



UNIVERSIDAD DEL ISTMO
CAMPUS TEHUANTEPEC

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ENERGÍA
EÓLICA

DISEÑO DE UN GENERADOR
SÍNCRONO DE FLUJO AXIAL
PARA SU USO EN
AEROGENERADORES DE BAJA
POTENCIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA EÓLICA

PRESENTA:
ING. ROLANDO GÓMEZ TORRES

DIRECTOR:
DR. REYNALDO IRACHETA CORTEZ

CODIRECTOR:
DR. NORBERTO FLORES GUZMÁN

SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC, OAXACA. OCTUBRE 2019.

Resumen

Este proyecto de investigación tiene como finalidad el desarrollo de una herramienta para el diseño analítico de Generadores Síncronos de Imanes Permanentes de Flujo Axial (AF-PMSG, por sus siglas en inglés) para sus aplicaciones en el sector eólico. Para ello, se desarrolló el algoritmo de diseño haciendo uso de la plataforma de MATLAB[®] tomando como referencia una potencia de salida de 10 kW a 225 *rpm* del generador.

El dimensionado de la máquina se realizó a partir de la obtención del circuito magnético equivalente de la topología seleccionada de doble estator con rotor interno. Se obtuvieron los flujos magnéticos en el entrehierro y se dimensionó la geometría del rotor y estator. Además, se calcularon parámetros eléctricos como el número de conductores en serie y paralelo para alcanzar el voltaje de diseño deseado, la resistencia de fase de la máquina, la densidad de corriente máxima y las inductancias.

Con los resultados del algoritmo desarrollado, se realizaron múltiples variantes de diseños de AF-PMSG's donde, se evaluaron los parámetros de entrada y los resultados obtenidos. De igual manera se restringió el generador a fin de cumplir con los estándares establecidos para el diseño de máquinas eléctricas y se desarrollaron los modelos CAD mediante el uso del software SolidWORKS[®].

La validación del diseño realizado, se llevó a cabo mediante análisis de elemento finito (FEA, por sus siglas en inglés) implementando el software JMAG Designer[®] donde, se realizaron simulaciones 3D del generador en vacío, variando las *rpm* y la resistencia. Se obtuvieron las curvas características de rendimiento del generador y se compararon los resultados obtenidos de las simulaciones con los calculados a través del algoritmo de diseño desarrollado.

Finalmente, en el apartado de anexos de este trabajo de tesis, se proporcionan los planos de fabricación del AF-PMSG y se describen los procedimientos necesarios para realizar las simulaciones de elemento finito. Adicionalmente, en el apartado de anexos, se muestra y describe la herramienta iterativa de diseño desarrollada en LabVIEW[®] donde, es posible introducir variables y visualizar los resultados instantáneamente. Además, al ser de código abierto, también se pueden ingresar nuevos algoritmos a fin de mejorar dicha herramienta.

Agradecimientos

Ante todas las cosas, a Dios,

Índice general

Resumen	ii
Agradecimientos	iii
Índice de Figuras	vii
Índice de Tablas	xi
Lista de Acrónimos	xiii
1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Planteamiento del problema	4
1.4 Justificación	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo General	6
1.5.2 Objetivos Específicos	6
1.6 Alcances y limitaciones	7
1.7 Estructura de tesis	8
1.8 Marco Teórico	9
1.8.1 Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG)	9
1.8.2 Clasificación de PMSG	10
1.9 Metodología	14
2. Análisis del Circuito Magnético del AF-PMSG	16
2.1 Introducción	16
2.2 Imanes Permanentes	16
2.2.1 Ciclo de histéresis	17
2.2.2 Punto de operación de un imán permanente	19
2.3 Modelado del entrehierro	20
2.4 Modelado de ranura	22
2.5 Circuito equivalente del AF-PMSG	24
2.5.1 Análisis de las topologías AF-PMSG's	24
2.5.2 Análisis del circuito equivalente de la topología de diseño	25
2.6 Restricciones topológicas	28
2.7 Parámetros geométricos	29
2.7.1 Dimensionado de Imanes	29
2.7.2 Dimensionado de ranura	31

