



Universidad del Istmo

Campus Tehuantepec

División de Estudios de Posgrado
Maestría en Ciencias en Energía Eólica

Análisis del desempeño de un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial para diferentes arreglos de bobinados

T E S I S

que para obtener el título de:
Maestro en Ciencias en Energía Eólica

Presenta:

Ing. Eduardo Ortiz Garcia

Director:

Dr. Reynaldo Iracheta Cortez

Codirector:

Dr. Emmanuel Hernandez Mayoral

Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca. Julio 2020.

*Hay hombres que luchan un día y son buenos
Hay otros que luchan un año y son mejores
Hay otros que luchan muchos años y son muy buenos
Pero hay los que luchan toda la vida
Esos son los imprescindibles
Bertolt Brech*

*Voluntas totum potest
Guiraa zanda ne guendaracala'dxi*

Resumen

Este proyecto de investigación tiene como finalidad el análisis teórico para el desarrollo de una herramienta de software para el cálculo universal de bobinados en Generadores Síncronos de Imanes Permanentes de Flujo Radial (RF-PMSG, por sus siglas en inglés). Para lograr el objetivo se propone realizar un estudio exhaustivo del diseño y tipos de bobinado con el fin de conocer sus principales características y aplicaciones dentro de los PMSG's.

El dimensionado para la obtención de bobinados parte de la formulación matemática que cumple con las condiciones de simetría propuestas para lograr la optimización del bobinado y reducir los efectos no deseados de calidad de energía a la salida del RF-PMSG. Los parámetros de entrada, en dicha herramienta son variables topológicas del diseño geométrico del RF-PMSG relacionadas con; el número de ranuras (N_s), número de polos (N_m), número de fases (N_{ph}) y número de capas (N_{lay}). Adicionalmente, se obtiene la distribución de cualquier tipo de bobinado tanto en máquinas convencionales como en máquina eléctricas no convencionales y se determina esquemáticamente el orden de conexión de los lados del bobinado ubicados en las ranuras de la máquina.

Con los resultados del algoritmo desarrollado se implementan tres diferentes geometrías para analizar el tipo de bobinado. Los bobinados propuestos son: Bobinado distribuido de Ranura Integral (ISDW, por sus siglas en inglés), Bobinado Distribuido de Ranura Fraccional (FSDW, por sus siglas en inglés) y Bobinado Concentrado de Ranura Fraccional (FSCW, por sus siglas en inglés). Adicionalmente, se realiza una comparativa de la herramienta desarrollada con softwares comerciales, destacando las ventajas que caracterizan la herramienta propuesta.

La validación del rendimiento del software, se lleva a cabo bajo simulaciones de elementos finitos en 2D y 3D, Analizado los efectos de los bobinados para el más amplio rango de operación, con estudios en vacío y variando las carga de 10 a 100 %. Evaluando los efectos de la calidad de energía y el rendimiento en general del RF-PMSG.

Finalmente, se describen las conclusiones generales y las principales aportaciones del trabajo de investigación así como trabajos futuros, y los anexos desarrollados para la obtención del desarrollo de resultados.

Agradecimientos

A mis papás Epitacio Ortíz López y Perfecta García Feria, por todo el esfuerzo realizado para que no me faltara nada, por educarme y convertirme en una persona de bien, por la enseñanza, consejos y anécdotas. A ustedes quienes confiaron en mis objetivos, metas y sueños. Todo lo que he conseguido en la vida se lo debo única y exclusivamente a ustedes, pues con su apoyo, inspiración, fortaleza, compromiso, cariño y ejemplo, he logrado terminar un ciclo profesional, que es para mí, la mejor de las herencias.

A mis hermanas Berenice Ortíz y Dulce Ortíz, por el apoyo incondicional, por el cariño de siempre y por estar ahí el uno para el otro, gracias por ser parte de mi vida y contar con ustedes. Las admiro por todo el empeño que realizan y por motivarme a seguir preparándome.

A mi director de tesis Dr. Reynaldo Iracheta Cortez, por ser una persona ejemplar, brindándome sus conocimientos y consejos tanto profesionales como personales, agradeciendo su paciencia y esfuerzo para el desarrollo de este trabajo.

A mi co-director de tesis Dr. Emmanuel Hernández Mayoral, por ser una persona ejemplar, brindándome sugerencias y discusiones oportunas en este trabajo de tesis.

A los miembros de mi Comité revisor, gracias por sus enseñanzas, por la paciencia, sus observaciones y opiniones que hicieron que este trabajo tuviera una visión académica crítica y objetiva. Admiro su ética profesional y académica.

A mis amigos de Posgrado Alan, Ananias, Armando, Eusebio, Juan Carlos y Vianey por esos buenos momentos y hacer mas amena mi estancia en la UNISTMO, gracias por esa amistad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la ayuda económica recibida para estudiar la maestría y por cumplir la misión de contribuir al desarrollo científico de la nación.

Nomenclatura y Acronimos

Nomenclatura

α	Ángulo eléctrico
α_{ph}	Ángulo de fase
η	Eficiencia
γ	Bobina de fase con la misma orientación
ω_e	Frecuencia eléctrica
ρ_{bi}	Densidad del acero
B	Densidad de flujo magnético
B_r	Densidad de flujo remanente
B_{max}	Densidad de flujo máximo
B_{min}	Densidad de flujo mínimo
BH_{max}	Producto de energía máxima
E_{rms}	Voltaje inducido
f_e	Frecuencia eléctrica
g	Número de bobinas con diferentes fases
H_c	Resistencia a la desmagnetización
H_cB	Intensidad de campo magnético coercitivo
h_n	Orden armónico
I	Corriente eléctrica
J_s	Densidad de corriente máxima
k_d	Factor de distribución
k_e	Coficiente de pérdida de núcleo en exceso
k_h	Coficiente de pérdida del núcleo

k_p	Factor de paso
k_w	Factor de bobinado
k_{st}	Factor de apilamiento de la laminación
N_c	Número total de bobinas
N_m	Número de polos
N_p	Número de pares de polos
N_s	Número de ranuras
N_{es}	Número de ranuras vacías
N_{lay}	Número de capas
N_{ph}	Número de fases
N_{spp}	Número de ranuras por polo y fase
N_{sp}	Número de ranuras por fase
N_{wc}	Número de bobinas por fase
P_{cu}	Pérdidas del cobre
P_{ent}	Potencia de entrada
P_{mis}	Pérdidas misceláneas
P_{nuc}	Pérdidas del nucleo
P_{sal}	Potencia de salida
R_v	Regulación de voltaje
R_{ph}	Resistencia de fase
S	Rango de velocidades de rotación
S_r	Velocidad de rotación
t	Máximo común divisor entre N_s y N_p
t'	Número de repeticiones
T_c	Paso de bobina expresado en número de ranuras
T_m	Torque en vacío
T_{ond}	Torque de ondulación
Z_{neg}	Número de ranuras intercaladas negativas
Z_{pos}	Número de ranuras intercaladas positivas

Acrónimos

AF-PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Axial, Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
DDPMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Accionamiento Directo, Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generators.
FEA	Análisis de Elementos Finitos, Finite Element Analysis.
FEM	Método de Elementos Finitos, Finite Element Method.
FSCW	Bobinado Concentrado de Ranura Fraccional, Fractional Slot Concentrated Windings.
FSDW	Bobinado Distribuido de Ranura Fraccional, Fractional Slot Distributed Winding.
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional, International Electrotechnical Commission.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.
ISDW	Bobinado de Ranura Integral, Integral Slot Windings
PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes, Permanent Magnet Synchronous Generator.
PMSM	Máquina Síncrona de Imanes Permanentes, Permanent Magnet Synchronous Motor.
RF-PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Radial, Radial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator.
TF-PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Transversal, Transversal-Flux, Permanent Magnet Synchronous Generator.
TH-FEA	Análisis Armónico de Elementos Finitos en el Tiempo, Time-Harmonic Finite Element Analysis.
THD	Distorsión Armónica Total, Total Harmonic Distortion.
WDT	Tabla de distribución de bobinado, Winding Distribution Table.

Glosario

- Bobina:** El tramo de la bobina es la distancia entre un conductor de una fase determinada y el conductor de retorno correspondiente.
- Bobinado concentrado de ranura fraccionaria:** Bobinado de ranura fraccionaria cuando el número de ranuras por polo por fase es fraccional y menor a 1.
- Bobinado concentrado de ranura intergal:** Bobinado de ranura interal cuando el número de ranuras por polo por fase es un entero.
- Bobinado desequilibrado:** Un bobinado desequilibrado tiene una combinación de número de polos y número de ranuras que no permite organizar las bobinas de tal manera que produzcan un sistema simétrico
- Bobinado distribuido de ranura fraccionaria:** Bobinado de ranura fraccionaria cuando el número de ranuras por polo por fase es fraccional y mayor a 1.
- Factor de bobinado:** Número que indica la eficacia de una bobina.
- Frecuencia eléctrica:** La frecuencia eléctrica es la frecuencia fundamental de la corriente y el voltaje en los terminales de la máquina medidos en Hz.
- Número de capas de bobinado:** El número de capas indica el número de bobinas diferentes en una ranura.
- Número de conductores por ranura:** Define cuántos conductores se colocan en una ranura.
- Número de ranuras por polo y por fase:** El número de ranuras por polo y por fase determina cómo se organiza el diseño del bobinado.
- Número de simetrías de bobinado:** El número de simetrías del bobinado indica el número de simetrías rotacionales en el diseño del bobinado. Indica también la periodicidad de la máquina.

