 kW.....	123
Fig. 14-11. Rotor y estator del GSIP de 5 kW.....	124
Fig. 14-12. Aerogenerador de 5 kW: a) Góndola, b) Diseño completo	124
Fig. 14-13. Simulación del flujo en el GSIP de 5 kW.....	127
Fig. 14-14. Conexiones del devanado, máquina de 5 kW	129

Lista de Tablas

Tabla 3-1. Conductividad térmica de materiales	24
Tabla 3-2. Coeficiente de transferencia de calor por convección.....	25
Tabla 9-1. Dimensiones del imán: Modelo NB14342BIG.	53
Tabla 9-2. Dimensiones del rotor.	56
Tabla 9-3. Dimensiones del estator, ver Fig. 9-1.....	57
Tabla 9-4. Parámetros del GSIP de 100W.....	58
Tabla 9-5. Geometrías modificadas: Alabes giradas sobre su propio eje.....	64
Tabla 11-1. Pruebas de laboratorio del GSIP de 100W.....	76
Tabla 12-1. Dimensiones del imán: Modelo NB50502.....	82
Tabla 12-2. Parámetros geométricos a modificar en el GSIP.....	84
Tabla 12-3. Dimensiones del rotor.	86
Tabla 12-4. Dimensiones del estator.	86
Tabla 12-5. Parámetros del GSIP de 5 kW.....	87
Tabla 12-6. Parámetros de diseño del GSIP de 5 kW.	91
Tabla 12-7. Casos de estudio.....	92
Tabla 13-1. Comparación entre el GSIP construido y mejorado.....	109
Tabla 14-1. Análisis del flujo magnético en el entrehierro, GSIP de 100 W.	115
Tabla 14-2. Análisis del flujo magnético en el entrehierro, GSIP de 5 kW.	126

GLOSARIO

EUA	Estados Unidos de América
TEPE	Turbina Eólica en Pequeña Escala
GWh	Gigawatt-hora
WWEA	World Wind Energy Association
EEPE	Energía Eólica en Pequeña Escala
GSIP	Generador Síncrono de Imanes Permanentes
GI	Generador de inducción
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
CRE	Comisión Reguladora de Energía
NREL	National Renewable Energy Laboratory
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
SENER	Secretaría de Energía
CNA	Comisión Nacional del Agua
A1	Anemómetro 1
A2	Anemómetro 2
A3	Anemómetro 3
ER	Energías Renovables
MWe	Megawatt eléctricos
DPE	Densidad de Potencia Eólica
k	Factor forma
c	Factor de escala
Γ	Función completa de gamma
v_p	Velocidad periférica en m/s
ω	Velocidad angular en rad/s
r	Radio del rotor
p	Número de polos
f	Frecuencia de operación
τ	Paso polar
D_i	Diámetro interior del rotor
B_p	Valor promedio del flujo magnético
B_e	Valor eficaz del flujo magnético
B_m	Valor máximo del flujo magnético
f_b	Factor forma
f_d	Factor de distribución
C_w	Constante del devanado
p	Número de polos
l_m	Longitud de la máquina
B	Densidad de flujo magnético
B_g	Densidad de flujo magnético en el entrehierro
n_s	Ranuras por polo y por fase
H	Intensidad de campo magnético
D_g	Diámetro del entrehierro

δ_f	Diámetro de fondo de ranura
δ_y	Longitud del yugo
δ_p	Porcentaje de abarcamiento polar
δ_l	Profundidad de la ranura
δ_d	Anchura del diente
δ_a	Entrehierro
N	Conductores por ranura
G	Calibre de los conductores
θ_p	Ángulo de inclinación de los polos
δ_i	Longitud del polo
T	Temperatura absoluta
T_s	Número de ranuras
f_{mm}	Fuerza magnetomotriz
f_{em}	Fuerza electromotriz
θ_{se}	Paso de ranura en radianes eléctricos
N_{sm}	Número de ranuras por polo
k_h	Constante de pérdidas por histéresis del acero
k_e	Constante de pérdidas por corrientes de Eddy del acero
η	Eficiencia
P_h	Pérdidas por histéresis
P_e	Pérdidas por corrientes de Eddy
P_c	Pérdidas en el cobre
k_t	Conductividad térmica
ε	Emisividad
h	Coefficiente de transferencia de calor
T_a	Temperatura absoluta
T_e	Temperatura
A	Área
E_c	Energía cinética del viento
V	Volumen
m	Masa del aire
P_v	Potencia del viento
v	Velocidad del viento
C_{PR}	Coefficiente de potencia
λ	Tip speed ratio
n	Revoluciones por minuto
N_c	Número de conductores corregido
<i>NEMA</i>	National Electrical Manufacturers Association
<i>CA</i>	Corriente alterna
<i>CD</i>	Corriente directa
<i>rms</i>	Root mean square

Capítulo 1

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

En los últimos veinte años, la energía eólica ha cobrado importancia en el mundo como una alternativa viable para complementar a las fuentes de generación basadas en la quema de combustibles fósiles.

Los principales parques de generación eólica se encuentran concentrados en China, Estados Unidos, Alemania, España e India. En estos países se concentra el 74 % de la capacidad eólica instalada a nivel mundial [1]. Las políticas ambientales de estos países han hecho posible la instalación de estos parques que producen miles de megawatts hora al día.

En México la instalación de generadores eólicos es reciente y se encuentran concentrados en Oaxaca, Chiapas, Baja California, Nuevo León y Jalisco [2]. La tecnología de generación es importada y son generadores de 1.8 a 3.0 MW. En la Fig. 1-1 se muestra el crecimiento anual de los parques eólicos en México, así como los proyectos que se encuentran en construcción.

Según la Comisión Reguladora de Energía (CRE), el costo estimado por MW eólico instalado es de 2 millones de dólares. La Secretaría de Energía (SENER) publicó en enero de 2013 [3] que México tiene una capacidad eólica competitiva de 20,000 MW, de los cuales se han otorgado permisos por 4,100 MW, por lo tanto, tenemos una capacidad sin explotar de 15,900 MW equivalentes a un mercado de 31,500 millones de dólares para los fabricantes de aerogeneradores.

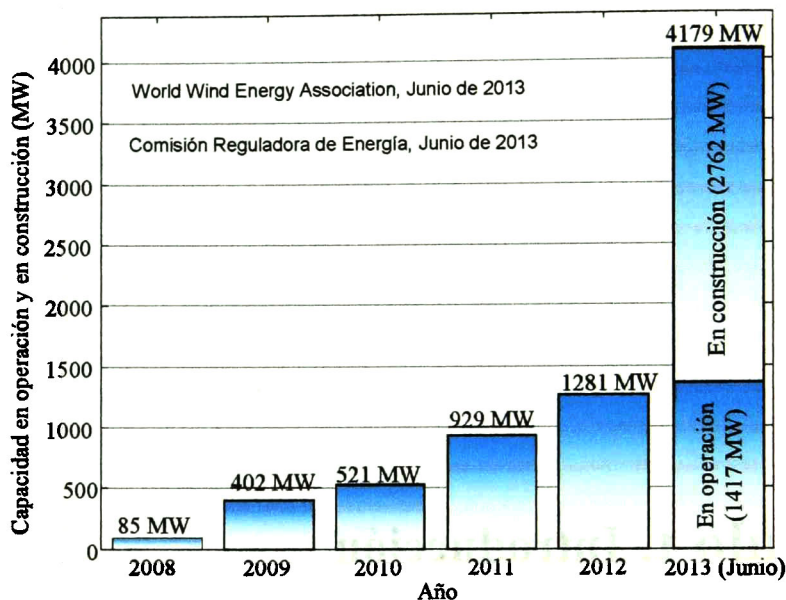


Fig. 1-1. Parques eólicos en México.

En el país tenemos un pequeño grupo de desarrolladores de tecnología al interior de las Universidades y Centros de Investigación y una compañía privada [4] que diseña y manufactura generadores eléctricos de hasta 30 MW.

En Cinvestav Unidad Guadalajara nos hemos dado a la tarea de diseñar un generador eólico vertical de 100 W que aprovecha los vientos provocados por las presiones y vacíos inducidos por el paso de los vehículos en las carreteras de doble sentido.

1.2. Turbinas Eólicas en Pequeña Escala

El concepto de Turbina Eólica en Pequeña Escala (TEPE) no se encuentra totalmente definido en el sector, la definición es amplia y va desde los 6 watt hasta los 300 kW [5]. Sin embargo, el estándar IEC 61400-2 define una TEPE como aquel generador cuyas aspas tienen un área de barrido menor a 200 m² y una potencia aproximada a 50 kW. La Asociación Mundial de Energía Eólica (WWEA) considera una TEPE como los equipos de generación menores a 100 kW. Esta definición será tomada como referencia en el resto del documento.

1.2.1. Generadores eléctricos para TEPE

En el diseño de una TEPE se han utilizado los siguientes tipos de generadores:

- Generadores Síncronos de Imanes Permanentes (GSIP) [6]-[25]
- Generadores de inducción [26]-[36] y
- Generadores de corriente directa [37][38].

1.2.1.1. Generadores síncronos de imanes permanentes

Tres diferentes topologías se han reportado en la utilización de los GSIPs (Fig. 1-2):

- **GSIP de rotor interno**
Es la forma tradicional utilizada en máquinas eléctricas rotativas donde los polos se encuentran girando al interior del estator. Aquí, el diámetro de la máquina es mayor al diámetro del rotor.
- **GSIP de rotor externo**
Su principal característica es la baja velocidad de operación y favorece su uso en turbinas de viento cuando se desea omitir la transmisión. El uso de esta topología se dio a finales de la década de 1990 de acuerdo a los registros de patentes [39] y artículos [6]-[15] en revistas internacionales. Esta topología presenta menores dimensiones en comparación con las otras mencionadas.
- **GSIP de flujo axial**
Este tipo de generador permite el incremento en el número de polos, es de bajo costo y requiere un diámetro mayor que un GSIP de rotor externo con las mismas características. Desde la década de 1960 se reportó en patente [40] y en artículos técnicos desde 1980 [16]-[25].

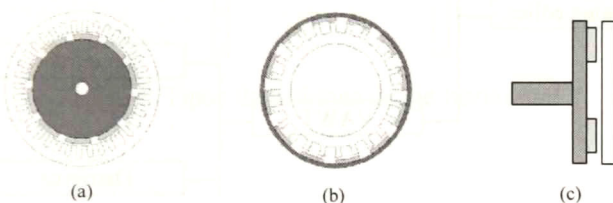


Fig. 1-2. (a) GSIP de rotor interno. (b) GSIP de rotor externo (c) Generador de flujo axial.

1.2.1.2. Generadores de inducción

Los Generadores de Inducción (GI) suelen utilizarse en sistemas de velocidad variable, por que al estar directamente conectados a la red, la frecuencia la impone el sistema eléctrico. Debido a lo anterior, no necesitan sincronización, sin embargo requieren la red eléctrica para operar. Existen dos tipos de generadores de inducción, los auto-excitados y los doblemente alimentados.

• **GI auto-excitado**

Son máquinas de inducción de jaula de ardilla con capacitores conectados en serie y paralelo en sus terminales para el proceso de auto-excitación [41]. En [26]-[29] se propone el uso de GI auto-excitados para usarse en sistemas eólicos e hidráulicos a pequeña escala.

• **GI doblemente alimentado**

Cuentan con un devanado trifásico en el rotor y en el estator. Podrían abastecer de energía con ambas terminales (Estator y rotor) y es un modelo muy utilizado en aerogeneradores a gran escala y en algunos casos se han usado en TEPEs [30]-[36].

1.2.1.3. Generadores de Corriente directa

El uso de generadores de corriente directa en aerogeneradores ha sido evaluado en [37] y [38] donde se argumenta que presentan una buena característica de regulación de voltaje. Además, no hay que rectificar la señal producida, lo que reduce los elementos en su construcción. No obstante, sus costos de construcción y mantenimiento son elevados.

1.2.2. Tipos de Alabes en una TEPE

Las TEPEs utilizan dos tipos de rotores, turbinas de eje horizontal (HAWT) y turbinas de eje vertical (VAWT), ver Fig. 1-3.

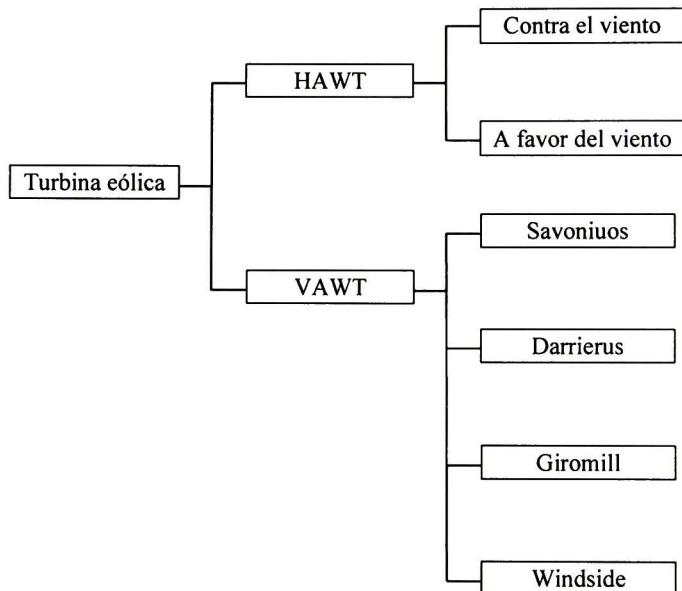


Fig. 1-3. Clasificación de turbinas eólicas en pequeña escala

1.2.2.1. HAWT

Son las más utilizadas en aerogeneradores y se encuentran disponibles a cualquier escala. Existen dos tipos de configuraciones; a favor y en contra del viento, ver la Fig. 1-4.

A favor de viento

En este tipo de turbinas las aspas se pueden flexionar sin causarle daño a la torre, sin embargo, al estar el generador antes de las aspas se pueden producir turbulencias.

En contra del viento

Es el tipo de turbinas que más se utiliza, en ella se evitan turbulencias al estar las aspas primero que la torre. Sin embargo, las aspas deben estar lejos de la torre para evitar daños en condiciones extremas.

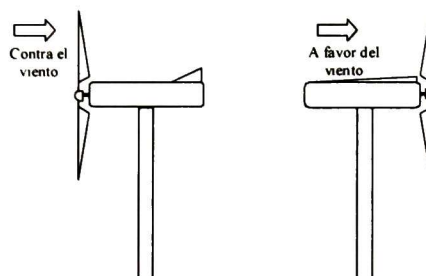


Fig. 1-4. Tipos de turbinas de eje horizontal

1.2.2.2. VAWT

Las turbinas de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento y por ello se les llama panemonos (todos los vientos) [42], ver Fig. 1-5.

Se han hecho prototipos experimentales de este tipo de turbinas de hasta 4 MW de capacidad, sin embargo solo se han comercializado unidades en pequeña escala. Algunos tipos de turbinas de eje vertical son:

Darrieus

Es la turbina eólica de eje vertical que más se ha fabricado y se han realizado prototipos de hasta 4 MW. Se caracteriza por sus palas en forma de C, que se asemejan a un batidor de huevos.

Savonius

Extrae la energía del viento por medio de dos semicírculos ahuecados. Tiene buen torque de partida pero su eficiencia es menor comparada con el rotor Darrieus.

Giromill

Conocida también como Darrieus tipo H, la más simple de construir y presenta características de operación similares a la turbina Darrieus.

Windside

Esta turbina es relativamente nueva y tiene la característica de nula contaminación acústica.

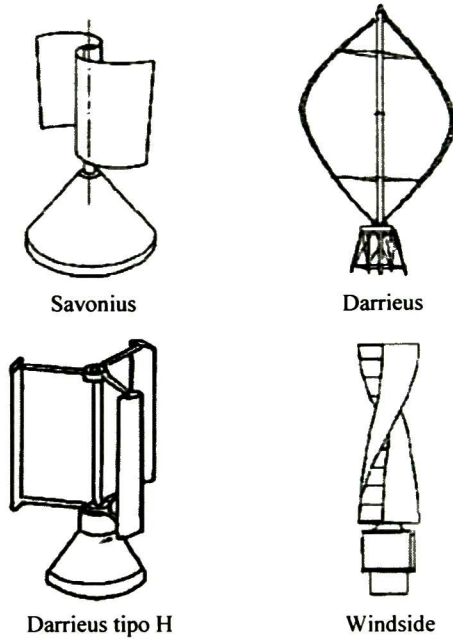


Fig. 1-5. Turbinas eólicas de eje vertical

1.3. Estado del Arte

1.3.1. Torque en la Máquina

El torque en una máquina eléctrica rotativa se define como una medida de la fuerza del giro producida en el entrehierro, en relación con la longitud de la máquina. El torque de arranque en un GSIP acoplado a una turbina eólica se debe mantener tan bajo como sea posible. Por ello se han realizado estudios para determinar los parámetros a modificar para reducir el valor del torque. Las modificaciones propuestas para reducir el torque de arranque se enlistan a continuación:

- Ángulo de inclinación para la ranura o el polo.
- Forma del polo
- Abertura de ranura
- Ranuras por polo
- Abarcamiento polar
- Asimetría de las ranuras y los polos
- Tipo de montaje del imán

Las modificaciones tienen como objetivo disminuir el efecto del campo magnético producido sobre el núcleo del estator para disminuir el torque de arranque en la máquina.

Capítulo I

La primera modificación corresponde a variar el ángulo de inclinación del polo o de la ranura. De acuerdo a la literatura [44][49][51] estos cambios pueden ser entre 1.5° a 6° .

La segunda modificación propone usar diferentes formas geométricas en los polos, es decir, usar imanes con forma diferente al bloque o imanes cóncavos [44], [45] y [46].

La tercera propuesta propone modificar la abertura de la ranura, incrementando el espacio por donde entran los conductores [44] y [50].

La cuarta propuesta corresponde a modificar el número de ranuras por polo. es decir, tener un número fraccionario de ranuras por polo. Esta estrategia permite disminuir el torque de arranque en la máquina ya que evita que las caras polares coincidan con las caras de las ranuras. reduciendo así la fuerza de atracción del imán [48] y [52] [51].

La sexta propone modificar el abarcamiento polar del rotor, es decir, modificar la relación entre el área ocupada por los imanes y el área total del rotor [45].

La séptima propuesta evalúa la construcción asimétrica del estator y del rotor. En el estator la modificación corresponde a construir un núcleo con ranuras de diferentes anchos. Y en el rotor corresponde a cortar el polo y desplazar una de las partes una distancia de 1° a 6° de la circunferencia del rotor [47].

La octava propuesta presenta dos formas de montar el imán en el rotor, la primera propone un montaje superficial y la segunda un montaje embebido. El montaje superficial ayuda a reducir el torque de arranque en la máquina [44].

En los estudios antes mencionados solo se analiza el torque en la máquina y no se consideran aspectos como eficiencia, forma de onda del voltaje y la potencia de salida.

1.3.2. DAT del Voltaje.

La DAT del voltaje se define como la energía contenida en todas las componentes armónicas de una señal que difieren de la frecuencia fundamental. Varios autores han desarrollado metodologías de diseño para GSIP, sin embargo no siempre toman en cuenta la DAT de la señal de voltaje. En [53] estudian el mejoramiento de la DAT del voltaje en una máquina de rotor interno que presenta un porcentaje de abarcamiento polar del 100%. El método propuesto consiste de modificaciones en el porcentaje de abarcamiento polar hasta alcanzar el mejor valor en la DAT. Los autores encontraron que un porcentaje de abarcamiento polar del 81 % produce una DAT en la señal de voltaje de 1.10 %. En [54] se estudia un GSIP de rotor externo y los autores proponen alcanzar un compromiso entre la DAT, el número de polos y el ángulo de inclinación de los polos. La DAT del voltaje alcanza un valor del 0.95 % para un rotor de 14 polos ensamblados con un ángulo de inclinación de 15° .

Lograr precisión en este tipo de simulaciones es una tarea complicada debido a que se requieren las curvas de magnetización de los materiales, la geometría correcta de la máquina y habilidad para utilizar software CAD y de elemento finito.

1.3.3. Eficiencia.

La eficiencia en la conversión de la energía en máquinas eléctricas es un importante factor para cuantificar la producción de energía en términos del costo. Los ingenieros de diseño siempre desean mantener el valor de eficiencia tan alto como sea posible. El valor de la eficiencia depende del tamaño físico de la máquina; esto es, mientras mas grande sea la máquina, la eficiencia deberá ser mayor. Esto sucede porque al incrementar el tamaño físico de la máquina, se pueden utilizar conductores con mayor sección transversal y menores pérdidas. Sin embargo, incrementar las dimensiones de la máquina implica un incremento en costo. Por lo tanto, hay un compromiso entre la capacidad, el costo y el tamaño físico disponible.

No hay un estándar relacionado a la eficiencia de máquinas de imanes permanentes. En este documento se tomará como referencia el valor para motores de inducción de 5.5 kW. Por ejemplo, el estándar IE2-High Premium Efficiency [55] indica valor de eficiencia de 89.2 % en máquina de 2 polos y 88 % para máquinas de 6 polos. El estándar NEMA Premium [55] indica una eficiencia del 89.5 % para máquinas de 2 polos y el 91 % para máquinas de 6 polos. Este último valor se utilizará como referencia para analizar el diseño de una máquina de 5 kW.

Con el fin de mejorar la eficiencia de la máquina algunos autores han analizado el diseño de GSIPs considerando modificaciones en la geometría. Por ejemplo, en [56] se lleva a cabo un re-diseño de un GSIP, partiendo de una máquina de inducción comercial que se transforma en una máquina de imanes permanentes. Ellos modifican la longitud de la máquina y las vueltas por bobina, para incrementar la eficiencia desde el 89 % al 90.2 %. La máquina eleva su potencia de salida de 2,438 W a 2,616 W.

En la referencia [57] se realizan modificaciones geométricas en un GSIP de 600 W. Los autores modifican la longitud y el diámetro del rotor, el porcentaje de abarcamiento polar y la longitud del polo. El valor de eficiencia alcanzado es de 89.5 % a 100 rpm. El diámetro y la longitud de la máquina son 145 mm y 218 mm, respectivamente. Estas medidas corresponden a una máquina de mayor potencia.

Un problema de optimización en el diseño de un GSIP es formulado en [58], el objetivo es maximizar la producción anual de energía y minimizar el volumen de los imanes permanentes. Los principales parámetros modificados fueron las vueltas por bobina, el calibre de los conductores, el diámetro del rotor, el porcentaje de abarcamiento polar y el flujo residual de los imanes en una máquina de 1,625 W con 87.8% de eficiencia. El valor de la eficiencia es mejorado hasta llegar al 93.4 % con una potencia de salida de 2,989 W a 250 rpm. Ellos proponen colocar 1152 conductores por fase de calibre 20 y no se presenta evidencia de que las ranuras tengan espacio suficiente para este número de conductores.

Capítulo I

Un método de diseño paramétrico que combina técnicas analíticas y de elemento finito es propuesto en [59]. Los autores minimizan las pérdidas, optimizan las dimensiones del estator y la distribución de la densidad del flujo magnético por medio de un modelo analítico. Trabajan con una máquina de 22 kW que opera a 2100 rpm con una eficiencia del 92 %. En [60] un algoritmo analítico de optimización es usado para maximizar la potencia transferida en el entrehierro bajo restricciones de esfuerzo tangencial en el estator. Los parámetros modificados son el diámetro interno y externo en el estator, la longitud del estator, ancho y profundidad del diente. Como resultado solo se muestra el torque en la máquina.

Un GSIP polifásico es presentado en [61], cuenta con 4 sistemas trifásicos en el devanado del estator de un generador de 3.5 kW. Si se incrementa el número de fases en la máquina, la eficiencia también incrementa y las componentes armónicas se reducen [61]. Esta estrategia es adecuada para diseñar turbinas eólicas de accionamiento directo a gran escala.

1.4. Meta y objetivos

Meta

Concebir, implementar y probar una metodología de diseño que permita realizar el diseño de aerogeneradores, mejorando los parámetros de eficiencia, torque en vacío y DAT del voltaje del GSIP. En particular se desea que los aerogeneradores de eje vertical aprovechen los vientos provocados por el paso de vehículos que circulan en carreteras de doble sentido para su uso en sistemas de alumbrado público.

Objetivos

Definir un flujo de diseño, los procedimientos de diseño y los procedimientos de construcción de turbinas eólicas tipo windside de GSIP de rotor externo.

- Realizar un programa de monitoreo del viento en el sitio de instalación del aerogenerador para dimensionar la máquina.
- Desarrollar una metodología de diseño de un generador síncrono de rotor externo y de imanes permanentes.

Desarrollar una metodología de diseño de los álabes para turbinas de eje vertical.

- Diseñar y construir un generador síncrono de rotor externo e imanes permanentes.

Diseñar y construir los alabes y la estructura de una turbina de eje vertical.

- Realizar pruebas de laboratorio y en campo del prototipo construido.

Este trabajo permitirá, también, estudiar el torque en la máquina, la forma de onda del voltaje, la eficiencia y el comportamiento térmico.

Capítulo 1

1.5. Organización de la tesis

Capítulo 1: presenta el estado actual de la generación de energía Eolo-eléctrica en México y su potencial de desarrollo. Muestra los tipos de generadores eléctricos y alabes utilizados en aerogeneradores de pequeña escala. Describe el trabajo de investigación a desarrollar, así como las metas y objetivo que se pretenden alcanzar.

Capítulo 2: muestra la teoría básica requerida en el diseño eléctrico del generador de imanes permanentes.

Capítulo 3: describe la teoría requerida para estimar la temperatura en los imanes del GSIP

Capítulo 4: se presentan antecedentes sobre energía eólica y se indica como estimar la energía cinética en el viento.

Capítulo 5: presenta los resultados del programa de monitoreo del viento en el sitio de instalación del aerogenerador de eje vertical.

Capítulo 6: describe el flujo diseño del aerogenerador. Este flujo inicia con los requerimientos de diseño, enseguida inician las etapas de diseño para las piezas del aerogenerador, se generan planos de construcción, se fabrican las piezas y se integran para hacer las pruebas del prototipo.

Capítulo 7: muestra los requerimientos de diseño, sus restricciones y sus dependencias. Esta es una guía que permite identificar las condiciones que debe cumplir el diseño a desarrollar.

Capítulo 8: se describen las especificaciones técnicas de diseño de los alabes y del generador de imanes permanentes.

Capítulo 9: se muestra el procedimiento de diseño de los elementos del aerogenerador de eje vertical.

Capítulo 10: se muestra el proceso de construcción de las piezas del GSIP y de los alabes del aerogenerador.

Capítulo 11: presenta las pruebas realizadas al prototipo para verificar el desempeño de los modelos desarrollados.

Capítulo 12: se describe el procedimiento de diseño de un GSIP de 5 kW.

Capítulo 13: se presentan las correcciones realizadas al GSIP de 100 W.

Capítulo 14: se dan las conclusiones del trabajo de tesis y los trabajos a futuro.

Capítulo 2. Leyes y conceptos para el diseño de un GSIP

En este capítulo se describe la teoría básica requerida para realizar el diseño eléctrico del GSIP. Se presentan aspectos como el torque, inductancia, voltaje inducido, pérdidas y DAT del voltaje.

2.1. Energía Mecánica y Torque.

2.1.1. Energía mecánica

El torque producido en un GSIP es uno de los parámetros más importantes a conocer, ya que el torque en vacío determina el arranque del aerogenerador. El torque en el GSIP equivale a la fuerza producida en el entrehierro multiplicado por la distancia entre el eje y el entrehierro. El momento de una fuerza con respecto a un punto da a conocer en qué medida existe capacidad en una fuerza o sistema de fuerzas para cambiar el estado de la rotación de un cuerpo alrededor de un eje que pase por dicho punto. El momento tiende a provocar una aceleración angular en el cuerpo sobre el cual se aplica y es una magnitud característica en elementos que trabajan sometidos a torsión (como los ejes de maquinaria).

La energía mecánica aplicada a un objeto es llamada trabajo. El trabajo es igual al producto de la fuerza aplicada a un objeto multiplicada por el desplazamiento del objeto en una dirección dada [62]. De esta forma, una cantidad diferencial de energía mecánica puede ser escrita como:

$$dW_m = F dx \quad (2-1)$$

Donde W_m es la energía mecánica, F es la fuerza en la dirección x , y dx es un diferencial de longitud en la dirección x .

Capítulo 2

La potencia es la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo, o la razón de cambio de la energía con respecto al tiempo. Por lo tanto, la potencia mecánica es dada por:

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fv \quad (2-2)$$

donde v es la velocidad de movimiento.

Cuando se trabaja con máquinas rotativas uno trata con torques en lugar de fuerzas. El torque T es la fuerza tangencial F , que actúa sobre un punto conectado a un brazo de palanca de radio r , es decir:

$$T = Fr \quad (2-3)$$

Entonces, una cantidad diferencial de trabajo está dada por:

$$dW_m = F dx = Fr d\theta = T d\theta \quad (2-4)$$

donde θ es la posición angular y:

$$x = r\theta \quad (2-5)$$

Finalmente la potencia mecánica se define como:

$$P_m = \frac{dW_m}{dt} = F \frac{d\theta}{dt} = T\omega \quad (2-6)$$

donde ω es la velocidad de rotación en radianes por segundo.

2.1.2. Ecuación de Torque

Existe una expresión basada en la fuerza mutua de la interacción entre el movimiento de cargas puntuales y un flujo magnético. Esta relación es descrita por la ecuación de fuerza de Lorentz,

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2-7)$$

donde q es el valor de carga, v es la velocidad de la carga, B es la densidad de flujo magnético actuando sobre la carga, y \times denota el producto vectorial de la velocidad y la velocidad del flujo magnético. Usando la definición del producto vectorial, la magnitud de la fuerza resultante es:

$$F = qv B \sin \alpha \quad (2-8)$$

Capítulo 2

donde α es el ángulo entre los vectores v y B . La dirección de la fuerza producida se muestra en la Fig. 2-1. Esta ecuación es aplicable en el diseño de máquinas eléctricas rotativas.

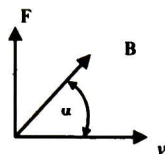


Fig. 2-1. Interpretación de la ecuación de fuerza de Lorentz

Considerando un elemento de carga diferencial dq , y expresando la velocidad como dl/dt , donde l es la longitud a lo largo de la trayectoria del movimiento, se determina, de (2-8), la fuerza diferencial producida por una diferencia de carga:

$$dF = dq \frac{dl}{dt} B \quad (2-9)$$

Siendo la corriente la razón de cambio entre la carga respecto al tiempo, $i = dq/dt$, entonces la expresión (2-9) puede ser escrita como:

$$dF = iB dl \quad (2-10)$$

Basados en esta expresión, la fuerza total experimentada por un cable que conduce una corriente i en la presencia de un campo magnético B es dada por la integral:

$$F = \int iB dl \quad (2-11)$$

Si el cable es recto y se expone a un campo magnético uniforme sobre la longitud L , esta integral tiene la solución:

$$F = BLi \quad (2-12)$$

Esta ecuación es conocida como la ley BLi y es útil para calcular la fuerza o torque por la interacción de un campo magnético y un cable que transporta corriente.

Una extensión de esta ecuación para estimar el torque desarrollado en una máquina rotativa con un número de ranuras por polo y por fase igual a uno [62], es:

$$T_m = (N_p B_g L_m S i) R_{ro} \quad (2-13)$$

donde T_m representa el torque desarrollado en la máquina, N_p el número de polos en la máquina, B_g el flujo magnético en el entrehierro, L_m la longitud axial de la máquina, S los conductores por ranura, i la corriente por fase y R_{ro} el diámetro del entrehierro.

2.2. Enlazamiento de Flujo e Inductancia

Esta sección comienza retomando el concepto de inductancia propia. Consideremos el circuito magnético mostrado en la Fig. 2-2 [62], se dice que este circuito está simplemente excitado debido a que solo tiene una bobina para producir un campo magnético. El flujo magnético generado a lo largo del núcleo es causado por la circulación de la corriente I por la bobina, donde la dirección del flujo está dada en sentido de las agujas del reloj (regla de la mano derecha).

Usando el circuito magnético equivalente de la ley de ohm, el flujo magnético está dado por:

$$\phi = \frac{NI}{R} \tag{2-14}$$

donde R es la reluctancia vista por la fuente de fuerza magnetomotriz (fmm).

El flujo magnético total que pasa a través de las N vueltas del devanado se le llama “flujo enlazado” y se define como:

$$\lambda = N\phi \tag{2-15}$$

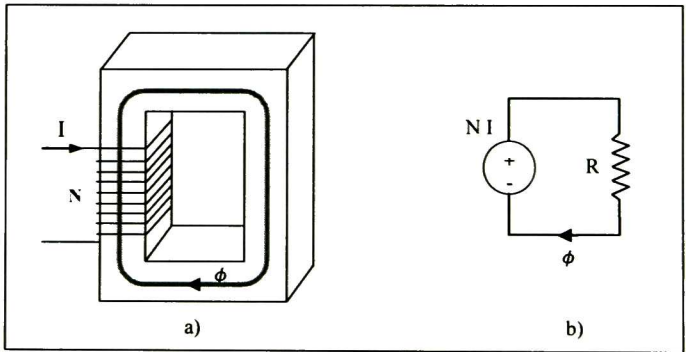


Fig. 2-2. Núcleo magnético simplemente excitado y su circuito magnético

Combinando (2-14) y (2-15), tenemos:

$$\lambda = \frac{N^2}{R} I \tag{2-16}$$

Esta expresión muestra que el enlazamiento del flujo es directamente proporcional a la corriente que fluye en la bobina.

A la relación, constante, que existe entre la corriente y el flujo enlazado se define como inductancia.

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N^2}{R} = N^2 P \quad (2-17)$$

donde $P = R^{-1}$. Esta relación aplica solo para los casos cuando el material magnético es lineal o se asume lineal. Cuando el material magnético es no lineal, la inductancia se vuelve una función del nivel de excitación.

La ecuación (2-17) también puede expresarse como la relación entre el cambio diferencial en los concatenamientos de flujo y el cambio diferencial en la corriente. Es decir [63]:

$$L = N \frac{d\phi}{dI} \quad (2-18)$$

2.3. Fuerza electromotriz inducida.

La fuerza electromotriz (*fem*) inducida en una espira cerrada, estacionaria, sujeta a una tasa de cambio de densidad de flujo magnético respecto al tiempo es [63]:

$$e_t = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{ds} \quad (2-19)$$

A la fem inducida se conoce también como *fem de transformación* y a (2-19) como la *ecuación de transformación* en forma integral.

Para conductores en movimiento con velocidad \vec{v} dentro de un campo magnético \vec{B} se induce una fem adicional provocada por una acción de corte del flujo la cual está dada por:

$$e_m = \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} \quad (2-20)$$

y se conoce como *fem de movimiento*, o voltaje de velocidad.

Para una espira cerrada que se mueve en un campo magnético, la fem total inducida es igual a la suma de la fem de transformación y la fem de movimiento, es decir,

$$e = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{ds} + \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{dl} \quad (2-21)$$

Esta ecuación es la definición matemática de la *ley de inducción de Faraday* que en forma concisa, se escribe:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (2-22)$$

donde el flujo total que pasa a través de la espira es:

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (2-23)$$

Las ecuaciones (2-22) y (2-23) proporcionan la fem inducida en una espira cerrada con una sola vuelta. Para espiras con N vueltas, la fem inducida es N veces mayor.

2.3.1. Ecuación de voltaje en máquinas de CA

El valor del voltaje efectivo inducido en cada fase de un devanado con una ranura por polo y por fase, y con bobinas de paso polar completo, se da mediante la ecuación [64]:

$$E = 4ff_b s \phi_p \times 10^{-8} \text{ Volts} \quad (2-24)$$

donde f es la frecuencia en ciclos por segundo, f_b es el factor forma (ver apéndice B), s es el número de espiras en serie por fase y ϕ_p es el flujo por polo.