2.8	Parámetros magnéticos	32
2.9	Factores de corrección	34
2.10	Parámetros de diseño fijos	35
2.11	Resultados	36
2.12	Conclusiones	37
3.	Parámetros eléctricos	38
3.1	Introducción	38
3.2	Número de conductores en serie y paralelo	38
3.3	Cálculo de resistencias	39
3.4	Cálculo de corrientes	40
3.5	Cálculo de inductancia	41
3.5.1	Inductancias de fase	41
3.5.2	Inductancias de dispersión de la ranura	42
3.6	Cálculo de devanados	44
3.6.1	Número de simetrías del devanado	44
3.6.2	Selección del tipo de devanado	44
3.6.3	Distorsión Armónica Total (THD)	44
3.7	Cálculo de volúmenes y masas del AF-PMSG	45
3.8	Rendimiento del AF-PMSG	46
3.8.1	Pérdidas	46
3.8.2	Eficiencia (η)	48
3.8.3	Densidad de calor del AF-PMSG	48
3.8.4	Torque de tracción	49
3.8.5	Torque de ondulación	49
3.8.6	Momento de inercia	50
3.9	Diseño analítico en MATLAB [®] y LabVIEW [®]	51
3.10	Resultados	53
3.10.1	Resultados de parámetros eléctricos	53
3.10.2	Resultados de rendimiento	56
3.11	Conclusiones	60
4.	Análisis de Elemento Finito	62
4.1	Introducción	62
4.2	Descripción del software JMAG [®] 17.1	63
4.3	Consideraciones previas a las simulaciones	64
4.3.1	Componentes del AF-PMSG	64
4.3.2	Materiales a implementarse	65
4.4	Descripción del análisis	66
4.4.1	Dirección del flujo magnético de los imanes	67
4.4.2	Circuito eléctrico del AF-PMSG	67
4.5	Condiciones de estudio	69
4.5.1	Condición de frontera periódica del AF-PMSG	69
4.5.2	Condiciones de Rotación	71
4.5.3	Condiciones de Torque	72
4.5.4	Condiciones de Mallado	72
4.6	Selección de la fracción magnética (α_m) óptima	73
4.6.1	Requerimientos eléctricos necesarios para las simulaciones	75

4.6.2	Resultados de la variación de α_m	76
4.6.3	Conclusiones de la variación de α_m	78
4.7	Nuevos diseños de AF-PMSG para mejorar el torque	79
4.7.1	Parámetros de diseño	79
4.7.2	Resultados de diseños para disminución del torque	80
4.8	Diseño final del AF-PMSG	80
4.8.1	Distribución de devanados del diseño final del AF-PMSG	81
4.8.2	Densidad de flujo magnético del AF-PMSG	83
4.8.3	Estudio en vacío	85
4.8.4	Estudio a plena carga	87
4.8.5	Corriente	90
4.8.6	Rendimiento del AF-PMSG	90
4.9	Comparación de resultados del algoritmo de diseño con los simulados	95
4.10	Conclusiones	99
5.	Análisis de desempeño de un prototipo experimental de AF-PMSG	101
5.1	Introducción	101
5.2	Características del generador	102
5.2.1	Resultados experimentales	103
5.3	Condiciones de estudio	105
5.3.1	Circuito del AF-PMSG	105
5.3.2	Mallado	106
5.4	Pruebas en vacío para verificación del voltaje AF-PMSG	107
5.4.1	Voltaje	108
5.4.2	THD	108
5.4.3	Torque	109
5.5	Desempeño del prototipo de AF-PMSG del INTI	110
5.5.1	Análisis en vacío	111
5.5.2	Flujo magnético	114
5.5.3	Análisis con carga del prototipo experimental del AF-PMSG	115
5.6	Conclusiones	120
6.	Conclusiones	121
6.1	Conclusiones	121
6.2	Aportaciones	122
6.3	Trabajos futuros	123
A.	Tablas para la selección de imanes permanentes	1
B.	Resultados geométricos de diseños adicionales de AF-PMSG's	4
C.	Diseños 3D y planos del AF-PMSG desarrollados en SolidWORKS[®]	6
D.	Descripción de la herramienta de diseño del AF-PMSG en LabVIEW[®]	12
E.	Descripción del análisis de elemento finito realizado en JMAG Designer[®]	13
E.1	Importación y preparación de las condiciones iniciales de estudio	13
E.2	Creación del estudio	15
Bibliografía		17