Índice general

Resumen	ii
Agradecimientos	iii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema	6
1.3 Objetivo general	7
1.3.1 Objetivos específicos	7
1.4 Justificación	8
1.5 Hipótesis	9
1.6 Alcances y limitaciones	10
1.7 Estructura de la tesis	11
1.8 Marco teórico	12
1.8.1 Generador eléctrico	12
1.8.1.1 Generador síncrono	12
1.8.1.2 Generador síncrono de rotor bobinado	13
1.8.1.3 Generador síncrono de imanes permanentes	14
1.8.1.4 Generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial (RF-PMSG's)	15
1.8.2 Calidad de energía	17
1.9 Diseño de investigación	18
2 Algoritmo de bobinados	21
2.1 Formulación matemática del diseño de bobinados	22
2.1.1 Fases del sistema	22
2.1.2 Capas del sistema	23
2.1.3 Condiciones de simetría	23
2.1.4 Distribución de bobinados	25
2.1.4.1 Distribución de bobinados para sistemas normales y no reducidos	25
2.1.4.2 Distribución de bobinados para sistemas reducidos	26
2.1.5 Intercalado de la distribución del bobinado	26
2.1.6 Factor de bobinado	27
2.2 Comparativa de la herramienta de bobinados	28

2.3	Ejemplo de la herramienta de distribución	30
2.4	Casos de estudio	35
2.4.1	Caso I: Bobinado de ranura integral (ISDW)	35
2.4.1.1	Capa simple	35
2.4.1.2	Doble capa	35
2.4.2	Caso II: Bobinado concentrado de ranura fraccional (FSCW)	36
2.4.2.1	Capa simple	36
2.4.2.2	Doble capa	37
2.4.3	Caso III: Bobinado distribuido de ranura fraccional (FSDW)	38
2.4.3.1	Capa simple	38
2.4.3.2	Doble capa	38
2.5	Conclusiones	40
3	Análisis del Desempeño del RF-PMSG con diferentes tipos de bobinados a través de FEM 2D	41
3.1	Software JMAG Designer®	42
3.2	Procedimiento de análisis	42
3.2.1	Modelado CAD	42
3.2.2	Asignación de las propiedades	43
3.2.2.1	Acero eléctrico	43
3.2.2.2	Imanes permanentes	44
3.2.2.3	Mallado de la geometría	45
3.2.3	Asignación de condiciones	46
3.3	Casos de estudio	47
3.3.1	Caso I: Bobinado concentrado de ranura fraccional (FSCW)	48
3.3.1.1	Capa simple	48
3.3.1.2	Doble capa	53
3.3.2	Caso II: Bobinado distribuido de ranura fraccional (FSDW)	57
3.3.2.1	Capa simple	57
3.3.2.2	Doble capa	60
3.3.3	Caso III: Bobinado de ranura integral (ISDW)	65
3.3.3.1	Capa simple	65
3.3.3.2	Doble capa	68
3.4	Resultados	73
3.5	Conclusiones	75
4	Análisis del Desempeño del RF-PMSG con diferentes tipos de bobinados a través de FEM 3D	76
4.1	Análisis de elementos finitos del RF-PMSG 3D	77
4.1.1	Mallado de la geometría	77
4.2	Estudio comparativo	78
4.2.1	Distribución de flujo magnético	78
4.2.2	Voltaje en vacío	80
4.2.3	Distorsión armónica total (THD)	81
4.2.4	Torque	83
4.2.5	Densidad de corriente	86
4.2.6	Pérdidas y potencia	88
4.2.7	Regulación de voltaje	89

4.2.8 Volumen y masa	91
4.3 Conclusiones	94
5 Conclusiones y trabajos futuros	95
5.1 Conclusiones generales	95
5.2 Aportaciones	97
5.3 Trabajos futuros	97
Anexos	98
A Publicaciones	98
B Comparativa de software	100
C Manual de usuario JMAG DESIGNER	101
D Esquemas de conexión	105
E Geometría del RF-PMSG	112
F Herramienta de diseño de bobinados del RF-PMSG	115
G Ensamble del RF-PMSG de 10 kW	118
Bibliografía	123

Índice de figuras

1.1	Generador síncrono.	12
1.2	Generador síncrono de rotor bobinado; a) empleando un convertidor de potencia, b) empleando dos convertidores de potencia y c) empleando múltiples polos sin caja multiplicadora.	13
1.3	Configuración de generador síncrono de imanes permanentes.	14
1.4	Configuración de las topologías de PMSG's; a) flujo axial, b) flujo radial y c) flujo transversal.	14
1.5	Topología PMSG de flujo radial.	15
1.6	Configuración de bobinados; a,b) ISDW de 1 capa, c) ISDW de 2 capas, d) FSDW de 2 capas, e) FSCW de 1 capa y f) FSCW de 2 capas.	16
2.1	Intercambio de los cuadrantes para sistemas reducidos y $N_{ph} \in \mathbb{G}$	26
2.2	Diagrama de flujo del diseño de bobinados del PMSG.	30
2.3	Cadena de diseño - máquina con $N_s = 72$, $N_m = 22$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	33
2.4	Esquema de conexión - máquina con $N_s = 72$, $N_m = 22$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	34
2.5	Factor de bobinado de máquina con $N_s = 72$, $N_m = 22$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	34
2.6	Cadena de diseño del bobinado ISDW con $N_s = 96$, $N_m = 32$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	35
2.7	Cadena de diseño del bobinado ISDW con $N_s = 96$, $N_m = 32$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 2$	36
2.8	Cadena de diseño del bobinado FSCW con $N_s = 90$, $N_m = 32$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	37
2.9	Cadena de diseño del bobinado FSCW con $N_s = 90$, $N_m = 32$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 2$	37
2.10	Cadena de diseño del bobinado FSDW con $N_s = 102$, $N_m = 32$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	38
2.11	Cadena de diseño del bobinado FSDW con $N_s = 102$, $N_m = 32$, $N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 2$	39
3.1	CAD de la geometría del RF-PMSG.	43
3.2	Curva BH del acero 50JN310.	43
3.3	Densidad de pérdidas del acero 50JN310.	44
3.4	Densidad de pérdidas del acero 50JN310.	45
3.5	Asignación de condiciones iniciales para el caso de estudio.	46
3.6	Voltajes inducidos del bobinado FSCW con $S_r = 225$ rpm.	48
3.7	Distorsión armónica del bobinado FSCW, armónicos individuales.	49
3.8	Señal del torque en vacío del bobinado FSCW.	49
3.9	Torque de ondulación a plena carga del bobinado FSCW.	50
3.10	Densidad de flujo magnético del bobinado FSCW a) Vectores de flujo, b) Líneas de flujo.	50
3.11	Voltaje a condición de vacío y plena carga a velocidad variable del bobinado FSCW.	51
3.12	Regulación de voltaje del bobinado FSCW con $S_r = 225$ rpm.	51
3.13	Densidad de corriente máxima en conductores del bobinado FSCW, a) $S_r = 255$ y b) $S_r = 400$ rpm.	52
3.14	Curva de potencia del bobinado FSCW a plena carga cuando $S_r = 255$ rpm.	52

3.15	Voltajes inducidos del bobinado FSCW con $S_r = 225$ rpm.	53
3.16	Distorsión armónica del bobinado FSCW, armónicos individuales.	53
3.17	Señal del torque en vacío del bobinado FSCW.	54
3.18	Torque de ondulación a plena carga del bobinado FSCW.	54
3.19	Densidad de flujo magnético del bobinado FSCW a) Vectores de flujo, b) Líneas de flujo.	54
3.20	Voltaje a condición de vacío y plena carga a velocidad variable del bobinado FSCW.	55
3.21	Regulación de voltaje del bobinado FSCW con $S_r = 225$ rpm.	55
3.22	Densidad de corriente máxima en conductores del bobinado FSCW, a) $S_r = 255$ y b) $S_r = 400$ rpm.	56
3.23	Curva de potencia del bobinado FSCW a plena carga cuando $S_r = 255$ rpm.	56
3.24	Voltajes inducidos del bobinado FSDW con $S_r = 225$ rpm.	57
3.25	Distorsión armónica del bobinado FSDW, armónicos individuales.	57
3.26	Señal del torque en vacío del bobinado FSDW.	58
3.27	Torque de ondulación a plena carga del bobinado FSDW.	58
3.28	Densidad de flujo magnético, bobinado FSDW a) Vectores de flujo, b) Líneas de flujo.	58
3.29	Voltaje a condición de vacío y plena carga a velocidad variable del bobinado FSDW.	59
3.30	Regulación de voltaje del bobinado FSDW con $S_r = 225$ rpm.	59
3.31	Densidad de corriente máxima en conductores del bobinado FSDW, a) $S_r = 255$ y b) $S_r = 400$ rpm.	60
3.32	Curva de potencia del bobinado FSDW a plena carga cuando $S_r = 255$ rpm.	60
3.33	Voltajes inducidos del bobinado FSDW con $S_r = 225$ rpm.	61
3.34	Distorsión armónica del bobinado FSDW, armónicos individuales.	61
3.35	Señal del torque en vacío del bobinado FSDW.	62
3.36	Torque de ondulación a plena carga del bobinado FSDW.	62
3.37	Densidad de flujo magnético del bobinado FSDW a) Vectores de flujo, b) Líneas de flujo.	62
3.38	Voltaje a condición de vacío y plena carga a velocidad variable del bobinado FSDW.	63
3.39	Regulación de voltaje del bobinado FSDW con $S_r = 225$ rpm.	63
3.40	Densidad de corriente máxima en conductores del bobinado FSDW, a) $S_r = 255$ y b) $S_r = 400$ rpm.	64
3.41	Curva de potencia del bobinado FSDW a plena carga cuando $S_r = 255$ rpm.	64
3.42	Voltajes inducidos del bobinado ISDW con $S_r = 225$ rpm.	65
3.43	Distorsión armónica del bobinado ISDW, armónicos individuales.	65
3.44	Señal del torque en vacío del bobinado ISDW.	66
3.45	Torque de ondulación a plena carga del bobinado ISDW.	66
3.46	Densidad de flujo magnético, bobinado ISDW a) Vectores de flujo, b) Líneas de flujo.	66
3.47	Voltaje a condición de vacío y plena carga a velocidad variable, bobinado ISDW.	67
3.48	Regulación de voltaje del bobinado ISDW con $S_r = 225$ rpm.	67
3.49	Densidad de corriente máxima en conductores del bobinado ISDW, a) $S_r = 255$ y b) $S_r = 400$ rpm.	68
3.50	Curva de potencia del bobinado ISDW a plena carga cuando $S_r = 255$ rpm.	68
3.51	Voltajes inducidos del bobinado ISDW con $S_r = 225$ rpm.	69
3.52	Distorsión armónica del bobinado ISDW, armónicos individuales.	69
3.53	Señal del torque en vacío del bobinado ISDW.	70
3.54	Torque de ondulación a plena carga del bobinado ISDW.	70
3.55	Densidad de flujo magnético del bobinado ISDW a) Vectores de flujo, b) Líneas de flujo.	70
3.56	Voltaje a condición de vacío y plena carga a velocidad variable del bobinado ISDW.	71
3.57	Regulación de voltaje del bobinado ISDW con $S_r = 225$ rpm.	71