Cuando no se tiene una ranura por polo y por fase se debe calcular el *factor de distribución* del embobinado k_d y agregarlo como multiplicador a la expresión (2-24). k_d es la relación entre la suma vectorial y la suma algebraica del voltaje inducido en el devanado.

$$k_d = \frac{\text{sen } \frac{180^\circ}{2 \times q}}{n_s \times \text{sen } \frac{180^\circ}{2 \times q \times n_s}} \quad (2-25)$$

donde n_s representa el número de ranuras por polo y por fase y θ_{se} el paso de ranuras en radianes eléctricos. θ_{se} esta dada por le relación:

$$\theta_{se} = \frac{\pi}{N_{sm}} \quad (2-26)$$

donde N_{sm} es el número de ranuras por polo.

Cuando las dos partes de la bobina no están colocadas en ranuras que estén a distancia polar, es decir, a 180 grados eléctricos, se tiene que multiplicar la expresión (2.24) por un término extra llamado factor de paso o *factor cuerda* k_p . Este factor corresponde al coseno de la mitad del ángulo en grados eléctricos, que subtiende.

$$k_p = \cos \left(\frac{\pi - \delta}{2} \right) \quad (2-27)$$

donde

$$\delta = \frac{360 \times p \times Y_s}{2 \times T_s} \quad (2-28)$$

Capítulo 2

δ representa la distancia en grados eléctricos de un extremo a otro de la bobina y Y_s representa el paso de ranura y se obtiene dividiendo el número de ranuras sobre el número de polos. T_s representa el número de ranuras en el estator.

La fórmula general para el valor efectivo del voltaje inducido por fase, es:

$$E = 4ff_b k_d k_p s \phi_p \times 10^{-8} \text{ Volts} \quad (2-29)$$

y el flujo total es:

$$\phi_t = \frac{\phi_p p}{f_d} \text{ líneas} \quad (2-30)$$

donde p es el número de polos de la máquina y f_d es el factor de distribución del flujo magnético.

de (2-29) se obtiene:

$$\phi_p = \frac{E \times 10^8}{4ff_b k_p k_d s} \text{ líneas} \quad (2-31)$$

y combinando (2-30) y (2-31):

$$\phi_t = \frac{Ep \times 10^8}{4ff_b f_d k_p k_d s} \quad (2-32)$$

Considerando que,

$$s = \frac{N}{2} \quad (2-33)$$

$$f = \frac{np}{2 \times 60} \quad (2-34)$$

donde N es el número de conductores en serie por fase y n es la velocidad angular en revoluciones por minuto.

Sustituyendo (2-33) y (2-34), en (2-32):

$$\phi_t = \frac{E \times 60 \times 10^8}{nN C_w k_p} \quad (2-35)$$

donde

$$C_w = f_b f_d k_d \quad (2-36)$$

y C_w es llamada *constante del devanado*.

Finalmente el voltaje en el devanado resulta,

$$E = \frac{\phi_t n N S k_p C_w}{60 \times 10^{11}} \quad (2-37)$$

Esta expresión se utiliza para obtener el voltaje en terminales en la etapa de pre-diseño del GSIP.

2.4. Pérdidas

2.4.1. Pérdidas en el núcleo

En el núcleo del estator se presentan dos tipos de pérdidas, las pérdidas parásitas y las pérdidas por histéresis. A la combinación de pérdidas se les llama pérdidas en el núcleo. En la Fig. 2-3 se muestran las características típicas de pérdidas en el núcleo para un material magnético a diferentes frecuencias [65].

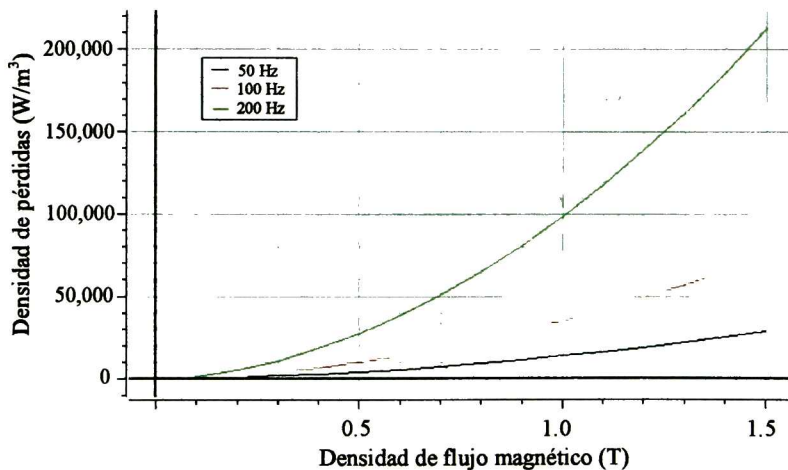


Fig. 2-3. Densidad de pérdidas magnéticas típicas de un material magnético

Las pérdidas están en función del volumen del material magnético. Utilizando las gráficas, las pérdidas se pueden calcular de la siguiente manera: se determina la frecuencia de trabajo, se produce una densidad de flujo magnético en Teslas y utilizando la gráfica correspondiente se obtiene la densidad de pérdidas, misma que multiplicada por el volumen nos da las pérdidas en W.

Otra manera de calcular las pérdidas para el caso de un GSIP con densidad de flujo magnético no distribuida uniformemente es calcular algebraicamente las pérdidas parásitas y las pérdidas por histéresis en el núcleo del estator.

2.4.2. Pérdidas por histéresis.

Las pérdidas por histéresis se producen debido a la memoria magnética que tiene el material con el que está construido el núcleo del estator, esto es, el material almacena flujo magnético en cada ciclo de excitación. A este fenómeno se le llama ciclo de histéresis, ver Fig. 2-4. En general, las pérdidas de energía por histéresis se describen mediante la siguiente ecuación:

$$P_h = k_h f B_m^n \quad (2-38)$$

donde k_h es una constante que depende del tipo de material y sus dimensiones, f es la frecuencia de la excitación aplicada, B_m es la densidad máxima de flujo magnético dentro del material, y n es un exponente dependiente del material que toma valores entre 1.5 y 2.5.

El material magnético a utilizar en la construcción del aerogenerador es el acero al silicio tipo M19, para el cual $n = 2$ (basado en resultados experimentales [66]). Las unidades de P_h están en W/m^3 .

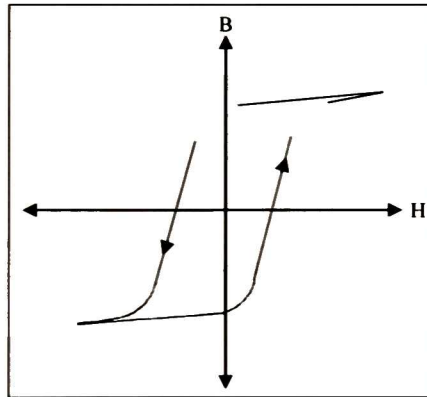


Fig. 2-4. Flujo de histéresis magnética

2.4.3. Pérdidas parásitas

Las pérdidas parásitas son debidas a una corriente eléctrica inducida dentro de un material ferromagnético bajo una excitación variante en el tiempo, llamada corriente de Eddy [62]. Las corrientes de Eddy inducidas que circulan dentro del material disipan potencia en función a la resistividad del material. Un valor aproximado de las pérdidas por corrientes de Eddy se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \quad (2-39)$$

donde k_e es una constante particular del material. En este caso, la pérdida de energía es proporcional al cuadrado de la frecuencia multiplicada por el cuadrado de la densidad máxima de flujo magnético. Lo que nos permite asegurar que las pérdidas por histéresis son dominantes en bajas frecuencias y las pérdidas de Eddy dominan en altas frecuencias.

El camino más directo para reducir las pérdidas de Eddy es incrementar la resistividad del material. Por esta razón en la construcción de aparatos eléctricos se utiliza el apilamiento de pequeñas laminaciones de material aisladas por una pequeña capa de material no conductor, ver Fig. 2-5. Al realizar el apilamiento de láminas la resistividad del material se incrementa considerablemente en dirección del apilamiento.

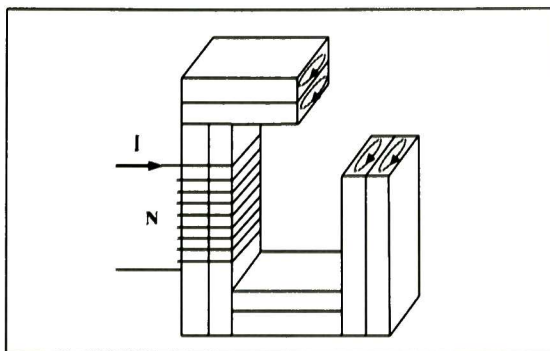


Fig. 2-5. Corrientes de Eddy

Las laminaciones disminuyen la cantidad de material magnético disponible para llevar flujo dentro de un área de sección transversal del núcleo. Este factor es conocido como factor de apilamiento y se define como:

$$k_{st} = \frac{\text{Sección transversal ocupada por el material}}{\text{Sección transversal total}} \quad (2-40)$$

2.4.4. Pérdidas en el devanado

Las pérdidas en el devanado se producen por el efecto Joule, es decir, el fenómeno por el cual al circular una corriente eléctrica en un conductor, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor. La cantidad de calor producida es proporcional al cuadrado de la corriente que circula por el conductor multiplicado por la resistencia del conductor [69], ecuación (2-41).

$$P_c = (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \times R \quad (2-41)$$

donde i_a , i_b e i_c son las corrientes de las fases a , b y c respectivamente, y R es la resistencia por fase del devanado.

2.5. Eficiencia del generador eléctrico

La eficiencia en un generador eléctrico se define como la relación que hay entre la potencia mecánica de entrada en el eje de la máquina y la potencia eléctrica que se produce en el devanado. En máquinas eólicas la eficiencia es un parámetro importante a mejorar, pues de su valor depende la energía eléctrica producida y consecuentemente el tiempo que se tomará en retornar la inversión financiera hecha sobre la máquina.

$$\eta = \frac{T\omega}{P_h + P_e + P_c} \quad (2-42)$$

donde η representa la eficiencia del generador. A lo largo del documento se utiliza (2-42) para estimar el valor de la eficiencia del GSIP:

2.6. DAT del Voltaje.

La DAT está definida por el estándar IEEE-519 [71] como la energía contenida en todas las componentes de una señal que difieren de la frecuencia fundamental. La DAT se utiliza como un índice para cuantificar las componentes armónicas de una señal [70]. Su valor se calcula como:

$$DAT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1} \quad (2-43)$$

donde h es el índice de numeración de las diferentes componentes armónicas contenidas en la señal bajo estudio.

El estándar ANSY/NEMA MG 1-2003 [72] especifica que la DAT del voltaje registrado en terminales de línea a línea del generador en circuito abierto debe ser menor al 5%. La ecuación (2-43) es usada a lo largo del documento para calcular la DAT del voltaje.

Capítulo 3. Ecuaciones para el cálculo de la temperatura en los imanes

En el presente capítulo se describen los procesos de transferencia de calor. Este estudio permite calcular la temperatura que alcanzan los imanes cuando el generador opera a plena carga.

En el diseño de un generador se debe cuidar que los imanes utilizados en el rotor del generador nunca alcancen la temperatura de desmagnetización.

Los mecanismos de la transferencia de calor, *conducción*, *convección* y *radiación*, están relacionados con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y cuerpos fríos llamados fuente y receptor.

En los sistemas electromecánicos, parte de la energía aplicada en su funcionamiento se convierte en calor y la transferencia resulta en una combinación de los mecanismos antes mencionados [73]

3.1. Conducción

La conducción es la transferencia de calor a través de un material tal como se muestra en la pared de la Fig. 3-1.

La dirección del flujo de calor se produce en ángulos rectos a la pared, si las superficies son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico [73].

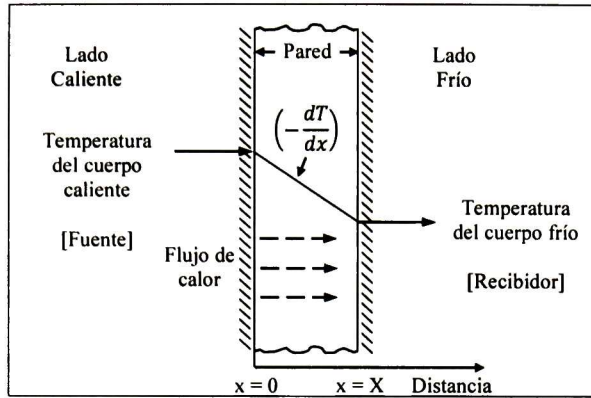


Fig. 3-1. Flujo de calor a través de una pared

Refiriéndose a la Fig. 3-1, el flujo de calor por hora es proporcional al gradiente de temperatura a través de la pared y al área A de la pared. Si T es la temperatura en cualquier punto de la pared y X es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor dQ es dada por:

$$dQ = kA \left(-\frac{dT}{dx} \right) \text{ Btu/hr} \quad (3-1)$$

El término dT/dx se llama gradiente de temperatura y el signo negativo en (3-1) se da cuando debido a que la temperatura en la cara de la pared para $x = 0$ es mayor que la temperatura en la cara de la pared para $x = X$.

La constante de proporcionalidad k se conoce como *conductividad térmica* y su valor se obtiene experimentalmente utilizando la ecuación (3-1).

La cantidad de flujo de calor de una pared de grueso X y área A , está dada por:

$$Q = k \frac{A}{X} \Delta T \quad (3-2)$$

donde ΔT representa el cambio de temperatura, $T_1 - T_2$, donde T_1 es la temperatura en el lado caliente de la pared y T_2 la temperatura en el lado frío de la pared, ver Fig. 3-1.

Tabla 3-1 se muestran valores de conductividad térmica para los materiales utilizados en la construcción del GSIP.

Tabla 3-1. Conductividad térmica de materiales

Material	Conductividad $\left(\frac{w}{m \cdot ^\circ C} \right)$
Acero inoxidable	15.1
Acero estructural	60.5
Neodimio	16.5
Acero M19 ¹	28 (eje x, eje y) y 0.35 (eje z)

¹ Es un material que presenta anisotropía

3.2. Convección

La convección es una forma de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. Este tipo de transferencia de calor se describe por la ecuación:

$$dQ = hA dt \quad (3-3)$$

La constante de proporcionalidad h es un término sobre el cual tiene influencia la naturaleza del fluido y la forma de agitación, y debe ser obtenido experimentalmente.

La Tabla 3-2 muestra valores típicos de h cuando se utiliza como medio el aire y el agua.

Tabla 3-2. Coeficiente de transferencia de calor por convección

Medio	Constante de proporcionalidad $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$
Aire (convección natural)	5 - 25
Aire (Convección forzada)	20 - 300
Agua (Convección forzada)	300 - 6000

3.3. Radiación

La radiación térmica es el proceso por el cual la energía, en forma de radiación electromagnética, es emitida por una superficie caliente en todas las direcciones.

Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía la absorbe el receptor y parte es reflejada. Basado en la segunda ley de la termodinámica, Boltzman estableció que la velocidad a la cual una fuente proporciona calor es:

$$dQ = \sigma \epsilon dA T^4 \quad (3-4)$$

Esta se conoce como la ley de la cuarta potencia, T es la temperatura absoluta, σ es una constante adimensional, ϵ es un factor peculiar a la radiación llamado *emisividad*. La emisividad, igual que la conductividad térmica k o el coeficiente de transferencia de calor h , debe también determinarse experimentalmente [73].

En [74] se hace un análisis térmico en máquinas eléctricas y se demuestra que el efecto de la radiación puede ser omitido.

Capítulo 4. Antecedentes sobre conversión de la energía eólica

En este capítulo se describe; el cálculo de la energía contenida en el viento, el límite teórico en el aprovechamiento de la energía del viento y la relación entre la velocidad del viento y la velocidad tangencial en los alabes. Esta información es utilizada en el proceso de diseño del aerogenerador.

4.1. Energía en el viento y límite Betz

La función de un aerogenerador es convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. El proceso de conversión inicia cuando los alabes del aerogenerador convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. La energía mecánica es transferida al rotor del generador eléctrico para ser convertida en energía eléctrica.

La energía cinética contenida en una masa de aire m que se mueve a una velocidad v puede ser expresada como [75]:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4-1)$$

Considerando una sección transversal de área A a través de la cual pasa el aire a velocidad v , el volumen V fluyendo a través de la sección por unidad de tiempo es:

$$V = v A \quad (4-2)$$

Entonces, el flujo de masa se obtiene multiplicando el volumen por la densidad de aire ρ .

$$\Phi_m = \rho v A \quad (4-3)$$

Al sustituir el flujo de masa, Φ_m , en (4-1) se obtiene (4-4). Esta ecuación expresa la energía cinética del flujo de aire pasando a través de la sección transversal A por un periodo de tiempo t . Las unidades obtenidas en la ecuación (4-4) son Watts.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4-4)$$

La potencia mecánica en el rotor de un generador se obtiene multiplicando la ecuación (4-4) por un coeficiente de potencia C_{PR} , cuyo valor depende del tipo de alabe utilizado. El coeficiente C_{PR} está limitado por la ley de Betz, que indica que no se puede extraer más del 59.3 % de la energía cinética del viento, esto independiente de la forma de los alabes.

$$P_R = \frac{1}{2} C_{PR} \rho A v^3 \quad (4-5)$$

La ecuación (4-5) es utilizada en el diseño del aerogenerador. Para alabes de eje vertical el valor de C_{PR} alcanza valores de hasta 32 %, ver Fig. 4-1.

4.2. Densidad de potencia eólica

La Densidad de Potencia Eólica (DPE) se calcula a partir de (4-4), tomando en cuenta n mediciones discretas de la velocidad del viento.

$$DPE = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\rho)(v_i)^3 [W/m^2] \quad (4-6)$$

donde v_i representa la velocidad del viento v en el i -ésimo registro.

La DPE representa un promedio de la energía cinética del viento para un conjunto de registros de velocidad que se tenga disponible.

4.3. Aerodinámica de los alabes

Las propiedades aerodinámicas de los alabes del aerogenerador se toman en cuenta en el proceso de diseño del generador eléctrico. En particular la relación λ que existe entre la velocidad tangencial de los alabes y la velocidad del viento, conocida como *tip speed ratio*:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\text{velocidad tangencial de la punta del alabe}}{\text{velocidad del viento}} \quad (4-7)$$

La frecuencia producida por el generador está directamente relacionada con el número de polos en la máquina y el tip speed ratio de los alabes.

Cada diseño de alabe cuenta con un valor característico de λ . En la Fig. 4-1 se muestra el valor de λ y de C_{PR} para de diferentes turbinas eólicas [76].

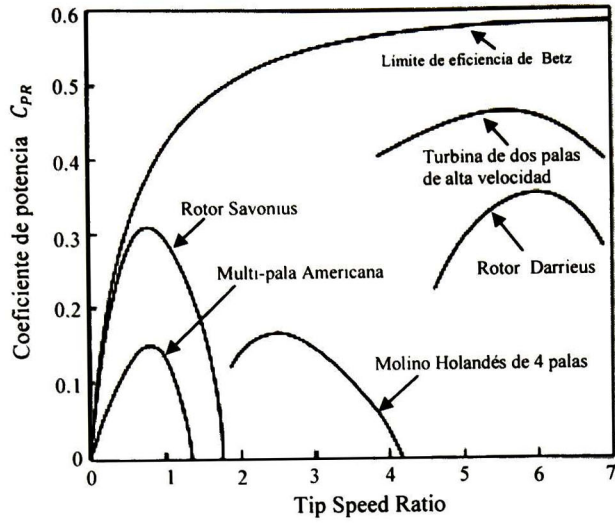


Fig. 4-1. Coeficiente de potencia

Capítulo 5. Medición del viento en sitio

Este capítulo muestra el procedimiento usado para medir el viento en el sitio de instalación del aerogenerador. Para este propósito fue necesario construir y calibrar 3 anemómetros.

Los resultados del programa de monitoreo del viento son utilizados para dimensionar el aerogenerador.

5.1. Determinación del sitio

El sitio de instalación se eligió considerando la afluencia y fluidez vehicular para tener el mayor flujo de viento posible.

Se eligió un sitio en el circuito periférico con límite de velocidad igual a 80 km/h y que cuenta con espacio disponible en el camellón para colocar el aerogenerador, ver Fig. 5-1.

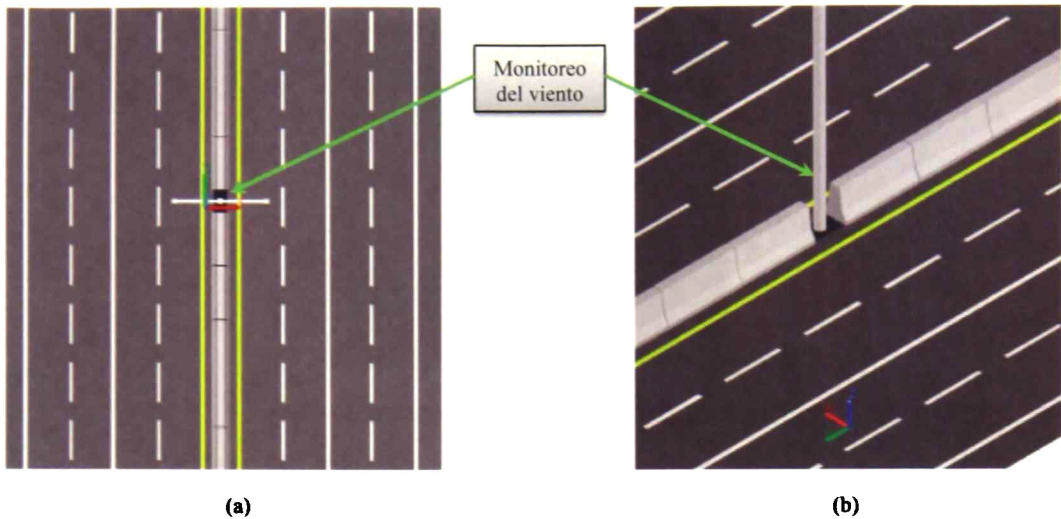


Fig. 5-1. Sitio de monitoreo. (a) Vista superior. (b) Vista Isométrica

En el sitio elegido se procede a hacer el monitoreo de la velocidad del viento a diferentes alturas.

5.2. Programa de monitoreo del viento

5.2.1. Construcción de anemómetros

Para realizar el programa de monitoreo del viento se realizó la construcción de tres anemómetros. Los anemómetros fueron construidos utilizando carcasas, ejes y rodamientos de servomotores de corriente directa. A este mecanismo se acopló un decodificador digital de 500 ranuras que permitió calcular la velocidad angular del eje acoplado.

Las salidas producidas por los decodificadores se conectaron a un sistema mínimo de procesamiento que permite llevar a cabo las funciones:

- Adquisición de datos
- Compresión y almacenamiento de la información cada segundo



Fig. 5-2. Anemómetro construido

5.2.2. Calibración

Los anemómetros fueron calibrados en el laboratorio del Cinvestav mediante un túnel de viento, ver Fig. 5-3.



Fig. 5-3. Túnel de viento

El protocolo de calibración [80] fue ejecutado en el rango de velocidades de 3 m/s a 12 m/s, con intervalos de 1 m/s, de acuerdo a la secuencia de prueba: 3, 5, 7, 9, 11, 12, 10, 8, 6, y 4 m/s. Los resultados de 3 anemómetros calibrados se muestran en las Fig. 5-4 (a), (b) y (c).

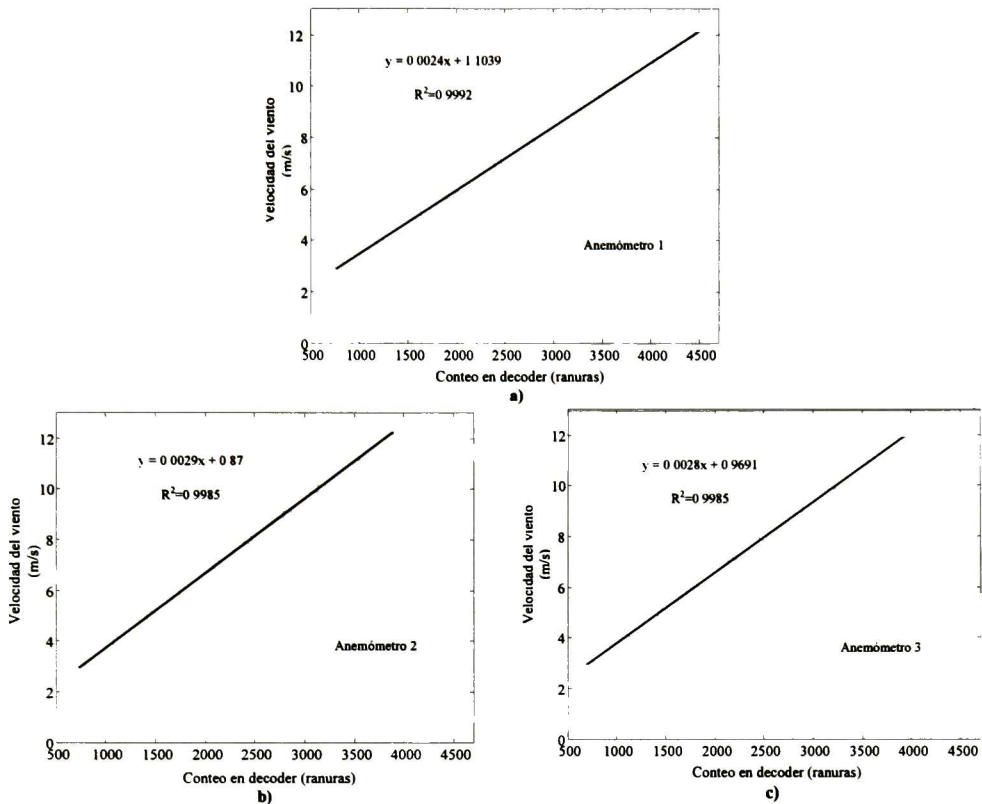


Fig. 5-4. Calibración: (a) Anemómetro 1. (b) Anemómetro 2. (c) Anemómetro 3

En las imágenes anteriores se muestran las expresiones algebraicas que se obtienen sobre la velocidad del viento en función del conteo del encoder de cada anemómetro. Donde y , x y R , representan la velocidad del viento, el conteo en el encoder y el coeficiente de correlación respectivamente.

5.2.3. Procedimiento de instalación

Una vez calibrados los anemómetros se instalan en el sitio de acuerdo a dos configuraciones básicas:

- Configuración 1: Se instalan los 3 anemómetros a las siguientes alturas sobre el pavimento: 3.6 m, 2.6 m. y 1.6 m., ver Fig. 5-4 (a).
- Configuración 2: Se instalan 2 anemómetros a la altura de 1.2 m. sobre el pavimento y separados 120 grados, ver Fig. 5-4 (b).

En la configuración 1, los anemómetros nos proporcionan datos sobre la velocidad natural del viento y la velocidad producida por los automóviles.

En la configuración 2, los anemómetros nos proporcionan datos sobre la velocidad del viento que provocan los automóviles al circular por los carriles adyacentes, velocidad que será aprovechada por la turbina.

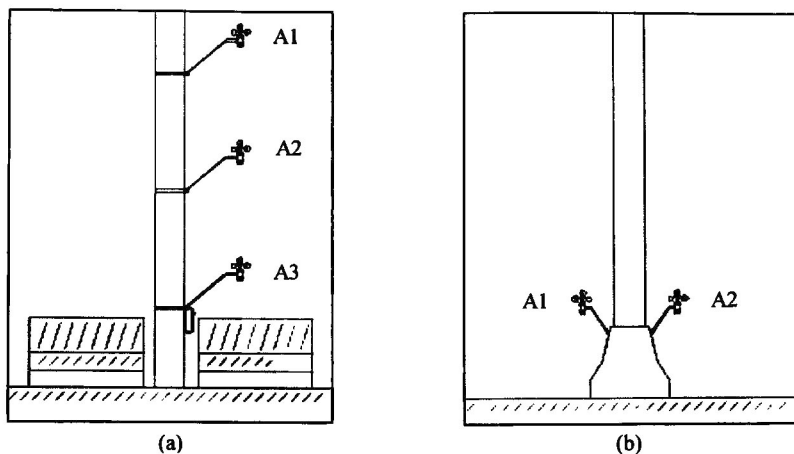


Fig. 5-5. Instalación de anemómetros: (a) Configuración 1. (b) Configuración 2

Los registros de la velocidad del viento se utilizan para realizar el dimensionamiento del aerogenerador, y para llevar a cabo el diseño del GSIP y de los alabes.

5.3. Recolección de datos y estimación de energía

Para iniciar la recolección de datos se instalan los anemómetros bajo la configuración 1, ver Fig. 5-6. Los resultados del monitoreo del viento en un periodo de 24 horas de esta configuración se muestra en la Fig. 5-7, Fig. 5-8 y Fig. 5-9



Fig. 5-6. Anemómetros instalados en el periférico

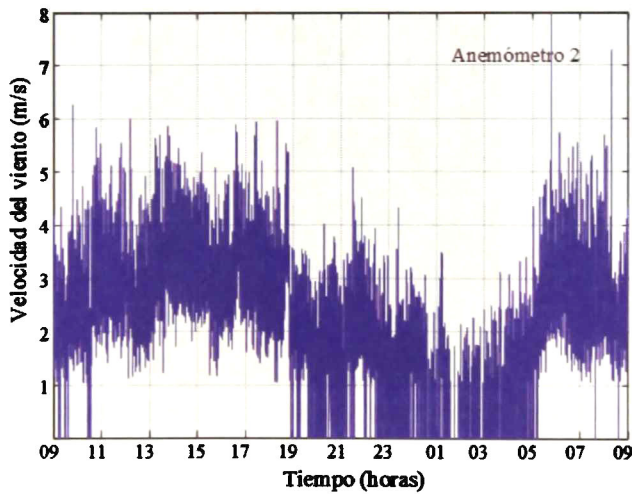
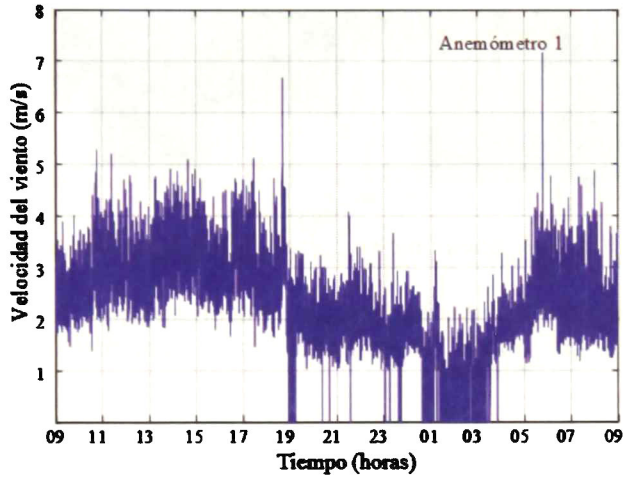
El viento registrado en la configuración 1 para un periodo de 24 horas cuenta con los siguientes promedios y DPEs, ver Apéndice A para un periodo de 7 días:

Capítulo 5

Promedio de A1 = 2.26 m/s
Promedio de A2 = 2.15 m/s
Promedio de A3 = 2.81 m/s

DPE de A1 = 9.94 W/m²
DPE de A2 = 11.16 W/m²
DPE de A3 = 15.09 W/m²

De esta información podemos concluir que en el sitio de monitoreo tenemos mayor energía a 1.6 m de altura. Es decir, el efecto del paso de los vehículos incrementa la energía cinética del viento en el sitio.



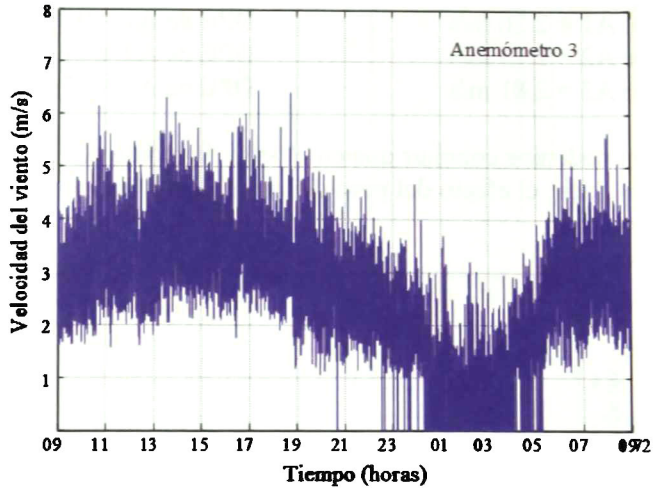


Fig. 5-9. Anemómetro 3, instalado a 1.6 m. de altura

Los registros del viento obtenidos en la segunda configuración, Fig. 5-10, nos indican la energía disponible y que puede ser utilizada para el suministro a la red de alumbrado público.



Fig. 5-10. Configuración 2: Anemómetros

La Fig. 5-11 y la Fig. 5-12 muestran los registros para un periodo de 24 horas de la configuración 2.

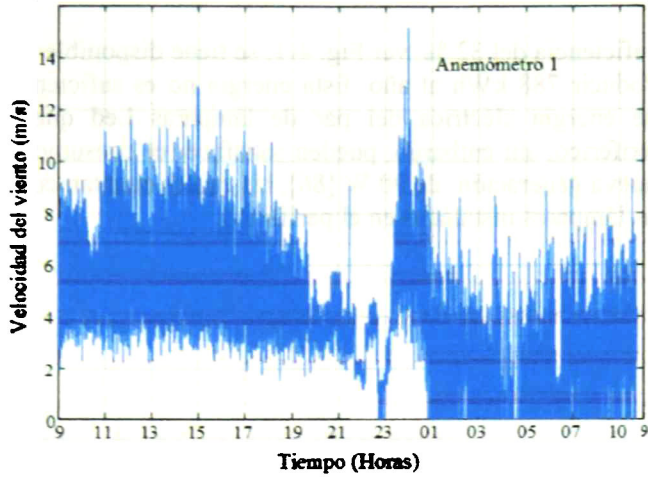


Fig. 5-11. Anemómetro 1, instalado a 1.2 m. de altura

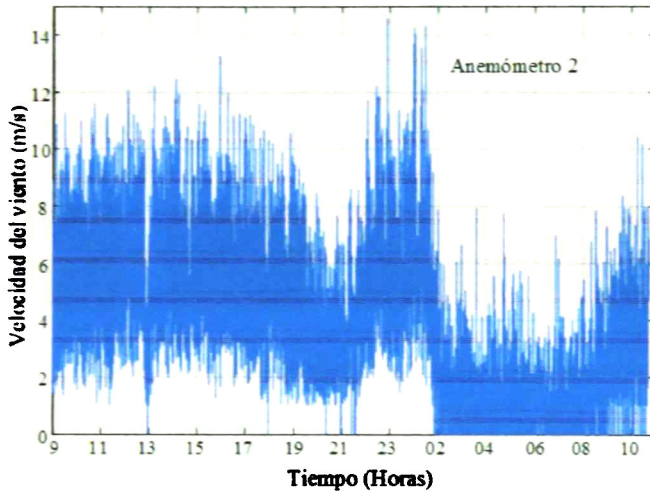


Fig. 5-12. Anemómetro 2, instalado a 1.2 m. de altura

Las velocidades promedio y la DPE de los registros antes mostrados son:

Promedio de A1= 3.76 m/s

Promedio de A2= 3.82 m/s

DPE de A1 = 63.80 W/m²

DPE de A2 = 74.30 W/m²

La DPE resulta 138.1 W/m². Suponiendo una sección transversal de 2 m² se tiene una energía cinética en el viento de 276.2 W.

Al considerar una eficiencia del 32 %, ver Fig. 4-1, se tiene disponible una capacidad de 90 W, que pueden producir 788 kWh al año. Esta energía no es suficiente para satisfacer el consumo anual de energía eléctrica del par de lámparas Led que actualmente están instaladas en el Periférico, sin embargo, pueden satisfacer el consumo anual de un par de lámparas Led de nueva generación de 90 W [86], las cuales cuentan con el mismo nivel de iluminación que las lámparas instaladas en el periférico.

Capítulo 6. Flujo de diseño

Una de las aportaciones del presente trabajo es desarrollar una metodología de diseño que permita crear aerogeneradores con un menor número de iteraciones en el flujo de diseño.