Índice de Figuras

1.1	Clasificación de generadores eléctricos de Corriente Alterna.	9
1.2	Configuración de un aerogenerador basado en PMSG conectado a la red eléctrica.	10
1.3	Generador de flujo radial.	11
1.4	Despiece de un generador de Imanes Permanentes de Flujo Axial.	12
1.5	Topologías básicas de AF-PMSG.	13
1.6	Colocación de imanes en el rotor. a) Imanes sobre la superficie, b) imanes embebidos, c) arreglo Halbach.	14
2.1	Características de desmagnetización para imanes de alnico, cerámica y tierras raras.	17
2.2	Circuito magnético con dos devanados.	18
2.3	Ciclo de histéresis.	18
2.4	Desmagnetización típica y curvas de producto de energía de un imán permanente.	19
2.5	Flujo magnético en el entrehierro.	20
2.6	Modelos de reluctancia en el entrehierro.	21
2.7	Modelo de permeancia en línea recta de arco circular.	22
2.8	Estructura ranurada.	23
2.9	Comparación de Coeficientes de Carter.	24
2.10	Topologías de AF-PMSG's. a) Una cara, b) doble cara (rotor interno), c) doble cara (estator interno), c) multidisco.	25
2.11	AF-PMSG de doble estator con rotor interno. a) Componentes básicos generales, b) estructura básica.	26
2.12	Circuito magnético equivalente del generador AFIR-S.	27
2.13	Simplificación del circuito magnético del AF-PMSG. a) Tres ramas en paralelo y una en serie, b) dos reluctancias equivalentes.	27
2.14	Parámetros magnéticos. a) Geometría, b) espacio entre imanes.	31
2.15	Definiciones geométricas del AF-PMSG.	32
2.16	Geometría de ranura para la topología del AF-PMSG de doble estator.	33
3.1	Trayectoria de las primeras inductancias de dispersión de la ranura.	42
3.2	Inductancias de dispersión de las trayectorias 5, 6 y 7 (vista superior).	43
3.3	Inductancias de dispersión de las trayectorias 5, 6 y 7 (vista frontal).	43
3.4	Diagrama de diseño del AF-PMSG.	52
3.5	Entorno gráfico para el diseño del AF-PMSG en LabVIEW®.	52
3.6	Perfil de voltaje del AF-PMSG en vacío y variando la carga a diferentes <i>rpm</i>	54