3.58	Densidad de corriente máxima en conductores del bobinado ISDW, a) $S_r = 255$ y b) $S_r = 400$ rpm.	72
3.59	Curva de potencia del bobinado ISDW a plena carga cuando $S_r = 255$ rpm.	72
4.1	Geometría del RF-PMSG, a) Vista 3D, b) Circuito eléctrico de los bobinados.	77
4.2	Flujo magnético del rotor para los bobinados propuestos a) 1 capa y b) 2 capas.	79
4.3	Flujo magnético del estator para los bobinados propuestos a) 1 capa y b) 2 capas.	79
4.4	Voltajes inducidos en terminales del RF-PMSG, a) 1 capa y b) 2 capas.	81
4.5	Armónicos individuales de voltaje obtenidos con FEA 2D y 3D a) 1 y b) 2 capas.	82
4.6	Torque en vacío para bobinados FSCW y FSDW a) 1 capa y b) 2 capas.	83
4.7	Torque en vacío para el bobinado ISDW a) Una capa y b) Doble capa.	84
4.8	Torque de ondulación para bobinados FSCW y FSDW a) 1 capa y b) 2 capas.	85
4.9	Torque de ondulación para bobinado ISDW a) 1 capa y b) 2 capas.	86
4.10	Densidad de corriente en bobinados del RF-PMSG con FEA 2D y 3D a) 1 capa y b) 2 capas.	87
4.11	Eficiencia del RF-PMSG obtenido con FEA 3D. a) FSCW, b) ISDW y c) FSDW.	89
4.12	Regulación de voltaje con FEA 2D y 3D para bobinados a) FSCW, b) ISDW y c) FSDW.	90
4.13	Masas de las diferentes configuraciones de bobinados a) FSCW, b) ISDW, c) FSDW y d) Masa total.	93
B.1	Comparativa de herramientas.	100
C.1	Estudio magnético transitorio del RF-PMSG.	101
C.2	Asignación de materiales para el caso de estudio.	102
C.3	Asignación de materiales para las partes del RF-PMSG: yugo rotor, yugo estator, imanes y bobinados.	102
C.4	Asignación de condiciones iniciales para el caso de estudio.	103
C.5	Asignación de condiciones iniciales para el caso de estudio.	104
C.6	Asignación de mallado al RF-PMSG.	104
D.1	Distribución del bobinado FSCW $N_{spp} = 0.9375$ de una capa.	106
D.2	Distribución del bobinado FSCW $N_{spp} = 0.9375$ de una capa.	107
D.3	Distribución de bobinado ISDW $N_{spp} = 1.00$ de una capa.	108
D.4	Distribución del bobinado ISDW $N_{spp} = 1.00$ de doble capa.	109
D.5	Distribución del bobinado FSDW $N_{spp} = 1.0625$ de una capa.	110
D.6	Distribución del bobinado FSDW $N_{spp} = 1.0625$ de doble capa.	111
E.1	Geometría del RF-PMSG a) radios del rotor y estator, b) ranuras del estator.	112
F.1	Programa de diseño de bobinados, Parámetros iniciales.	116
F.2	Programa de diseño de bobinados, Distribución de bobinado.	116
F.3	Programa de diseño de bobinados, Factor de bobinado.	117
G.1	Ensamble del Rotor del RF-PMSG a) Colocación de flecha, b) Colocación de la cuña, c) Vista general del Rotor ensamblado.	118
G.2	Ensamble del RF-PMSG a) Alineación de los componentes, b) Ensamblaje del rotor con estator, c) Imanes afectados por el desplazamiento.	119
G.3	Modificación del Rotor a) Colocación y alineación del rotor sobre la fresadora, b) Proceso de ajuste del rotor.	119

G.4	Adhesión de imanes a) Fijación de imanes correspondiente a su polaridad , b) Limpieza final de imanes.	120
G.5	Ensamble del Rotor del RF-PMSG a) Colocación de flecha, b) Colocación de la cuña, c) Vista general del Rotor ensamblado.	120
G.6	Ensamble final del RF-PMSG a) Colocación de soportes guías, b) Colocación de indicadores dial, c) Ajuste final de tapas, d) RF-PMSG funcional.	121
G.7	Ensamble final del RF-PMSG a) Limpieza general, b) Pulido con banda suave, c) Pintura general, d) Vista final del RF-PMSG.	122

Índice de tablas

1.1	Operacionalización de la variable independiente.	18
1.2	Operacionalización de la variable dependiente.	19
1.3	Tabla de registro de datos.	19
2.1	Sistemas de fase de bobinados.	22
2.2	Elementos de la WDT	25
2.3	Reordenamiento de filas para sistemas reducidos con $N_{ph} \in \mathbb{G}$	26
2.4	Parámetros generales de la máquina.	30
2.5	Distribución de bobinados, con $N_s = 72, N_m = 22$	31
2.6	Ángulos eléctricos, $N_s = 72, N_m = 22, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	32
2.7	Distribución de bobinado, positivos y negativos.	33
2.8	Distribución de bobinado, columnas a intercalar.	33
2.9	Distribución de bobinado, celdas intercaladas.	33
2.10	Distribución de bobinados optimizada.	33
2.11	Resultados del factor de bobinado.	34
2.12	Parámetros del bobinado ISDW.	35
2.13	Factor de bobinado ISDW con $N_s = 96, N_m = 32, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	35
2.14	Parámetros del bobinado ISDW.	36
2.15	Factor de bobinado ISDW con $N_s = 96, N_m = 32, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 2$	36
2.16	Parámetros del bobinado FSCW.	36
2.17	Factor de bobinado FSCW con $N_s = 90, N_m = 32, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	37
2.18	Parámetros del bobinado FSDW.	37
2.19	Factor de bobinado FSCW con $N_s = 90, N_m = 32, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 2$	38
2.20	Parámetros del bobinado FSDW.	38
2.21	Factor de bobinado FSDW con $N_s = 102, N_m = 32, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 1$	38
2.22	Parámetros del bobinado FSDW.	39
2.23	Factor de bobinado FSDW con $N_s = 102, N_m = 32, N_{ph} = 3$ y $N_{lay} = 2$	39
3.1	Propiedades del imán N35.	44
3.2	Asignación de mallado del RF-PMSG.	45
3.3	Requerimientos del RF-PMSG.	47
3.4	Parámetros de bobinados propuestos.	48
3.5	Armónicos individuales del bobinado FSCW.	49
3.6	Armónicos individuales del bobinado FSCW.	53
3.7	Armónicos individuales del bobinado FSDW.	57
3.8	Armónicos individuales del bobinado FSDW.	61
3.9	Armónicos individuales del bobinado ISDW.	65
3.10	Armónicos individuales del bobinado ISDW.	69

3.11	Evaluación de la THD de las diferentes configuraciones de bobinados.	73
3.12	Evaluación del toque en vacío y ondulación de las diferentes configuraciones de bobinados.	73
3.13	Evaluación de la densidad de flujo magnético de las diferentes configuraciones de bobinados.	74
3.14	Evaluación de la eficiencia del RF-PMSG.	74
4.1	Asignación de mallado 3D del RF-PMSG.	77
4.2	Comparación de las densidades de flujo magnético.	80
4.3	Comparación de voltajes.	81
4.4	Comparación de armónicos del RF-PMSG obtenidos con FEA 2D y 3D.	82
4.5	Comparación del torque en vacío obtenido con FEA 2D y 3D de las diferentes configuraciones de bobinados.	84
4.6	Comparación del torque de ondulación obtenido con FEA 2D y 3D de las diferentes configuraciones de bobinados.	86
4.7	Comparación de las densidades de corriente.	88
4.8	Comparación de la eficiencia del RF-PMSG.	88
4.9	Regulación de voltaje para las diferentes configuraciones de bobinados.	91
4.10	Masa del RF-PMSG - FSCW	93
E.1	Definiciones geométricas del RF-PMSG - Bobinado FSCW.	113
E.2	Definiciones geométricas del RF-PMSG - Bobinado FSDW.	113
E.3	Definiciones geométricas del RF-PMSG - Bobinado ISDW.	114

Capítulo 1

Introducción

En la tecnología de los aerogeneradores, un generador eléctrico es una máquina que transforma energía mecánica en energía eléctrica, además es considerado el elemento central del sistema eléctrico de un aerogenerador y el componente a partir del cual se dimensionan los restantes elementos [1].