La metodología sugerida para llevar a cabo esta tarea se muestra en Fig. 6-1. En este capítulo se describe de manera general cada etapa del flujo de diseño.

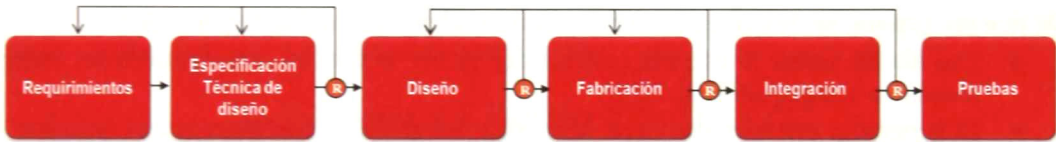


Fig. 6-1. Flujo de diseño del aerogenerador

El flujo de diseño presenta una sucesión ordenada de transformaciones a los requerimientos originales. Cada transformación debe de ser “conforme” a los requerimientos.

En el flujo de diseño los requerimientos iniciales se transforman en una geometría descrita en las especificaciones técnicas de diseño, esta a su vez se transforma en documentos de fabricación en la etapa de diseño, los cuales se transforman en un prototipo en las etapas de fabricación e integración y por último en un producto al terminar las pruebas de campo.

En cada etapa existen puntos de revisión que pueden regresarnos a etapas anteriores para su corrección. Aún más, se puede regresar hasta re-escribir parte de los requerimientos, hecho por el cual ésta tecnología no es ampliamente desarrollada y su desarrollo es costoso.

Un flujo de diseño bien implementado permite crear productos exitosos con un menor número de iteraciones.

6.1. Requerimientos de diseño

Los requerimientos definen con palabras y dibujos el producto a diseñar y construir, por ejemplo, en el caso del aerogenerador:

- Requerimientos funcionales
 - voltaje de salida a x-revoluciones
 - potencia
 - frecuencia, etc.
- Restricciones
 - estándares a seguir
 - sitio de instalación
 - velocidad del viento
 - dimensiones físicas
 - ambientales
 - costos, etc.
- Certificaciones
- Mercado objetivo y precio del producto

6.2. Especificación técnica de diseño

El aerogenerador consta de 4 elementos en la cadena de producción de energía eléctrica; estos elementos son los alabes, el GSIP, el rectificador y el inversor de red.

De manera general se describen a continuación los elementos del aerogenerador:

- Los alabes captan la energía cinética del viento la cual es transformada en energía mecánica y transmitida al GSIP.
- El generador eléctrico convierte la energía mecánica en energía eléctrica trifásica.
- El rectificador convierte la señal trifásica de CA en una señal de CD.
- El inversor de red convierte la señal de CD en una señal de CA con voltaje y frecuencia acorde a los requerimientos de la red eléctrica para inyectar la energía producida.

6.3. Diseño

6.3.1. Diseño del GSIP

En la Fig. 6-2 se describe el procedimiento para crear el diseño del GSIP. El proceso inicia tomando como referencia los requerimientos de diseño, previamente especificados.

Enseguida viene un proceso iterativo donde se calcula el número de polos, el diámetro de la máquina y se hace el diseño de las ranuras. Este proceso termina cuando se obtiene un devanado balanceado.

Una vez que se tiene el devanado balanceado se determina el número de conductores y el voltaje en terminales del generador.

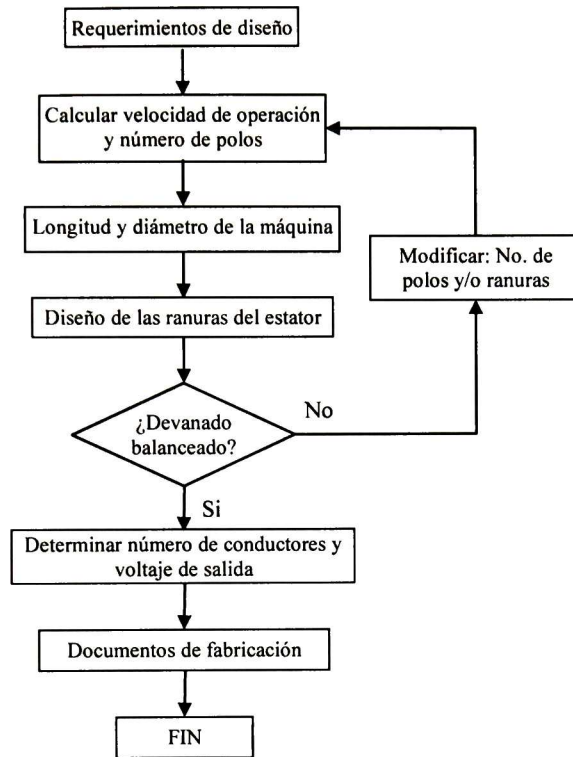


Fig. 6-2. Diagrama de flujo para el diseño del GSIP

6.3.2. Diseño de los alabes

El procedimiento de diseño de los álabes está descrito en la Fig. 6-3. Inicia con el diseño de una geometría de referencia. A la geometría se le realizan estudios estáticos de fluidos mediante el software Ansys Fluent® para calcular el torque producido en el eje del generador. Enseguida los alabes se giran 22.5° con respecto al eje del generador y se realiza nuevamente el estudio de fluidos, este proceso se repite hasta completar un giro 180° , que por simetría nos da el valor del torque para los 360°

Enseguida se calcula el promedio de los valores de torque obtenidos y se guarda en una lista. El proceso continúa haciendo modificaciones a la geometría de los alabes y se repite el cálculo del torque. Finalmente se elige para construcción la geometría con mayor torque producido.

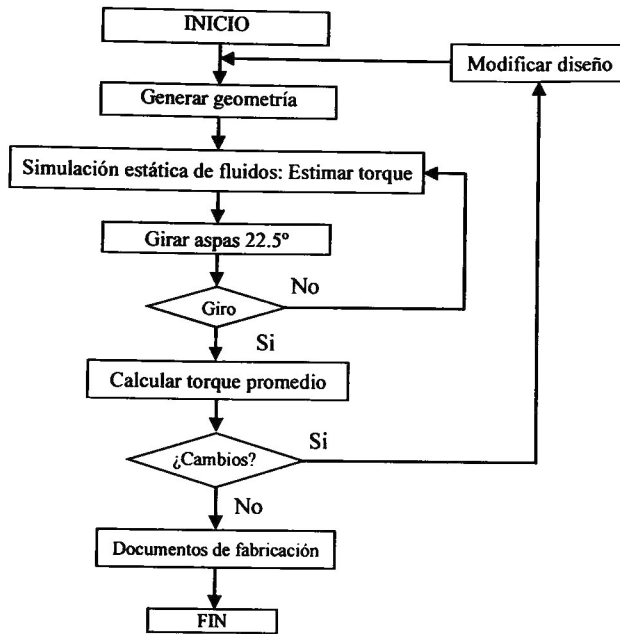


Fig. 6-3. Diagrama de flujo para el diseño de los alabes

La Fig. 6-4 muestra las geometrías analizadas mediante el diagrama de flujo de la Fig. 6-3. Los cambios en la geometría de cada álabe se realizan con respecto al eje del radio de cada aspa.

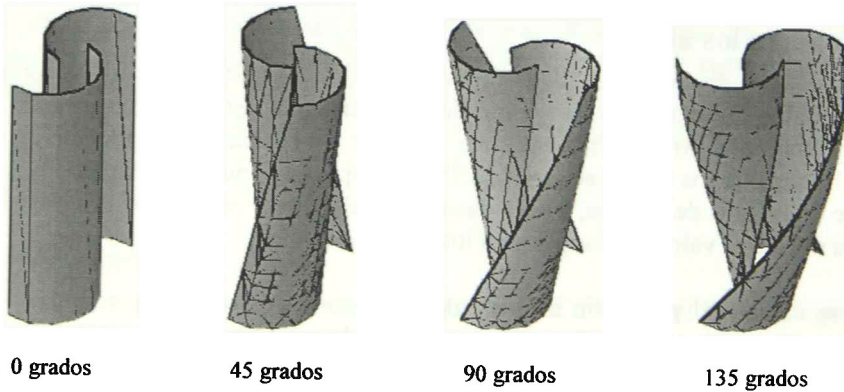


Fig. 6-4. Modificaciones geométricas en cada alabe

6.4. Construcción

6.4.1. Etapas de construcción del generador

Una vez realizados los documentos de fabricación se procede a efectuar la construcción de la máquina en base a la siguiente secuencia:

1. Obtener la materia prima: Acero al silicio, imanes permanentes, tornillería, pegamento epóxico, etc.
2. Cortar las láminas de acero al silicio.
3. Manufacturar el cuerpo del rotor, eje, base del estator, etc.
4. Pegar imanes al rotor.
5. Ensamble de las piezas del GSIP.
6. Construcción de base de pruebas.

6.4.2. Etapas de construcción de los alabes

La construcción de los alabes se realiza en un taller especializado en el manejo de fibra de vidrio. Su secuencia de construcción es:

1. Manufactura de los alabes y su estructura de sujeción al GSIP.
2. Ensamblar al GSIP
3. Verificación de tolerancias

6.5. Integración

Las partes de la máquina se ensamblan y se prueban en forma secuencial:

- Ensamble de las piezas del estator del GSIP.
- Ensamble de las piezas del rotor del GSIP.
- Unir el GSIP al mástil del aerogenerador.
- Ensamblar los alabes en el GSIP.

6.6. Pruebas

6.6.1. Pruebas de laboratorio.

Etapas de prueba del generador:

- Medir resistencia de fase.
- Medir inductancia de fase.
- Adquirir un motor y su control de velocidad para realizar las pruebas de laboratorio.
- Comparar las pruebas de laboratorio con los resultados obtenidos en simulación.

Etapas de prueba de los alabes:

- Realizar la instalación en campo.
- Verificar el desempeño del sistema mecánico del aerogenerador: baleros, sellos, estructura, etc.

6.7. Herramientas de diseño

Las herramientas de diseño para generar geometrías son:

- AutoCAD
- SolidWorks.

6.7.1. Captura del diseño

La captura de diseño para los elementos del aerogenerador se realiza en la secuencia mostrada en la Fig. 6-5.

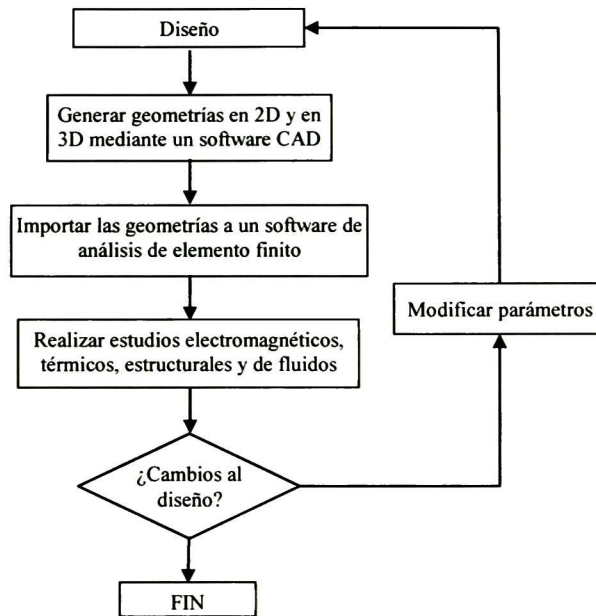


Fig. 6-5. Diagrama de flujo de la captura de diseño

6.7.2. Simulación

Las simulaciones para realizar el diseño del aerogenerador se realizaron utilizando los siguientes programas:

- Maxwell
 - Distribución del devanado en las ranuras del estator
- JMAG:
 - Análisis electromagnético del GSIP
- Ansys
 - Análisis térmico del GSIP
 - Análisis estructural de los alabes
 - Análisis de fluidos de los alabes
- MatLab
 - Analizar la señal del voltaje

6.7.3. Documentos de fabricación

Una vez concluido el proceso diseño y simulación del aerogenerador, se generan los documentos de fabricación de cada pieza en Autocad.

Los documentos de fabricación deben especificar las medidas y tolerancias necesarias para realizar correctamente la manufactura de las piezas.

Capítulo 7. Requerimientos de diseño

El sujeto de estudio es la concepción de un sistema eólico que aproveche las presiones y depresiones de aire generadas por los vehículos que circulan por vialidades de doble sentido. Ejemplo de estas son los circuitos periféricos, las carreteras estatales y las carreteras federales, ver la Fig. 7-1.

La idea es utilizar la energía generada para la iluminación de la vialidad. Durante el día el sistema entrega la energía a la red eléctrica y durante la noche el sistema de alumbrado requiere energía a la red eléctrica.

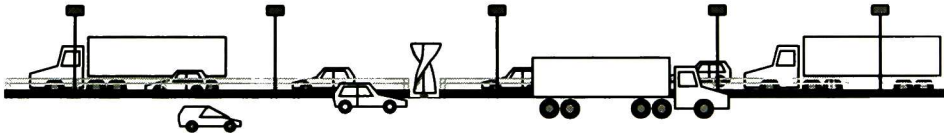


Fig. 7-1. Propuesta a desarrollar

Lista de requerimientos de diseño del aerogenerador:

<R-1> Diseñar un generador eólico vertical para alimentar luminarias en vialidades

Inicio

- Para operar sobre la barrera de contención en el anillo periférico de Guadalajara.
- Satisfacer el consumo de energía eléctrica de dos lámparas Led de 90 W, que puedan ser instaladas en el periférico de Guadalajara (788 kWh anual).
- Velocidad de los vehículos igual o superior a 80 km/h.

Fin

Restricciones

- Operacional en condiciones de intemperie

- Diámetro máximo disponible de 1.4m
- Sistema mecánico de mínimo mantenimiento
- Velocidad del viento menor a 11 m/s.
- Baja emisión acústica [43]

Dependencias

- Para llevar a cabo las pruebas de campo se requieren los permisos de las secretarías:
 - Movilidad
 - Infraestructura y obra pública

<R-2> GSIP

Inicio

El generador debe calcularse de acuerdo a las siguientes características:

- Voltaje a plena carga: 24 Vca
- Potencia: 120 W
- 3 Fases

Fin

Restricciones

- Ninguna

Dependencias

- Ninguna

<R-3> Inyectar la energía producida a la red eléctrica,
Acorde a los parámetros de voltaje y frecuencia de la red

Inicio

Inyectar la energía producida a la red eléctrica acorde a los parámetros de voltaje y frecuencia de la red [94].

Fin

Restricciones

- No exceder de un rango de -10% a +5 % la tensión nominal en el Punto de Interconexión.
- Rango de frecuencia: menor a 60.5 Hz y mayor a 59.3 Hz.
- Dispositivo de protección y desconexión acorde a las características de la carga y del nivel de corriente de corto circuito en el punto de interconexión.
- Componente armónico individual máximo de tensión: 6%.
- Distorsión armónica máximo total de tensión: 8%.
- Prueba de operación Isla.

Dependencias

- Aprobación de CFE

<R-4> Materiales

Inicio

- Imanes de neodimio grado N35
- Núcleo de acero al silicio tipo M19.
- Eje, base y carcasa del rotor en acero inoxidable

Fin

Restricciones

- Ninguna

Dependencias

- Abasto nacional

<R-5> Estándares a seguir

Inicio

- IEC 61400 -1: Wind turbine generators systems Safety requirements.
- IEC 61800-3 ed. 2.0: Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods.
- IEC 61400-22 ed. 1.0: Wind turbines - Part 22: Conformity testing and certification.
- IEC 61400-11 ed. 3.0: Wind turbines Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
- Especificación CFE G0100-04.

Fin

Dependencias

- Ninguna

Restricciones

- Ninguna

<R-6> Mercado objetivo y precio

Inicio

- Mercado: Entidades públicas o privadas, que deseen reducir su factura de energía por consumo en alumbrado público o que deseen comercializar la energía.
Precio: El precio de mercado de estas máquinas oscila entre 350 dólares y 1,200 dólares.

Fin

Dependencias

- Ninguna

Restricciones

- Ninguna

Capítulo 8. Especificaciones técnicas de diseño

8.1. Sistema eólico

El sistema cuenta con 5 subsistemas que permiten cumplir con los requerimientos.



Fig. 8-1. Cadena de generación del aerogenerador

El sistema cuenta con un mecanismo que capta la energía cinética del viento y la transfiere al GSIP. El GSIP la transforma la energía eléctrica de CA variable en magnitud y en frecuencia. La energía así generada no puede inyectarse a la red, la cual demanda un voltaje y frecuencias específicas, <R3>. Para inyectar esta energía, en voltaje y frecuencia, a la red eléctrica se tiene un equipo formado por un rectificador y un inversor, ver la Fig. 8-1.

Para la aplicación, en este documento se diseña y describe el GSIP y los alabes. Para el rectificador y el inversor se usaron equipos comerciales.

8.1.1. Alabes

El diseño de los alabes se realiza tomando como referencia la turbina Windside. Esta turbina tiene como característica un ángulo de torsión desde la parte inferior hasta la parte superior del alabe.

La selección del ángulo de torsión se realiza en base a simulaciones de fluidos en el software Ansys Fluent. Para este fin, se evaluaron cuatro geometrías de alabe diseñadas.

De las simulaciones se obtiene el torque producido por los alabes al realizar un giro de 360° . El diseño evaluado que presente el mayor valor promedio del torque, es el que se elige para construir.

La construcción de los alabes se realizan en 3 capas de fibra de vidrio, para tener un espesor aproximado de 3 mm.

En la Fig. 8-2 se muestra la geometría de los dos alabes del aerogenerador.

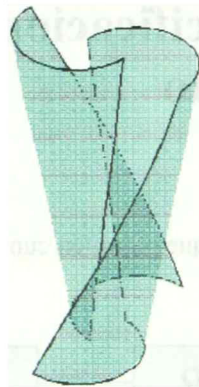


Fig. 8-2. Geometría de los alabes del eje vertical

8.1.2. GSIP

Para turbinas de baja velocidad de operación es conveniente utilizar un GSIP de rotor externo, ya que su topología permite incrementar el número de polos sin incrementar considerablemente el diámetro de la máquina, ver Fig. 8-3.

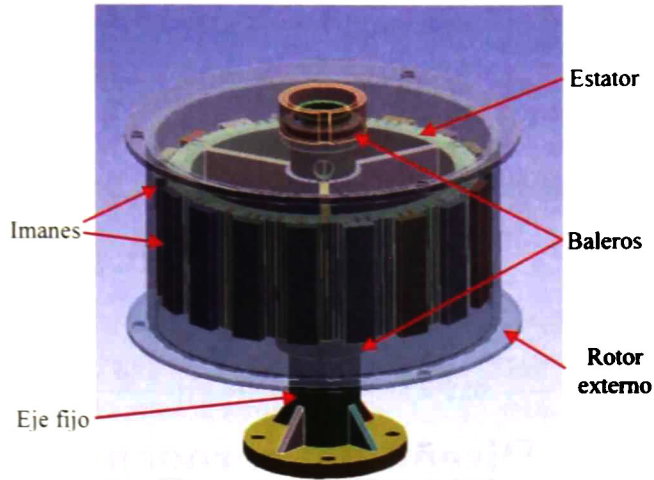


Fig. 8-3. Geometría de un GSIP de rotor externo

Los imanes utilizados son de neodimio grado N35, estos imanes se encuentran adheridos al rotor externo por medio de pegamento epóxico. En este tipo de máquinas, el rotor gira al exterior del estator.

La máquina cuenta con un eje fijo al interior del estator. El eje será unido al mástil del aerogenerador.

El estator se construye por medio de laminaciones de acero al silicio de grano no orientado tipo M19.

El GSIP cuenta con dos baleros localizados en la parte superior e inferior del rotor. Estos baleros cuentan con sello de neopreno para reducir al mínimo el mantenimiento de la máquina.

Capítulo 9. Diseño del aerogenerador

En este capítulo se describe el procedimiento de diseño de los elementos del aerogenerador. El diseño tiene la siguiente secuencia: Primero se realiza el diseño del GSIP, enseguida se hace el diseño de los alabes y por último se diseña el mástil y los brazos que sujetan los alabes al GSIP.

9.1. Diseño del GSIP

9.1.1. Cálculo de la velocidad de operación

Para calcular la velocidad de operación de la máquina, se toman como referencia los resultados obtenidos durante el monitoreo del viento y las características de operación de la turbina Windside.

Para calcular la velocidad de operación del aerogenerador se utiliza la ecuación de la velocidad tangencial (9-1):

$$v_p = \omega r \quad (9-1)$$

donde v es la velocidad tangencial en m/s, ω es la velocidad angular en rad/s. y r el radio del rotor en m.

Considerando un *tips peed ratio* igual a 1, ver Fig. 4-1, se calcula la velocidad de operación del aerogenerador, es decir:

Para la velocidad de arranque de la turbina Windside, de 2.5 m/s, tenemos:

$$\omega = \frac{(2.5 \text{ m/s})(1)}{0.5 \text{ m}} = 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (9-2)$$

Capítulo 9

o

$$\omega = 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2 \pi \text{ rad}} \right) = 47.74 \approx 48 \text{ rpm} \quad (9-3)$$

Para la velocidad máxima del viento en el sitio, de 11.5 m/s, tenemos:

$$\omega = \frac{(11.5 \text{ m/s})(1)}{0.5 \text{ m}} = 23 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (9-4)$$

o

$$\omega = 23 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2 \pi \text{ rad}} \right) = 219.63 \approx 220 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \quad (9-5)$$

9.1.2. Cálculo del número de polos

Para determinar el número de polos p de la máquina, usamos la velocidad de arranque y especificamos la frecuencia inicial de operación, ecuación (9-6):

$$p = \frac{f \times 120}{n} \quad (9-6)$$

donde f la frecuencia en Hz y n las revoluciones por minuto.

Considerando una frecuencia inicial de 7 Hz² y la velocidad de arranque de 48 rpm, se tiene:

$$p = \frac{7 \times 120}{48} = 17.5 \approx 18 \text{ polos} \quad (9-7)$$

Para la velocidad de operación máxima de 220 rpm, la frecuencia resulta:

$$f = \frac{p \times n}{120} = \frac{18 \times 220}{120} = 33 \text{ Hz} \quad (9-8)$$

² La frecuencia inicial se debe sintonizar hasta obtener una combinación de número de ranuras por polo y por fase (n_p) que permita diseñar un devanado balanceado. Para conocer las combinaciones de n_p que producen un devanado balanceado consultar: <https://www.emotor.com/edit/windings>

9.1.3. Longitud y diámetro de la máquina

La longitud y diámetro de la máquina se obtienen a partir del número de polos y de las medidas de los imanes comerciales. El modelo de imán utilizado es NB14342BIG y tiene las siguientes dimensiones:

Tabla 9-1. Dimensiones del imán: Modelo NB14342BIG.

Milímetros		
Largo	Ancho	Espesor
38.10	19.03	6.38

Paso polar, separación entre el centro de los polos,

$$\tau = \frac{\pi D_i}{p} \tag{9-9}$$

donde τ es paso polar y D_i es el diámetro interior del rotor.

Considerando un porcentaje de abarcamiento³ polar del 56.5 % se obtiene el siguiente paso polar.

$$\tau = \frac{100(19.03)}{56.5} = 33.68 \text{ mm} \tag{9-10}$$

El diámetro interior del rotor resulta.

$$D_i = \frac{\tau p}{\pi} = \frac{(33.68)(18)}{\pi} = 192.98 \text{ mm} \approx 193 \text{ mm} \tag{9-11}$$

Para un espesor en la carcasa de 5 mm – donde se adhieren los imanes – tenemos un diámetro exterior del rotor igual a 216 mm.

Elijiendo una longitud en el entrehierro de 1.5 mm, tenemos un diámetro exterior del estator de 190 mm.

La relación tradicionalmente utilizada de diámetro externo a diámetro interno del estator en máquinas síncronas de 18 polos es de 1.15 [64], sin embargo, para reducir la densidad de flujo magnético en el núcleo se toma una relación de 1.17, incrementando así el área por donde circula el flujo. De esta forma el diámetro interior del estator es de 162 mm.

La longitud de la máquina es de 76.2 mm debido a que se utilizaron 2 imanes por polo.

9.1.4. Diseño de las ranuras

Para realizar el diseño de las ranuras se decide utilizar un número fraccionario de ranuras por polo y por fase, ya que ayuda a disminuir el torque de arranque en la máquina. Cuando

³ Para el primer diseño, el porcentaje de abarcamiento polar puede tomar valores entre 50% y 60 %.

Capítulo 9

se utiliza un número entero de ranuras por polo y por fase, las caras polares se alinean con los dientes del estator provocando un incremento en el torque.

Para el GSIP de 100 W se elige utilizar 84 ranuras⁴ en el estator, para tener 1 $\frac{5}{9}$, ranuras por polo y por fase.

Otra ventaja de incrementar el número de ranuras en el núcleo del estator es incrementar del área de disipación para reducir el calentamiento en la máquina.

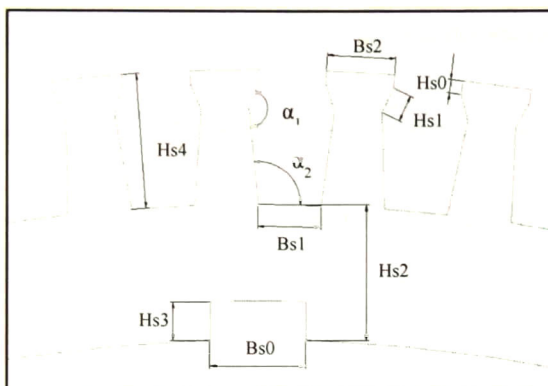


Fig. 9-1. Medidas de las ranuras del estator (ver Tabla 9-3)

9.1.5. Determinación del número de conductores y voltaje de salida

De (2-37) se obtiene el número de conductores por fase, que se expresa por la ecuación (9-12).

$$N = \frac{E \times 60 \times 10^{11}}{\phi_t n k_p C_w} \quad (9-12)$$

Para calcular C_w , la constante del devanado, es necesario calcular el factor de distribución del flujo magnético f_d , el factor forma f_b y el factor de distribución del embobinado k_d . El procedimiento para calcular f_d , y f_b se muestra en el Apéndice B.

Para calcular k_d se utiliza la ecuación (2-25), es decir:

$$k_d = \frac{\text{sen } \frac{180^\circ}{2 \times 3}}{14 \times \text{sen } \frac{180^\circ}{2 \times 3 \times 14}} = \frac{0.5}{0.5234} = 0.95 \quad (9-13)$$

Para calcular C_w se utiliza la ecuación (2-36).

Se debe verificar que el número de ranuras permita diseñar un devanado balanceado. Para mayor información: <https://www.emetor.com/edit/windings>

Capítulo 9

$$C_w = 0.56 \times 1.03 \times 0.95 = 0.5 \quad (9-14)$$

Para calcular k_p se requiere conocer la distancia en grados eléctricos de un extremo a otro de la bobina la cual se calcula con (9-15):

$$\delta = \frac{360 \times 18 \times 4}{2 \times 84} = 154 \text{ grados eléctricos} \quad (9-15)$$

Y k_p se calcula con la ecuación (2-27).

$$k_p = \cos\left(\frac{180 - 154}{2}\right) = 0.9743 \quad (9-16)$$

Para calcular ϕ_t , el flujo total en el entrehierro se usa (9-17)

$$\phi_t = \pi \times D_g \times l_m \times B_g \quad (9-17)$$

$$\phi_t = \pi \times 19.0 \times 7.6 \times 5350 = 2,427,005 \text{ lines} \quad (9-18)$$

$E=24$ Vca, es el voltaje de fase requerido en el generador para que el inversor de red suministre 90 W a la red eléctrica, ver Apéndice C.

Entonces el número de conductores por fase es:

$$N = \frac{24 \times 60 \times 10^8}{(2,427,005)(220)(0.97)(0.5)} = 556.06 \quad (9-19)$$

Para un devanado trifásico, el número total de conductores es de 1,668.2. Para un estator con 84 ranuras, los conductores por ranura serían de 19.85, redondeando este número obtenemos el número de conductores corregido $Nc = 20$. Esto nos da 560 conductores por fase.

De esta forma a la velocidad angular de arranque de 48rpm:

$$E = \frac{Nc \times n \times \phi_t \times k_p \times C_w}{60 \times 10^8} = \frac{560 \times 48 \times 2,427,005 \times 0.97 \times 0.5}{60 \times 10^8} = 5.27 \text{ V} \quad (9-20)$$

Y a la velocidad angular máxima de 220 rpm:

$$E = \frac{560 \times 220 \times 2,427,005 \times 0.97 \times 0.5}{60 \times 10^8} = 24.16 \text{ V} \quad (9-21)$$

9.1.6. Cálculo del calibre del conductor

La corriente de armadura por fase se calcula de acuerdo a [64]:

$$I = \frac{KVA \times 10^3}{E \times 3} = \frac{0.100 \times 10^3}{24.16 \times 3} = 1.37 \text{ Amperes} \quad (9-22)$$

Según las curvas mostradas en [64] para máquinas de muy baja potencia y baja velocidad operación, la densidad de corriente eléctrica, A_a , en el cobre de armadura es de aproximadamente 4.25 Amperes/mm². De esta forma, la sección del conductor s_a resulta:

$$s_a = \frac{I}{A_a} = \frac{1.37 \text{ A}}{4.25 \text{ A/mm}^2} = 0.324 \text{ mm}^2 \quad (9-23)$$

Según el catálogo de conductores de alambre magneto, la sección del conductor obtenida corresponde a un calibre 22.

Finalmente la distribución del devanado en las ranuras se realiza mediante el software Maxwell, ver Apéndice D.

En la siguiente tabla se resumen las características del generador.

9.1.7. Simulación del GSIP en vacío

9.1.7.1. Captura del diseño

La captura del diseño del GSIP para la simulación se hizo en 2 dimensiones de acuerdo a los cálculos obtenidos en la sección anterior, Fig. 9-2, es decir:

Tabla 9-2. Dimensiones del rotor.

Número de polos (2 imanes por polo) dimensiones del imán Largo 38.10 Ancho 19.03 Espesor 6.38	18
Paso polar	33.68 mm
Diámetro interior del rotor	193.00 mm
Espesor de la carcasa	5.00 mm
Longitud en el entrehierro	1.50 mm
Diámetro exterior del rotor igual	216.00 mm
Longitud de la máquina	76.20 mm

Tabla 9-3. Dimensiones del estator, ver Fig. 9-1.

Número de Ranuras	84
Ranuras del estator	$Bs0 = 5.00 \text{ mm}$ $Bs1 = 3.29 \text{ mm}$ $Bs2 = 3.55 \text{ mm}$ $Hs0 = 0.70 \text{ mm}$ $Hs1 = 1.40 \text{ mm}$ $Hs2 = 7.00 \text{ mm}$ $Hs3 = 2.00 \text{ mm}$ $Hs4 = 7.00 \text{ mm}$ $\alpha_1 = 153^\circ$ $\alpha_2 = 97^\circ$
Diámetro interior del estator	162mm
Diámetro exterior del estator	190mm
Longitud en el entrehierro	1.5 mm
Calibre del conductor	22

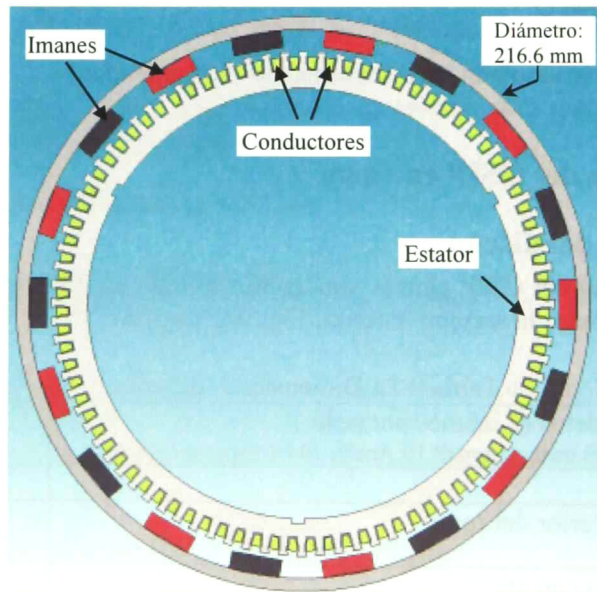


Fig. 9-2. Geometría del GSIP de 100 W

La captura del diseño se hizo en Autocad.

9.1.7.2. Simulación de la densidad de flujo magnético

La simulación del diseño del GSIP se hizo en 2 dimensiones de acuerdo a los siguientes parámetros, es decir:

Tabla 9-4. Parámetros del GSIP de 100W.

Elementos estructurales	Acero inoxidable 305
Material del imán	Neodimio N35
Núcleo	Acero al silicio, M19

Los resultados de la simulación para la densidad de flujo magnético en la máquina se presentan en la Fig. 9-3. Se observa que existe una densidad máxima de flujo magnético en uno de los dientes del estator con un valor de 1.34 Teslas, este punto cambia de posición al momento que el rotor comienza a girar.

La densidad de flujo magnético en el entrehierro y en el yugo del estator presenta un valor aproximado de 0.55 Teslas.

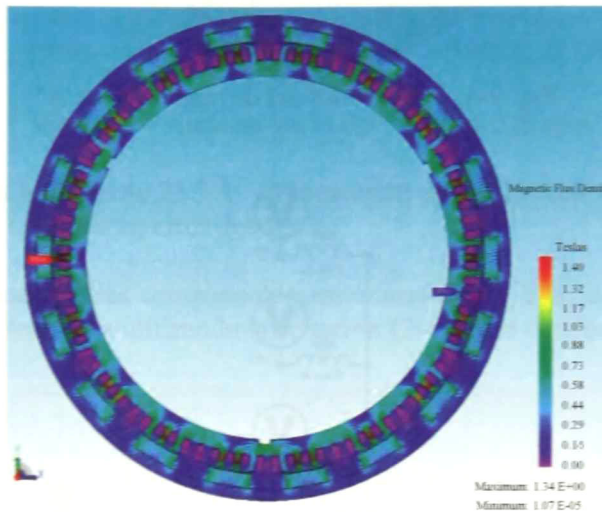


Fig. 9-3. Simulación de la densidad de flujo magnético en el GSIP

La simulación se hizo usando el software JMAG.

9.1.7.3. Estimación del voltaje en vacío en simulación

Para estimar el voltaje en vacío se requiere conectar los devanados del estator para las tres fases, en la Fig. 9-4 se muestran las conexiones de la fase A. Estas conexiones se hicieron con la ayuda del software Maxwell.

Los conductores por ranura son conectados en serie y el devanado del estator se conecta en estrella. La Fig. 9-5 muestra el circuito eléctrico de las conexiones de las fases del generador.

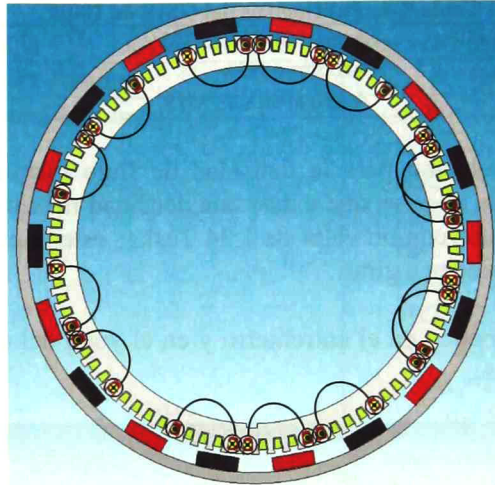


Fig. 9-4. Conexiones del devanado: Fase A

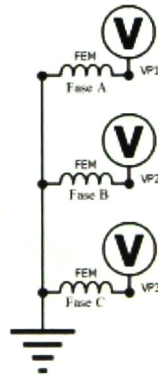


Fig. 9-5. Circuito eléctrico para prueba en vacío del GSIP

Utilizando el circuito y las conexiones mostradas en Fig. 9-4 y Fig. 9-5 se estima el voltaje de salida mediante el Software JMAG a una velocidad angular de 220 rpm. En la Fig. 9-6 se presenta la señal de voltaje en terminales del GSIP.