3.7	Mapa de regulación de voltaje del AF-PMSG.	55
3.8	Masas del AF-PMSG.	57
3.9	Pérdidas del AF-PMSG.	57
3.10	Pérdidas en el núcleo del AF-PMSG.	58
3.11	Pérdidas del conductor del AF-PMSG.	58
3.12	Diagrama de diseño del AF-PMSG.	59
3.13	Mapa de eficiencia del AF-PMSG.	60
4.1	Entorno de JMAG [®] 17.1.	63
4.2	Componentes del AF-PMSG a) vista lateral, b) vista frontal.	65
4.3	Selección de primeras caras de condición de frontera periódica.	67
4.4	Circuito general en estrella.	68
4.5	Circuitos del AF-PMSG. a) Circuito para pruebas en vacío, b) circuito para pruebas con carga.	69
4.6	Selección de primeras caras de condición de frontera periódica.	70
4.7	Corroboración de puntos de identificación de caras con el ángulo asignado.	70
4.8	Copia de la fracción del AF-PMSG analizado a partir del ángulo de rotación asignado.	71
4.9	Asignación de condición de rotación al AF-PMSG en JMAG Designer [®]	72
4.10	Condición de torque del AF-PMSG.	73
4.11	Mallado del AF-PMSG para pruebas de voltaje y THD. a) vista lateral, b) vista superior.	74
4.12	Distribución de devanados con EMETOR [®] para la selección de la α_m óptima.	76
4.13	Voltaje en vacío del generador 1.	77
4.14	Distorsión Armónica Total variando la fracción magnética α_m del AF-PMSG.	78
4.15	Distribución de devanados del diseño final del AF-PMSG con EMETOR [®]	82
4.16	Distribución de devanados del diseño final del AF-PMSG con JMAG Express [®]	82
4.17	Densidad de flujo magnético en el AF-PMSG.	83
4.18	Densidad de flujo magnético en el núcleo del estator.	84
4.19	Densidad de flujo magnético en el núcleo del rotor.	84
4.20	Densidad de flujo magnético en el diente del estator.	85
4.21	Voltaje en vacío del diseño final de AF-PMSG.	86
4.22	THD en vacío del diseño final de AF-PMSG.	86
4.23	Torque de tracción del diseño final de AF-PMSG.	87
4.24	Voltajes en vacío, obtenido con JMAG Designer [®] a 225 rpm.	88
4.25	THD del diseño final de AF-PMSG.	89
4.26	Torque de ondulación del diseño final de AF-PMSG.	90
4.27	Corriente del diseño final de AF-PMSG.	90
4.28	Curva de regulación de voltaje del AF-PMSG para el más amplio rango de carga a 225 rpm.	91
4.29	Densidad de corriente máxima del diseño final de AF-PMSG.	92
4.30	Densidad de corriente del diseño máxima final de AF-PMSG (vista lateral).	93
4.31	Densidad de corriente <i>rms</i> del diseño final de AF-PMSG.	93

4.32	Curva de potencia y eficiencia del AF-PMSG a 225 rpm variando la carga.	94
4.33	Potencia de salida del AF-PMSG a plena carga.	95
4.34	Errores del voltaje del AF-PMSG de los resultados calculados y simulados variando las rpm.	97
4.35	Errores de la Regulación de Voltaje del AF-PMSG de los resultados calculados y simulados variando la carga.	98
4.36	Errores de la eficiencia del AF-PMSG de los resultados calculados y simulados variando la carga.	99
5.1	Prototipo experimental de AF-PMSG.	101
5.2	Modelo 3D de prototipo experimental de AF-PMSG. a) Vista frontal, b) vista lateral.	102
5.3	Componentes del prototipo experimental de AF-PMSG. a) Rotor, b) estator.	103
5.4	Circuito en estrella del prototipo experimental de AF-PMSG.	104
5.5	Circuitos del prototipo experimental de AF-PMSG. a) Circuito para simulaciones en vacío, b) circuito para simulaciones con carga.	105
5.6	Mallado del AF-PMSG para las simulaciones de elemento finito. a) Vista superior, b) vista lateral.	106
5.7	Mallado de las regiones de aire del AF-PMSG. a) Mallado de estator, b) mallado de los rotores, c) mallado de ambas regiones de aire.	107
5.8	Señales de voltaje medidas en pruebas experimentales y calculadas mediante simulaciones del prototipo experimental de AF-PMSG. a) Señales de 114.6 rpm a 163.6 rpm, b) señales de 170 rpm a 253.1 rpm.	109
5.9	Distorsión armónica individual en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG.	110
5.10	Torque en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG.	110
5.11	Voltaje en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	111
5.12	Distorsión armónica en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	112
5.13	Torque de tracción en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	113
5.14	Densidad de del flujo magnético del prototipo experimental de AF-PMSG.	114
5.15	Voltaje en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	115
5.16	THD bajo carga del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	116
5.17	Torque de rizado del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	117
5.18	Torque de rizado del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	118
5.19	Torque de rizado del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	118
5.20	Potencia de salida del prototipo experimental de AF-PMSG a 300 rpm.	119
C.1	Diseño 3D del AF-PMSG	6
C.2	Plano del Estator	7
C.3	Plano del disco del rotor	8
C.4	Plano de los imanes	9
C.5	Plano del ensamblaje del rotor	10
C.6	Plano del ensamblaje del generador	11
E.1	Centrado del diseño 3D a) Selección de centrado, b) tipo de centrado.	14
E.2	Selección del tipo set	15