Los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG's por sus siglas en inglés) son cada vez más utilizados en el ámbito industrial y en la generación de energía renovable, especialmente para la generación de energía eólica a velocidad variable, debido al desarrollo que han obtenido de alta eficiencia y la alta densidad de torque.

La energía obtenida con los PMSG's es mayor que la que se obtiene con otro tipo de generadores debido a su simplicidad, factibilidad y la eliminación de pérdidas en el rotor [1], [2]. Un aerogenerador de imanes permanentes de 20 kW puede captar un 10 % más de energía que un aerogenerador asíncrono con convertidor de frecuencia y un 15 % más que un aerogenerador asíncrono de la misma potencia a velocidad fija. La velocidad asignada de los generadores síncronos utilizados en energía eólica está comprendida entre 20 y 200 rpm, dependiendo de la potencia nominal del generador [3], [14].

En la actualidad, las topologías más importantes que existen de generadores síncronos de imanes permanentes para sistemas eólicos son; flujo radial, axial y transversal. La utilización de los PMSG's directamente acoplado a la turbina es una de las opciones más prometedoras en el desarrollo de la industria eólica. Adicionalmente, otras características favorables que presentan los PMSG's son el mínimo ruido y su alta eficiencia. Con ello mejorar el desempeño de la máquina con la selección del tipo de bobinado y la optimización de la distribución del bobinado beneficia su vida útil y, por consiguiente, logra una reducción económica en su mantenimiento.

En esta tesis se analiza el desempeño de un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial (RF-PMSG) de 10 kW utilizando diferentes configuraciones de bobinados. El tópico principal consiste en analizar el fenómeno electromagnético de mayor incidencia en los bobinados de las máquinas rotatorias en materia de calidad de la energía: la distorsión armónica en las señales de voltaje y corriente del RF-PMSG. Adicionalmente, se evalúan otros parámetros de desempeño del RF-PMSG como el par de engrane, el par de ondulación, las pérdidas y la eficiencia del generador.

1.1. Antecedentes

El estudio sobre máquinas eléctricas y las ventajas que representa al utilizar diferentes configuraciones de bobinados han sido estudiados por varios años, parte del estudio es aplicado en los PMSG y sus aplicaciones en el área de energía eólica. Los estudios iniciales sobre la síntesis de bobinados se remontan a la década del siglo XX y se pueden atribuir a E. Arnold y R. Richter [4], [5].

A. Chen *et al.* [6] llevó a cabo un análisis armónico en software de elementos finitos de la fuerza electromotriz (EMF, por sus siglas en inglés) producida en cuatro diferentes tipos de RF-PMSG con imanes montados en su superficie. Los tipos de RF-PMSG analizados son: a) una máquina de 4 polos con bobinado distribuido de ranura entera, b) una máquina de 8 polos con bobinado distribuido de ranura fraccional, c) una máquina de 24 polos con bobinado concentrado de ranura entera y d) una máquina de 24 polos con bobinado concentrado de ranura fraccional. Los resultados obtenidos del análisis armónico, realizado con software FEA, muestran el efecto de la distorsión armónica en la fuerza electromotriz con respecto a la variación del parámetro del paso de bobinado. Adicionalmente, también se observa un alto contenido del tercer armónico que requiere ser disminuido. En la investigación se concluye que los bobinados distribuidos ya sean de ranura entera y de ranura fraccionaria presentan mejores características para suprimir y atenuar los armónicos en los bobinados del PMSG.

J. de la Cruz Soto *et al.* [7] presenta un estudio paramétrico de modificaciones geométricas y de materiales para el diseño de un PMSG de rotor externo de 5 kW, con el propósito de evaluar la distorsión armónica total (THD, por sus siglas en inglés) del voltaje. Los principales parámetros geométricos que se modificaron fueron la profundidad de la ranura, el ancho del yugo del estator, la fracción magnética, la longitud del entrehierro. Las principales modificaciones en los materiales fueron considerar 4 diferentes tipos de acero eléctricos para el núcleo del estator. Las simulaciones para obtener el voltaje inducido se llevaron a cabo en software de elementos finitos, y el análisis de la evaluación de las componentes armónicas se realizó en el software MATLAB[®]. En trabajo de investigación de J. de la Cruz Soto *et al.* se demuestra que la geometría del PMSG y la selección del material tiene un impacto sobre la distorsión armónica de las señales de voltaje inducido en las terminales del generador. Adicionalmente, en los experimentos realizados se encontró una estrecha relación entre los resultados de THD y el par en vacío de la máquina. Esto significa que al obtener un THD bajo se puede reducir el torque en vacío de la máquina, lo cual, es bastante deseable en generadores eólicos. La investigación presentada no contempla un estudio exhaustivo del desempeño del generador a diferentes condiciones de operación bajo carga.

N. Madani *et al.* [8] propone el diseño de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de flujo radial de potencia nominal de 12 kW, con bobinados concéntricos, para su aplicación en una turbina de eje vertical. El objetivo principal de esta investigación es optimizar el diseño del PMSG reduciendo los costos del material activo del generador. En este sentido, en dicho trabajo se hace referencia a que se utilizó un bobinado concéntrico para reducir la cantidad de cobre en los extremos de fin de vuelta del bobinado. Adicionalmente, también se hace mención de que con menos cantidad de cobre

se reducen las pérdidas del cobre en el bobinado y, en cierta medida, el PMSG presenta mejor tolerancia a fallas. Estas bondades de los bobinados concéntricos son ampliamente resaltados en otras referencias de la literatura especializada [9], [15], [16], [18]. En los resultados finales de la investigación se dice que la selección cuidadosa de la combinación de polos y ranuras con bobinados concéntricos puede ayudar a mantener valores reducidos los pares de engrane y de ondulación del generador.

W. A. M. Ghoneim *et al.* [9] presentó un estudio comparativo para analizar el impacto de tres tipos de bobinados en el desempeño de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 1 kW. Los bobinados considerados en dicho estudio fueron; a) bobinado distribuido de paso largo, b) bobinado distribuido de paso corto y c) un bobinado concéntrico de doble capa. Para los tres casos de estudio se utilizó un imán permanente de NdFeB (Neodimio Hierro Boro) de grado N42. Los resultados de la investigación se realizaron en software de elementos finitos y demostraron que el bobinado concéntrico de doble capa contribuye a mejorar la eficiencia del PMSG, además, es más compacto y tiene la longitud más corta de fin de bobinado al igual que la longitud de vuelta promedio. Los resultados de calidad de energía muestran que con el bobinado concentrado de doble capa se genera la menor distorsión armónica total (THD), sin embargo, las gráficas de las señales de voltajes y corrientes mostradas tienen una distorsión armónica muy superior a lo que indican las normas internacionales [19], [20], [21] lo cual, es un indicativo de que no se está comparando los bobinados sobre la base de un diseño PMSG optimizado. En el estudio presentado por Ghoneim *et al.* también se muestra que factor de bobinado impacta directamente en el voltaje en terminales de la máquina. En este sentido, el bobinado concéntrico con doble capa fue el que presentó mayor factor de bobinado y por lo tanto, tuvo el mayor voltaje inducido en terminales del generador.

S. Jia *et al.* [10] presenta una comparación del rendimiento de un generador síncrono de imanes permanentes de accionamiento directo (DDPMSG), con tres tipos de bobinado: a) bobinado de ranura integral (ISDW), b) bobinado concentrado de ranura fraccional (FSCW) y c) bobinado distribuido de ranura fraccional (FSDW). Se analizan los efectos de los tipos de bobinado con respecto al rendimiento de la máquina. Los resultados obtenidos muestran, que para los ISDW presenta el par más alto cuando el factor de potencia y el par de ondulación el par se ajustan al mismo valor. Además, presentan las pérdidas de rotor más bajas y el aumento de temperatura más bajo. Para los FSCW presenta un bajo factor de potencia y las pérdidas son relativamente altas en el rotor, lo que puede reducir el par y la eficiencia de salida y aumentar la temperatura. Los FSDW muestran la característica similar del par de ondulación bajo con los FSCW y el bobinado de extremo superpuesto similar a los ISDW. Además, los valores del factor de potencia, la distribución de pérdidas y el aumento de temperatura, se encuentran entre los valores reportados por ISDW y FSCW. Los resultados de la investigación presentan una comparación de las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de bobinados. Adicionalmente las máquinas con diferentes parámetros o diferentes aplicaciones pueden mostrar un rendimiento similar dependiendo de los parámetros de dicha máquina.