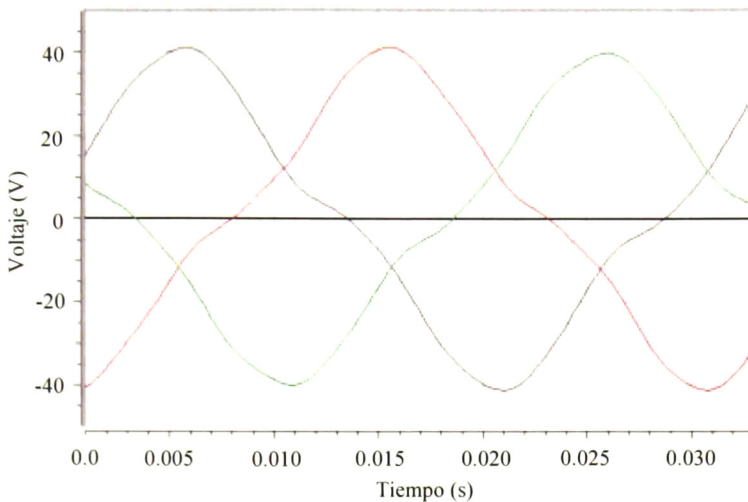


Fig. 9-6. Voltaje en vacío del GSIP @ 220 rpm

El valor rms de esta señal es de 25.3 V. Comparando este valor con el obtenido (24.16 V) en el primer diseño, tenemos un error del 4.5 %.

En la Fig. 9-7 se muestran las componentes armónicas (2da – 20a) de la señal del voltaje. La DAT del voltaje se estima utilizando la ecuación (2-43) y se obtiene un valor de 26.2 %.

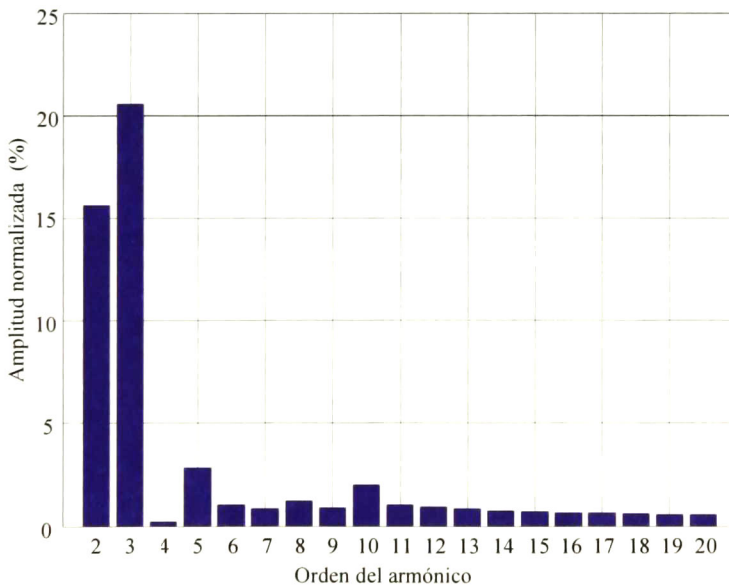


Fig. 9-7. Componentes armónicas de la señal de voltaje

La 2da y 3ra armónica presentan mayor aportación en la DAT del voltaje, con un valor del 15.6 % y del 20.56 %, respectivamente. La 5ta armónica tiene un valor de 2.84 % y la 10a un valor del 2 %. El resto de las componentes cuentan con un valor inferior a 1.2 %.

El mismo programa de simulación calcula la forma de onda del torque en vacío, ver Fig. 9-8.

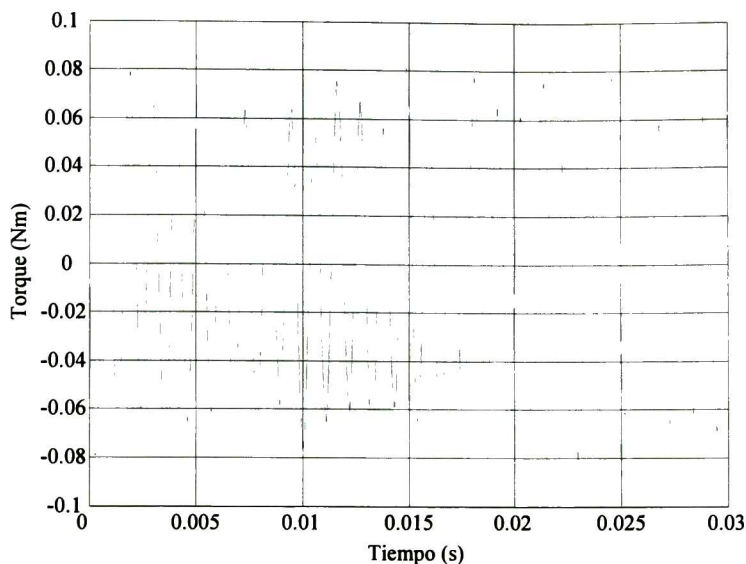


Fig. 9-8. Torque en vacío

El valor rms del torque es de 0.048 Nm.

9.1.8. Simulación del GSIP bajo carga

Para la simulación del GSIP bajo carga se considera una carga resistiva y capacitiva. El valor de $R1=9.5 \Omega$ se selecciona de acuerdo a las características de entrada que requiere el inversor para inyectar la potencia a la línea (90W), es decir 32.3 V y 3.4 Amp⁵. Por lo que respecta a C1, esta capacitancia fue ajustada de acuerdo al voltaje de rizo.

La Fig. 9-9 muestra el circuito implementado para hacer la simulación bajo carga.

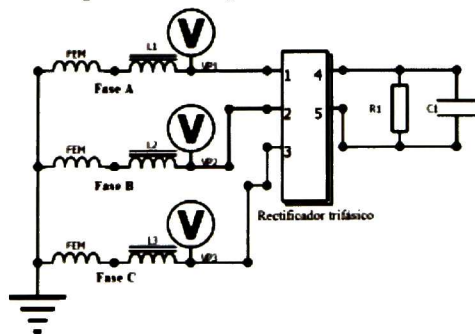


Fig. 9-9. Circuito eléctrico para prueba bajo carga del GSIP

⁵ Considerando una eficiencia en el inversor del 80 %.

Capítulo 9

La Fig. 9-10 muestra la potencia producida por el GSIP y medida en la carga. Su valor promedio equivale a 121.1 W. Considerando que la eficiencia promedio del inversor es del 80 %, la potencia inyectada a la red eléctrica es de 96 W.

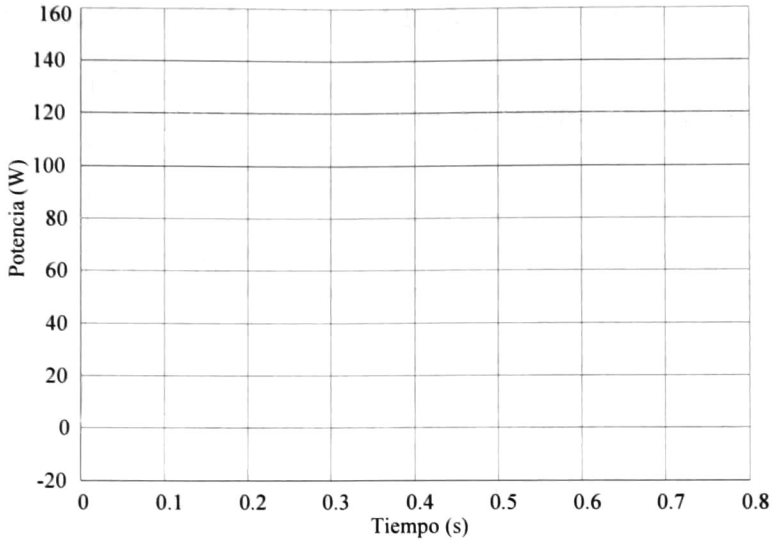


Fig. 9-10. Potencia producida por el GSIP

La potencia mecánica de entrada al GSIP se calcula utilizando la ecuación (2-6). Para ello se utiliza el valor promedio de la onda de torque, 8.36 Nm, ver Fig. 9-11 y la velocidad angular de la máquina, 220 rpm.

La potencia mecánica de entrada equivale a 192.6 W. Por lo tanto, la eficiencia del GSIP es de 62.8 %.

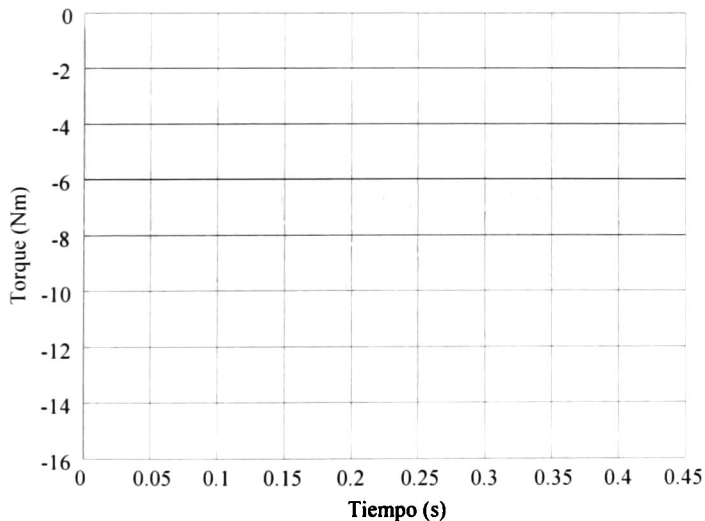


Fig. 9-11. Torque de entrada en el GSIP

Las pérdidas en el devanado se estiman mediante la expresión (2-41). Estas pérdidas equivalen a 72.28 W.

Las pérdidas por histéresis y por corrientes de Eddy se estiman utilizando las ecuaciones (2-38) y (2-39). Las constantes k_h y k_e del acero tipo M19 se obtienen de un estudio mostrado en [87].

Las pérdidas por histéresis resultan:

$$P_h = 178.478 (36)(1.34)^2 = 11,537.10 \text{ W/m}^3 \quad (9-24)$$

Dado que la densidad del acero al silicio M19 es de $7,180 \text{ kg/m}^3$ y el volumen del estator es de 0.00041408 m^3 , las pérdidas por histéresis son 4.77 W.

Las pérdidas por corrientes de Eddy se obtienen:

$$P_e = 0.5344(36)^2(1.34)^2 = 1,243.60 \text{ W/m}^3 \quad (9-25)$$

Teniendo en cuenta que el volumen del estator no se modifica, estas pérdidas equivalen a 0.515 W.

En total tenemos 77.56 W de pérdidas, de los cuales 72.28 W se presentan en el devanado y 5.28 W en el núcleo del estator.

9.1.9. Análisis térmico

Se realiza un análisis térmico en la máquina para estimar la temperatura en los imanes cuando la máquina opera a plena carga. Para el análisis térmico se utilizan las pérdidas calculadas en la sección anterior.

El coeficiente de convección utilizado en el estudio es de $2 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ [88].

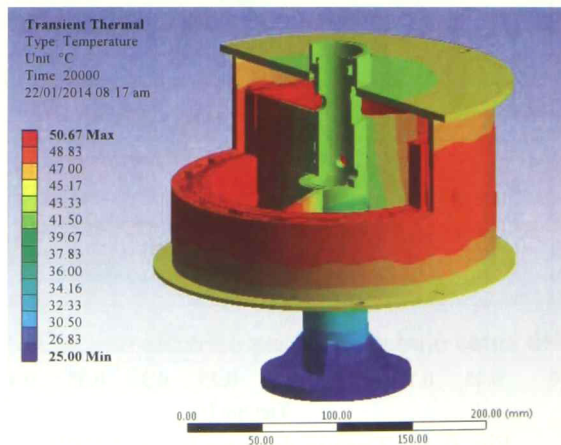


Fig. 9-12. Análisis térmico del GSIP en Ansys

Capítulo 9

La temperatura máxima alcanzada en la máquina, $50.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, se presenta en el núcleo del estator y en los imanes. Este valor de temperatura está por debajo de los $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ requeridos [89] para la desmagnetización del imán.

La Fig. 9-13 muestra el incremento de la temperatura a través del tiempo en la máquina.

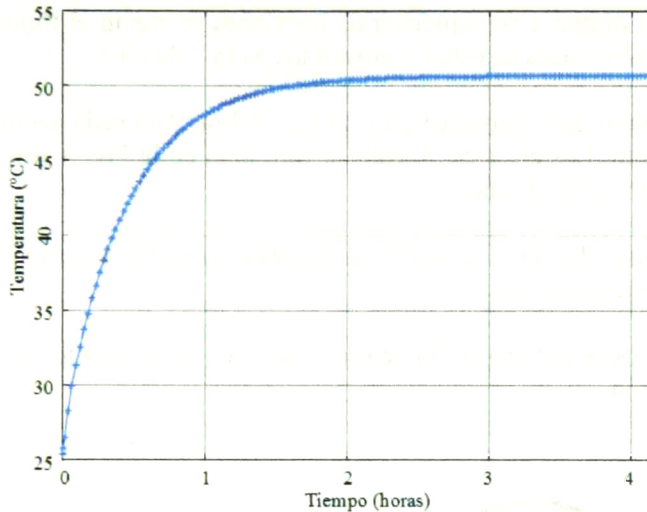


Fig. 9-13. Temperatura máxima en la máquina

9.2. Diseño de los alabes

Para obtener el diseño de los alabes se diseñaron un cuatro geometrías que fueron analizadas mediante el software Ansys Fluent. Estas geometrías se mostraron en la Fig. 6-4.

Las geometrías presentan un ángulo de torsión desde la parte inferior hasta la parte superior del alabe. Es decir, cuentan con un ángulo de torsión igual a 45° , 90° y 135° respectivamente, ver Fig. 6-4. Para cada geometría se realizan 8 casos de estudio, ver Tabla 9-5.

Tabla 9-5. Geometrías modificadas: Alabes giradas sobre su propio eje

	Giros de los alabes sobre el eje del generador			
	0 grados	45 grados	90 grados	135 grados
Caso 1	0.0°	0.0°	0.0°	0.0°
Caso 2	22.5°	22.5°	22.5°	22.5°
Caso 3	45.0°	45.0°	45.0°	45.0°
Caso 4	67.5°	67.5°	67.5°	67.5°
Caso 5	90.0°	90.0°	90.0°	90.0°
Caso 6	112.5°	112.5°	112.5°	112.5°
Caso 7	135.0°	135.0°	135.0°	135.0°
Caso 8	157.5°	157.5°	157.5°	157.5°

En cada caso de estudio se realiza giros en pasos de 22.5° en los alabes para completar un giro de 180° , que por simetría representa un giro de 360° en los alabes. En total se realizan 32 simulaciones.

9.2.1. Análisis de fluidos

Para llevar a cabo el diseño y construcción de los alabes se siguió el flujo de diseño de la Fig. 6-3 y se realizan los casos de estudio mostrados en la Tabla 9-5.

Se inicia con un estudio de la geometría, ver la Fig. 9-14a. Para cada geometría se hacen 8 simulaciones de viento. Los giros en el alabe se muestran en la Fig. 9-14b. Este estudio es realizado para el resto de los diseños.

En cada posición mostrada en la Fig. 9-14b se calcula el torque producido en el eje de GSIP a una velocidad del viento de 5 m/s.

Para los cuatro diseños se obtiene el torque promedio y el diseño con torque más elevado se elige para construcción.

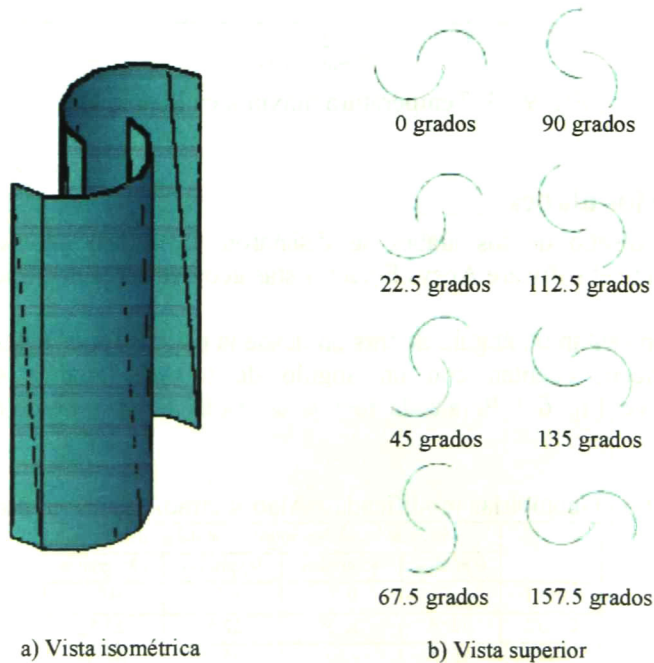


Fig. 9-14. Alabe sin modificación geométrica.

En la Fig. 9-15 se muestran el flujo del viento, la velocidad del viento y la presión ejercida en los alabes. Con esta información se estima el torque producido en el eje de los alabes.

Para el caso mostrado en la Fig. 9-15 se produce un torque de 7.86 Nm.

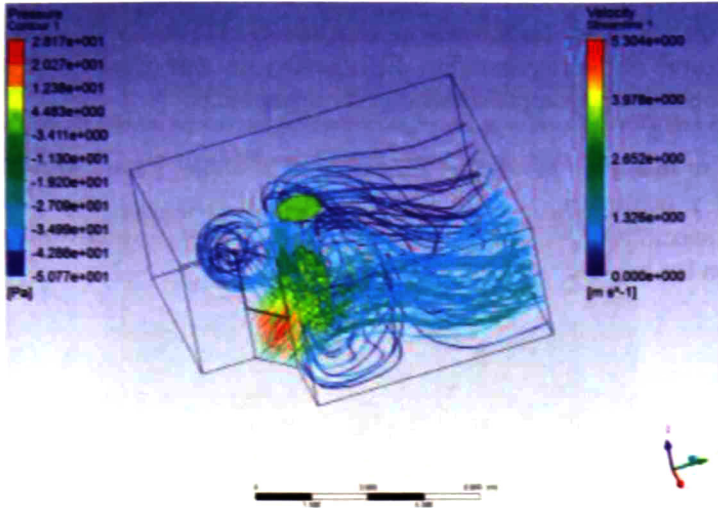


Fig. 9-15. Simulación en Ansys Fluent: Alabe sin modificación.

En la Fig. 9-16 se muestra el valor de torque para las cuatro geometrías en un giro de 360°.

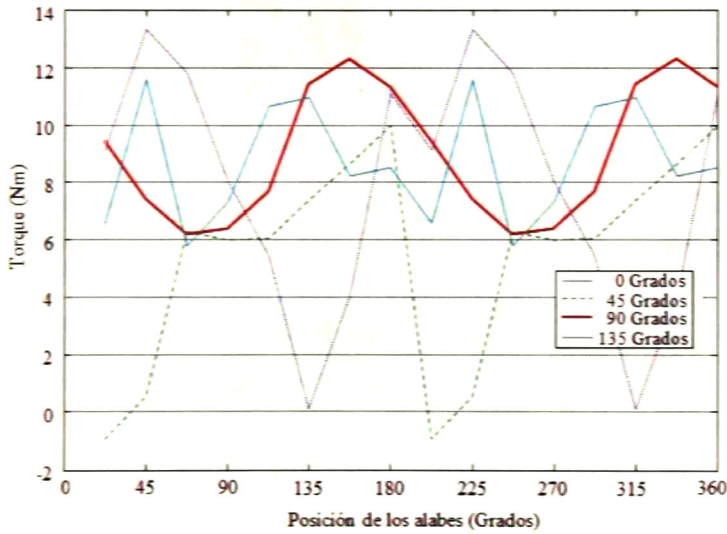


Fig. 9-16. Torque a diferentes posiciones.

El valor promedio del torque para de las geometrías con 0 grados, 45 grados, 90 grados y 135 grados de torsión son 7.86 Nm, 5.50 Nm, 8.99 Nm y 8.92 Nm, respectivamente. Por esta razón se elige construir un álabe con 90 grados de torsión. En el Apéndice E se muestran las simulaciones de fluidos para el resto de las geometrías.

9.2.2. Análisis estructural

Antes de construir las aspas fue necesario verificar el esfuerzo y la deformación de cada elemento estructural del aerogenerador. El objetivo de este análisis es verificar que el aerogenerador soportará las cargas a las que estará sometido.

En la Fig. 9-17 se muestran las cargas aplicadas en el alabe. Estas cargas son la gravedad (peso del alabe y estructura) y un torque de 90 Nm, equivalente a 10 veces el torque estimado en la sección anterior. Los soportes de la estructura están ubicados en el sitio donde se colocan los baleros.



Fig. 9-17. Cargas aplicadas en el alabe.

La Fig. 9-18 muestra las deformaciones producidas en el alabe y su brazo de apoyo, se observa una deformación máxima de 1.24 mm en la parte inferior derecha del alabe.

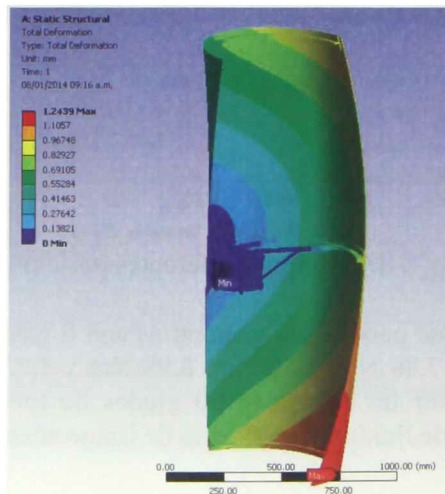


Fig. 9-18. Deformación en el aerogenerador

Los esfuerzos en el alabe se muestran en la Fig. 9-19. El esfuerzo máximo, 8.53 MPa, se presenta en la zona donde el alabe se une al GSIP mediante uno de los brazos de apoyo.

El esfuerzo que soporta la fibra de vidrio clase E, utilizada en la construcción de los alabes, es de 220 MPa. Por lo tanto, el esfuerzo presentado es apenas del 4 % del esfuerzo máximo que soporta la fibra de vidrio utilizada para construir las aspas.

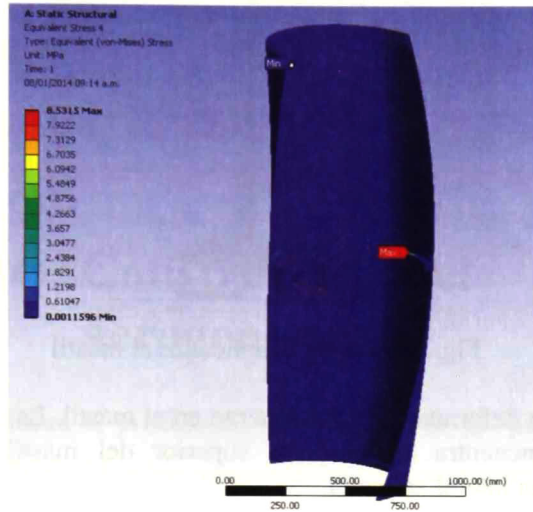


Fig. 9-19. Esfuerzo en el alabe

La Fig. 9-20 muestra el esfuerzo en los brazos que sujetan los alabes y la carcasa del generador. El esfuerzo se concentra principalmente en los brazos que sostienen el alabe. Sin embargo este esfuerzo, 54.39 MPa, representa alrededor de una octava parte del esfuerzo máximo, 440 MPa, que soporta el acero utilizado [91].

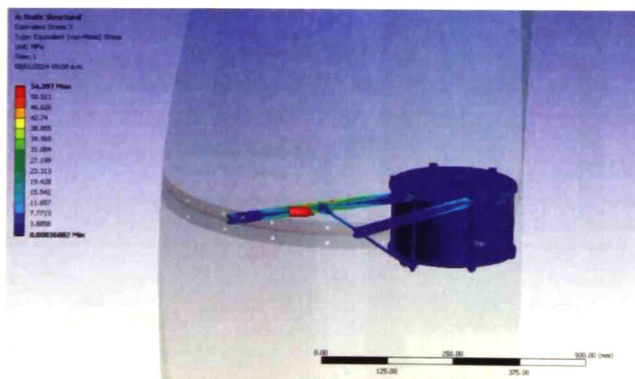


Fig. 9-20. Esfuerzo en la carcasa del generador y la estructura de soporte del alabe

A continuación se realiza un análisis estructural sobre el mástil donde se instala el aerogenerador. En la Fig. 9-21 se muestran las tres cargas aplicadas. La primera es un momento de 180 N-m, equivalentes a 90 N-m proporcionados por cada alabe. La segunda es una fuerza lateral de 32 N ejercida por una velocidad del viento de 15 m/s. La tercera

Capítulo 9

corresponde al peso del generador y los alabes, su valor es de 392 N. El soporte del mástil se encuentra ubicado en los orificios de la base inferior.

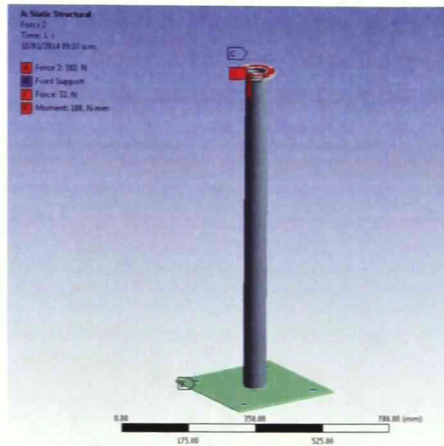


Fig. 9-21. Cargas aplicadas al mástil

La Fig. 9-22 muestra la deformación y el esfuerzo en el mástil. La deformación máxima es de 1.49 mm y se encuentra en la parte superior del mástil, esta deformación es consecuencia de la carga lateral aplicada.

El esfuerzo que se presenta en la base del mástil equivale a 92.92 MPa. Este valor es una quinta parte del esfuerzo que soporta el acero utilizado en su construcción.

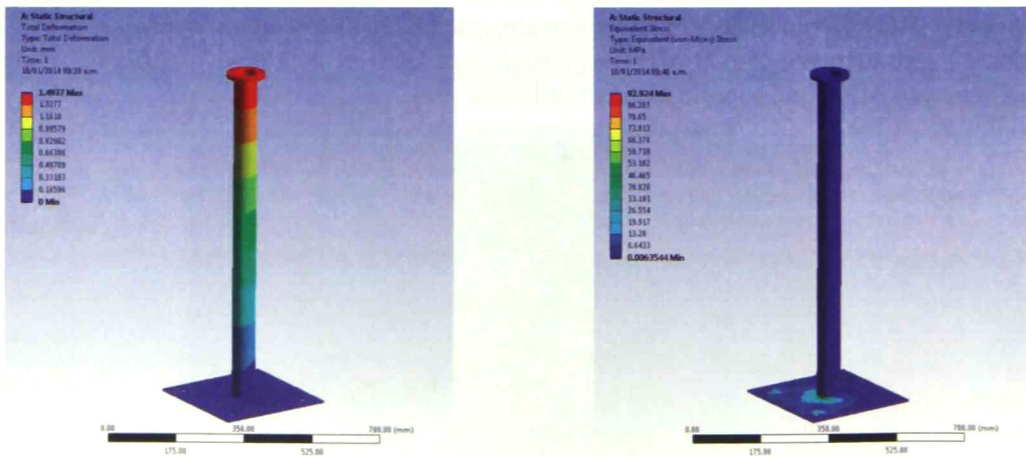


Fig. 9-22. Deformación y esfuerzo en el mástil

Capítulo 10. Construcción del aerogenerador

En este capítulo se muestra el proceso de construcción de las piezas del GSIP y de los alabes del aerogenerador.

10.1. Construcción del GSIP

10.1.1. Construcción del estator

El estator se construye apilando láminas de acero al silicio de grano no orientado M19. Para realizar el corte de las láminas existen tres alternativas; troquelado, corte laser y mediante procesos químicos.

La técnica más utilizada y barata para la producción en serie de pequeñas máquinas rotativas es el troquelado, sin embargo, para la construcción de un prototipo el troquel resulta muy costoso. Para prototipos la solución más rápida y conveniente es el corte del acero por medio de una máquina laser, ver Fig. 10-1.



Fig. 10-1. Corte laser del acero al silicio

Una vez hecho el corte se realiza el apilamiento sobre el soporte del estator, ver Fig. 10-2.



Fig. 10-2. Apilamiento del laminado

Enseguida se realiza el embobinado en el núcleo del estator. Para este propósito se sigue el diagrama mostrado en el Apéndice D.



Fig. 10-3. Estator embobinado

10.1.2. Construcción del rotor

La construcción de la carcasa del rotor se hace en acero inoxidable tipo 304. La Fig. 10-4 muestra parte del proceso de construcción de la carcasa en un taller de torno y soldadura.

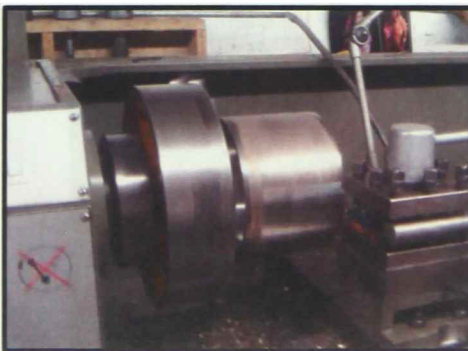


Fig. 10-4. Construcción del rotor

Capítulo 10

Para adherir los imanes al rotor se utilizó pegamento epóxico. Cada imán fue fijado por una prensa de tornillo mientras se llevó a cabo el proceso de solidificación del pegamento epóxico, ver Fig. 10-5.



Fig. 10-5. Adhesión de los imanes

10.1.3. Ensamble del GSIP

Para realizar el ensamble del GSIP se toma como referencia la Fig. 10-6.



Fig. 10-6. Ensamble del GSIP

Primero se hace el ensamble del Eje del generador, Tapa inferior, Balero inferior, Soporte del estator y el Estator. Enseguida se hace el ensamble del rotor y el estator.

En Fig. 10-7a se muestra el rotor y el estator antes del ensamble y en la Fig. 10-7b se muestra el GSIP ensamblado.

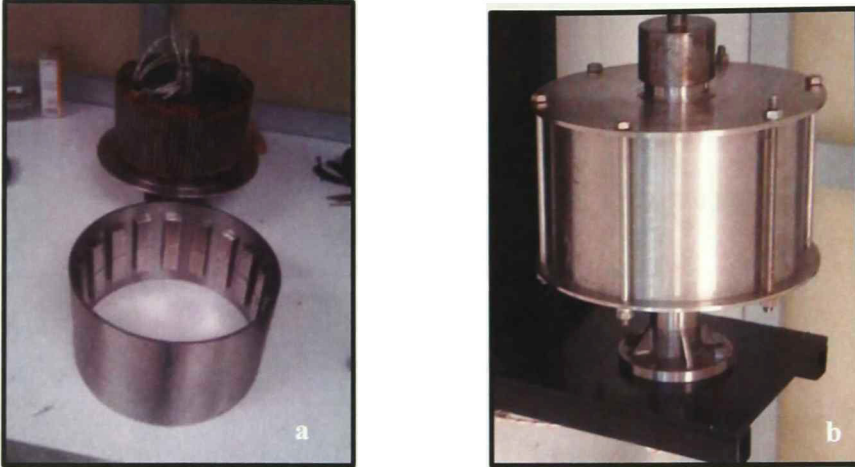


Fig. 10-7. GSIP: a) Rotor y Estator, b) Ensamble

10.2. Construcción del Alabe.

Para llevar a cabo la construcción de los alabes se inicia construyendo un cilindro que se utiliza como molde para la fabricación de las aspas. La Fig. 10-8 muestra la construcción del cilindro.



Fig. 10-8. Molde para la fabricación de los alabes.

Capítulo 10

Los alabes del aerogenerador se construyen con tres capas de fibra de vidrio para alcanzar un espesor aproximado de 3 mm. En la Fig. 10-9 se muestran los alabes construidos.



Fig. 10-9. Alabes extraídas del molde.

Una vez construidos los alabes se colocan tres segmentos de aro para incrementar la rigidez en la hoja del alabe.

El primer segmento se coloca en la parte superior, el segundo segmento se coloca a la mitad del alabe y el último en la parte inferior. La Fig. 10-10 muestra los alabes construidos.



Fig. 10-10. Aspas construidas.

10.2.1. Ensamble

El aerogenerador fue ensamblado en las instalaciones del Cinvestav para probar el sistema mecánico antes de instalarlo en el periférico. El sitio de instalación se muestra en la Fig. 10-11 y en la Fig. 10-12.



Fig. 10-11. Ensamble del aerogenerador en el Cinvestav



Fig. 10-12. Aerogenerador instalado en el Cinvestav.

A partir de estas pruebas se mejoraron aspectos como; la unión de los imanes de neodimio al rotor, el diseño de la base del mástil y el sellado en las tapas del generador.

Capítulo 11. Pruebas

Las pruebas realizadas al prototipo nos ayudaron a verificar el desempeño de los modelos desarrollados, así como a validar y mejorar la metodología propuesta.

11.1. Pruebas de laboratorio del GSIP

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo mediante tres configuraciones. En la primera configuración el devanado del estator fue bifásico con 30 conductores por ranura. La velocidad de giro fue de 196 rpm.

En la segunda configuración el devanado fue trifásico con 20 conductores por ranura y con un giro de 209 rpm.

En la tercera configuración el devanado fue trifásico con 40 conductores por ranura y las pruebas se hicieron a 155 rpm. En la Tabla 11-1 se resumen las características de cada configuración.

Tabla 11-1. Pruebas de laboratorio del GSIP de 100W.

	Fases del devanado	Conductores por ranura	Velocidad angular
Configuración 1	2	30	196
Configuración 2	3	20	209
Configuración 3	3	40	155

Para llevar a cabo estas pruebas, el GSIP se acopló a un motor de inducción controlado por un variador de frecuencia. Las señales de voltaje obtenidas son capturadas con un osciloscopio digital, ver Fig. 11-1.

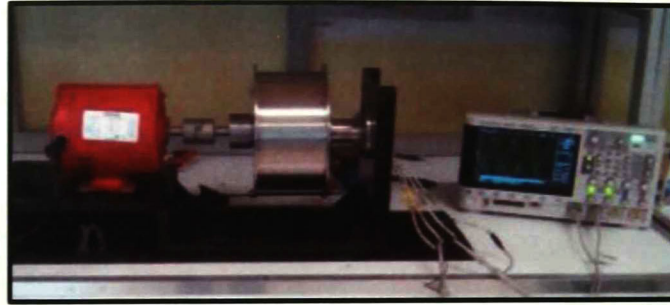


Fig. 11-1. Prueba de laboratorio al prototipo

La Fig. 11-2 presenta las formas de onda obtenidas en terminales del devanado durante las pruebas de laboratorio para la configuración 1. Estas señales son comparadas con las señales obtenidas mediante el software JMAG. El error obtenido al comparar el valor rms del voltaje estimado en simulación con el valor rms obtenido con el osciloscopio es de 4 % para la fase A y 0.8 % para la fase B.

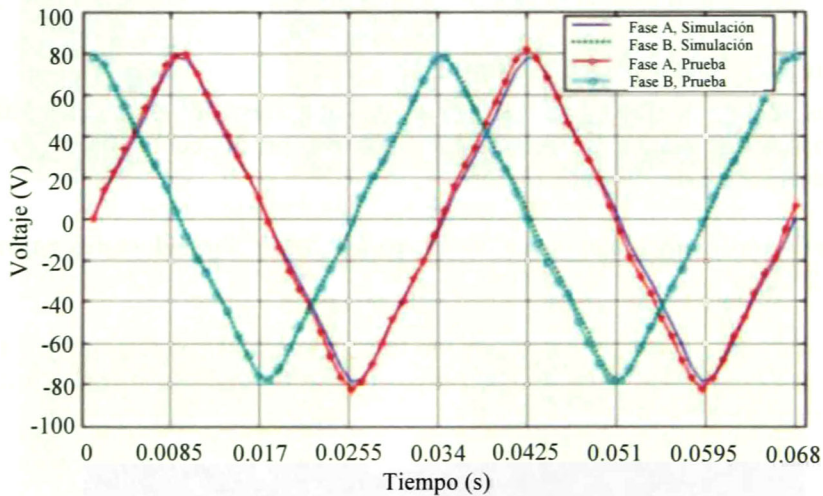


Fig. 11-2. Prueba 1: Voltaje vs Tiempo @ 196 rpm.