E.3	Creación del tipo de estudio que se dese realizar	15
E.4	Selección de las propiedades de estudio	16
E.5	Modificación de las propiedades de estudio	16

Índice de Tablas

2.1	Parámetros fijos para el diseño del AF-PMSG.	35
2.2	Resultados de parámetros topológicos, geometría y dimensionado de imanes del AF-PMSG.	37
3.1	THD para el Punto de Común Acoplamiento.	45
3.2	Resultados de parámetros topológicos, geometría y dimensionado de imanes del AF-PMSG.	53
3.3	Rendimiento de los AF-PMSG's analizados.	56
3.4	Pérdidas y rendimiento del AF-PMSG.	56
4.1	Componentes del AF-PMSG.	65
4.2	Materiales del AF-PMSG.	66
4.3	Tamaño de mallado asignado a cada componente del AF-PMSG.	73
4.4	Variación de la α_m en función de τ_f	74
4.5	Parámetros eléctricos para las simulaciones de cada diseño del AF-PMSG.	75
4.6	Voltajes en vacío del AF-PMSG variando la fracción magnética.	76
4.7	Voltajes en vacío del AF-PMSG variando la fracción magnética.	77
4.8	THD para devanados de una capa.	77
4.9	Parámetros de diseño de generadores para disminuir el torque.	79
4.10	Torque en vacío de pruebas de desempeño del AF-PMSG.	80
4.11	Especificaciones del diseño final de AF-PMSG.	81
4.12	Valores de voltajes en vacío del diseño final del AF-PMSG a 225 rpm.	85
4.13	Valores de T_{cog} en vacío a 225 rpm del diseño final del AF-PMSG.	87
4.14	Parámetros del circuito eléctrico del AF-PMSG bajo condiciones de carga.	88
4.15	Valores de T_{rzi} del diseño final del AF-PMSG a plena carga y 225 rpm.	89
4.16	Voltajes de línea a línea del diseño final del AF-PMSG al variar la carga.	91
4.17	Rendimiento del AF-PMSG ante condiciones de carga variable a 225 rpm.	94
4.18	Voltajes en vacío variando las rpm de 50 a 400.	96
4.19	Errores en vacío variando las rpm de 50 a 400.	96
4.20	Voltajes en vacío variando de 50 a 400 rpm.	97
4.21	Voltajes en vacío variando de 50 a 400 rpm.	98
4.22	Comparación de resultados de la eficiencia del AF-PMSG.	99
5.1	Voltajes obtenidos de las pruebas experimentales.	103
5.2	Voltajes obtenidos de las pruebas experimentales.	103
5.3	Voltajes obtenidos de las pruebas experimentales.	104
5.4	Dimensiones de mallado asignado a cada componente del AF-PMSG.	106
5.5	Voltajes de pruebas y de simulaciones en vacío del prototipo experimental de AF-PMSG.	108

5.6	Valores de torque a 288.4 <i>rpm</i> del prototipo experimental de AF-PMSG. . .	110
5.7	Voltajes obtenidos en vacío de pruebas de desempeño del AF-PMSG. . .	111
5.8	Distorsión Armónica Total en vacío de pruebas de desempeño del AF-PMSG.	112
5.9	Torque en vacío de pruebas de desempeño del AF-PMSG.	113
5.10	Voltajes obtenidos en carga de pruebas de desempeño del AF-PMSG. . .	114
5.11	Densidad de flujo magnético máxima del prototipo experimental del AF-PMSG.	114
5.12	Voltajes obtenidos en carga de pruebas de desempeño del AF-PMSG. . .	115
5.13	Distorsión armónica total en vacío de pruebas de desempeño del AF-PMSG.	116
5.14	Torque con carga de pruebas de desempeño del AF-PMSG.	117
5.15	Rendimiento del prototipo de diseño de AF-PMSG.	119
A.1	Clasificación de imanes de acuerdo a la Norma europea (IEC 60404-8-1).	1
A.2	Clasificación de imanes de acuerdo a estándares chinos.	2
A.3	Clasificación de imanes de acuerdo a estándares americanos.	3
B.1	Resultados geométricos del generador de 32 polos y 72 ranuras	4
B.2	Resultados geométricos del generador de 32 polos y 108 ranuras	5