A. M. El-Refaie and M. R. Shah [11] presentan el análisis del rendimiento de una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM) con bobinados concentrados de ranura fraccional en cuatro diseños. El primer diseño se presenta con un bobinado de doble capa con $N_{spp}=5/6$. La segunda máquina tiene un bobinado con $N_{spp}=1/2$ de doble capa. La tercera máquina tiene un bobinado con $N_{spp}=2/5$ de doble capa. Por último, la cuarta máquina tiene un bobinado con $N_{spp}=2/5$ de una sola capa. Se realizan dos tipos de análisis el primero es un análisis armónico de elementos finitos en el tiempo y el segundo tipo es un análisis de elementos finitos transitorio paso a paso. Los resultados obtenidos del análisis muestran que la segunda máquina resulto ser mejor en términos de producción de torque, además de una reducción significativa y simplificación de los giros finales y con un menor número de bobinados, en el tercer y cuarto diseño de $2/5 N_{spp}$ los resultados transitorios de la simulación, toman en cuenta simultáneamente los efectos de todos los armónicos espaciales y la saturación magnética mostrados tendencias no deseables para la producción del torque. Se concluye en que los FSCW tienden a tener una mayor torsión en comparación con los bobinados distribuidos como se muestra en [22], [18].

B. Vîrlan *et al.* [12] en este estudio se realizó el diseño de un generador con un alto número de polos para su construcción en un aerogenerador de baja velocidad de eje vertical. El generador propuesto es una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM) con bobinado de ranura fraccional de rotor externo. Los resultados analizados con software de elementos finitos de la fuerza electromotriz (FEM), incluyen la distribución del campo magnético, la distribución del flujo en el entrehierro, los voltajes y sus formas de onda. El voltaje de fase y los voltajes de línea tienen formas casi senoidales, que requieren ser mejorados. El par de engranaje presenta valores altos debido al posicionamiento asimétrico de los imanes en relación con los polos del estator. Adicionalmente, las pruebas físicas presentan las formas de onda de los voltajes donde se puede notar la influencia de la reacción del bobinado con el estator, la reacción de armadura es elevada para los armónicos 5° y 6° lo que provoca ruido y vibraciones durante su funcionamiento. En la investigación se concluye que el diseño representa una solución para aplicaciones en aerogeneradores de baja velocidad de accionamiento directo, la limitante es la necesidad de un inversor de potencia para administrar los grandes límites de la potencia generada.

A. Munteanu *et al.* [13] en esta investigación se presenta el rediseño de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 5 fases con bobinado distribuido, en uno con bobinado de ranura fraccional manteniendo la misma potencia y velocidad de operación de la máquina. Se utilizó el análisis de elementos finitos para estimar el comportamiento de ambas máquinas con diferentes condiciones de trabajo, la mitad del PMSG se modeló con bobinados distribuidos y, respectivamente una tercera parte del PMSG con bobinados concentrados de ranura fraccional. Los resultados mostrados demuestran que las formas de onda de densidad de flujo del espacio de aire son diferentes debido a la estructura y el número de polos. La distribución de líneas de flujo magnético en el caso del PMSG con bobinado distribuido presenta simetría para todos los polos de la máquina para el yugo del estator, yugo del rotor y dientes, y por lo tanto una mejor distribución de la densidad de flujo magnético. La distribución del flujo magnético muestra valores bajos en el yugo del estator y del rotor, también para los dientes del estator en el caso del PMSG con ranura fraccional. Adicionalmente el contenido de armónicos de la densidad de flujo muestra que el valor fundamental es mayor en el caso del PMSG con bobinados concentrados de ranura fraccional, el PMSG con ranura fraccional presenta valores bajos con respecto a los

armónicos de alto orden, lo que implica un funcionamiento sin vibraciones ni ruidos adicionales. La investigación finaliza con que la estructura del PMSG de ranura fraccionaria puede ser empleada para aumentar la densidad de potencia, sin alterar los rendimientos de la máquina, adicionalmente se requieren de más estudios para evaluar las pérdidas de hierro producidas debido a la mayor frecuencia de trabajo.

1.2. Planteamiento del problema

Una turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento, en energía mecánica. Dentro de los componentes principales de un aerogenerador, los generadores síncronos y asíncronos juegan un papel importante puesto que ellos transforman la energía mecánica en energía eléctrica.

La energía eléctrica y su calidad, es un tema dentro de la industria eléctrica, que implica a los productores a cumplir normativas que ayuden a regular el sistema eléctrico de potencia. La integración de la generación eólica al sistema eléctrico provoca un impacto, afectando, entre otros, la calidad de energía del mismo. Es importante mencionar que algunos de los aspectos que afectan la calidad de energía presentes en los sistemas eléctricos son: sobrevoltajes, muescas de voltaje, armónicas, interarmónicas, impulsos, oscilaciones, flickers, y variación de frecuencia. Estos se presentan debido a la fluctuación del viento, al convertidor electrónico de potencia y los diferentes tipos de generadores que se utilizan en los aerogeneradores [14].

El bobinado de armadura es un elemento esencial en un PMSG y de cualquier máquina eléctrica rotatoria. En dicho bobinado se induce el voltaje necesario para suministrar la potencia eléctrica a la red eléctrica a través de un convertidor electrónico de potencia. El tipo de arreglo de bobinado puede influenciar significativamente la forma de onda del voltaje inducido y de esta manera, afectar el desempeño del generador eléctrico [15].

Actualmente, existen muchos tipos de bobinados en las máquinas eléctricas, pero existen pocos estudios acerca de cómo impacta el tipo de bobinado en el desempeño del PMSG. Partiendo de este punto se requiere contar con una herramienta de software de código abierto para hacer el cálculo universal de los bobinados de los PMSG's. La finalidad de realizar este estudio consiste, inicialmente, en determinar si una configuración de ranuras y polos del PMSG es viable para una determinada configuración de bobinado. Posteriormente, si la configuración es viable, se optimiza la distribución del bobinado para mitigar los efectos adversos de la distorsión armónica.

El arreglo de bobinados en un generador eléctrico influye en el desempeño del mismo y por tanto en la calidad de la energía que genera, por lo que resulta importante estudiar su perfeccionamiento, por ello evaluar la distribución de bobinados en un PMSG se convierte en el objeto principal de esta investigación. Cuando se optimiza la distribución del bobinado, el PMSG es más fiable en su desempeño resultando en; una baja distorsión armónica, un bajo par de engrane, un torque de ondulación bajo y una mayor eficiencia. Esta investigación tiene como propósito responder ¿Cuál es la distribución de los bobinados en un generador PMSG, que permita obtener el menor impacto en la calidad de la energía producida en un aerogenerador de pequeña potencia?

1.3. Objetivo general

Obtener la distribución óptima de los bobinados en un generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial (RF-PMSG, por sus siglas en inglés), para analizar, la distorsión armónica de las señales de voltaje y corriente, el par de engrane, el par de ondulación, las pérdidas totales y la eficiencia en un aerogenerador de 10 kW.

1.3.1. Objetivos específicos

- Realizar revisión del estado del arte de todos los tipos de bobinados usados en los PMSG's de turbinas eólicas.
- Desarrollar una herramienta universal para calcular la distribución de los bobinados, e incorporarla a la herramienta de diseño analítico flexible de RF-PMSG.
- Realizar simulaciones de elementos finitos para evaluar el desempeño del RF-PMSG.
- Realizar simulaciones con diferentes tipos de bobinados propuestos y analizar la distorsión armónica, el par de engrane, el par de ondulación, las pérdidas del cobre y la eficiencia del RF-PMSG.
- Realizar un estudio comparativo entre los diferentes tipos de bobinados, para evaluar el que ofrezca mejores características de desempeño del RF-PMSG.

1.4. Justificación

Los PMSG's tienen la ventaja de que con el uso de múltiples polos pueden operar a baja velocidad y de esta manera, pueden acoplarse directamente al rotor eólico. Adicionalmente proporcionan ventajas significativas en términos de eficiencia con respecto a las máquinas síncronas excitadas eléctricamente. Esto se debe, principalmente a que se eliminan las pérdidas del cobre en el rotor o debidas al efecto Joule, dado que los bobinados de campo del generador son remplazados por el conjunto de imanes permanentes.

En el diseño y fabricación de los PMSG's de baja potencia es imprescindible contar con una herramienta de software de código abierto, que permita obtener el diseño óptimo de los bobinados del estator con la finalidad de mejorar el desempeño del generador ante condiciones normales de operación. Se debe tener en cuenta que el diseño de cualquier bobinado de armadura puede influir significativamente en la forma de onda de la fuerza contraelectromotriz y por lo tanto, dicha distorsión armónica puede afectar el desempeño del generador eléctrico.

El desarrollo de una herramienta de diseño óptimo de bobinados en los PMSG's es fundamental para determinar, por medio del factor de bobinado, si una determinada combinación de ranuras y polos es adecuada para el diseño de dicho generador. Por tanto, la aportación de este trabajo de investigación es tener una herramienta de software para el cálculo de bobinados donde se obtenga la distribución adecuada para minimizar costos de fabricación, reduciendo la masa del cobre, y aumentando la eficiencia de la máquina (reduciendo las pérdidas del cobre) sin recurrir a herramientas de software sofisticadas como el análisis de elementos finitos (FEA). Esto constituye el fundamento para llevar a cabo pruebas del prototipo del generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial de 10 kW, fabricado en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

1.5. Hipótesis

Si se obtiene la distribución de bobinados en los generadores síncronos de imanes permanentes de flujo radial, mediante un criterio de mejoramiento, es posible minimizar las pérdidas de los bobinados, los costos de manufactura, la distorsión armónica de las señales de voltaje y corriente, con dicha corrección se incrementa la eficiencia global de la máquina.