En la Fig. 11-3 se presentan las señales de voltaje obtenidas en JMAG y las señales capturadas en el osciloscopio para la configuración 2. Al comparar el valor rms de la señal medida con la señal estimada, tenemos un error del 2.5 %, 3.8 % y 1.3 %, en las fases A, B y C, respectivamente.

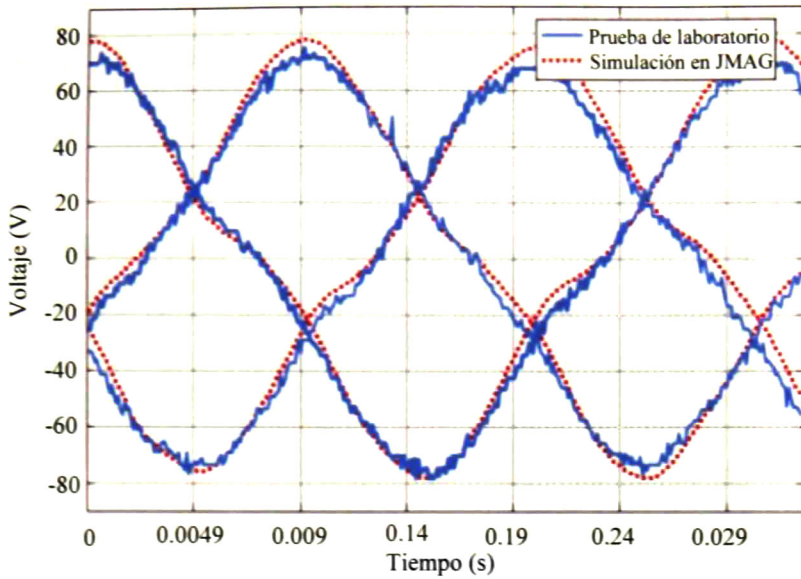


Fig. 11-3. Prueba 2: Voltaje vs Tiempo @ 209 rpm.

Los resultados de las pruebas de laboratorio de la configuración 3 son presentados en la Fig. 11-4. Los errores de simulación en relación a la medición en las fases A, B y C son del 8.6 %, 6.8 % y 14.6 %, respectivamente.

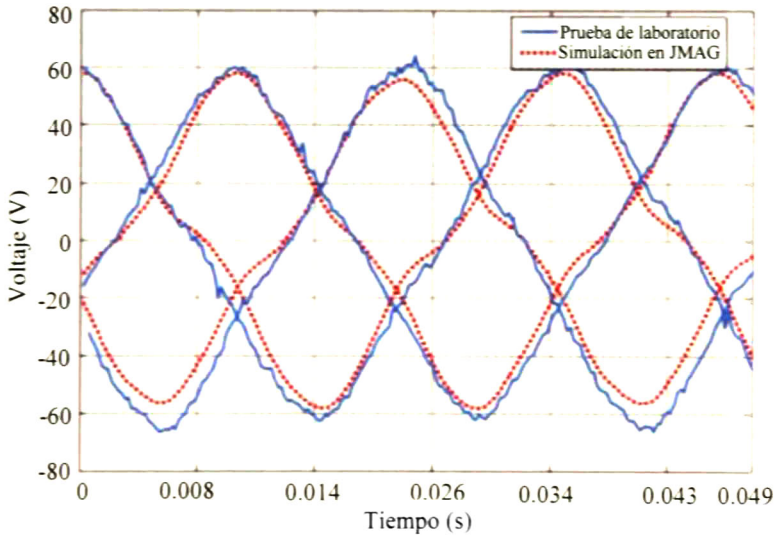


Fig. 11-4. Prueba 3: Voltaje vs Tiempo @ 155 rpm.

Las configuraciones 1 y 2 presentan buenos resultados dado que el error máximo fue del 4%, y se obtuvo un error mínimo del 0.8%. Por otro lado, en la configuración 3 se presentó un error máximo de 14.6% y un mínimo de 6.8%. Este incremento en el error puede atribuirse a errores en las conexiones de la 3er configuración.

11.2. Pruebas de campo del aerogenerador

Una vez realizadas las pruebas en Cinvestav, se realizó la instalación del Aerogenerador en el periférico de Guadalajara. El esquema de interconexión a la red eléctrica se muestra en la Fig. 8-1. La Fig. 11-5 muestra el aerogenerador instalado junto a la barrera central del periférico. El rectificador, inversor y esquema de protección se colocó en el poste de una luminaria a 15 metros de distancia del aerogenerador, ver Fig. 11-6.



Fig. 11-5. Aerogenerador instalado en el periférico.



Fig. 11-6. Inversor instalado en el periférico.

Los resultados de la instalación del aerogenerador no fueron los esperados, debido a que el giro de los alabes fue menor al estimado en la sección 9.1.1. La velocidad nominal calculada fue de 220 rpm y lecturas tomadas en el sitio muestran velocidades cercanas a 80 rpm. Esto no permitió que se alcanzara el voltaje de operación en el inversor para realizar la sincronización a la red eléctrica.

Capítulo 11

El diseño del aerogenerador debe ser modificado para que el generador alcance el voltaje requerido por el inversor. Para este propósito tenemos dos alternativas; La primera es modificar el diseño de los alabes. Esta modificación deberá realizarse para alcanzar las rpm requeridas por el generador. Y La segunda opción es modificar el diseño del GSIP para que opere a las rpm que producen los alabes construidos.

En nuestro caso se elige realizar la segunda opción, por ser nuestra área de interés y de mayor conocimiento técnico.

La modificación al flujo de diseño será la corrección del parámetro correspondiente a la velocidad periférica de la máquina que se debe tomar como el 40% de la velocidad máxima de viento medida en el sitio, esto para asegurar la entrega de potencia requerida del generador, es decir:

$$v_p = 0.4v_{max} \quad (11-1)$$

En el Capítulo 13 se presentan las correcciones al GSIP de 100 W.

Capítulo 12. Diseño de un generador de 5kW

Mientras se llevaba a cabo el diseño y construcción del aerogenerador de 100 W surgió el financiamiento para realizar el diseño y construcción de un aerogenerador de eje horizontal de 5 kW.

Para este fin se tomó como base el flujo de diseño descrito en el capítulo 6 y la experiencia obtenida en la máquina de 100 W, [78] [79].

En este capítulo se presenta el procedimiento de diseño del GSIP de 5 kW. Se muestran estudios adicionales realizados en el generador para mejorar los parámetros: DAT del voltaje, Torque de arranque en la máquina y la eficiencia.

12.1. Diseño del GSIP de 5 kW

12.1.1. Cálculo de la velocidad de operación

Como parámetro de diseño se nos dio una velocidad del viento de 12 m/s. La velocidad de arranque de la turbina horizontal se considera de 3.5 m/s, entonces:

$$\omega = \frac{(3.5 \text{ m/s})(7)}{2.5 \text{ m}} = 9.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (12-1)$$

o

$$\omega = 9.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2 \pi \text{ rad}} \right) = 93.58 \approx 94 \text{ rpm} \quad (12-2)$$

Para la velocidad nominal del viento de 12 m/s, tenemos:

$$\omega = \frac{(12 \text{ m/s})(7)}{2.5 \text{ m}} = 33.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (12-3)$$

o

$$\omega = 33.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \text{ rev}}{2 \pi \text{ rad}} \right) = 320.8 \text{ rpm} \quad (12-4)$$

12.1.2. Cálculo del número de polos

Para determinar el número de polos p de la máquina, usamos la velocidad de arranque y especificamos la frecuencia inicial de operación, ecuación (9-6).

Considerando una frecuencia inicial de 24 Hz⁶ y la velocidad de arranque de 48 rpm, se tiene:

$$p = \frac{24 \times 120}{94} = 30.63 \approx 30 \text{ polos} \quad (12-5)$$

Para la velocidad de operación de 320 rpm, la frecuencia resulta:

$$f = \frac{p \times n}{120} = \frac{30 \times 320}{120} = 80 \text{ Hz} \quad (12-6)$$

12.1.3. Longitud y diámetro de la máquina

La longitud y diámetro de la máquina se obtienen a partir del número de polos y de las medidas de los imanes comerciales. El modelo de imán utilizado es NB50502 y tiene las siguientes dimensiones:

Tabla 12-1. Dimensiones del imán: Modelo NB50502.

Milímetros		
Largo	Ancho	Espesor
50.8	12.7	12.7

Considerando un porcentaje de abarcamiento⁷ polar del 50 % se obtiene el siguiente paso polar.

$$\tau = \frac{100(12.7)}{50} = 23.09 \text{ mm} \quad (12-7)$$

El diámetro interior del rotor resulta.

$$D_i = \frac{\tau p}{\pi} = \frac{(23.09)(30)}{\pi} = 220.50 \text{ mm} \approx 221 \text{ mm} \quad (12-8)$$

Agregando el espesor de los imanes, 12.7 mm, y el espesor en la carcasa de 5 mm, tenemos un diámetro exterior del rotor igual a 256.4 mm.

⁶ La frecuencia inicial se debe sintonizar hasta obtener una combinación de número de ranuras por polo y por fase (n_s) que permita diseñar un devanado balanceado. Para conocer las combinaciones de n_s , que producen un devanado balanceado consultar: <https://www.emetor.com/edit/windings>

⁷ Para el primer diseño, el porcentaje de abarcamiento polar puede tomar valores entre 50% y 60 %.

Eligiendo la longitud en el entrehierro de 1.5 mm, tenemos un diámetro exterior del estator de 218 mm.

Utilizando una relación⁸ de 1.3, entre el diámetro interno y el diámetro externo del estator, tenemos un diámetro interior del estator igual a 167 mm.

La longitud de la máquina es de 152.4 mm debido a que se utilizaron 3 imanes por polo, ver Apéndice G.

12.1.4. Diseño de las ranuras

Se utiliza un número fraccionario de ranuras por polo y por fase, para disminuir el torque de arranque en la máquina. Se elige utilizar 72 ranuras⁹ en el estator, para tener $\frac{4}{5}$ ranuras por polo y por fase.

Otra ventaja de incrementar el número de ranuras en el núcleo del estator es incrementar del área de disipación para reducir el calentamiento en la máquina.

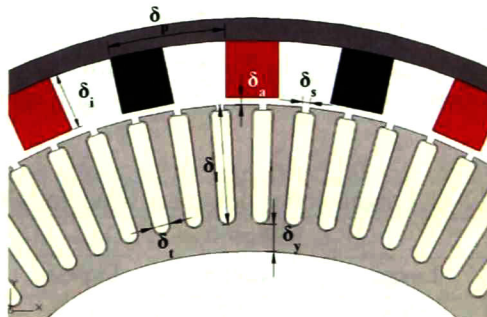


Fig. 12-1. GSIP de 5 kW (Medidas en Tabla 12-7)

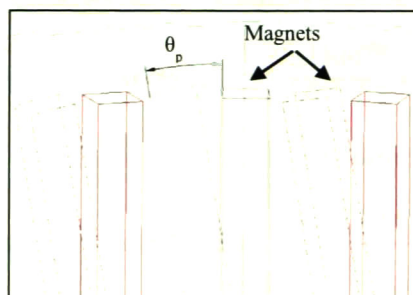


Fig. 12-2. Ángulo de inclinación de los polos

La Tabla 12-2 muestra el significado de los parámetros mostrados en la Fig. 12-1 y Fig. 12-2.

⁸ Este valor puede incrementarse para aumentar el número de conductores por ranura.

⁹ Se debe verificar que el número de ranuras permita diseñar un devanado balanceado. Para mayor información: <https://www.emetor.com/edit/windings>.

Tabla 12-2. Parámetros geométricos a modificar en el GSIP.

Parámetro	Significado
δ_i	ancho del polo
δ_p	porcentaje de abarcamiento polar
δ_a	entrehierro
δ_s	apertura de la ranura
δ_t	diámetro de fondo de ranura
δ_l	profundidad de la ranura
δ_v	longitud del yugo
θ_p	ángulo de inclinación de los polos

12.1.5. Determinación del número de conductores y voltaje de salida

De (2-37) se obtiene el número de conductores por fase, que se expresa por la ecuación (9-12).

$$N = \frac{E \times 60 \times 10^{11}}{\phi_t n k_p C_w} \quad (12-9)$$

Para calcular C_w la constante del devanado, es necesario calcular el factor de distribución del flujo magnético f_d , el factor forma f_b y el factor de distribución del embobinado k_d . El procedimiento para calcular f_d , y f_b se muestra en el Apéndice H.

Para calcular k_d se utiliza la ecuación (2-25), es decir:

$$k_d = \frac{\text{sen } \frac{180^\circ}{2 \times 3}}{4 \times \text{sen } \frac{180^\circ}{2 \times 3 \times 4}} = \frac{0.5}{0.5221} = 0.95 \quad (12-10)$$

Para calcular C_w se utiliza la ecuación (2-36).

$$C_w = 0.68 \times 1.11 \times 0.95 = 0.717 \quad (12-11)$$

Para calcular k_p se requiere conocer la distancia en grados eléctricos de un extremo a otro de la bobina la cual se calcula con (9-15):

$$\delta = \frac{360 \times 30 \times 2}{2 \times 72} = 150 \text{ grados eléctricos} \quad (12-12)$$

Y k_p se calcula con la ecuación (2-28).

$$k_p = \cos\left(\frac{180 - 150}{2}\right) = 0.96 \quad (12-13)$$

Capítulo 12

Para calcular ϕ_t , el flujo total en el entrehierro se usa (9-17)

$$\phi_t = \pi \times D_g \times l_m \times B_g \quad (12-14)$$

$$\phi_t = \pi \times 21.8 \times 15.2 \times 9706 = 10,103,927 \text{ lines} \quad (12-15)$$

$E=300$ Vca, es el voltaje de fase requerido en el generador para que el inversor de red suministre 5 kW a la red eléctrica.

Entonces el número de conductores por fase es:

$$N = \frac{300 \times 60 \times 10^8}{(10,103,927)(320)(0.96)(0.717)} = 803.86 \quad (12-16)$$

Para un devanado trifásico, el número total de conductores es de 2411.5. Para un estator con 72 ranuras, los conductores por ranura serían de 33.4, redondeando este número obtenemos el número de conductores corregido $Nc = 33$. Esto nos da 792 conductores por fase.

De esta forma a la velocidad angular de arranque de 94 rpm:

$$E = \frac{Nc \times n \times \phi_t \times k_p \times C_w}{60 \times 10^8} = \frac{792 \times 94 \times 10,103,927 \times 0.96 \times 0.717}{60 \times 10^8} \quad (12-17)$$
$$E = 86.29 \text{ V}$$

Y a la velocidad angular máxima de 320 rpm:

$$E = \frac{Nc \times n \times \phi_t \times k_p \times C_w}{60 \times 10^8} = \frac{792 \times 320 \times 10,103,927 \times 0.96 \times 0.717}{60 \times 10^8} \quad (12-18)$$
$$E = 293.7 \text{ V}$$

12.1.6. Cálculo del calibre del conductor

La corriente de armadura por fase se calcula de acuerdo a [64];

$$I = \frac{KVA \times 10^3}{E \times 3} = \frac{5.0 \times 10^3}{293.7 \times 3} = 5.67 \text{ A} \quad (12-19)$$

Según las curvas mostradas en [64] para máquinas de muy baja potencia y baja velocidad operación, la densidad de corriente eléctrica, A_a , en el cobre de armadura es de aproximadamente 4.25 Amperes/mm². De esta forma, la sección del conductor s_a resulta:

$$s_a = \frac{I}{A_a} = \frac{5.67 \text{ A}}{4.25 \text{ A/mm}^2} = 1.33 \text{ mm}^2 \quad (12-20)$$

Según el catálogo de conductores de alambre magneto, la sección del conductor obtenida corresponde a un calibre 16.

Finalmente la distribución del devanado en las ranuras se realiza mediante el software Maxwell, ver Apéndice I.

12.1.7. Simulación del GSIP en vacío

12.1.7.1. Captura del diseño

La captura del diseño del GSIP para la simulación se hizo en 2 dimensiones de acuerdo a los cálculos obtenidos en la sección anterior, Fig. 12-3, es decir:

Tabla 12-3. Dimensiones del rotor.

Número de polos (3 imanes por polo) dimensiones del imán Largo50.8 Ancho 12.7 Espesor 12.7	30
Paso polar	23.09 mm
Diámetro interior del rotor	221.00 mm
Espesor de la carcasa	5.00 mm
Longitud en el entrehierro	1.50 mm
Diámetro exterior del rotor igual	256.40 mm
Longitud de la máquina	152.40 mm

Tabla 12-4. Dimensiones del estator.

Número de Ranuras	72
Ranuras del estator	$\delta_p = 55.0 \%$ $\delta_i = 12.70 \text{ mm}$ $\delta_t = 4.00 \text{ mm}$ $\delta_l = 26.6 \text{ mm}$ $\delta_y = 5.98 \text{ mm}$ $\delta_s = 1.70 \text{ mm}$ $\delta_a = 1.50 \text{ mm}$ $\theta_p = 153^\circ$
Diámetro interior del estator	167 mm
Diámetro exterior del estator	218 mm
Longitud en el entrehierro	1.5 mm
Calibre del conductor	16

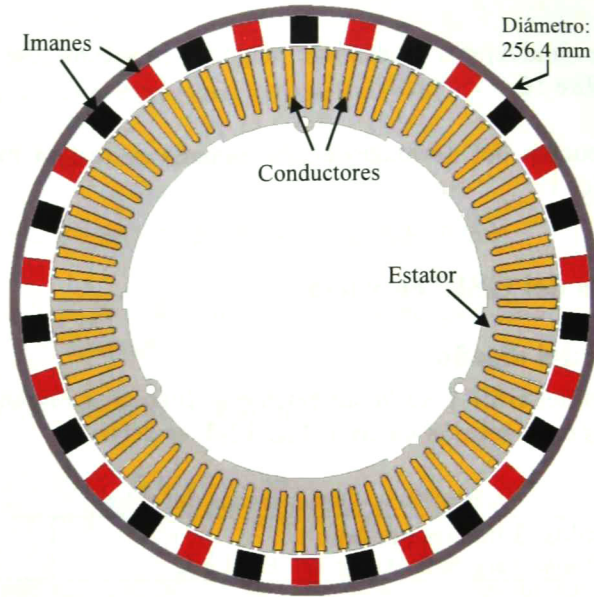


Fig. 12-3. Geometría del GSIP de 5 kW

La captura del diseño se hizo en AutoCAD.

12.1.7.2. Simulación de la densidad de flujo magnético

La simulación del diseño del GSIP se hizo en 2 dimensiones de acuerdo a los siguientes parámetros, es decir:

Tabla 12-5. Parámetros del GSIP de 5 kW.

Elementos estructurales	Acero SCM 435
Material del imán	Neodimio N35
Núcleo	Acero al silicio, M19

La simulación del GSIP de 5 kW se realiza haciendo consideraciones de simetría. Es decir, a diferencia de la máquina de 100 W, el diseño del generador de 5 kW presenta simetría a un tercio de su circunferencia, ver Fig. 12-20.

De esta forma, las simulaciones se hacen considerando únicamente un tercio de la máquina, disminuyendo así el tiempo de procesamiento para la simulación y disminuyendo el espacio requerido en el disco duro para almacenar los resultados de la simulación.

Los resultados de la simulación para la densidad de flujo magnético en la máquina se presentan en la Fig. 12-4. Se observa que existe una densidad máxima de flujo magnético en uno de los dientes del estator con un valor de 1.84 Teslas, este punto cambia de posición al momento que el rotor comienza a girar.

La densidad de flujo magnético en el entrehierro y en el yugo del estator presenta un valor aproximado de 0.97 Teslas.

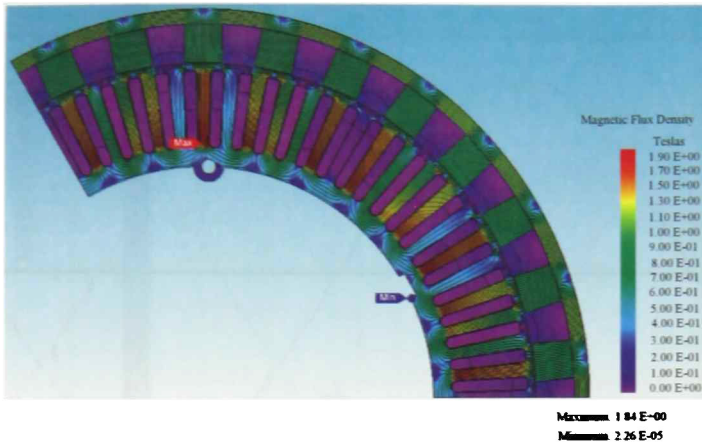


Fig. 12-4. Simulación de la densidad de flujo magnético en el GSIP de 5 kW

La simulación se hizo usando el software JMAG.

12.1.7.3. Estimación del voltaje en vacío en simulación

Para estimar el voltaje en vacío se requiere conectar los devanados del estator para las tres fases, en la Fig. 12-5 se muestran las conexiones de la fase A. Estas conexiones se hicieron con la ayuda del software Maxwell.

Los conductores por ranura son conectados en serie y el devanado del estator se conecta en estrella. En la Fig. 9-5 se mostró el circuito eléctrico de las conexiones de las fases del generador.

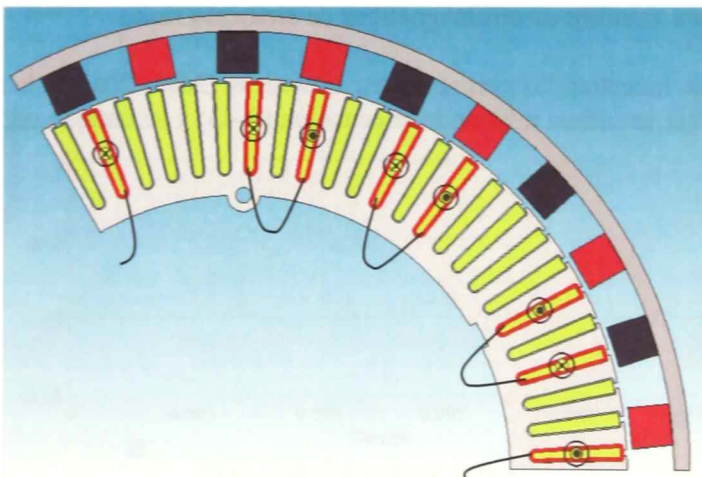


Fig. 12-5. Conexiones del devanado: Fase A, GSIP de 5 kW

Utilizando el circuito y las conexiones mostradas en Fig. 12-5 y Fig. 9-5 se estima el voltaje de salida mediante el Software JMAG a una velocidad angular de 320 rpm. En la Fig. 12-6 se presenta la señal de voltaje en terminales del GSIP.

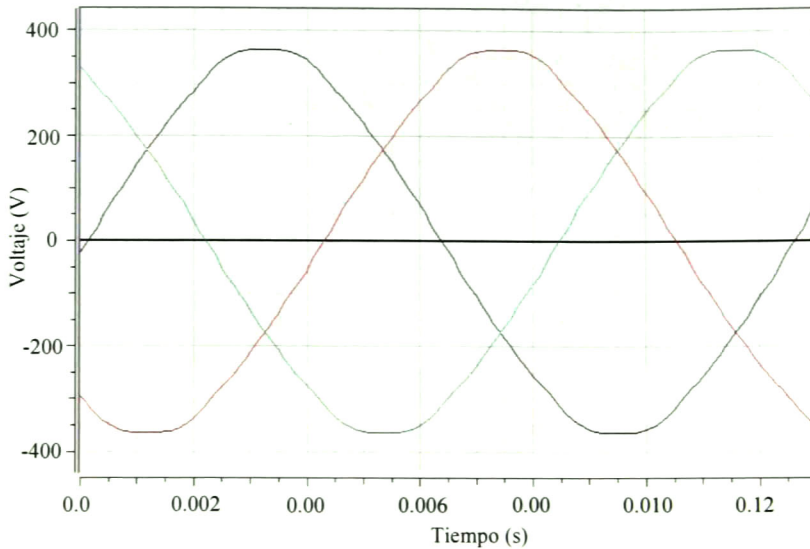


Fig. 12-6. Voltaje en vacío del GSIP @ 320 rpm

El valor rms de la señal de voltaje es de 256 V. Comparando este valor con el obtenido (293 V) en la sección 12.1.5, tenemos un error del 12 %. Sin embargo, dados los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio de la máquina de 100 W, el modelo desarrollado en JMAG produce buenos resultados al comparar la simulación con las pruebas de laboratorio.

Por otra parte, el procedimiento para realizar el diseño de un GSIP mostrado en las secciones 9.1.1-9.1.6 y 12.1.1-12.1.6 representa una primera aproximación que debe ser mejorada mediante estudios electromagnéticos de elemento finito.

En la Fig. 12-7 se muestran las componentes armónicas (2da – 20a) de la señal del voltaje. La DAT del voltaje se estima utilizando la ecuación (2-43) y se obtiene un valor de 6.0 %.

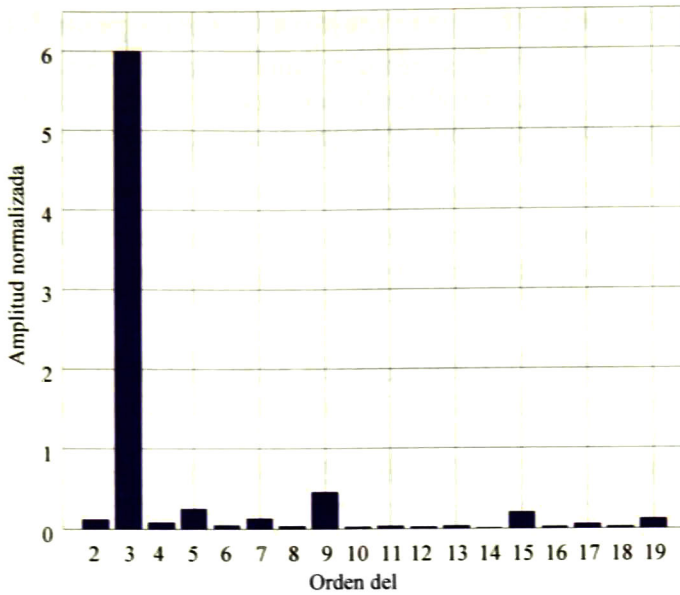


Fig. 12-7. Componentes armónicas de la señal de voltaje: GSIP de 5 kW

La 3ra y 9na armónica presentan mayor aportación en la DAT del voltaje, con un valor del 6 % y del 0.5 %, respectivamente. El resto de las componentes cuentan con un valor inferior a 0.3 %.

El mismo programa de simulación calcula la forma de onda del torque en vacío, ver Fig. 12-8.

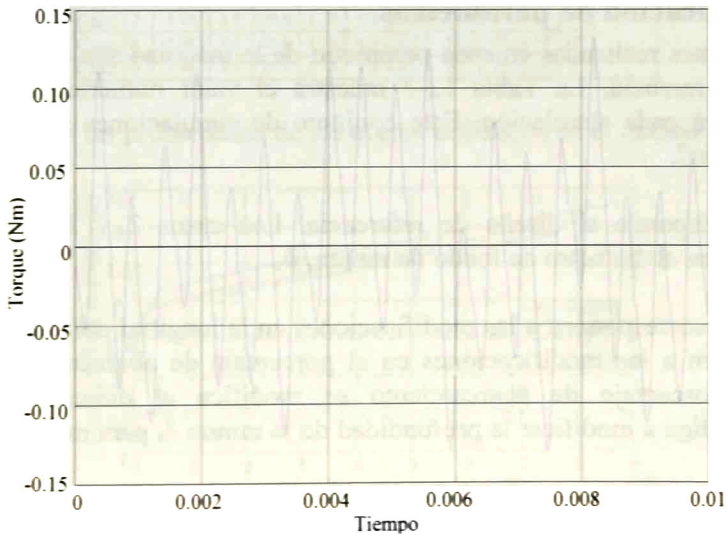


Fig. 12-8. Torque en vacío

El valor rms del torque es de 0.07 Nm.

12.2. Determinar parámetros que mejoran el desempeño del GSIP.

Una vez hecho el diseño del GSIP, se realizan estudios para determinar los parámetros de construcción que ayudan a mejorar el rendimiento de la máquina. En particular se busca disminuir la DAT del voltaje, disminuir el torque de arranque e incrementar la eficiencia de la máquina.

Los estudios para mejorar el desempeño de la máquina se realizaron modificando la geometría del rotor, la geometría del estator y el tipo de acero utilizado en el núcleo del estator.

En la Tabla 12-6 se describen los parámetros de diseño del GSIP de 5 kW, que se utiliza como referencia para llevar a cabo el estudio paramétrico en la máquina.

Tabla 12-6. Parámetros de diseño del GSIP de 5 kW.

Potencia nominal	5 kW	3 fases a velocidad nominal de 320 rpm
Polos	30	Material: Neodimio N35
Estator	72 Ranuras	Acero al silicio, M19
Elementos estructurales	Acero SCM35	
Torque en vacío	0.07 Nm	
DAT del Voltaje	6.01 %	

En la Fig. 12-1 y en la Fig. 12-2 se describieron los parámetros geométricos, propuestos, a modificar en el rotor y en el estator con el fin de conocer los parámetros que permitan mejorar el rendimiento de la máquina.

12.2.1. Modificación de parámetros

Las modificaciones realizadas en cada parámetro de la máquina son de $\pm 10\%$ en relación al diseño de referencia. La Tabla 12-7 muestra el valor numérico de los parámetros modificados para cada simulación. Este conjunto de simulaciones serán llamadas como “Casos de estudio”

El caso 1 corresponde al diseño de referencia. Los casos 2 y 3 corresponden a las modificaciones en el diámetro de fondo de ranura, δ_t .

Los casos 4 y 5 corresponden a las modificaciones en la longitud del yugo, δ_y . Los casos 6 y 7 corresponden a las modificaciones en el porcentaje de abarcamiento polar δ_p . Para modificar el porcentaje de abarcamiento se modifica el diámetro del rotor. Esta modificación obliga a modificar la profundidad de la ranura δ_l para mantener el entrehierro original.

Los casos 8 y 9 corresponden a variaciones en la apertura de la ranura δ_s . Los casos 10 y 11 corresponden a las modificaciones en el entrehierro δ_a . Esto se alcanza modificando el diámetro exterior del estator.

Capítulo 12

Los casos 12 y 13 corresponden a modificaciones en el número de conductores por ranura S . Para estas modificaciones, se cambia el calibre de los conductores G para usar el área disponible en la ranura.

El caso 14 corresponde a la variación en el alargamiento de la profundidad de la ranura δ_1 . Los casos 15 y 16 corresponden a modificaciones en el ángulo de inclinación de los polos θ_p .

Finalmente, los casos 17-19 corresponden a reducciones en la longitud del polo δ_i .

Cada caso de estudio es simulado para 4 diferentes aceros en el núcleo del estator. En total son generados 76 casos de estudio.

Tabla 12-7. Casos de estudio.

	Milímetros						δ_p (%)	S	G	θ_p	Núcleo
	δ_y	δ_a	δ_1	δ_s	δ_i	δ_i					
Case 1	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	0°	M14, M19, M27 and M43
Case 2	5.98	1.5	26.6	1.70	3.6	12.7	55	33	14	0°	
Case 3	5.98	1.5	26.6	1.70	4.4	12.7	55	33	14	0°	
Case 4	7.00	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 5	5.00	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 6	5.98	1.5	29.9	1.70	4.0	12.7	50	33	14	0°	
Case 7	5.98	1.5	23.9	1.70	4.0	12.7	60	33	14	0°	
Case 8	5.98	1.5	26.6	1.85	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 9	5.98	1.5	26.6	2.00	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 10	5.98	1.0	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 11	5.98	2.0	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 12	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	29	13	0°	
Case 13	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	37	15	0°	
Case 14	5.98	1.5	28.4	1.70	4.0	12.7	55	33	14	0°	
Case 15	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	3°	
Case 16	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	12.7	55	33	14	6°	
Case 17	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	9.5	55	33	14	0°	
Case 18	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	6.3	55	33	14	0°	
Case 19	5.98	1.5	26.6	1.70	4.0	3.2	55	33	14	0°	

La Fig. 12-9 ilustra las propiedades de los aceros utilizados en el núcleo del estator.

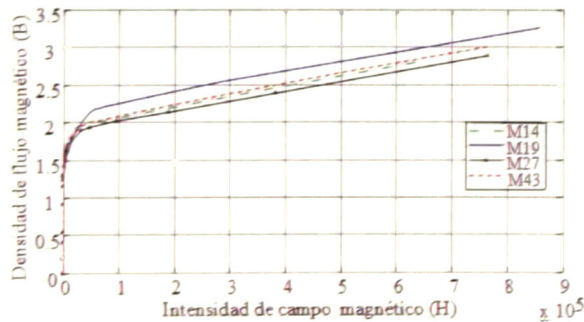


Fig. 12-9. Curvas de magnetización utilizadas para el núcleo del estator

12.3. Mejorar DAT del Voltaje y torque en vacío.

El proceso iterativo para determinar los parámetros que ayudan a mejorar la DAT y el torque en vacío se muestra en la Fig. 12-10.

Para cada caso de estudio se calcula, con los parámetros de referencia, la DAT de Voltaje (pasos 1 a 3), se calcula el valor del torque en vacío (paso 4) y se guardan los valores en una lista.

Enseguida se toma una de las características del GSIP a la vez, se altera en un 10% de su valor de referencia, se simula y los resultados se guardan en la lista. Se toma la misma característica y se altera en un -10% de su valor referencia, se simula y los resultados se guardan en la lista.

A partir de la lista de resultados se hace un análisis exhaustivo y se determinan las características de construcción del generador. Este análisis permite ver cuáles son las modificaciones que influyen en la calidad de la señal y el torque del generador.

Para este ejercicio se utilizaron dos programas comerciales; programa de análisis de elemento finito, JMAG® y la rutina FFT de MatLab®.

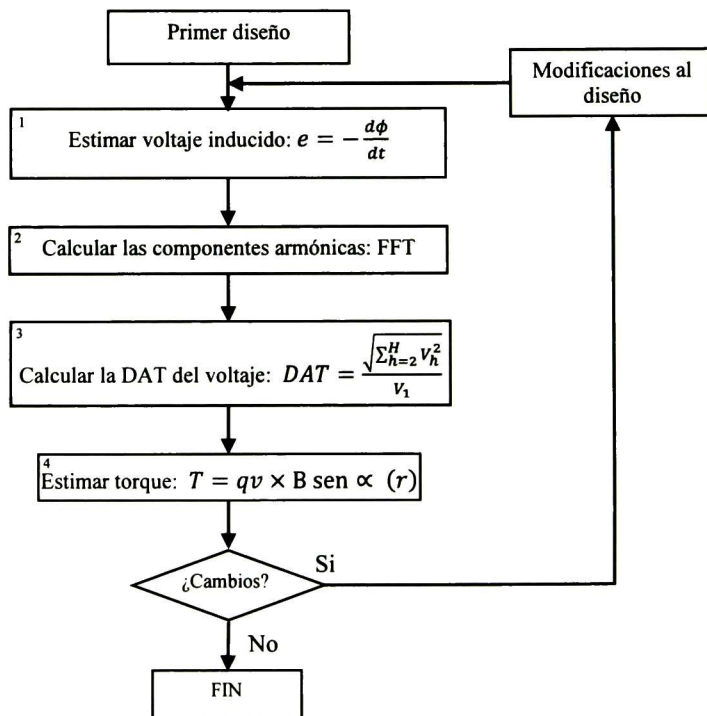


Fig. 12-10. Diagrama de flujo para el cálculo de la DAT y del Torque

12.3.1. DAT del Voltaje

El valor de la DAT del voltaje para caso de estudio se muestra en la Fig. 12-11. Se observa que las modificaciones propuestas tienen influencia en la DAT del voltaje inducido. Los materiales utilizados en la construcción del estator también presentan influencia en la DAT.