Lista de Acrónimos

AF	Flujo Axial. Por sus siglas en inglés: Axial Flux
AF-PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Axial. Por sus siglas en inglés: Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares. Por sus siglas en inglés: American National Standards Institute
CA	Corriente Alterna
CAD	Diseño Asistido por Computadora. Por sus siglas en inglés: Computer Aided Design
CD	Corriente Directa
FEA	Análisis de Elementos Finitos. Por sus siglas en inglés: Finite Element Analysis
FFT	Transformada Rápida de Fourier. Por sus siglas en inglés: Fast Fourier Transform
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional. Por sus siglas en inglés: International Electrotechnical Commission
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Por sus siglas en inglés: Institute of Electrical and Electronics Engineers
INEEL	Instituto Nacional de Electricidad y de Energías Límpias
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial
MCD	Máximo Común Divisor
NEMA	Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos. Por sus siglas en inglés: National Electrical Manufacturers Association
PM	Imanes Permanentes. Por sus siglas en inglés: Permanent Magnets
PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes. Por sus siglas en inglés: Permanent Magnet Synchronous Generator
PPC	Punto de Común Acoplamiento. Por sus siglas en inglés: Point of Common Coupling
RF	Flujo Radial. Por sus siglas en inglés: Radial Flux
RF-PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Radial. Por sus siglas en inglés: Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator
rms	Valor cuadrático medio (valor eficaz). Por sus siglas en inglés: Root Mean Square Valor
rpm	Revoluciones por minuto
RV	Regulación de voltaje
TF	Flujo Transversal. Por sus siglas en inglés: Transverse Flux
TF-PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes de Flujo Transversal. Por sus siglas en inglés: Transverse Flux Permanent Magnet Synchronous Generator

THD Distorsión Armónica Total. Por sus siglas en inglés: Total Harmonic Distortion

Lista de Símbolos

Letras mayúsculas

A_c	Área del conductor	m^2
A_{cs}	Área de los conductores	m^2
A_g	Área del entrehierro	m^2
A_s	Área de la ranura	m^2
B	Densidad de flujo magnético	T
B_g	Densidad de flujo magnético en el entrehierro	T
BH_{max}	Producto de energía máxima	kJ/m^3
C_ϕ	Factor de concentración de flujo	—
D_o	Diámetro externo	m
D_i	Diámetro interno	m
Fe	Frecuencia eléctrica	Hz
E_{rms}	Voltaje medio cuadrático	V
E_{max}	Voltaje máximo inducido	V
H	Intensidad de campo magnético	m
I	Corriente eléctrica	A
I_{ph}	Corriente de fase	A
I_s	Corriente en la ranura	A
J_c	Densidad de corriente de ranura	A/m^2
J_{max}	Densidad de corriente máxima	A/m^2
J_{max}	Densidad de corriente media cuadrática	A/m^2
L	Longitud axial	m
L_e	Inductancia de fin e vuelta	H
L_e	Inductancia del entrehierro	H
L_{ph}	Inductancia de fase	H
L_s	Inductancia de ranura	H
N_m	Número de polos magnéticos	—
N_p	Número de pares de polos magnéticos	—
N_{ph}	Número de fases	—
N_s	Número de ranuras	—
N_{sm}	Número de ranuras por polos	—
N_{sp}	Número de ranuras por fase	—
N_{spp}	Número de ranuras por polo por fase	—
P	Permeancia	Wb/Av
P_{in}	Potencia de entrada	W
PC	Coefficiente de permeancia	—
P_{cl}	Pérdidas del núcleo	W