1.6. Alcances y limitaciones

El presente proyecto de tesis tiene como alcance desarrollar y validar una herramienta de software de código abierto para obtener la distribución de cualquier tipo de bobinado tanto en máquinas eléctricas convencionales, así como no convencionales, estas últimas para aplicaciones de energía eólica a velocidad variable, basado en un RF-PMSG de 10 kW. Mejorando la forma de onda senoidal inducida por el bobinado y mitigando la distorsión armónica total de las señales de voltaje y corriente. Adicionalmente, se contempla el ensamblaje y pruebas experimentales del RF-PMSG de 10 kW, fabricado en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

La limitación del trabajo y a causa de la contingencia sanitaria provocada por el coronavirus COVID-19, se cancelaron las pruebas experimentales del RF-PMSG de 10 kW, quedando en simulaciones con FEA.

1.7. Estructura de la tesis

El presente proyecto de tesis estará constituido por 5 capítulos que describen los fundamentos teóricos y resultados de simulaciones del desarrollo del software de diseño de bobinados del RF-PMSG para su aplicación en turbinas eólicas de baja potencia, los cuales se abordarán de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se abordarán los temas relacionados al estado del arte, se muestran los objetivos y el marco teórico de los conceptos básicos que competen al tema a desarrollar.

En el Capítulo 2 se desarrolla la metodología para obtener la distribución de los bobinados en Matlab[®]. El algoritmo será capaz de evaluar bobinados de una y dos capas, dependiendo del conjunto de polos y ranuras propuesto, los bobinados podrán ser de ranura integral, concentrado de ranura fraccional y distribuido de ranura fraccional.

En el Capítulo 3 se hace una evaluación exhaustiva del desempeño de la máquina para diferentes tipos de bobinados. Dicho estudio se lleva a cabo con análisis de elementos finitos en 2D y se avalúa la distorsión armónica de las señales de voltaje y corriente, se analizan los pares de ondulación y de engrane así como las pérdidas por el efecto Joule, las pérdidas del núcleo y la eficiencia total de la máquina para el amplio rango de las condiciones de operación.

En el Capítulo 4 se presentará un estudio comparativo del RF-PMSG para análisis de elementos finitos en 2D y 3D, para analizar de manera detallada el rendimiento de los tipos de bobinados en el RF-PMSG. Adicionalmente, se analizará el rendimiento general.

En el Capítulo 5 se presentarán las conclusiones generales, las principales aportaciones de la tesis y por último, los trabajos futuros.

1.8. Marco teórico

Se presenta los fundamentos teóricos del generador eléctrico empleado en aerogeneradores de baja potencia, sus componentes, características, clasificación y funcionamiento.

1.8.1. Generador eléctrico

El generador eléctrico es una máquina que se utilizan para convertir energía mecánica en energía eléctrica, además es considerado el elemento central del sistema eléctrico de un aerogenerador y el componente a partir del cual se dimensionan los elementos restantes [1].

1.8.1.1. Generador síncrono

Una máquina síncrona se caracteriza por tener una velocidad de rotación vinculada con la frecuencia de red con la que trabaja, el generador está formado por dos bobinados que son independientes entre sí (ver Figura 1.1):

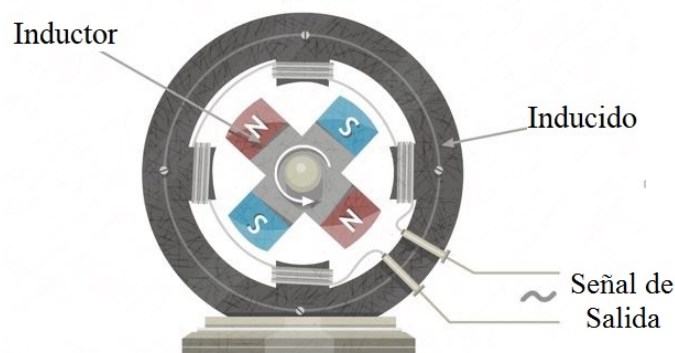


Figura 1.1: Generador síncrono.

Bobinado inductor: se encuentra en el rotor y se distribuye en ranuras formando los polos del generador recorrido por corriente directa (CD).

Bobinado inducido: se encuentra en el estator y se distribuye formando un bobinado que va recorrido por corriente alterna (CA).

El funcionamiento del generador emplea una fuerza externa que provoca el movimiento del rotor, el cual tiene acoplado una fuente independiente de CD, generando de esa manera un flujo constante. Como la fuente se encuentra acoplada al rotor, este flujo crea un campo magnético giratorio debido al movimiento de dicho rotor, dando lugar a un sistema trifásico de fuerzas en el bobinado inductivo [17].

1.8.1.2. Generador síncrono de rotor bobinado

Estos generadores se caracterizan por la necesidad de alimentar el bobinado inductor con una corriente continua, este bobinado esta situado en el rotor y es accesible mediante anillos rozantes y escobillas, los cuales requieren un frecuente mantenimiento [14].

Existen tres configuraciones de este generador (ver Figura 1.2); generador síncrono excitado por convertidor de potencia donde el bobinado del rotor es excitado con corriente continua a través de un convertidor de potencia. El generador síncrono empleando dos convertidores de potencia donde el bobinado es excitado con corriente continua rectificada desde el convertidor de potencia. El generador síncrono de múltiples polos con rotor bobinado donde no se emplea el uso de la caja multiplicadora y utiliza un generador síncrono de múltiples polos.

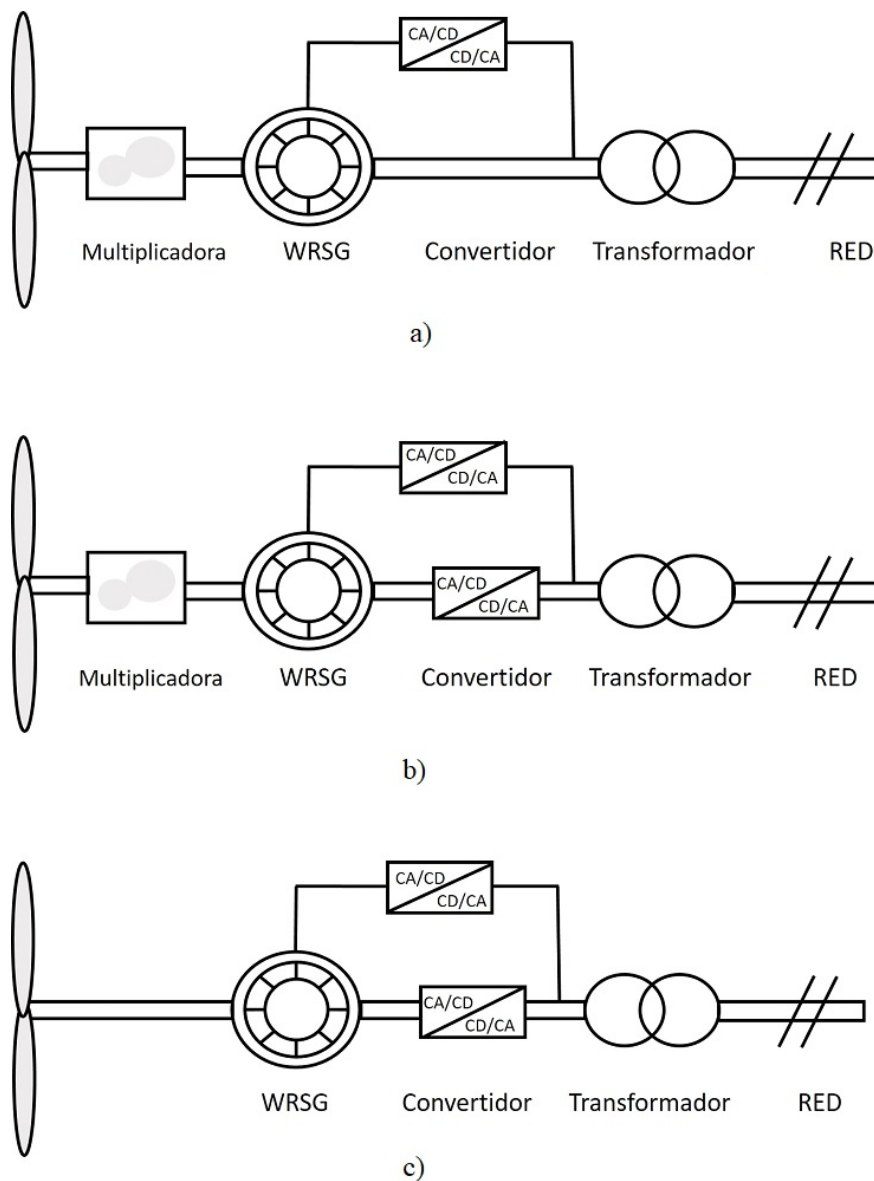


Figura 1.2: Generador síncrono de rotor bobinado; a) empleando un convertidor de potencia, b) empleando dos convertidores de potencia y c) empleando múltiples polos sin caja multiplicadora.

1.8.1.3. Generador síncrono de imanes permanentes

Un PMSG es un generador síncrono en el que el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, es reemplazada por un sistema formado de imanes permanentes que proporcionan un campo de excitación constante, en esta configuración la entrada del sistema es directamente acoplada al rotor del aerogenerador (ver Figura 1.3), es decir preside de la caja multiplicadora, lo que conlleva un menor mantenimiento [1].