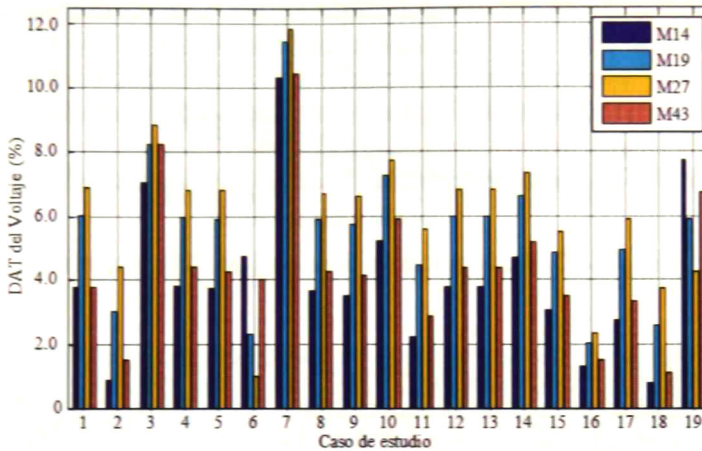


Fig. 12-11. DAT del voltaje para cada caso de estudio

La Fig. 12-11 muestra que utilizando el material M14 se produce el mejor desempeño en casi todos los casos.

Por otra parte, el material M27 produce el peor desempeño en la mayoría de los casos, debido a que este material cuenta con la mayor reluctancia, para un valor de B menor a 1.93 Teslas, de los materiales utilizados [81], ver Fig. 12-12.

Sin embargo, el acero M27 presenta mejor desempeño en el caso 6 (modificación del porcentaje de abarcamiento polar) que el material M14. Esto sucede porque con el material M14 se presenta saturación magnética en uno de los dientes del estator, ver Fig. 12-13. En la Fig. 12-14 se muestran las propiedades del acero. Para el caso 6, la densidad de flujo magnético alcanza un valor de 1.97 Teslas. Esta saturación modifica la onda del voltaje inducido.

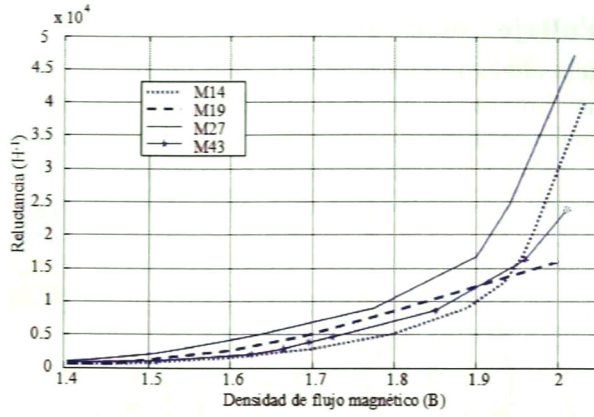


Fig. 12-12. Reluctancia vs densidad de flujo magnético

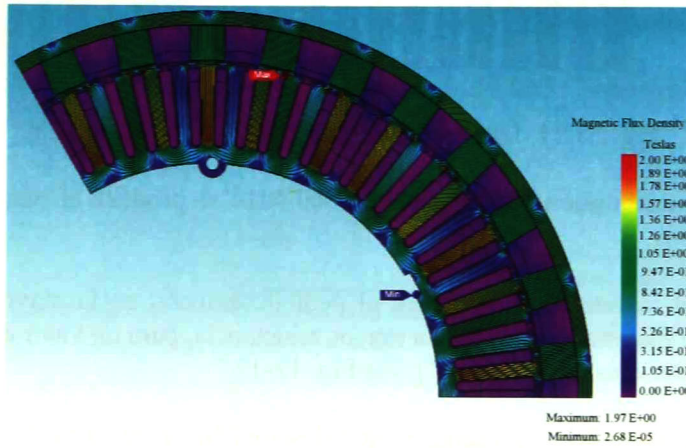


Fig. 12-13. Densidad de flujo magnético en el GSIP de 5 kW

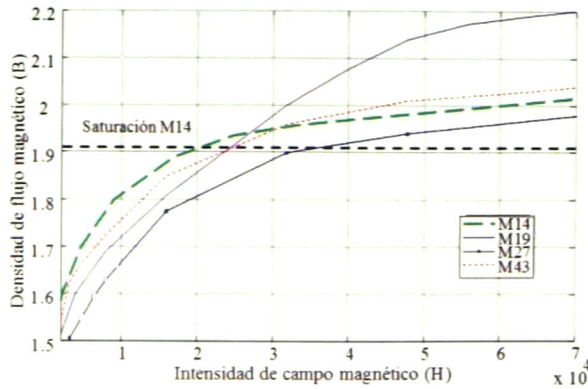


Fig. 12-14. Saturación del material M14 (Acercamiento de la Fig. 12-9)

Para los casos 15 y 16, la modificación en el ángulo de inclinación de los polos crea una reducción de hasta el 10 % en el voltaje de salida. Es decir, disminuye de 140.4 V hasta 126.4 V; sin embargo, se produce una reducción en la DAT del voltaje.

Los casos 17, 18 y 19 son muy interesantes, aquí la longitud del polo (δ_i) es disminuida 25 %, 50% y 75 %. Considerando al caso 1 (100%) como referencia, el caso 17 mantiene la misma magnitud del voltaje pero la DAT es reducida en 27 %. Para el caso 18, la magnitud del voltaje se mantiene igual y la DAT se reduce en 78 %. En el caso 19 el voltaje de salida se vuelve triangular, su magnitud disminuye y su DAT incrementa un 102 %.

La Fig. 12-15 ilustra la forma de onda del voltaje para los casos 1, 17, 18 y 19.

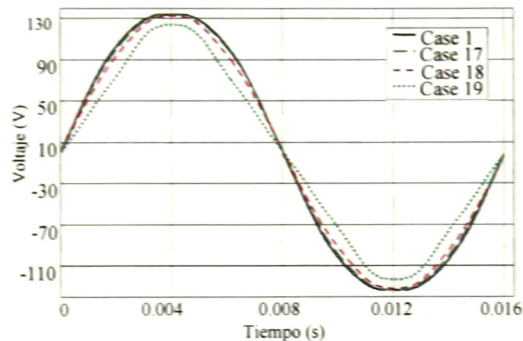


Fig. 12-15. Formas de onda para el caso 1 y casos 17-19, reduciendo longitud del polo (Acero M14)

Se observa como al disminuir δ_i , la señal tiende a convertirse en una señal triangular.

La Fig. 12-16 reproduce las formas de onda del voltaje inducido cuando se utiliza el material M14 en el núcleo del estator. Las formas de onda fueron ordenadas iniciando con el caso de estudio 7, el cual produce la DAT más elevada, hasta el caso 18 donde se produce la DAT mas baja.

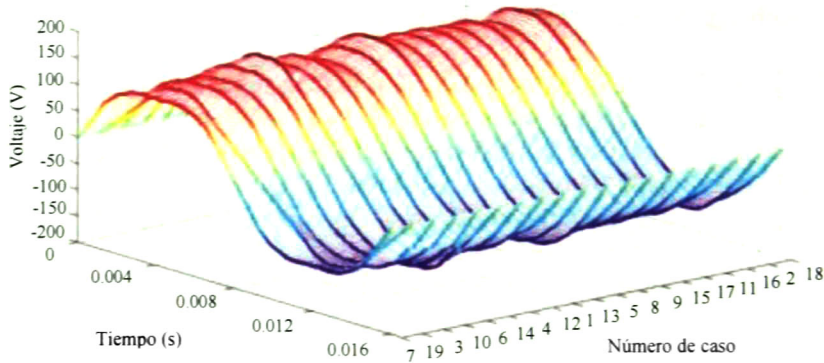


Fig. 12-16. Formas de onda para los casos que utilizan acero M14

La Fig. 12-17a) y la Fig. 12-17 b) presentan las componentes armónicas generadas en la forma de onda del voltaje del peor (10.34 %, Caso 7) y el mejor (0.80 %, Caso 18) caso de estudio con el material M14. Diecinueve componentes armónicas son presentadas.

Se observa que en el caso 7, la tercera armónica exhibe la mayor contribución en la DAT del voltaje, mientras que en el caso 18 la mayor contribución en la DAT del voltaje es debido al quinto y noveno armónico. El caso 18 con 0.8 % cumple la DAT del voltaje requerida por el estándar ANSY/NEMA MG1-2003, el cual requiere un máximo de 5 %.

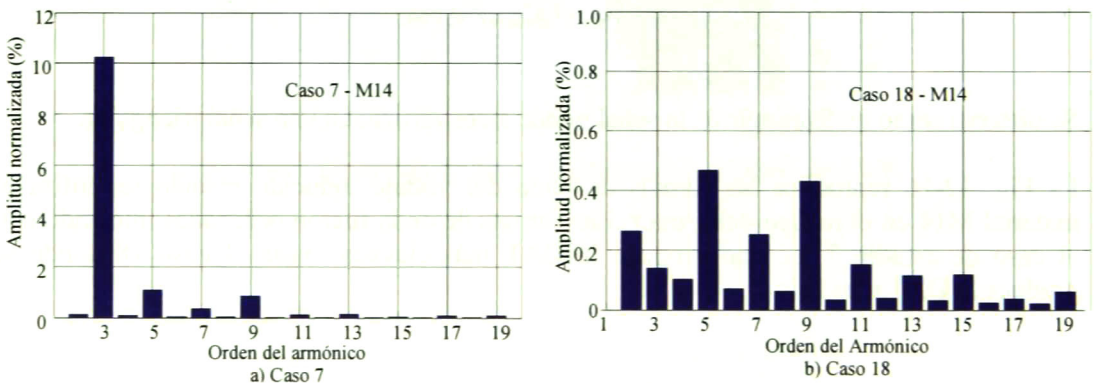


Fig. 12-17. Armónicos en la señal de voltaje utilizando el acero M14

De los resultados obtenidos en esta sección se concluye lo siguiente:

1.- Cuatro modificaciones geométricas conducen a mantener la DAT del voltaje dentro del estándar, $DAT \leq 5\%$.

- Disminuir la Longitud del polo δ_l .
- Reducir el diámetro de fondo de ranura δ_f .
- Reducir el porcentaje de abarcamiento polar δ_p .
- Aplicar un ángulo de inclinación del polo θ_p .

Capítulo 12

2.- Existe un compromiso entre la longitud del polo, la magnitud del voltaje y la DAT del voltaje. En el diseño propuesto con una longitud del polo de 6.35 mm se produce la menor DAT del voltaje.

3.- Se encontró una relación óptima del 50 % entre el diámetro de fondo de ranura y el ancho del diente. Es decir, la longitud total del diámetro de fondo de ranura y del ancho del diente se divide en partes iguales. Al modificar estos parámetros el diseñador debe preservar espacio suficiente en la ranura para colocar los conductores.

4.- Al modificar el porcentaje de abarcamiento polar, se obtiene un valor reducido de la DAT del voltaje. Utilizando los aceros M19 y M27, un buen valor del porcentaje de abarcamiento polar fue del 50 %.

5.- La modificación del ángulo del polo reduce la DAT del voltaje, sin embargo, esta modificación produce una disminución en el voltaje de salida.

12.3.2. Torque en vacío

En la Fig. 12-18 se muestra la magnitud del torque en vacío para todos los casos de estudio.

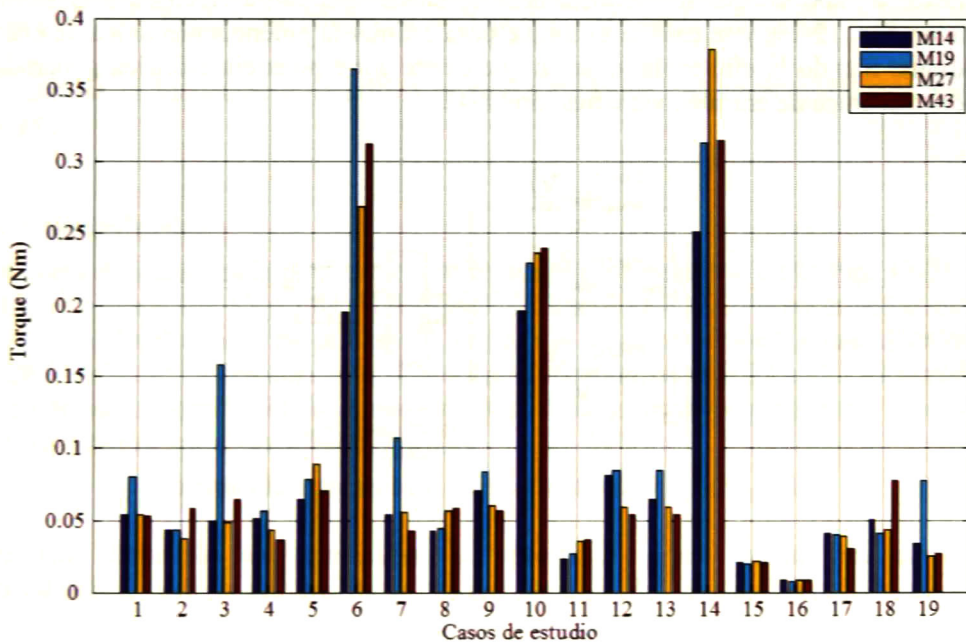


Fig. 12-18. Torque en vacío para todos los casos de estudio

El torque en vacío toma valores entre 0.01 Nm y 0.38 Nm. La magnitud del torque de arranque en un GSIP es generalmente 33 % superior al valor de torque en vacío [82]. De esta forma, el torque de arranque para los diseños realizados tomará valores entre 0.013 Nm y 0.505 Nm.

Para máquinas comerciales de 5 kW, el torque de arranque es de 2 a 3 Nm [83], [84] y [85], es decir, de 5 a 7 veces superior a los resultados obtenidos.

Analizando los datos de la Fig. 12-18 se concluye lo siguiente:

1.- El valor del torque en vacío incrementa de 4 a 5 veces cuando:

- Se disminuye el porcentaje de abarcamiento polar δ_p , de 55 % a 50 %.
- Se disminuye el entrehierro δ_a desde 1.5 mm hasta 1.0 mm.
- Si incrementa la profundidad de la ranura δ_l desde 26.6 mm hasta 28.4 mm.

2.- El valor del torque en vacío se reduce con las siguientes modificaciones:

- Aumentar el entrehierro δ_a de 1.5 mm a 2.0 mm: Disminución del 50 %.
- Aplicar un ángulo θ_p de 3° en los polos: Disminución del 50 %.
- Aplicar un ángulo θ_p de 6° en los polos; Disminución del 75 %.

El resto de las modificaciones propuestas no producen cambios significativos en el valor del torque.

12.4. Mejorar la Eficiencia

Para llevar a cabo el análisis de eficiencia se añade una carga eléctrica a la salida del generador, Fig. 12-19, y se calcula el torque para estimar la potencia mecánica de entrada a la máquina. Siendo la eficiencia la razón que existe entre potencia eléctrica generada y la potencia mecánica de entrada, ver ecuación (2-42).

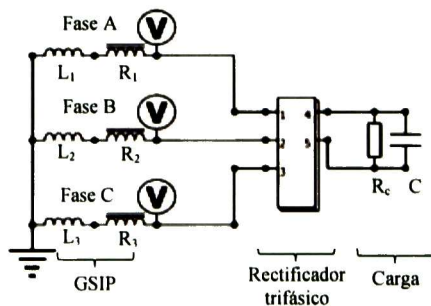


Fig. 12-19. Circuito eléctrico para estimar eficiencia

El proceso de análisis inicia estimando la inductancia del devanado del estator considerando una corriente de 1A. Esta inductancia se utiliza para realizar la simulación del GSIP a plena carga.

De los resultados de simulación se obtiene el torque promedio a la entrada del generador y la potencia promedio que entrega el devanado.

Durante este análisis se verifica que el número de conductores por ranura no ocupen mayor área que la disponible en el diseño de la ranura, evitando así realizar diseños que no puedan ser fabricados. El diagrama de flujo para el análisis de la eficiencia se muestra en la Fig. 12-20.

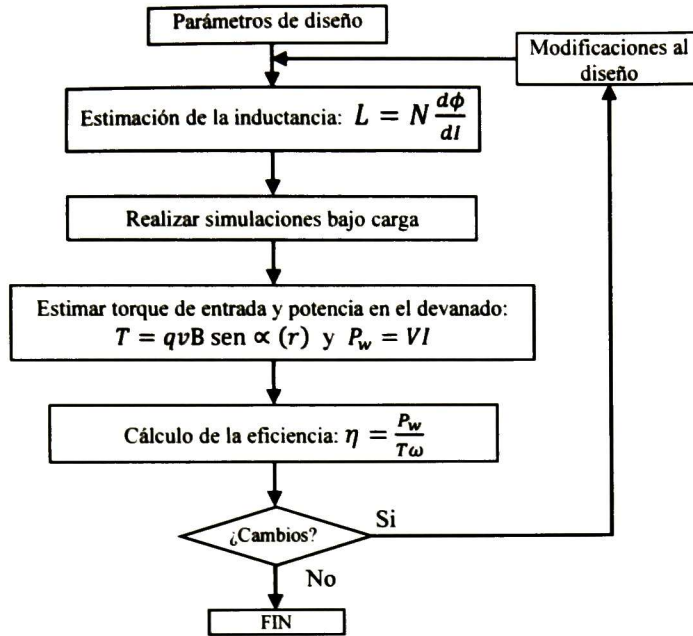


Fig. 12-20. Diagrama de flujo para calcular la eficiencia

Para calcular la inductancia se utilizó la rutina “calcular inductancia del devanado” de JMAG®.

12.4.1. Resultados

Los valores de inductancia para cada caso de estudio se muestran en la Fig. 12-21. Notar que solo los casos 12, 13 y 19 exhiben cambios superiores al 20 % en la inductancia por fase, en relación al caso 1. En el caso 12, el número de conductores por fase disminuye de 33 a 29. En el caso 13, los conductores por fase se incrementan de 33 a 37. Al modificar el número de conductores en el devanado, la inductancia se modifica a razón del cuadrado del número de conductores, ver ecuación (2-17).

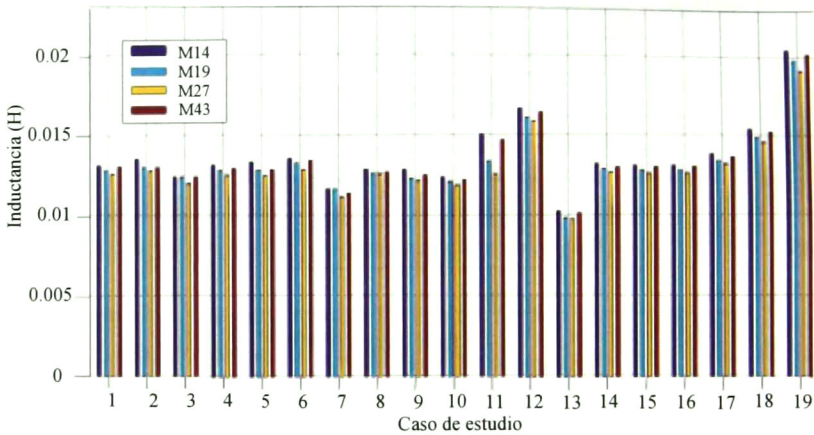


Fig. 12-21. Inductancia del estator en todos los casos de estudio

En el caso 19, la densidad de flujo magnético en el estator cae de 1.92 Teslas a 1.80 Teslas. Esto da lugar a un decremento de la reluctancia en un 60 %, ver Fig. 12-12. Entonces, de acuerdo a la ecuación (2-17) un decremento en la reluctancia produce un incremento en el valor de la inductancia, bajo el mismo número de vueltas por bobina.

Una vez calculada la inductancia se calcula la eficiencia del GSIP. La Fig. 12-22 muestra el valor de eficiencia para cada caso de estudio.

La mayoría de los casos exhibe una eficiencia cercana al 92 %. El caso 12 presenta un 94 % y el caso 13 presenta un 89 %. El caso 12 cuenta con el valor más pequeño de resistencia por fase (0.85 ohm), con 310 W de pérdidas en el devanado. El caso 13 tiene 1.73 ohm de resistencia por fase con 600 W de pérdidas en el devanado. La resistencia por fase para el resto de los casos de estudio es de 1.18 ohm.

Las pérdidas en el devanado para los casos 1-11 y 14-17 son 430 W. Para el caso 18 las pérdidas son 330 W y para el caso 19 son 180 W. Los casos 18 y 19 producen una potencia de salida menor que los casos 1-17, ver Fig. 12-23.

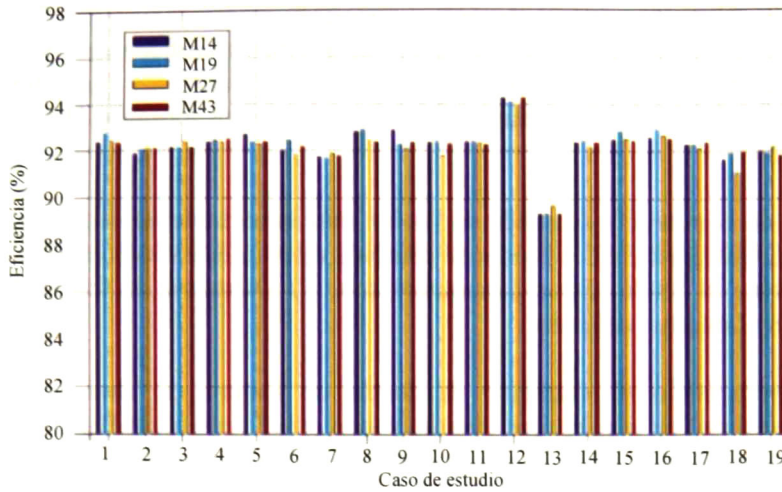


Fig. 12-22. Eficiencia de los casos de estudio

La potencia de salida para cada caso de estudio se muestra en la Fig. 12-23. Tres parámetros tienen mayor influencia en la potencia de salida del GSIP.

El primer es el entrehierro δ_a , en el caso 10 se reduce de 1.5 mm a 1.0 mm, esto produce un incremento en la potencia de salida del 17 %.

El segundo parámetro es la longitud del polo δ_i , en los casos 17 – 19, δ_i tiene un decremento del 25 %, 50 % y 75 %, respectivamente. Estas variaciones original un decremento en la potencia de salida del 7 %, 24 % y 58 %, respectivamente.

El tercer parámetro es el diámetro de fondo de ranura δ_r . En el caso 3 la potencia de salida se reduce 7.5 % al incrementar en 10 % el δ_r .

El resto de los casos de estudio presentan cambios en la potencia de salida de $\pm 5\%$.

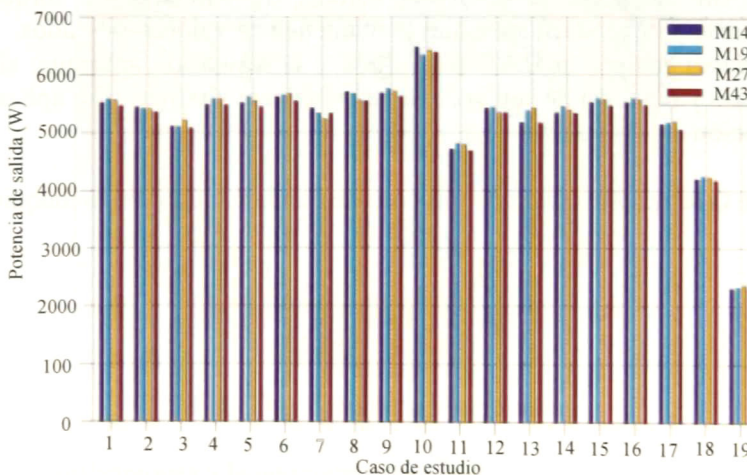


Fig. 12-23. Potencia de salida de los casos de estudio

De los resultados obtenidos en esta sección se concluye:

1.- Un cambio en el número y calibre de los conductores produce un incremento en la eficiencia de la máquina, del 92 % al 94 %. Ambos valores son más elevados que el recomendado (91 %) por el estándar NEMA Premium para motores de inducción de la misma capacidad.

2.- El análisis de la potencia de salida se vuelve más interesante en esta sección, debido a que tres parámetros geométricos producen cambios relevantes en la potencia de salida, que van del 8% hasta el 58 %. Estos parámetros son; (i) Diámetro de fondo de ranura, (ii) Entrehierro, (iii) Longitud del polo.

- i) Incrementado el diámetro de fondo de ranura, se disminuye la sección transversal en la máquina, disminuyendo así el flujo magnético en el núcleo y el voltaje en terminales del generador, con esto la potencia de salida del generador se disminuye un 8 %. La reducción del diámetro de fondo de ranura con respecto al caso base no presenta cambios significativos en la potencia de salida.
- ii) Los cambios realizados en el entrehierro consisten de una reducción de 1.5 mm a 1.0 mm y un incremento de 1.5 mm a 2.0 mm, estos cambios provocaron un incremento en la potencia de salida del 16 % y un decremento del 15 %, respectivamente.
- iii) Las modificaciones en la longitud del polo produjeron reducciones en la potencia de salida, alcanzando el 58 % en el caso 19, cuando el polo tiene una cuarta parte de la longitud en relación al caso base.

Correlacionando estos resultados con los obtenidos en la sección anterior, se concluye lo siguiente:

- No es conveniente reducir la longitud del polo (casos 17 -19) para disminuir la DAT del voltaje, debido a que la potencia en la máquina se disminuye hasta en un 58 %.
- Al reducir el entrehierro en la máquina (caso 10) se incrementa su potencia de salida, sin modificar la DAT del voltaje. Sin embargo, el torque en vacío se incrementa y debe verificarse que se mantenga en valores deseados.
- Si se desea reducir la DAT del voltaje y el torque de arranque, sin modificar la eficiencia y potencia de salida en la máquina, una alternativa es aplicar un ángulo de inclinación en los polos.

En el apéndice G se muestra parte del proceso de construcción de esta máquina.

Capítulo 13. Correcciones al diseño del GSIP de 100 W

En este capítulo se presentan las correcciones realizadas al GSIP de 100 W. Estas correcciones toman como referencia los resultados obtenidos durante las pruebas de campo al aerogenerador de eje vertical, y los resultados obtenidos durante el diseño y construcción del GSIP de 5 kW.

13.1. Correcciones al diseño del GSIP de 100 W

La geometría corregida de la máquina de 100 W se presenta en la Fig. 13-1.

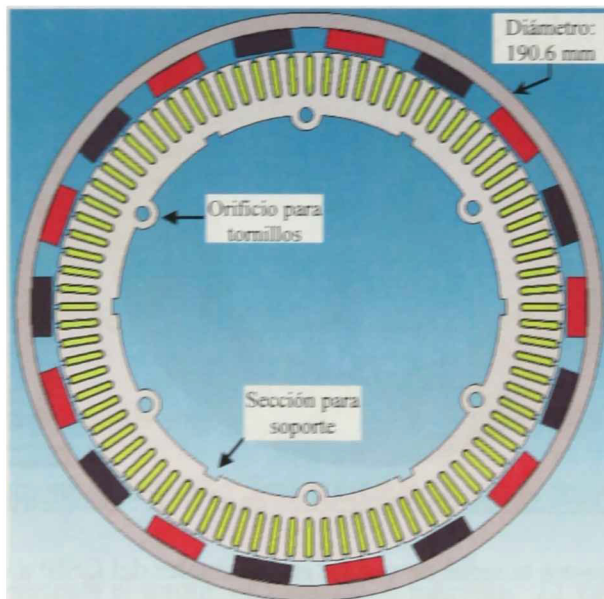


Fig. 13-1. Geometría mejorada.

Se realizaron 5 modificaciones a la geometría del GSIP:

1. Se incrementó la profundidad de la ranura para incrementar la sección transversal del conductor, incrementar el número de conductores por ranura y para mejorar la eficiencia de la máquina.
2. Se redujo el porcentaje de abarcamiento polar y en consecuencia el diámetro de la máquina, esta modificación ayudó a reducir la DAT del voltaje desde 26.2 % hasta 3.0 %.
3. Se agregaron orificios a las láminas del estator. En estos orificios se colocan tornillos para mejorar el apilamiento de las láminas del núcleo.
4. Se agregaron 6 secciones para el soporte del estator, para disminuir el calentamiento en la máquina porque las secciones transfieren el calor hacia el eje del generador.
5. Reducir el entrehierro de 1.5 mm a 1.0 mm, para incrementar la potencia en la máquina.

Las modificaciones 2 y 5 ayudan a incrementar el voltaje en terminales. Con esto se alcanza el voltaje requerido por el inversor a las 80 rpm.

Las conexiones del devanado y el número de polos se mantienen de la misma forma que el primer diseño.

La densidad de flujo magnético en la máquina se muestra en la Fig. 13-2. En esta geometría se alcanza un valor máximo de 1.97 Teslas.

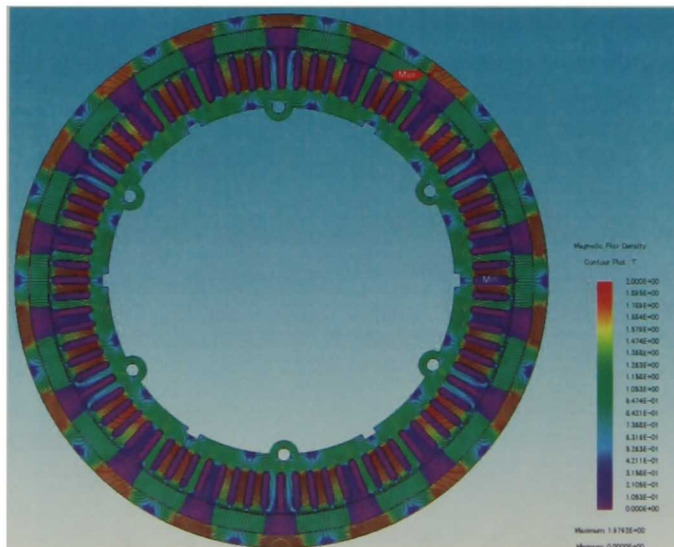


Fig. 13-2. Densidad de flujo magnético en el GSIP: Geometría mejorada.

En la Fig. 13-3 se muestra la señal de voltaje en terminales del GSIP a una velocidad de 80 rpm. El valor rms de la señal de voltaje es de 23.3 Vca.

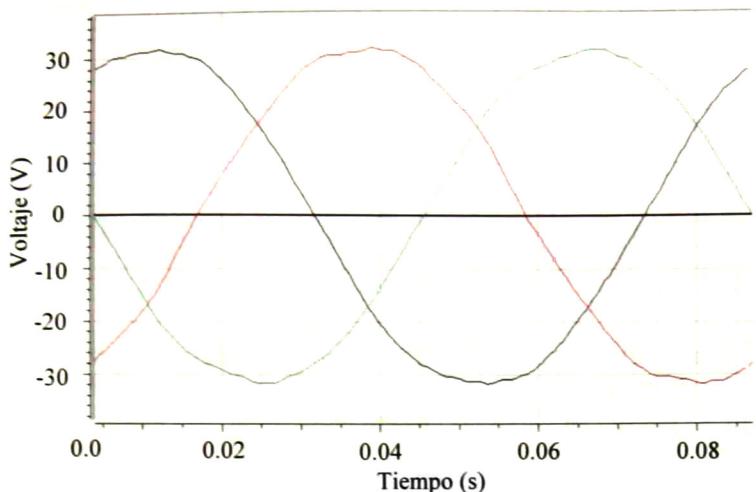


Fig. 13-3. Voltaje en vacío del GSIP @ 80 rpm

Las componentes armónicas 2da – 20a de la señal de voltaje se muestran en la Fig. 13-4. La DAT del voltaje se estima utilizando la ecuación (2-43) y resulta un valor de 3.0 %.

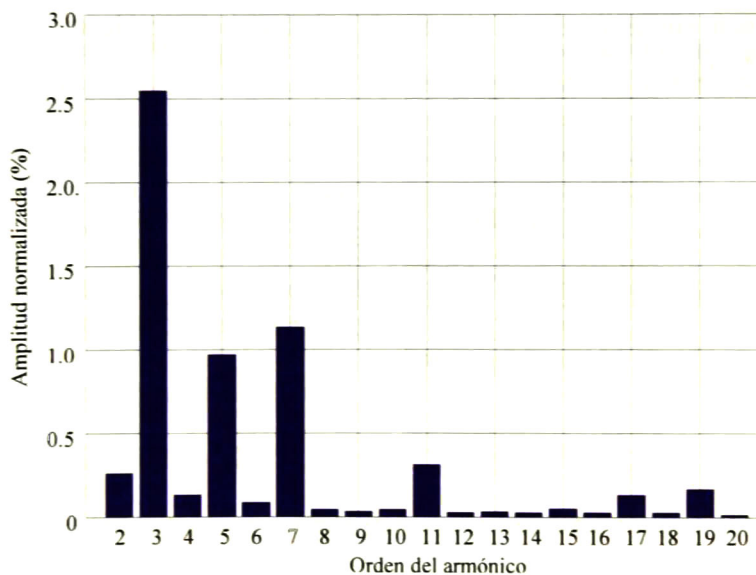


Fig. 13-4. Componentes armónicas de la señal de voltaje: Diseño mejorado.

Las componentes armónicas 3ra, 5ta y 7ma presentan la mayor aportación en la DAT del voltaje.

En la Fig. 13-5 se presenta el torque en vacío de la máquina. El valor rms del torque en vacío es de 0.21 Nm. Este valor es mayor al presentado en el prototipo construido, sin embargo concuerda con el torque en vacío de GSIP comerciales de 100 W, [92] y [93]. No obstante, si se aplica un ángulo de inclinación en los polos de 6° el valor rms del torque es de 0.1 Nm.

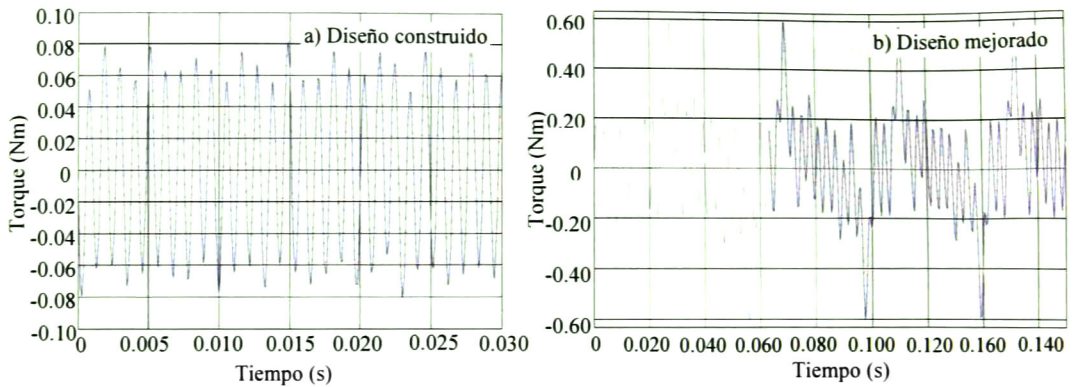


Fig. 13-5. Torque en vacío: a) Diseño construido, b) Diseño mejorado.

13.1.1. Simulación bajo carga

El circuito eléctrico mostrado en la Fig. 12-19 es implementado para conocer el desempeño del GSIP bajo condiciones de carga. La Fig. 13-6 muestra la potencia de salida en terminales del generador. El valor promedio de la potencia de salida es de 117.6 W.

Considerando una eficiencia del 80 % en el inversor, la potencia inyectada en la red eléctrica es de 94 W.

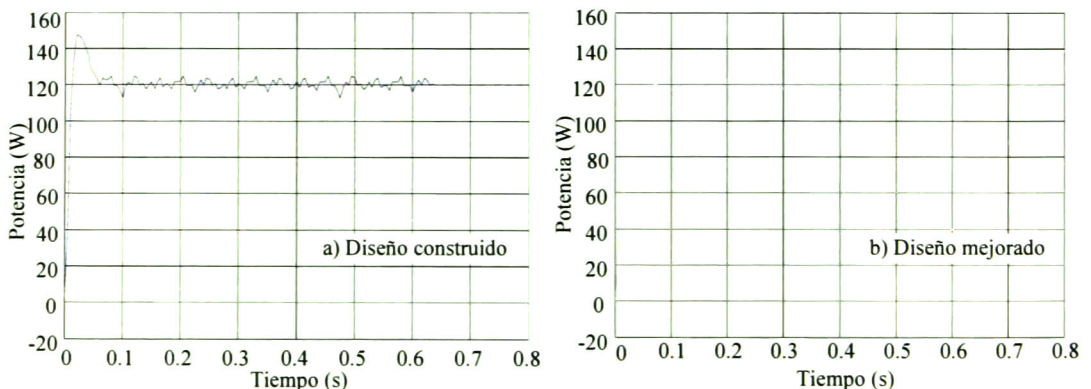


Fig. 13-6. Potencia de salida del GSIP: a) Diseño construido, b) Diseño mejorado.