P_{cu}	Pérdidas de cobre	W
P_{out}	Potencia de salida	W
P_s	Pérdidas miscelaneas	W
P_t	Pérdidas totales	W
R	Reluctancia magnética	Av/Wb
R	Resistencia eléctrica	Ω
R_e	Resistencia de fin de vuelta	Ω
$R_{eq1,eq2}$	Reluctancias equivalentes	Av/Wb
R_g	Reluctancia del entrehierro	Av/Wb
R_m	Reluctancia de los imanes	Av/Wb
R_{ml}	Reluctancia entre imanes	Av/Wb
R_{ph}	Resistencia de fase	Ω
R_r	Reluctancia del rotor	Av/Wb
R_s	Reluctancia del estator	Av/Wb
R_s	Resistencia de ranura	Ω
T_{cog}	Torque de tracción	Nm
T_m	Torque mecánico	Nm
T_{min}	Torque mínimo	Nm
T_{max}	Torque máximo	Nm
T_{pro}	Torque promedio	Nm
T_{rizado}	Torque de rizado	Nm
T_{rms}	Torque medio cuadrático	Nm
V_{cu}	Volumen de los conductores	m^3
V_{LL}	Voltaje de línea a línea	V
V_{LN}	Voltaje de línea a neutro	V
V_m	Volumen de imanes	m^3
V_{ph}	Voltaje de fase	V
V_{ro}	Volumen del disco el rotor	m^3
V_{st}	Volumen del estator	m^3
W_{cu}	Masa de los conductores	kg
W_m	Masa de imanes	kg
W_{ro}	Masa del disco el rotor	kg
W_{st}	Masa del estator	kg
X_e	Reactancia del fin de vuelta	Ω
X_g	Reactancia del entrehierro	Ω
X_{ph}	Reactancia de fase	Ω
X_s	Reactancia de ranura	Ω

Letras minúsculas

d_s	Profundidad de diente	m
d_1	Profundidad de zapato d_1	m
d_2	Profundidad de zapato d_2	m
d_3	Profundidad de la ranura	m
fem	Fuerza electromotriz	V
f_{mm}	Fuerza magnetomotriz	A
g	Entrehierro	m
h	Altura real de los conductores	m

i	Corriente	A
k_a	Coeficiente de pérdidas adicionales por corriente Eddy	—
k_c	Coeficiente de Carter	—
k_{cp}	Factor de empaquetamiento del conductor	—
k_d	Factor de distribución	—
k_e	Coeficiente de pérdidas por corriente Eddy	—
k_h	Coeficiente de pérdidas por histéresis	—
k_{ml}	Coeficiente de flujo de dispersión	—
k_p	Factor de paso de polo	—
k_s	Factor de sesgo	—
k_{st}	Factor de laminación	—
l_m	Longitud del imán	m
n_s	Número de conductores en serie	—
n_p	Número de conductores en paralelo	—
q_s	Densidad de calor en la ranura	W/m^2
q_{st}	Densidad de calor en el estator	W/m^2
v	Velocidad	m/s

Letras griegas

α_{cp}	Fracción bobina-polo	—
α_m	Fracción magnética	%
α_{si}	Fracción de ranura en el radio interno	—
α_{sd}	Fracción de profundidad de zapato	—
μ	Permeabilidad magnética	H/m
μ_r	Permeabilidad relativa	—
μ_0	Permeabilidad del vacío $4\pi 10^7$	H/m
ϕ	Flujo magnético	Wb
ϕ_{bi}	Flujo magnético en el estator	Wb
ϕ_g	Flujo magnético en el entrehierro	Wb
η	Eficiencia	%
ρ_{bi}	Densidad del acero	kg/m^3
ρ_{cu}	Densidad del cobre	kg/m^3
ρ_m	Densidad del imán	kg/m^3
θ_c	Paso angular del devanado	rad
θ_{ce}	Paso del devanado	rad eléctricos
θ_p	Paso angular del polo	rad
θ_s	Paso angular de la ranura	rad
θ_{se}	Paso de ranura	rad eléctricos
τ_c	Paso de bobina	m
τ_{ci}	Paso de bobina en el radio interno	m
τ_{co}	Paso de bobina en el radio externo	m
τ_p	Paso de polo	m
τ_{pi}	Paso de polo en el radio interno	m
τ_{po}	Paso de polo en el radio externo	m
τ_{si}	Paso de ranura en el radio interno	m
τ_{so}	Paso de ranura en el radio externo	m