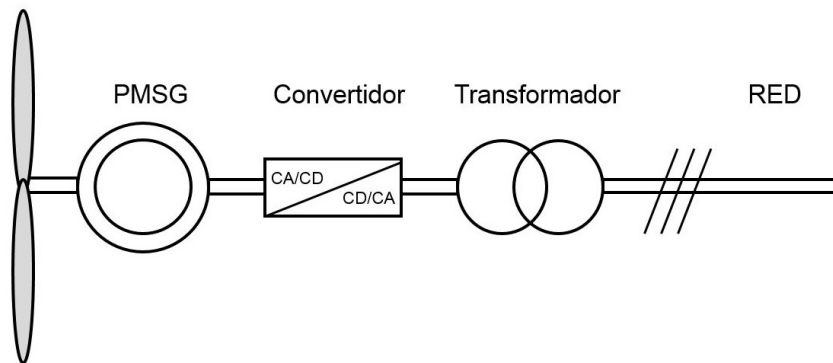


Figura 1.3: Configuración de generador síncrono de imanes permanentes.

La clasificación principal de las topologías de los PMSG's para aplicaciones de aerogeneradores de acoplamiento directo son; generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial (RF-PMSG), axial (AF-PMSG) y transversal (TF-PMSG). Esta denominación responde a la distribución de los imanes en el generador y la trayectoria del flujo magnético, como se observa en la Figura 1.4.

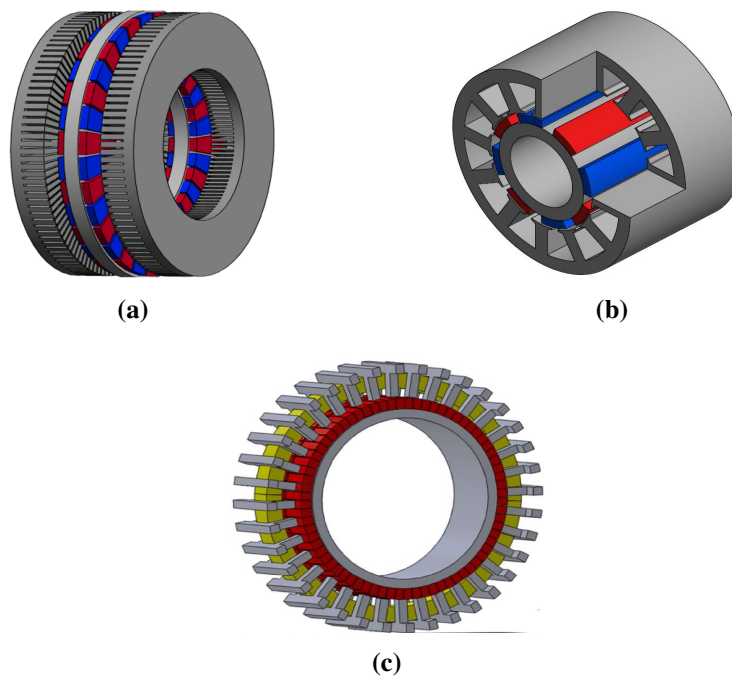


Figura 1.4: Configuración de las topologías de PMSG's; a) flujo axial, b) flujo radial y c) flujo transversal.

1.8.1.4. Generador síncrono de imanes permanentes de flujo radial (RF-PMSG's)

Las máquinas de flujo radial son las más convencionales de los diferentes tipos de máquinas de imanes permanentes que existen, se trata de un generador que tiene flujo radial en el entrehierro y flujo longitudinal en el estator. Mecánicamente tiene un funcionamiento parecido a la máquina síncrona, donde los bobinados del estator están dispuestos de la misma manera y el rotor está dispuesto por los imanes [2], [14], [25]. La topología de un generador de flujo radial se presenta en la Figura 1.5.

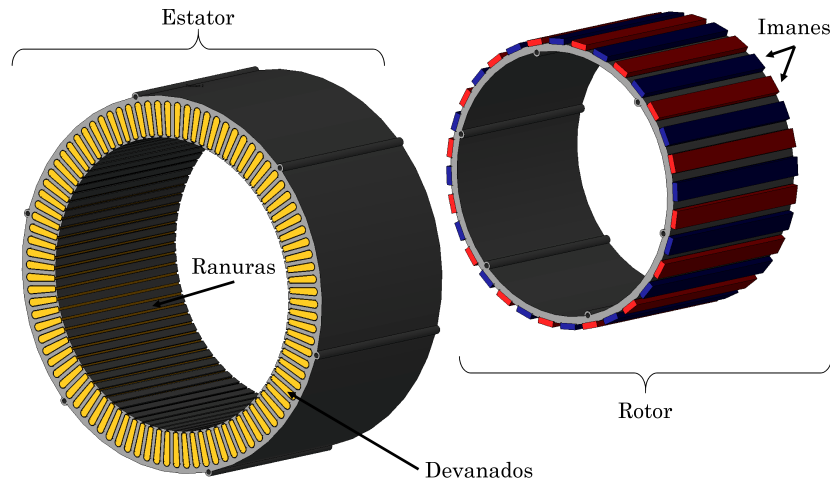


Figura 1.5: Topología PMSG de flujo radial.

El rotor del generador está compuesto por el yugo, que es un cilindro hueco sobre el que van sujetos los imanes. El yugo del rotor está hecho de láminas de hierro con silicio donde la disposición de los imanes se coloca longitudinalmente en la superficie exterior del rotor, por lo que suministra un campo de excitación constante.

Los imanes permanentes son materiales que, después de ser magnetizados por un campo magnético alto, mantienen su alta magnetización aún con cambios de temperatura o con la presencia de campos magnéticos externos. A lo largo de la historia los imanes permanentes han sido encontrados en forma natural, tal como la magnetita, o han sido producidos por el hombre, tales como los alnicos, las ferritas y las tierras raras [23], [24].

El estator está compuesto por el yugo, los dientes, ranuras, y el bobinado que va a llevar la corriente inducida al convertidor, para después llevarla a la red.

El yugo del estator, al igual que el del rotor, es un cilindro de hierro con silicio, necesario para que circule el flujo magnético y en el cual se aloja un bobinado trifásico a lo largo de su periferia, con una configuración tal que los conductores que ocupan posiciones homólogas en cada una de las fases están desfasados 120° eléctricos [25].

El bobinado, es el conjunto de espiras conectadas unas con otras y a los bornes de la máquina, el bobinado de una máquina está compuesto por un conjunto de bobinas por fase. Cada bobinado está compuesto por un cierto número de vueltas, los lados del bobinado van alojados en las ranuras del estator. Cada fase se forma conectando en serie cierto número de bobinas. La forma de conectarlas depende del número de polos que se desee y del tipo de bobinado.

Los bobinados se pueden clasificar de acuerdo al parámetro del número de ranuras por polo fase (N_{spp} , por sus siglas en inglés). El N_{spp} determina cómo se organiza el diseño del bobinado en los siguientes tipos:

- Si el N_{spp} es un entero, el bobinado se denomina bobinado de ranura entera (ISDW). Es generalmente conocido como bobinado distribuido traslapado. Un rasgo conocido de los bobinados de ranura entera es que tienen un patrón simétrico y naturalmente ordenado, los bobinados se dividen en grupos y cada grupo generalmente está relacionado con un polo.
- Si el N_{spp} es fraccional y superior a 1, el bobinado se denomina bobinado de ranura fraccional (FSDW). La construcción de un bobinado de ranura fraccional requiere del desarrollo de métodos para encontrar la distribución adecuada para todas las combinaciones polo/ranura.
- Si el N_{spp} es fraccional e inferior a 1, el bobinado se denomina bobinado concentrado (FSCW). La principal desventaja de los bobinados concentrados es que tienen factores de bobinados bajos cuando se comparan con los bobinados distribuidos.

Una segunda forma de clasificar los bobinados del estator es por el número de capas. En un diseño de bobinado de una sola capa, cada ranura contiene un lado de un bobinado, mientras que en el de dos capas se sitúan dos lados del bobinado por ranura; en este último caso, un lado del bobinado está colocado en la parte superior de una ranura y el otro lado se sitúa en la parte inferior de la otra, como se observa en la Figura 1.6.

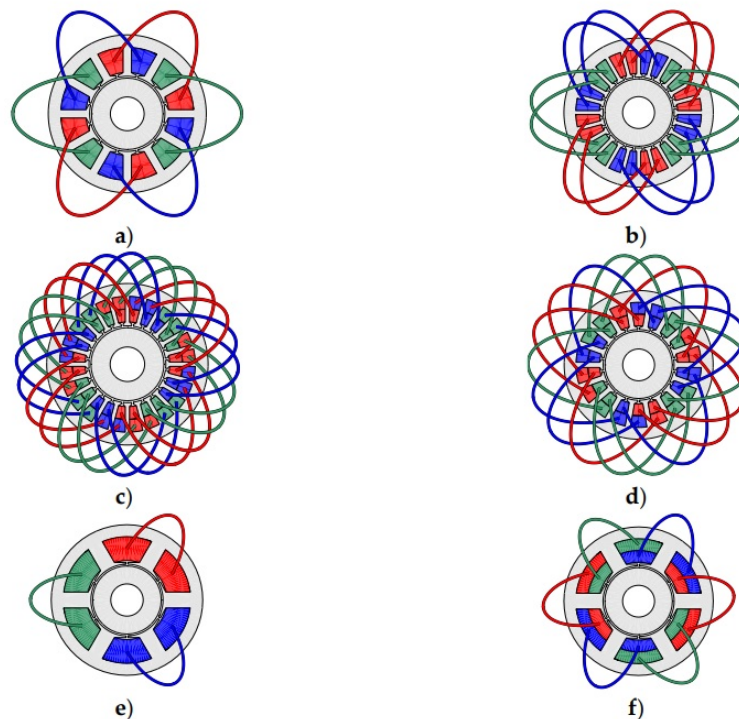


Figura 1.6: Configuración de bobinados; a,b) ISDW de 1 capa, c) ISDW de 2 capas, d) FSDW de 2 capas, e) FSCW de 1 capa y f) FSCW de 2 capas.