La potencia mecánica de entrada en el GSIP se estima en función del torque mostrado en la Fig. 13-7. El valor promedio del torque es de 19.95 Nm a una velocidad de 80 rpm. Esto equivale a una potencia mecánica de 167.13 W.

La eficiencia del diseño mejorado del GSIP es de 70.4 %. La eficiencia de motores de inducción trifásicos de ¼ de hp se encuentra entre el 50 % y 60 % a una velocidad de operación de 1800 rpm. Sin embargo, conforme se reduce la velocidad de operación de una máquina eléctrica rotativa, su eficiencia también se reduce. Por lo tanto se considera un buen diseño al contar con una eficiencia de 70.4 % a una velocidad de 80 rpm.

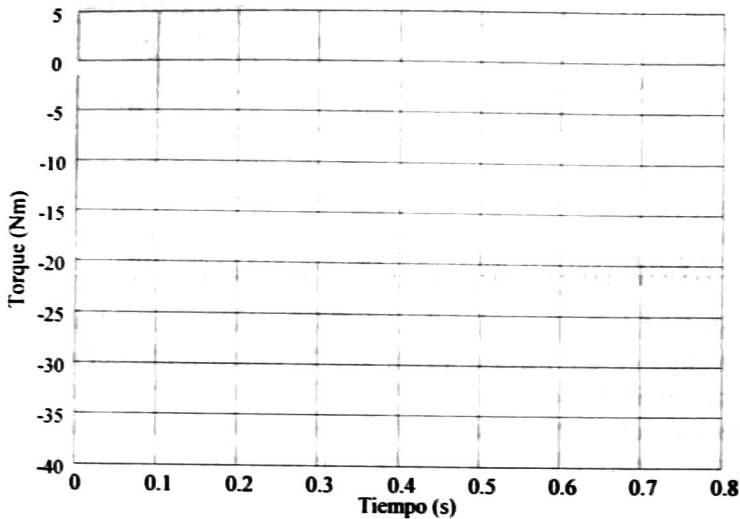


Fig. 13-7. Torque de entrada al GSIP: Diseño mejorado.

Las pérdidas en el devanado se estiman utilizando la expresión (2-41) y equivalen a 51.62W.

Las pérdidas por histéresis y por corrientes de Eddy se estiman utilizando las ecuaciones (2-38) y (2-39), las constantes k_h y k_e se obtienen de un estudio mostrado en [87].

Las pérdidas por histéresis son:

$$P_h = 178.478 (12)(1.97)^2 = 8,311.8 W/m^3 \quad (13-1)$$

Dado que la densidad del acero al silicio M19 es de $7180 kg/m^3$ y el volumen del estator es de $0.00041408 m^3$, las pérdidas por histéresis equivalen a 3.44 W.

Las pérdidas por corrientes de Eddy son:

$$P_e = 0.5344(12)^2(1.97)^2 = 298.6 W/m^3 \quad 13-2$$

Entonces, las pérdidas por corrientes de Eddy son de 0.123 W.

En total tenemos 55.18 W en pérdidas, de las cuales 51.62 W son en el devanado y 3.56 W en el núcleo del estator.

En la Tabla 13-1 se muestra una comparación entre el diseño construido del GSIP y el diseño mejorado del GSIP.

Tabla 13-1. Comparación entre el GSIP construido y mejorado.

	GSIP Construido	GSIP Mejorado
Potencia (W)	121.1	117.6
Velocidad (rpm)	220	80
Voltaje (V)	25.3	23.3
Eficiencia (%)	62.8	70.4
DAT (%)	26.2	3.0
Pérdidas (W)	77.5	55.1

La DAT del voltaje del diseño mejorado del GSIP resulta una octava parte del DAT del generador construido, siendo incluso menor al 5 % especificado por el estándar IEEE-519 [71] . La eficiencia se incrementa del 62.8 % al 70.4 %, sin embargo, dado que la velocidad de operación es casi una tercera parte, el diseño mejorado tiene mayor mérito pues las máquinas rotativas pierden eficiencia al reducir su velocidad de operación.

13.1.2. Análisis térmico

Se realiza un análisis térmico en la máquina para estimar la temperatura que se alcanza en los imanes en condiciones de plena carga, para ello se utiliza el valor de pérdidas calculado en la sección anterior.

El coeficiente de convección utilizado en el estudio es de $2 \times 10^{-5} W/mm^2 \text{ } ^\circ C$ [88].

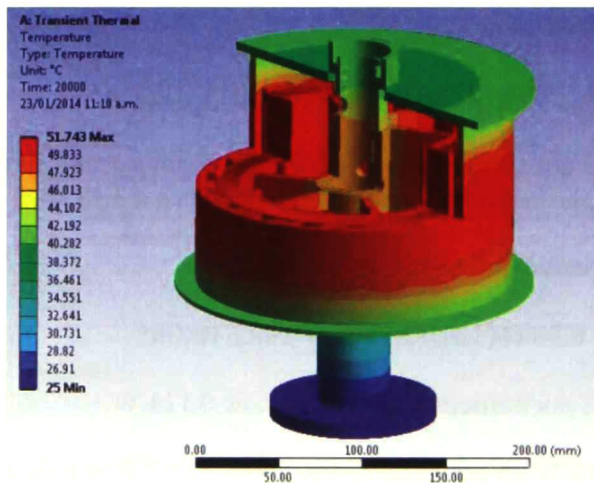


Fig. 13-8. Análisis térmico del GSIP en Ansys

La temperatura alcanzada es de 51.74° C, este valor está por debajo de los 80 °C requeridos [89] para la desmagnetización del imán.

La Fig. 13-9 muestra el incremento de la temperatura a través del tiempo en la máquina.

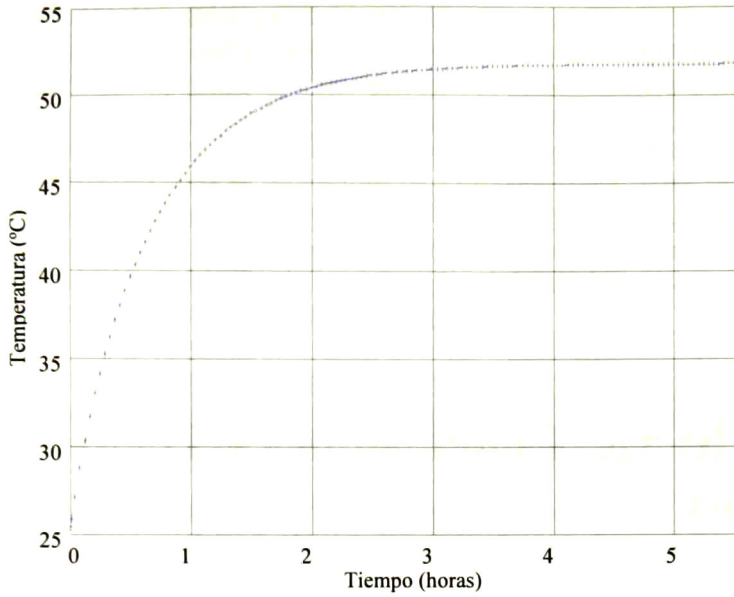


Fig. 13-9. Temperatura máxima en la máquina

Aun cuando el diseño modificado presenta menos pérdidas que el diseño original, la temperatura en la máquina es 2°C mayor. Esto sucede porque el diseño modificado tiene menor diámetro y en consecuencia menor área de disipación.

Capítulo 14. Conclusiones y Trabajos Futuros

14.1. Conclusiones

La generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable representa un área de oportunidad para los ingenieros en México. Este es el caso de la energía eólica que actualmente es una industria en crecimiento y que requiere de ingenieros dedicados al diseño y desarrollo de esta tecnología.

El proyecto de tesis inició realizando un programa de monitoreo del viento donde se encontró que el recurso eólico disponible en la vialidad es suficiente para satisfacer el consumo de energía eléctrica de un par de lámparas Led de 90 W.

Se establecieron metodologías de diseño y construcción para un GSIP y los alabes del aerogenerador. Se hicieron análisis electromagnéticos, estructurales, térmicos y de fluidos para conocer el desempeño del aerogenerador. Sin embargo, debido a las diferencias en los puntos de operación entre los alabes y el GSIP, no fue posible inyectar energía a la red de alumbrado público.

De los resultados obtenidos en las pruebas en campo se obtiene información para mejorar el diseño de la máquina. Con esta información se realizan correcciones a la máquina construida, mejorando la eficiencia, la DAT del voltaje y la geometría para facilitar el proceso de construcción.

El diseño corregido de la máquina de 100 W y el diseño de la máquina de 5 kW presentan mejor eficiencia y menor torque de arranque que máquinas comerciales de su misma capacidad.

Si un diseñador de máquinas eléctricas desea mejorar aspectos como el torque de arranque, la eficiencia y la DAT del voltaje, entonces, deberá intentar modificar los parámetros geométricos del GSIP y llevar a cabo las simulaciones correspondientes.

Por ejemplo no es conveniente reducir la longitud del polo δ_i para disminuir la DAT del voltaje, debido a que la potencia en la máquina se disminuye hasta en un 58 %. Reducir el entrehierro incrementa la potencia de salida de la máquina sin modificar la DAT del voltaje, sin embargo, incrementa el torque en vacío. Una alternativa para reducir la DAT del voltaje y el torque de arranque, sin modificar la eficiencia y potencia de salida de la máquina es aplicar un ángulo de inclinación en los polos.

El diseño de la máquina de 5 kW, se hizo para construir un aerogenerador de eje horizontal que se colocará en las instalaciones del Cinvestav para operar en conjunto con un aerogenerador comercial de 2.2 kW y una planta solar fotovoltaica de 7 kW.

Como resultado de este trabajo tenemos dos aerogeneradores y sus procedimientos de diseño y construcción, dos artículos en revista, 3 artículos en congresos y un reconocimiento:

Voltage THD improvement for an outer rotor permanent magnet synchronous machine, International Journal of Emerging Electric Power Systems. Volume 14, Issue 5, Pages 459–465, DOI: 10.1515/ijeeps-2013-0072.

- *Modification of geometric parameters in outer rotor permanent magnet generators to improve THD, efficiency, and cogging torque*, Accepted at International Journal of Emerging Electric Power Systems.
- *Diseño y Simulación de un Aerogenerador de 5 kW*, XXIV Congreso Internacional de Ahorro de Energía, Guadalajara, Jalisco. Agosto de 2013.
- *Diseño y Fabricación de un Generador Síncrono de Rotor Externo e Imanes Permanentes de 350 Watts, Para un Aerogenerador de Eje Vertical*, XXIII Congreso Internacional de Ahorro de Energía, Agosto de 2012, Guadalajara, México.
- *Calibración de Anemómetros para Cuantificar el Recurso Eólico en Vialidades*, XXII Congreso Internacional de Ahorro de Energía, Agosto de 2011, Guadalajara, México.
- Tercer Lugar nacional en el Concurso Universitario de Proyectos de Investigación y Desarrollo para el Ahorro y Uso Eficiente de Energía del CIMEJ: *Diseño y Fabricación de un Generador Síncrono de Rotor Externo e Imanes Permanentes de 100 Watts, para un Aerogenerador de Eje Vertical*. Agosto de 2012, Guadalajara México.

Esta tecnología puede ser escalada para construir unidades de mayor tamaño. Incluso, el GSIP puede ser implementado en plantas de generación mini hidráulicas o como motor para vehículos eléctricos.

14.1.1. Trabajos futuros

- Construir y realizar pruebas de laboratorio al diseño mejorado que se muestra en la sección 13.1 para verificar el desempeño de los siguientes parámetros:
 - Torque de entrada
 - Temperatura en el estator
 - Potencia generada

- Instalar los aerogeneradores al interior de Cinvestav y realizar los siguientes registros en terminales del generador y a la salida del inversor por un periodo de un año para obtener datos que permitan optimizar el diseño:
 - Voltaje
 - Corriente
 - Potencia
 - DAT del Voltaje
 - Factor de potencia

- Instalar una torre de monitoreo del viento en el sitio de instalación de los aerogeneradores para caracterizar su operación y obtener el desempeño de cada aerogenerador.

- Analizar los materiales y las geometrías de las piezas del aerogenerador para proponer modificaciones que mejoren el desempeño mecánico y optimicen materiales.

APÉNDICE A. Registros de velocidad, configuración 1

Registros de la velocidad del viento para un periodo de 7 días.

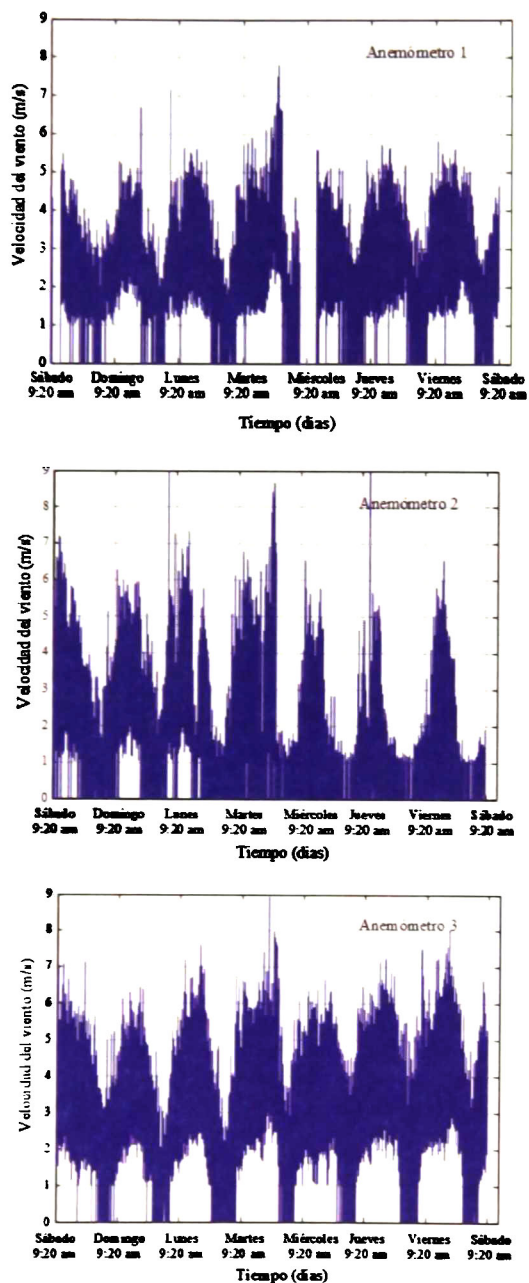


Fig. 14-1. Registros del viento para un periodo semanal

APÉNDICE B. Análisis del flujo magnético por series de Fourier

En la Tabla 14-1 se presenta el análisis por series de Fourier al flujo magnético de la mitad del paso polar, ver Fig. 14-2.

Tabla 14-1. Análisis del flujo magnético en el entrehierro, GSIP de 100 W.

Ángulo	$B_x(\%)$	Sen x	Sen $3x$	Sen $5x$	Sen $7x$	B_r Sen x	B_r Sen $3x$	B_r Sen $5x$	B_r Sen $7x$	
1.8	B_{x49}	-0.157	0.031	0.094	0.156	0.218	-0.005	-0.015	-0.025	-0.034
3.6	B_{x48}	-1.669	0.063	0.187	0.309	0.426	-0.105	-0.313	-0.516	-0.711
5.4	B_{x47}	-2.996	0.094	0.279	0.454	0.613	-0.282	-0.836	-1.360	-1.836
7.2	B_{x46}	-4.136	0.125	0.368	0.588	0.771	-0.518	-1.523	-2.431	-3.187
9	B_{x45}	-5.091	0.156	0.454	0.707	0.891	-0.796	-2.311	-3.600	-4.536
10.8	B_{x44}	-5.781	0.187	0.536	0.809	0.969	-1.083	-3.098	-4.677	-5.600
12.6	B_{x43}	-6.210	0.218	0.613	0.891	1.000	-1.355	-3.806	-5.533	-6.207
14.4	B_{x42}	-6.565	0.249	0.685	0.951	0.982	-1.633	-4.494	-6.244	-6.449
16.2	B_{x41}	-6.949	0.279	0.750	0.988	0.918	-1.939	-5.213	-6.864	-6.378
18	B_{x40}	-7.353	0.309	0.809	1.000	0.809	-2.272	-5.948	-7.353	-5.948
19.8	B_{x39}	-7.707	0.339	0.861	0.988	0.661	-2.611	-6.634	-7.613	-5.097
21.6	B_{x38}	-7.953	0.368	0.905	0.951	0.482	-2.928	-7.196	-7.564	-3.832
23.4	B_{x37}	-8.036	0.397	0.941	0.891	0.279	-3.191	-7.560	-7.160	-2.242
25.2	B_{x36}	-7.733	0.426	0.969	0.809	0.063	-3.293	-7.490	-6.256	-0.486
27	B_{x35}	-6.868	0.454	0.988	0.707	-0.156	-3.118	-6.784	-4.857	1.074
28.8	B_{x34}	-5.140	0.482	0.998	0.588	-0.368	-2.476	-5.130	-3.021	1.892
30.6	B_{x33}	-2.406	0.509	1.000	0.454	-0.562	-1.225	-2.405	-1.092	1.352
32.4	B_{x32}	1.249	0.536	0.992	0.309	-0.729	0.669	1.239	0.386	-0.910
34.2	B_{x31}	6.177	0.562	0.976	0.156	-0.861	3.472	6.028	0.966	-5.317
36	B_{x30}	13.159	0.588	0.951	0.000	-0.951	7.735	12.515	0.000	-12.515
37.8	B_{x29}	22.795	0.613	0.918	-0.156	-0.996	13.971	20.920	-3.566	-22.694
39.6	B_{x28}	34.422	0.637	0.876	-0.309	-0.992	21.942	30.164	-10.637	-34.151
41.4	B_{x27}	45.766	0.661	0.827	-0.454	-0.941	30.265	37.852	-20.777	-43.060
43.2	B_{x26}	54.997	0.685	0.771	-0.588	-0.844	37.648	42.376	-32.326	-46.436
45	B_{x25}	61.508	0.707	0.707	-0.707	-0.707	43.493	43.493	-43.493	-43.493
46.8	B_{x24}	64.864	0.729	0.637	-0.809	-0.536	47.284	41.346	-52.476	-34.756
48.6	B_{x23}	64.936	0.750	0.562	-0.891	-0.339	48.709	36.499	-57.858	-21.996
50.4	B_{x22}	63.303	0.771	0.482	-0.951	-0.125	48.776	30.496	-60.204	-7.934
52.2	B_{x21}	61.936	0.790	0.397	-0.988	0.094	48.939	24.598	-61.174	5.828
54	B_{x20}	61.357	0.809	0.309	-1.000	0.309	49.639	18.961	-61.357	18.960
55.8	B_{x19}	61.570	0.827	0.218	-0.988	0.509	50.923	13.431	-60.812	31.341
57.6	B_{x18}	62.564	0.844	0.125	-0.951	0.685	52.825	7.842	-59.502	42.828
59.4	B_{x17}	64.373	0.861	0.031	-0.891	0.827	55.409	2.022	-57.357	53.242
61.2	B_{x16}	67.444	0.876	-0.063	-0.809	0.930	59.101	-4.235	-54.563	62.707
63	B_{x15}	72.178	0.891	-0.156	-0.707	0.988	64.311	-11.291	-51.038	71.290
64.8	B_{x14}	79.231	0.905	-0.249	-0.588	0.998	71.691	-19.704	-46.571	79.075
66.6	B_{x13}	87.371	0.918	-0.339	-0.454	0.960	80.185	-29.596	-39.666	83.902
68.4	B_{x12}	93.660	0.930	-0.426	-0.309	0.876	87.083	-39.878	-28.943	82.075
70.2	B_{x11}	97.041	0.941	-0.509	-0.156	0.750	91.304	-49.397	-15.181	72.792
72	B_{x10}	98.723	0.951	-0.588	0.000	0.588	93.891	-58.027	-0.001	58.028
73.8	B_{x9}	99.572	0.960	-0.661	0.156	0.397	95.618	-65.848	15.576	39.545
75.6	B_{x8}	99.904	0.969	-0.729	0.309	0.187	96.765	-72.826	30.871	18.721
77.4	B_{x7}	100.000	0.976	-0.790	0.454	-0.031	97.592	-79.015	45.399	-3.140
79.2	B_{x6}	99.587	0.982	-0.844	0.588	-0.249	97.823	-84.084	58.535	-24.765
81	B_{x5}	98.151	0.988	-0.891	0.707	-0.454	96.943	-87.453	69.403	-44.559
82.8	B_{x4}	95.106	0.992	-0.930	0.809	-0.637	94.356	-88.428	76.942	-60.622
84.6	B_{x3}	89.205	0.996	-0.960	0.891	-0.790	88.809	-85.663	79.482	-70.485
86.4	B_{x2}	81.120	0.998	-0.982	0.951	-0.905	80.960	-79.683	77.150	-73.400
88.2	B_{x1}	74.061	1.000	-0.996	0.988	-0.976	74.025	-73.732	73.149	-72.277
90	B_{x0}	69.479	0.500	-0.500	0.500	-0.500	34.740	-34.740	34.740	-34.740
						Σ	1938.064	-664.573	-331.068	14.861

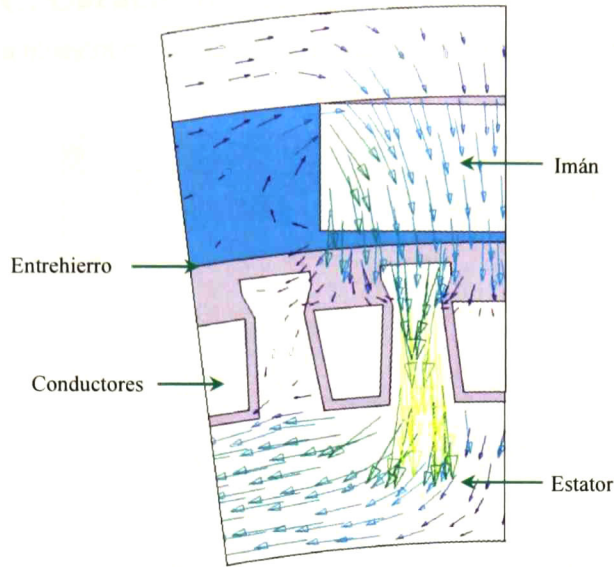


Fig. 14-2. Simulación del flujo al 50 % del paso polar

Ecuaciones para el cálculo de armónicas fundamentales, 3ª, 5ª y 7ª:

$$B_1 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 1.8^\circ + B_{x48} \text{ sen } 3.6^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 90^\circ) \quad (14-1)$$

$$B_3 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 5.4^\circ + B_{x48} \text{ sen } 10.8^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 3 \times 90^\circ) \quad (14-2)$$

$$B_5 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 9^\circ + B_{x48} \text{ sen } 18^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 5 \times 90^\circ) \quad (14-3)$$

$$B_7 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 12.6^\circ + B_{x48} \text{ sen } 25.2^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 7 \times 90^\circ) \quad (14-4)$$

El valor de las armónicas resulta.

$$B_1 = \frac{1938.06}{25} = 77.523 \quad B_3 = \frac{-664.57}{25} = -26.583$$

$$B_5 = \frac{-331.06}{25} = -13.243 \quad B_7 = \frac{14.86}{25} = 0.594$$

El valor promedio, eficaz y máximo de las ondas de flujo magnético se calculó:

$$B_a = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi B_x d_x = \frac{2}{\pi} (B_1 + 1/3 B_3 + 1/5 B_5 + 1/7 B_7) \quad (14-5)$$

$$B_a = \frac{2}{\pi} \left(77.523 - \frac{1}{3} 26.583 - \frac{1}{5} 13.243 + \frac{1}{7} 0.594 \right)$$

$$B_a = 56.626$$

$$B_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_x^2 dx} = \sqrt{1/2 (B_1^2 + B_3^2 + B_5^2 + B_7^2)} \quad (14-6)$$

$$B_{rms} = \sqrt{1/2 (77.523^2 + (-26.583)^2 + (-13.243)^2 + 0.594^2)}$$

$$B_{rms} = 58.703$$

$$B_m = B_{x7} = 100$$

El factor de distribución del flujo.

$$f_d = \frac{B_a}{B_m} = \frac{56.626}{100} = 0.566$$

El factor forma.

$$f_b = \frac{B_{rms}}{B_p} = \frac{58.703}{56.626} = 1.037$$

APÉNDICE C. Caracterización del inversor

La siguiente Figura muestra el rectificador, inversor, medidor de energía y la protección de sobre corriente.



Fig. 14-3. Inversor de red

La gráfica que se muestra a continuación indica la característica entrada – salida del inversor. En la gráfica se muestra la ecuación que define la operación del inversor.

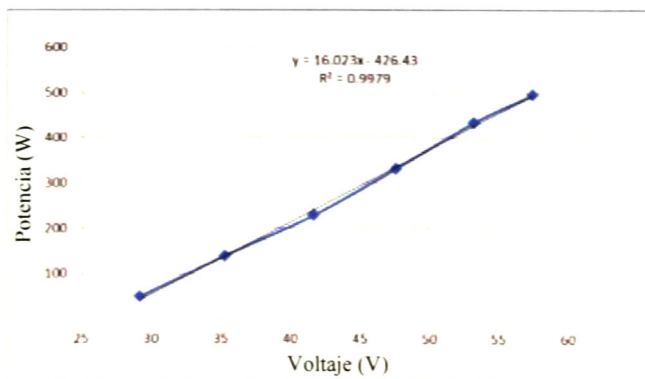


Fig. 14-4. Pendiente de operación del inversor

De la ecuación mostrada en la Figura anterior se obtiene el voltaje en corriente directa requerido por el inversor para entregar 90 W. El valor de este voltaje es 32.32 Vcd.

La magnitud del voltaje a la salida del rectificador puede ser expresada mediante la siguiente función:

$$V_O = 0.955 V_M$$

Capítulo 14

Donde V_O es el voltaje en cd y V_M es el valor máximo del voltaje en corriente alterna.

Entonces,

$$V_M = V_O / 0.955$$

$$V_M = 32.32 \text{ V} / 0.955 = 33.84 \text{ V}$$

Por lo tanto el valor rms del voltaje en terminales del generador debe ser $V_M/\sqrt{2} = 23.9 \text{ V}$

APÉNDICE D. Distribución del devanado: GSIP de 100 W

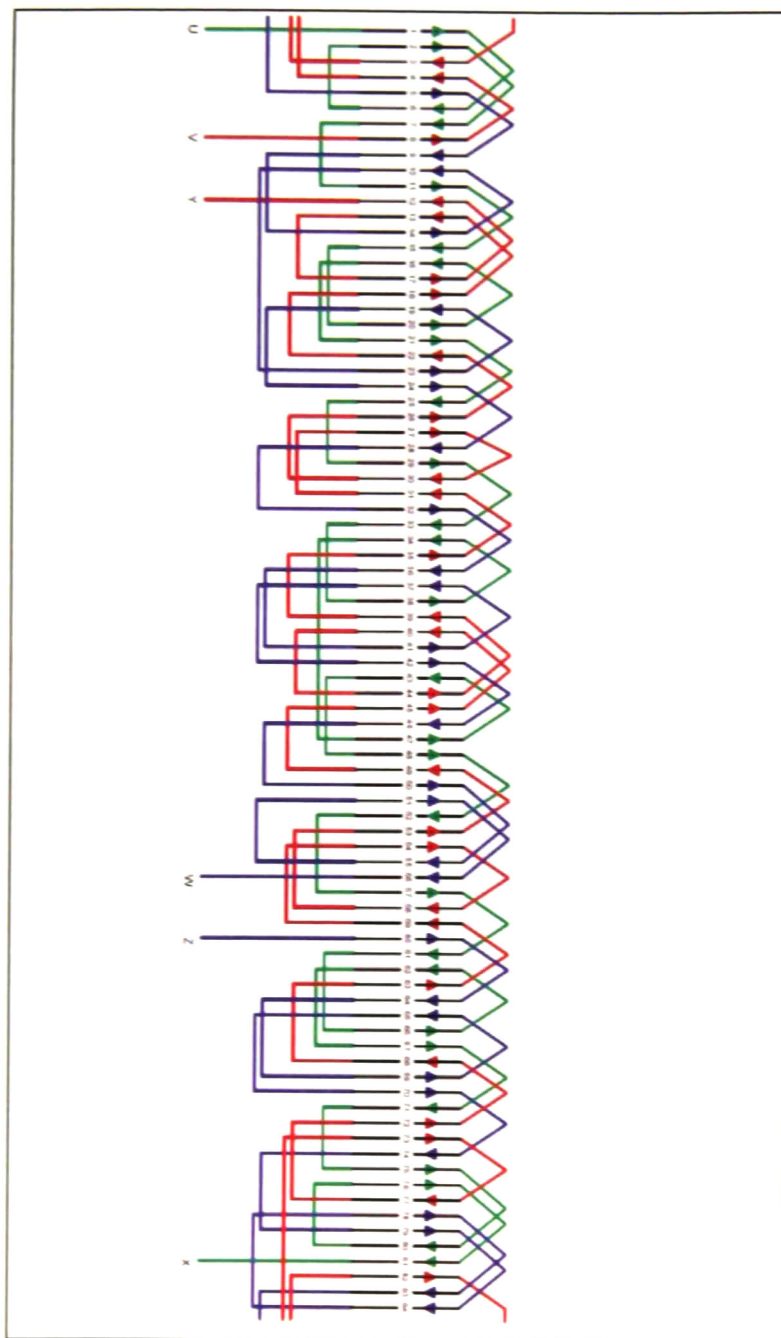


Fig. 14-5. Conexiones del devanado, máquina de 100 W

APÉNDICE E. Análisis de fluidos: Geometrías de los alabes.

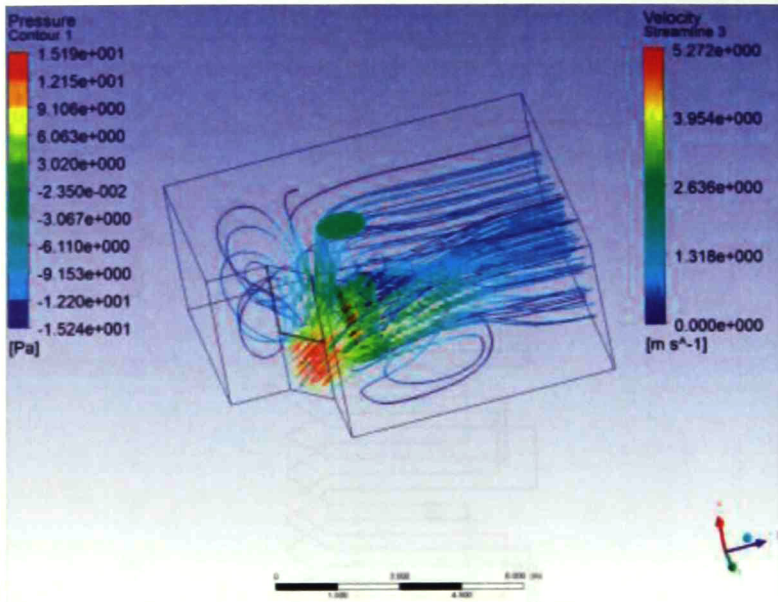


Fig. 14-6. Simulación en Ansys Fluent: Alabe torcida 45 grados

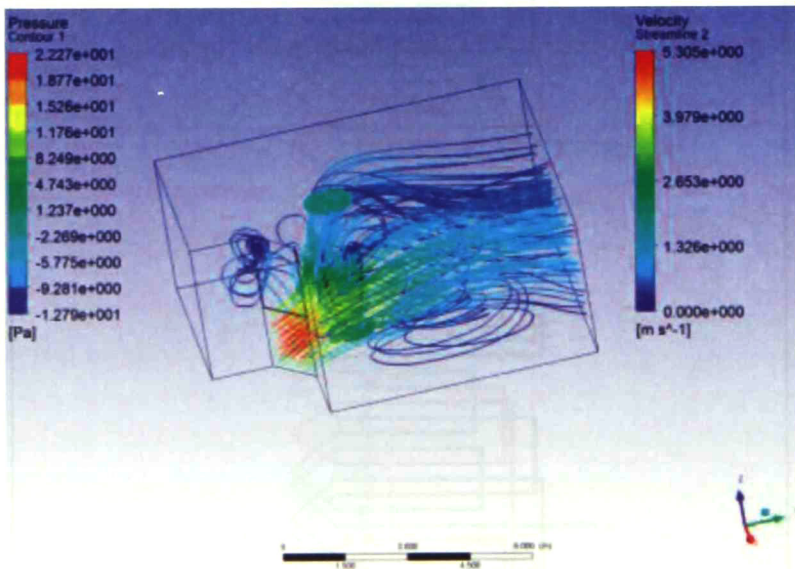


Fig. 14-7. Simulación en Ansys Fluent: Alabe torcida 90 grados

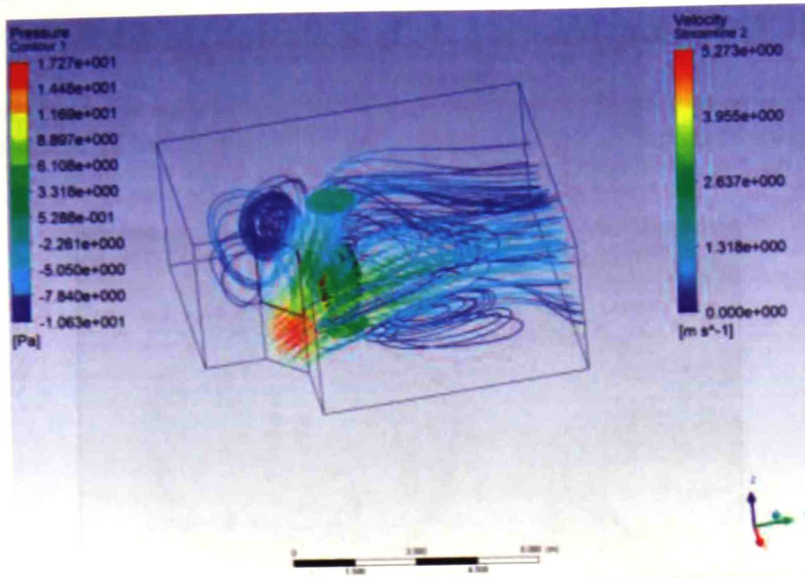


Fig. 14-8. Simulación en Ansys Fluent: Alabe torcida 135 grados.

APÉNDICE F. Construcción de la máquina de 5 kW.

En esta sección se muestra una parte del proceso de construcción del GSIP de 5 kW. La Fig. 14-9 ilustra el proceso de apilamiento de las láminas de acero al silicio de grano no orientado M19.

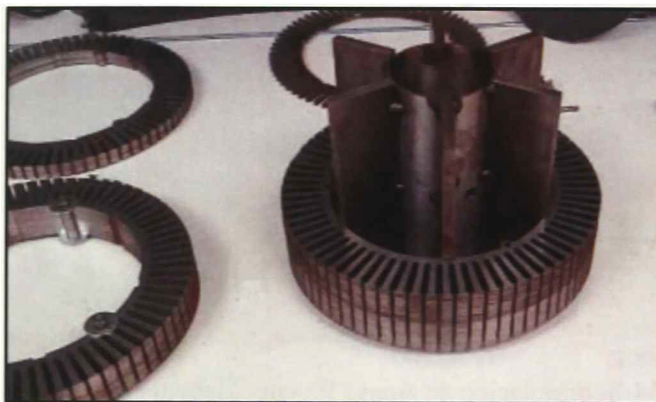


Fig. 14-9. Apilamiento de las láminas de acero al silicio

Fig. 14-10 se muestra el proceso de embobinado del estator. El diseño del devanado fue 29 conductores por ranura calibre 16. Sin embargo, dado que de un extremo a otro de cada bobina hay una distancia de 2 ranuras, no es posible utilizar conductores calibre 16 por los esfuerzos mecánicos presentados. Entonces se optó por 6 grupos de 29 conductores calibre 23 conectados en paralelo para mantener el mismo voltaje en terminales. De esta forma la sección transversal de los conductores se reduce de 2.62 mm^2 a 1.56 mm^2 y la eficiencia disminuye del 94 % al 91 %.