1.8.2. Calidad de energía

La calidad de energía es un tema dentro de la industria eléctrica, que implica a los productores, consumidores y fabricantes de equipos, a cumplir normativas que ayuden a regular el sistema eléctrico de potencia. Las normas mundiales que abordan esta temática son; IEEE-519, IEC-61000, EN-50160 [19], [20], [21], [26].

Las normas clasifican diversos fenómenos electromagnéticos presentes en los sistemas eléctricos de potencia, que definen los problemas de la calidad de energía como: sobre voltajes, muescas de voltaje, interrupciones, armónicas, interarmónicas, impulsos, oscilaciones, caídas, micro-cortes, ruido, flickers, y variaciones de frecuencia. En la interconexión de los parques eólicos al suministro de energía eléctrica, los aspectos de la calidad de la energía más significativos son: variación de la frecuencia, variación de voltaje y distorsión armónica [27], [28], [29].

Los problemas de la calidad de la energía depende de la interacción entre la red eléctrica y los parques eólicos debido a la fluctuación del viento y los diferentes tipos de generadores que se utilizan. Así mismo, los parques eólicos interconectados a la red eléctrica no solo afectan la calidad de la energía de la misma, si no que también afecta la calidad de la energía del mismo parque eólico.

Existen diversos disturbios en la calidad de la energía, sin embargo, los disturbios que juegan un papel crucial en un sistema energético interconectado a la red son: variaciones de voltaje, variaciones de corriente, variaciones de frecuencia y armónicas [29].

Variaciones de voltaje: Los problemas comunes de los voltajes tienen que ver con sus magnitudes. La variación de voltaje ocurre en muchas formas y cada forma tiene la terminología apropiada. La variación de voltaje es una desviación del valor de voltaje nominal que puede ser por una duración muy corta (milisegundos a segundos) o una duración larga (más de un minuto).

Variaciones de frecuencia: La variación de la frecuencia es una desviación de la frecuencia del sistema de energía respecto del valor nominal estándar aceptable.

Armónicos: Los armónicos son múltiplos integrales del voltaje de CA y corriente de la frecuencia fundamental, cuando los armónicos y la frecuencia fundamental se suman, se produce una forma de onda distorsionada provocada solamente los armónicos impares (3, 5 y 7). Los armónicos distorsionan la forma de onda de corriente y voltaje de la fuente.

1.9. Diseño de investigación

Esta investigación busca optimizar la distribución de los bobinados de un RF-PMSG para analizar la distorsión armónica, el par de engrane, el par de ondulación, las pérdidas y la eficiencia entregada por el generador, en este sentido la investigación presenta la posibilidad de controlar las variables de entrada y utilizarlas en diferentes combinaciones.

Con respecto a la Tabla 1.1, se toman los diferentes tipos de bobinados descritos en el apartado 1.8.1.4, clasificándose de acuerdo al parámetro del número de ranuras por polo fase N_{spp} .

Tabla 1.1: Operacionalización de la variable independiente.

Variable independiente	Distribución de bobinados		
	Dimensión	Indicador	Características
Es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por la corriente eléctrica	Bobinado	Número de polos	32
		Número de ranuras	92
			96
			99
			102
			105
			108
		192	
Número de fases	3		
Número de capas	1		
	2		

En la Tabla 1.2, los estándares IEEE-519, IEEE-1159, IEC-61000, EN-50160, clasifican a los diversos fenómenos presentes en los sistemas eléctricos de potencia, que precisan los problemas de calidad de energía descritos en el apartado 7.2. Adicionalmente se presentan el par de engrane y el par de ondulación presentes en las máquinas de imán permanente.

En la Tabla 1.3 se muestran las combinaciones posibles para el modelo de distribución de bobinados, en dependencia del número de polos, número de fases, número de capas y número de ranuras. En este sentido la elección y las variaciones dependen de la dimensión del bobinado que se desea analizar donde; A= Número de polos (32 Polos), B= Número de fases (3 fases), C= Número de capas (1 y 2 capas) y D= Número de ranuras (92, 96, 99, 102, 105, 108, 192 ranuras).

La combinación A1 (32 polos), B1 (3 fases), C1 (1 capa) y D1 (92 ranuras), presenta un bobinado de tipo concéntrico de ranura fraccionaria, el cual tiene características específicas como; distorsión armónica, par de engrane, par de ondulación y eficiencia entregada.

Tabla 1.2: Operacionalización de la variable dependiente.

Variable dependiente	Calidad de la energía		
Definición	Dimensión	Indicador	Instrumento
La calidad de suministro eléctrico es la normalización mediante reglas que fijan los niveles, parámetros básicos, forma de onda, armónicos, niveles de distorsión, etc.	Voltaje	Variación de las señales; voltaje, corriente, frecuencia, distorsión armónica. Normas; IEEE-519, IEC 61000-4-30, IEC 61400-21	Software
	Corriente		
	Frecuencia		
	Distorsión armónica		
Variable dependiente	Torque de vacío		
El torque de vacío es el producido por el eje cuando el rotor del PMSG gira con respecto al estator.	Geometría del generador	Variación del número de polos y el número ranuras, ancho del imán permanente, ancho de apertura de la ranura,	Software
Variable dependiente	Torque de ondulación		
El torque de ondulación en los PMSG's se debe a la interacción entre el campo magnético de los imanes permanentes y las ranuras del estator.	Geometría del generador	Variación del número de polos y el número de ranuras, (tipo de bobinado), ancho de apertura de la ranura, el ancho del imán	Software

Tabla 1.3: Tabla de registro de datos.

Bobinados				Combinación
Número de polos	Número de fases	Número de capas	Número de ranuras	
A1	B1	C1	D1	A1, B1, C1, D1
			D2	A1, B1, C1, D1
			D3	A1, B1, C1, D1
			D4	A1, B1, C1, D1
			D5	A1, B1, C1, D1
			D6	A1, B1, C1, D1
			D7	A1, B1, C1, D1
		C2	D1	A1, B1, C2, D1
			D2	A1, B1, C2, D1
			D3	A1, B1, C2, D1
			D4	A1, B1, C2, D1
			D5	A1, B1, C2, D1
			D6	A1, B1, C2, D1
			D7	A1, B1, C2, D1

Para el desarrollo de la herramienta de software que nos permita dimensionar los bobinados del RF-PMSG, en aplicaciones de aerogeneradores de baja potencia, se presentan los siguientes pasos a seguir:

I. Revisión bibliográfica del estado del arte. Se realizará una revisión exhaustiva sobre el estado del arte de los diferentes tipos de bobinados empleados en Generadores Síncrono de Imanes Permanentes.

II. Selección de los tipos de bobinados para el estudio del RF-PMSG. Dentro de la revisión bibliográfica, se analizarán y se compararán las diferentes configuraciones de bobinados seleccionándose los tipos más adecuados para la presente investigación.

III. Análisis de las condiciones de simetría para el diseño de bobinados del RF-PMSG seleccionado. Se profundizará en máquinas eléctricas y en la teoría de circuitos magnéticos, obteniéndose las expresiones matemáticas de la distribución de bobinado equivalentes del RF-PMSG, para el realizar el procedimiento de distribución.

IV. Realizar un algoritmo para el dimensionamiento de bobinados del RF-PMSG. Se desarrollará un algoritmo computacional en el software MATLAB®, con el objetivo de solucionar ecuaciones relacionadas a la dimensión particular del RF-PMSG, dicho procedimiento incluye el dimensionamiento y geometría del estator, además se calculan las propiedades físicas y geométricas de los bobinados.

V. Modelar y simular el RF-PMSG en software de Elementos Finitos. Se implementa y simula el modelo del PMSG con la finalidad de evaluar y verificar el desempeño del generador en condiciones de vacío y condiciones de carga. Los resultados obtenidos sirven para validar los resultados obtenidos del análisis del circuito equivalente de la máquina.

Se realizan simulaciones de todas las combinaciones posibles para evaluar parámetros como; distorsión armónica, par de engrane, par de ondulación, pérdidas y eficiencia entregada por el RF-PMSG. Se presentará un análisis comparativo sobre los tipos de bobinados modelados y se compararan los parámetros de la simulación con respecto a la normativa aplicable, en caso que exceda el rango aplicable se llevará a cabo un rediseño de bobinado.

VI. Comparativa sobre tipos de bobinados y su impacto en la calidad de la energía. La finalidad de realizar este estudio consiste en determinar si una configuración de ranuras y polos del RF-PMSG es viable para una determinada configuración de bobinado. El arreglo de bobinados influye en el desempeño del RF-PMSG y por tanto en la calidad de energía que genera. Cuanto más se optimiza el bobinado el desempeño del RF-PMSG resulta en una baja distorsión armónica, bajo par de engrane, bajo torque de ondulación y mayor eficiencia.