Ante esta situación es necesario realizar estudios adicionales en el número y calibre de conductores para incrementar la eficiencia de la máquina.



Fig. 14-10. Construcción del estator del GSIP de 5 kW



Fig. 14-11. Rotor y estator del GSIP de 5 kW

La Fig. 14-12 a) muestra el mecanismo de giro “góndola” del aerogenerador de 5 kW. Este mecanismo cuenta con anillos colectores que permiten transferir la energía producida sin contar con esfuerzos mecánicos en los conductores. La Fig. 14-12 b) muestran el diseño final del aerogenerador de eje horizontal.

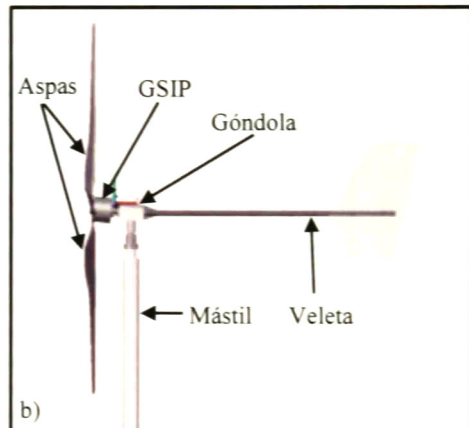


Fig. 14-12. Aerogenerador de 5 kW: a) Góndola. b) Diseño completo

APÉNDICE G. Longitud y diámetro de la máquina

Para determinar la longitud y el diámetro de la máquina se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- Clase del imán.
- Dimensiones del imán.
- Velocidad de operación.
- Restricción de diseño en las dimensiones de la máquina.
- Potencia de la máquina.

Una modificación a los parámetros anteriores puede producir un cambio en la longitud o diámetro de la maquina.

Sin embargo, sino tenemos restricciones en las dimensiones para el diseño de la máquina, podemos tener longitudes y diámetros diferentes para máquinas de una misma potencia de salida.

En el diseño de la máquina de 5 kW se utilizaron tres imanes por polo, modelo NB50502, para obtener la potencia deseada.

APÉNDICE H. Análisis del flujo magnético, GSIP de 5 kW

La Tabla 14-2 presenta el análisis por series de Fourier al flujo magnético, ver Fig. 14-2.

Tabla 14-2. Análisis del flujo magnético en el entrehierro, GSIP de 5 kW.

Angulo	B, (%)	Sen x	Sen 3x	Sen 5x	Sen 7x	B, Sen x	B, Sen 3x	B, Sen 5x	B, Sen 7x	
1.8	B ₄₀₀	7.328	0.031	0.094	0.156	0.218	0.230	0.690	1.146	1.599
3.6	B ₄₀₈	8.355	0.063	0.187	0.309	0.426	0.525	1.566	2.582	3.557
5.4	B ₄₁₇	9.499	0.094	0.279	0.454	0.613	0.894	2.650	4.312	5.822
7.2	B ₄₂₆	10.773	0.125	0.368	0.588	0.771	1.350	3.966	6.332	8.301
9	B ₄₃₅	12.236	0.156	0.454	0.707	0.891	1.914	5.555	8.652	10.903
10.8	B ₄₄₄	13.858	0.187	0.536	0.809	0.969	2.597	7.425	11.211	13.423
12.6	B ₄₅₃	15.781	0.218	0.613	0.891	1.000	3.443	9.672	14.061	15.773
14.4	B ₄₆₂	17.994	0.249	0.685	0.951	0.982	4.475	12.318	17.113	17.675
16.2	B ₄₇₁	20.541	0.279	0.750	0.988	0.918	5.731	15.408	20.288	18.851
18	B ₄₈₀	23.544	0.309	0.809	1.000	0.809	7.275	19.047	23.544	19.047
19.8	B ₄₈₉	27.148	0.339	0.861	0.988	0.661	9.196	23.367	26.813	17.953
21.6	B ₄₉₈	31.445	0.368	0.905	0.951	0.482	11.576	28.452	29.906	15.149
23.4	B ₅₀₇	36.649	0.397	0.941	0.891	0.279	14.555	34.482	32.654	10.225
25.2	B ₅₁₆	42.866	0.426	0.969	0.809	0.063	18.251	41.519	34.679	2.692
27	B ₅₂₅	50.002	0.454	0.988	0.707	-0.156	22.700	49.386	35.357	-7.822
28.8	B ₅₃₄	57.394	0.482	0.998	0.588	-0.368	27.650	57.281	33.736	-21.128
30.6	B ₅₄₃	64.385	0.509	1.000	0.454	-0.562	32.774	64.353	29.230	-36.189
32.4	B ₅₅₂	70.425	0.536	0.992	0.309	-0.729	37.735	69.869	21.763	-51.337
34.2	B ₅₆₁	75.390	0.562	0.976	0.156	-0.861	42.375	73.574	11.794	-64.891
36	B ₅₇₀	79.483	0.588	0.951	0.000	-0.951	46.719	75.592	0.000	-75.592
37.8	B ₅₇₉	82.977	0.613	0.918	-0.156	-0.996	50.857	76.152	-12.980	-82.609
39.6	B ₅₈₈	85.919	0.637	0.876	-0.309	-0.992	54.767	75.292	-26.550	-85.242
41.4	B ₅₉₇	88.469	0.661	0.827	-0.454	-0.941	58.505	73.171	-40.164	-83.239
43.2	B ₆₀₆	90.249	0.685	0.771	-0.588	-0.844	61.780	69.538	-53.047	-76.200
45	B ₆₁₅	91.097	0.707	0.707	-0.707	-0.707	64.415	64.416	-64.415	-64.416
46.8	B ₆₂₄	90.914	0.729	0.637	-0.809	-0.536	66.274	57.951	-73.551	-48.715
48.6	B ₆₃₃	89.638	0.750	0.562	-0.891	-0.339	67.238	50.384	-79.868	-30.364
50.4	B ₆₄₂	87.651	0.771	0.482	-0.951	-0.125	67.536	42.226	-83.361	-10.986
52.2	B ₆₅₁	85.552	0.790	0.397	-0.988	0.094	67.599	33.977	-84.499	8.051
54	B ₆₆₀	83.953	0.809	0.309	-1.000	0.309	67.919	25.943	-83.953	25.942
55.8	B ₆₆₉	83.614	0.827	0.218	-0.988	0.509	69.155	18.240	-82.584	42.562
57.6	B ₆₇₈	84.606	0.844	0.125	-0.951	0.685	71.436	10.604	-80.466	57.917
59.4	B ₆₈₇	86.921	0.861	0.031	-0.891	0.827	74.817	2.730	-77.448	71.891
61.2	B ₆₉₆	89.920	0.876	-0.063	-0.809	0.930	78.797	-5.646	-72.747	83.605
63	B ₇₀₅	93.001	0.891	-0.156	-0.707	0.988	82.865	-14.548	-65.762	91.856
64.8	B ₇₁₄	95.587	0.905	-0.249	-0.588	0.998	86.490	-23.771	-56.185	95.399
66.6	B ₇₂₃	97.318	0.918	-0.339	-0.454	0.960	89.314	-32.965	-44.182	93.454
68.4	B ₇₃₂	98.455	0.930	-0.426	-0.309	0.876	91.541	-41.920	-30.425	86.277
70.2	B ₇₄₁	99.011	0.941	-0.509	-0.156	0.750	93.157	-50.400	-15.489	74.269
72	B ₇₅₀	99.401	0.951	-0.588	0.000	0.588	94.536	-58.426	-0.001	58.427
73.8	B ₇₅₉	99.631	0.960	-0.661	0.156	0.397	95.675	-65.887	15.585	39.569
75.6	B ₇₆₈	99.830	0.969	-0.729	0.309	0.187	96.694	-72.773	30.849	18.707
77.4	B ₇₇₇	99.986	0.976	-0.790	0.454	-0.031	97.578	-79.004	45.392	-3.140
79.2	B ₇₈₆	100.000	0.982	-0.844	0.588	-0.249	98.229	-84.433	58.778	-24.868
81	B ₇₉₅	99.903	0.988	-0.891	0.707	-0.454	98.673	-89.014	70.641	-45.354
82.8	B ₈₀₄	99.813	0.992	-0.930	0.809	-0.637	99.026	-92.804	80.750	-63.623
84.6	B ₈₁₃	99.588	0.996	-0.960	0.891	-0.790	99.146	-95.633	88.733	-78.689
86.4	B ₈₂₂	99.297	0.998	-0.982	0.951	-0.905	99.101	-97.538	94.437	-89.846
88.2	B ₈₃₁	98.823	1.000	-0.996	0.988	-0.976	98.774	-98.384	97.606	-96.442
90	B ₈₄₀	98.429	0.500	-0.500	0.500	-0.500	49.215	-49.215	49.215	-49.215
	Σ						2683.074	144.437	-130.516	-181.011

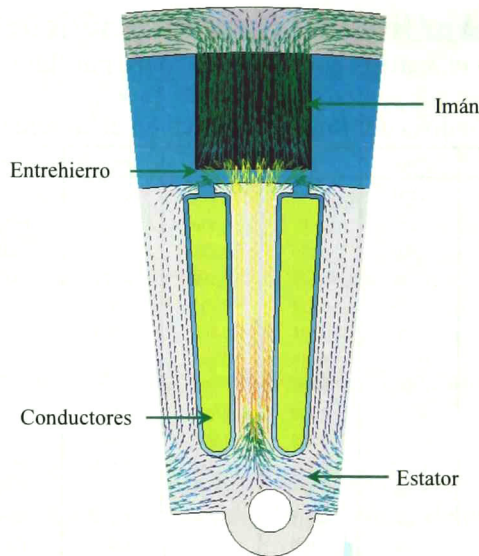


Fig. 14-13. Simulación del flujo en el GSIP de 5 kW

Ecuaciones para el cálculo de armónicas fundamentales, 3ª, 5ª y 7ª:

$$B_1 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 1.8^\circ + B_{x48} \text{ sen } 3.6^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 90^\circ) \quad (14-7)$$

$$B_3 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 5.4^\circ + B_{x48} \text{ sen } 10.8^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 3 \times 90^\circ) \quad (14-8)$$

$$B_5 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 9^\circ + B_{x48} \text{ sen } 18^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 5 \times 90^\circ) \quad (14-9)$$

$$B_7 = 1/25 (B_{x49} \text{ sen } 12.6^\circ + B_{x48} \text{ sen } 25.2^\circ + \dots + 1/2 B_{x0} \text{ sen } 7 \times 90^\circ) \quad (14-10)$$

El valor de las armónicas resulta.

$$B_1 = \frac{2683.07}{25} = 107.323 \quad B_3 = \frac{144.437}{25} = 5.777$$

$$B_5 = \frac{-130.516}{25} = -5.221 \quad B_7 = \frac{-181.011}{25} = -7.240$$

El valor promedio, eficaz y máximo de las ondas de flujo magnético se calculó:

$$B_a = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi B_x dx = \frac{2}{\pi} (B_1 + 1/3 B_3 + 1/5 B_5 + 1/7 B_7) \quad (14-11)$$

$$B_a = \frac{2}{\pi} \left(107.323 + \frac{1}{3} 5.777 - \frac{1}{5} 5.221 - \frac{1}{7} 7.240 \right)$$

$$B_a = 68.421$$

$$B_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} B_x^2 dx} = \sqrt{1/2 (B_1^2 + B_3^2 + B_5^2 + B_7^2)} \quad (14-12)$$

$$B_{rms} = \sqrt{1/2 (107.323^2 + (5.777)^2 + (-5.221)^2 + 0.594^2)}$$

$$B_{rms} = 76.260$$

$$B_m = B_{x7} = 100$$

El factor de distribución del flujo.

$$f_a = \frac{B_a}{B_m} = \frac{68.421}{100} = 0.684$$

El factor forma.

$$f_b = \frac{B_{rms}}{B_a} = \frac{76.26}{68.421} = 1.115$$

APÉNDICE I. Distribución del devanado: GSIP de 5 kW

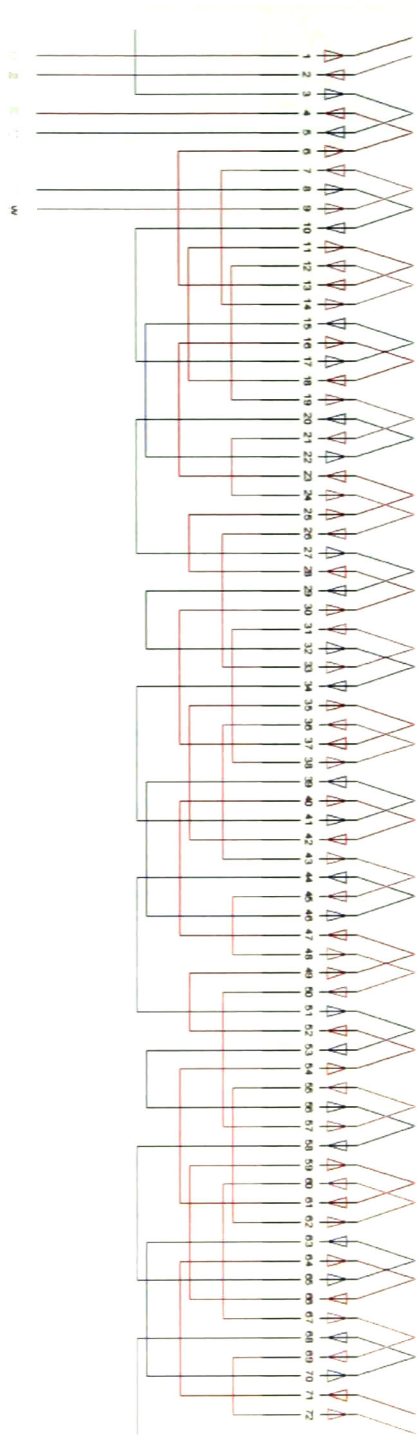


Fig. 14-14. Conexiones del devanado, máquina de 5 kW

APÉNDICE J. Publicaciones y Proyectos financiados

Publicaciones

J. de la Cruz-Soto, J.L. Leyva-Montiel, J.M. Ramírez-Arredondo, “Voltage THD improvement for an outer rotor permanent magnet synchronous machine,” *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. Volume 14, Issue 5, Pages 459–465, ISSN (Online) 1553-779X, ISSN (Print) 2194-5756, DOI: 10.1515/ijeeps-2013-0072, August 2013.

J. de la Cruz-Soto, J.L. Leyva-Montiel, J.M. Ramírez-Arredondo, “Modification of geometric parameters in outer rotor permanent magnet generators to improve THD, efficiency. and cogging torque,” Accepted at *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, July 2014.

J. de la Cruz-Soto, R. Cázares Domínguez, J.L. Leyva-Montiel, J.M. Ramírez-Arredondo, “Diseño y Simulación de un Aerogenerador de 5 kW,” XXIV Congreso Internacional de Ahorro de Energía, Guadalajara, Jalisco. Agosto de 2013.

J. de la Cruz-Soto, J. L. Leyva-Montiel, J. M. Ramirez-Arredondo, “Diseño y Fabricación de un Generador Síncrono de Rotor Externo e Imanes Permanentes de 350 Watts, Para un Aerogenerador de Eje Vertical,” XXIII Congreso Internacional de Ahorro de Energía, Agosto de 2012. Guadalajara, México.

J. de la Cruz-Soto, J. L. Leyva-Montiel, J. M. Ramirez-Arredondo, “Calibración de Anemómetros para Cuantificar el Recurso Eólico en Vialidades,” XXII Congreso Internacional de Ahorro de Energía, Agosto de 2011, Guadalajara, México.

Proyectos Financiados

Jeeka: Desarrollo de Tecnología y Procesos para la Construcción de Aerogeneradores. COECYTJAL, Enero 2013. Folio: 1722-2012.

Referencias

- [1] World Wind Energy Association, “**Annual Report: 2012**,” WWEA Head Office, Germany. May 2013.
- [2] Comisión Reguladora de Energía, “**Tabla de permisos de Generación e Importación de Energía Eléctrica Administrados al 30 de junio de 2012 (Versión Excel)**,” Junio de 2012. Disponible: <http://www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=171>.
- [3] SENER, “**Estrategia Nacional de Energía 2013 -2027**,” México D.F. 2013.
- [4] Potencia Industrial SA de CV, Disponible: <http://potenciaindustrial.com.mx>, Consultado: Enero de 2011.
- [5] World Wind Energy Association, “**Small Wind World Report: Summary 2012**,” Marzo de 2012.
- [6] National Renewable Energy Laboratory, “**Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator**,” 21st American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium Reno, Nevada. January 14–17, 2002.
- [7] Ebrahimi, B.M. ;Rajabi-Sebdani, M. ; Khan, A. “**Optimal design of permanent magnet synchronous generator for wind energy conversion considering annual energy input and magnet volume**,” Sustainable Power Generation and Supply, 6-7 April 2009.
- [8] C. Ghita, A.-I. Chirila, I.-D. Deaconu and D.-I. Ilina, “**Wind turbine permanent magnet synchronous generator magnetic field study**,” **International Conference On Renewable Energies And Power Quality**,” Santander, 12, 13 and 14 of March, 2008.
- [9] P. Sivachandran, P.Venkatesh, “**Design and Analysis of Dual-Rotor Radial Flux Permanent Magnet Generator For Direct Coupled Stand-Alone Wind Energy Systems**,” International Journal of Innovations in energy Systems and Power. Vol 2, no. 1 (June 2007).
- [10] A. Olano, V. Moreno, J. Molina, I. Zubia, “**Design and construction of an Outer-Rotor PM Synchronous Generator for small Wind Turbines; comparing real results with those of FE model**,” Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.
- [11] Jian Yi Chen, ChemNayar and LongyaXu, “**Design and FE Analysis of an Outer-Rotor PM Generator for Directly- Coupled Wind Turbine Applications**,” Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. 12-15 Oct. 1998.

Referencias

- [12] Ramsden, V.S. ; Crawford, T. ; Hill, G. **“A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines,”** Industry Applications Conference, 2000.
- [13] Seok-Myeong Jang. **“Magnetic field analysis on outer rotor type permanent magnet synchronous wind power generator using transfer relation theorem,”** International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 10-13 Oct. 2010.
- [14] Cistelecan, M.V.; Popescu, M. **“Study of the Number of Slots/Pole Combinations for Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generators,”** Electric Machines & Drives Conference, 2007.
- [15] J. H. J. Potgieter, M. J. Kamper, **“Torque and Voltage Quality in Design Optimization of Low-Cost Non-Overlap Single Layer Winding Permanent Magnet Wind Generator,”** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 5, may 2012.
- [16] J.R. Bumby, N. Stannard, J Dominy and N. McLeod, **“A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines,”** Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.
- [17] National Renewable Energy Laboratory, **“Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications,”** IEEE Industry Applications Conference, St. Louis, MO. November 5-8, 1998.
- [18] J. R. Bumby and R. Martin, **“Axial Flux, Permanent Magnet, Generators For Engine Integration,”** School of Engineering, Durham University, Science Site, South Road, Durham, UK.
- [19] Chen, Y. **“Axial-flux PM wind generator with a soft magnetic composite core,”** Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, 2-6 Oct. 2005.
- [20] G. F. Price, T. D. Batzel, M. Comanescu, and B. A. Muller, **“Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator,”** Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference.
- [21] R. Wallace y A. Rodriguez, **“Diseño de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes para Aplicaciones Eólicas,”** Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Tarapaca, Vol. 7, Enero-Junio 2000.
- [22] E. Yoel F., A. Jacomino B., I. Matínez Y. **“Generador De Imanes Permanentes En La Generación De Energía,”** Centro Nacional de Referencia emPequenasCentraisHidrelétricas, Quarta-feira, 18 de Maio de 2011.
- [23] S. Gonzáles C., J. Chiroque B., T. Sánchez C. **“Diseño Y Construcción De Un Aerogenerador De 500 W Con Imanes Permanentes Para Pequeñas Demandas**

Referencias

- Eléctricas De Zonas Rurales,”** Abril de 2009. Disponible en: http://www.bibliotecavirtual.uni.edu.pe/pdfs/TECNIA/2,2006/art_008.pdf.
- [24] A. Kilk, “**Low-Speed Permanent-Magnet Synchronous Generator For Small-Scale Wind Power Applications,**” Estonian Academy Publishers. OilShale, 2007, Vol. 24, No. 2 Special.
- [25] T. F. Chan, W. Wang, and L. L. Lai, “**Performance of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator From 3-D Finite-Element Analysis,**” IEEE Transactions On Energy Conversion, vol. 25, no. 3, September 2010.
- [26] Torres M. Emmanuel, Chan-Puc Freddy, Ramírez A. Juan, “**Análisis Dinámico del Generador de Inducción Auto-excitado,**” Revista De Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Computación, Vol. 8 No. 1, Diciembre 2010.
- [27] Sawetsakulanond, B., Hothongkham, P., Kinnares, V. “**Design and construction of a three phase of self-exited induction generator,**” IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, 24-27 Nov. 2008.
- [28] Chit Mon Hnin, “**Design and Construction of Induction Generator for Wind Power,**” GMSARN International Conference on Sustainable Development: Issues and Prospects for the GMS 12-14 Nov. 2008.
- [29] J Faiz, A.A. Dadgari, S. Horning, A. Keyhari, “**Design of a Three-phase Self-Excited Induction Generator,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- [30] N. Levin, V Pugachov, L Ribickis, A Zhiravetska, “**Contactless Multipolar Double-Fed Asynchronous Generator For Windmills,**” Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XII, No. 2, 2006.
- [31] B.Chitti B. ,K.B.Mohanty, “**Doubly-Fed Induction Generator for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems- Modeling & Simulation,**” International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 1, February, 2010.
- [32] E. Muljadi and C.P. Butterfield, “**Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Applications,**” National Renewable Energy Laboratory,” Presented at the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. October 3-7, 1999.
- [33] S. P. Barave, B. H. Chowdhury, “**Optimal Design of Induction Generators for Space Applications,**” IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems Vol. 45, NO. 3 July 2009.
- [34] R. Ramírez A. “**Generador de Inducción Autoexcitado con Capacitor Shunt Y Autoregulado con Capacitor Serie para Utilización en Plantas Autonomas de**

Referencias

- Generacion Eolica,** Sección Postgrado FIEE Universidad Nacional de Ingeniería. Disponible: <http://contenido.coes.org.pe/alfrescostruts/download.do?nodeId=480e3a22-df5f-4621-a060-17bc1d6effba>. Consultado: Enero 2014.
- [35] Ahmed, T., Ogura, K., Soshin, K., Hiraki, E., Nakaoka, M. “**Small-scale wind turbine coupled single-phase self-excited induction generator with SVC for isolated renewable energy utilization,**” The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003.
- [36] G. Dilevs, E. Jakobsons, “**The Generated Power of Multipole Induction Generator with Secondary Winding on the Stator,**” The 50th International Scientific Conference, Power and Electrical Engineering. October 2009.
- [37] Hongzhong Ma, Lin Chen, Ping Ju, Haihua Liu, Ning Jiang, Chunling Wang, “**Feasibility research on DC generator based wind power generation system,**” International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009.
- [38] Guoliang Yang; Huiguang Li, “**Design and analysis of a newly brushless DC wind generator,**” World Automation Congress, 2008.
- [39] H. Uchiyama, “**Permanent Magnet Electric Generator,**” U. S. Patent 5 767 601, Jun. 16 1998.
- [40] W. Kober, R Hills, “**Axial Air Gap Generator with Cooling Arrangement,**” U. S. Patent 3 428 840, Feb.18 1969.
- [41] Ion Boldea, “**Variable Speed Generators,**” Tylor and Francis Group, 2006, USA.
- [42] J. C. Antezana Núñez, “**Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical,**” Ing. Tesis, Universidad de Chile, Septiembre de 2004.
- [43] Mediterráneo Señales Marítimas, “**Aerogeneradores WINDSIDE**”, Consultado en Octubre de 2013, Disponible: <http://www.mesemar.com/ES/pdf/AEROGENERADORES.pdf>.
- [44] Oleg Kudrjartsev, Aleksander Kilk, “**Cogging Torque Reduction Methods,**” Doctoral School of Energy and Geotechnology II. Disponible: http://egdk.ttu.ee/files/parnu2013/Parnu_2013_212-214.pdf, Enero de 2013.
- [45] Luke Dosiek, Pragasen Pillay, “**Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines,**” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 6, p.p. 1565- 1571. November/December 2007.
- [46] R. Dutta, S. Sayeef, M.F. Rahman, “**Analysis of Cogging Torque and its Effect on Direct Torque Control (DTC) in a Segmented Interior Permanent Magnet Machine,**” Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL., 17-21 June 2007.

Referencias

- [47] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, D. Ishak, D. Howe, “**Analysis of Cogging Torque in Brushless Machines Having Nonuniformly Distributed Stator Slots and Stepped Rotor Magnets,**” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 10, p.p. 3910 – 3912, October 2005.
- [48] Kwangdeok Kim, Younho Jeong, Seungho Lee, Yong Jae Kim, Yu-Suk Jeong, Sang-Yong Jung1, “**Torque Harmonic Characteristic of Permanent Magnet Synchronous Motor According to Ratio Numbers of Slots and Poles,**” International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 20-23 Aug. 2011.
- [49] Themistoklis Kefalas, George Kalokiris, Antonios Kladas, John Tegopoulos, “**Design of skewed mounted permanent magnet synchronous generators based on 2D and 3D finite element techniques,**” ELSEVIER, Journal of Materials Processing Technology, p.p. 288–293, 2005.
- [50] Jianzhong Zhang Ming Cheng Zhe Chen, “**Optimal design of stator interior permanent magnet machine with minimized cogging torque for wind power application,**” ELSEVIER, Energy Conversion and Management p.p. 2100–2105, 2008.
- [51] J. A. Güemes, A. M. Iraolagoitia, J. I. Del Hoyo, P. Fernández, “**Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 1, p.p. 55 – 63, March 2011.
- [52] Seok-Hee Han, Thomas M. Jahns, Wen L. Soong, Mustafa K. Güven, Mahesh S. Illindala, “**Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Stators With Odd Number of Slots Per Pole Pair,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25, No. 1, p.p. 118 – 127, March 2010.
- [53] Wang T, Wang Q. “**Optimization design of a permanent magnet synchronous generator for a potential energy recovery system,**” IEEE Transaction on Energy Conversion, Pages: 856 - 863, 2012.
- [54] Liu C-S, Hwang J-C, Chen Po-C. “**Design of permanent magnet synchronous motor with low cogging torque,**” International Power Electronics Conference (IPEC), Sapporo Japan, 21-24 June 2010.
- [55] WEQ “**Energy Efficient Programs,**” Available: http://www.weg.net/green/_files/Energy-Efficiency-Global-Directives_-_Presentation.pdf, August 2013.
- [56] I. M. Ducar, C. P. Ion, “**Design of a PMSG for Micro Hydro Power Plants,**” International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, Romania. 24-26 May 2012.

Referencias

- [57] Qingling He, Xiaohua Bao, Qunjing Wang, “**Analyzing on Structure Parameters for Low-speed Permanent Magnet Synchronous Generator,**” International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China. 17-20 Oct. 2008.
- [58] Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi and M. Rajabi-Sebdani and A. Khan “**Optimal Design of Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Energy Conversion Considering Annual Energy Input and Magnet Volume,**” International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing 6-7 April 2009.
- [59] Tao Wang and Qingfeng Wang, “**Optimization Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Potential Energy Recovery System,**” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, No. 4, December 2012.
- [60] J. A. Tapia , J. Pyrhönen , J. Puranen , P. Lindh , and Sören Nyman, “**Optimal Design of Large Permanent Magnet Synchronous Generators,**” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 1, January 2013.
- [61] Z. Xiang-Jun Y. Yongbing Z. Hongtao L. Ying F. Luguang Y. Xu, “**Modelling and control of a multi-phase permanent magnet synchronous generator and efficient hybrid 3L-converters for large direct-drive wind turbines,**” IET Electr. Power Appl., 2012, Vol. 6, Iss. 6, pp. 322–331.
- [62] Duane C. Hanselman, “**Brushless Permanent – Magnet Motor Design,**” McGraw-Hill, Inc. ISBN-10: 0070260257. January 1994.
- [63] B.S. Guru y H.R. Hiziroglu, “**Máquinas Eléctricas y Transformadores,**” Editorial Reverté, ISBN 10: 9706136738. Malaga, España 2010.
- [64] John H. Kuhlmann, “**Diseño de Aparatos Eléctricos,**” Compañía Editorial Continental, S. A. México. 1980.
- [65] JMAG-Designer 10.5. Material editor: Iron loss, 2013.
- [66] Nategh, S. ; Wallmark, O. ; Soulard, J., “**Local iron loss identification by thermal measurements on an outer-rotor permanent magnet synchronous machine,**” International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo Japan, 21-24 Oct. 2012.
- [67] Anton Haumer Christian Kral Hansjörg Kapeller Thomas Bäuml Johannes V. Gragger, “**The Advanced Machines Library: Loss Models for Electric Machines,**” Proceedings 7th Modelica Conference, Como, Italy, Sep. 20-22, 2009.
- [68] Fengxiang Wang, Dianhai Zhang, Junqiang Xing and Yunlong Xu “**Study on Air Friction Loss of High Speed PM Machine,**” IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. Gippsland, Australia. VIC. 10-13 Feb. 2009.

Referencias

- [69] Tarun Maandi, Farshad Fahimi, David Brown, “**Minimizing Torque Ripple and Copper Losses in Variable Speed Brushless DC Motor,**” 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA2011), September 25-28, 2011, Langkawi, Malaysia.
- [70] Bollen MH, Gu I. “**Signal processing of power quality disturbances.**” IEEE Press Series on Power Engineering. John Wiley and Sons, Inc. USA 2006.
- [71] American National Standard (ANSI). IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE Std 519–1992. IEEE Press, 1993.
- [72] National Electrical Manufacturers Association. NEMA Standards Publication ANSI/NEMA MG 1-2003, December 17, 2003.
- [73] Donald Q. Kern, “**Procesos de transferencia de calor,**” Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. Trigésima primera reimpresión. México 1999.
- [74] A.-I. Chirila, C. Ghi,a, A. Craciunescu, I.-D. Deaconu, V. Navrapescu and M. Catrinoiu, “**Rotating Electric Machine Thermal Study,**” International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April. 2010.
- [75] Erich Hau, “**Wind Turbines, Fundamental, Technologies, Application, Economics**” Springer; Softcover reprint of hardcover 2nd ed. 2006.
- [76] Magdi Ragheb and Adam M. Ragheb (2011). “**Wind Turbines Theory The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power,**” Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2. InTech. DOI: 10.5772/21398. Available from: <http://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>.
- [77] John H. Kuhlmann, “**Design of Electrical Apparatus.**” John Wiley; Third Edition. Second Printing edition, 1954.
- [78] J. de la Cruz-Soto, J.L. Leyva-Montiel. Juan M. Ramirez, “**Design and Development of an Outer Rotor Permanent Magnet Synchronous Generator of 400 W for a vertical wind turbine**” XXIII International conference of Energy Saving, Guadalajara, Jal., Mexico. August 2012.
- [79] J. de la Cruz-Soto, Juan M. Ramirez, J.L. Leyva-Montiel, “**Voltage THD Improvement for an Outer Rotor Permanent Magnet,**” International Journal of Emerging Electric Power Systems. Volume 14, Issue 5, Pages 459–465, ISSN (Online) 1553-779X, ISSN (Print) 2194-5756, DOI: 10.1515/ijeeps-2013-0072, August 2013.

Referencias

- [80] R. V. Coquilla, “**Review of Anemometer Calibration Standards,**” Canadian Wind Energy Association, CANWEA 2009, Toronto, Ontario Supplemental Paper to Poster Presentation.
- [81] ANSYS Release 13, “**Engineering Data Library: B-H Curves for Soft Materials,**” April 2013.
- [82] A.K. Wright, D.H. Wood, “**The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine,**” ELSEVIER Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 92, Issues 14–15, December 2004, Pages 1265–1279.
- [83] Xinda Green Energy Co. “**Horizontal Permanent magnet generator for wind turbine,**” Disponible: <http://www.xindaenergy.com/Horizontal-Permanent-magnet-generator-for-wind-turbine-p177.html>. Consultado: Enero de 2014.
- [84] Ginlong. “**Permanent Magnet Generator: GL-PMG-5000 Specification Sheet,**” Disponible: <http://www.ginlong.com/wind-turbine-pmg-pma-permanent-magnet-generator-alternator-GL-PMG-5k.htm>. Consultado: Enero de 2014.
- [85] Precilec. “**Wind PMG Range of Wind Turbine Generator: Technical Date,**” Disponible: http://www.precilec.com/fichier_produit/1_1302441749.pdf. Consultado: Enero de 2014.
- [86] Greenin. “**Lámparas Ecológicas: Lámparas LED para alumbrado público,**” Disponible: <http://www.ahorroenergiahoy.com.mx/producto.php?categoria=4&subcategoria=&productp=57>. Consultado: enero de 2014.
- [87] İ. Tarimer, S. Arslan, M. E. Güven, “**Investigation fo Losses of M19 and Amorphous Core Materials Asynchronous Motor by Finite Element Methods,**” IEEE Elektronika Ir Elektrotechnika, ISSN 1392-1215, Vol. 18, No. 9, 2012.
- [88] SolidWorks, “**Coefficiente de transferencia de calor por convección,**” Disponible: http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm. Consultado: Enero 2014.
- [89] Armstrong Magnetics, Inc. “**Neodymium Magnets: Magnetic Property of Nwodymium Magnet,**” Disponible: <http://www.armsmag.com/neodymium.htm>. Consultado: Enero de 2014.
- [90] Rişon Inter Ltd, “**Fiberglass composite main properties: Results of the tests,**” Disponible: http://www.rishon-inter.lv/?l=6&item_id=11. Consultado: Enero de 2014.
- [91] Azom, “**AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel: Mechanical Properties,**” Disponible: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6115>. Consultado: Enero de 2014.

Referencias

- [92] Small generator, “**Permanent Magnet Generator for Wind Turbine 100W,**” Disponible: http://small-generator.com/buy/index.php?main_page=product_info&products_id=38. Consultado: Enero de 2014.
- [93] Chinal Coal, “**product introduction: Main parameter,**” Disponible: http://chinacoalenergy.en.alibaba.com/product/1437681281-218441772/china_coal_100w_600w_Rare_earth_permanent_magnet_generator_AC_motor_altern_shandong_coal.html. Consultado Enero de 2014.
- [94] Secretaría de Energía, “**Reglas Generales de Interconexión al Sistema Eléctrico Nacional para generadores o permisionarios con fuentes de energías renovables o cogeneración eficiente,**” Diario Oficial, Martes 22 de mayo de 2012.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N. UNIDAD GUADALAJARA

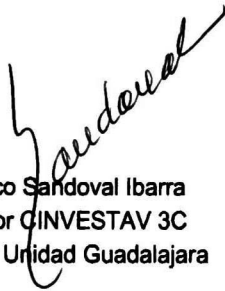
El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Diseño e Implementación de un Aerogenerador de Eje Vertical

del (la) C.

Javier DE LA CRUZ SOTO

el día 23 de Julio de 2014.



Dr. Federico Sandoval Ibarra
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara



Dr. Pablo Moreno Villalobos
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara



Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara



Dr. José Luis Alejandro Naredo
Villagrán
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara



Dr. Pável Zúñiga Haro
Profesor Investigador Titular A
Universidad de Guadalajara



CINVESTAV - IPN
Biblioteca Central



SSIT0012583