ω_{bi}	Ancho del yugo del estator	m
ω_r	Velocidad nominal	rad/s
ω_s	Separación entre zapatos	m
ω_{sb}	Ancho de la ranura	m
ω_{tbi}	Ancho del diente en el radio interno	m
ω_{tbo}	Ancho del diente en el radio externo	m

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Introducción

Durante las últimas décadas, ha habido un rápido desarrollo en el uso de recursos de energía alternativa para la generación de energía eléctrica en todo el mundo [1, 2]. Entre las fuentes energéticas renovables, la eólica es actualmente la energía de mayor crecimiento debido a sus ventajas, ser limpia y rentable [3], siendo la más importante para la planificación de futuros proyectos energéticos en muchos países.

Los generadores son los encargados de transformar la energía mecánica en energía eléctrica al ser accionados por un impulsor primario. En la industria eólica este componente es elemento principal del sistema eléctrico, donde, con el desarrollo de imanes permanentes más eficientes, el diseño de Generadores Síncronos Multipolo de Imanes Permanentes (PMSG por sus siglas en inglés) ha tenido un realce importante en las últimas décadas.

En los sistemas de generación de energía eólica de velocidad variable a pequeña escala, los PMSG's tienen muchas ventajas sobre la generación de velocidad fija, como la disponibilidad, el tamaño pequeño, el alto rendimiento, la instalación de bajo costo, el funcionamiento en el punto de máxima potencia y la alta calidad de potencia [4].

Se han desarrollado varios tipos de PMSG's para aplicaciones en el sector eólico. Sin embargo, Debido a la estructura compacta, alto número de polos, alta densidad de potencia y bajo peso del Generador Síncrono de Imanes Permanente de Flujo Axial (AF-PMSG), es un excelente candidato para este propósito [5–7].

Como objetivo de estudio, en este trabajo de investigación se desarrollará una metodología para el diseño de un Generador Síncrono Multipolo de Imanes Permanentes de Flujo Axial (AF-PMSG por sus siglas en inglés) haciendo uso de la herramienta de software MATLAB/Simulink para dimensionar el generador y modelarlo. Esto se realizará con el fin de aplicar esta tecnología a la industria eólica en aerogeneradores de baja potencia de eje horizontal y vertical.

1.2 Antecedentes

En este apartado se realiza el análisis del estado del arte de los avances tecnológicos de los Generadores Síncronos de Imanes Permanentes (PMSG's), así como el estudio de las principales topologías y metodologías de diseño de la configuración de Flujo Axial de este tipo de generadores para su implementación en aerogeneradores de baja potencia.

Aunque el primer sistema de excitación de Imanes Permanentes (PM por sus siglas en inglés) se aplicó a máquinas eléctricas en la década de 1830, la mala calidad de los materiales magnéticos duros desalentó su uso. La invención de Alnico en 1931, la ferrita de bario en la década de 1950 y especialmente, el material de tierra rara-neodimio-hierro-boro (NdFeB) (anunciado en 1983) han hecho posible el regreso del sistema de excitación de PM [7].

En comparación a las máquinas de inducción y las máquinas síncronas de rotor devanado, los PMSG's ofrecen ciertas ventajas técnicas debido principalmente a que ofrecen mejores relaciones de potencia/masa, no se requiere de caja multiplicadora, su eficiencia es mayor y requieren de menos mantenimiento. Esto significa que este tipo de máquinas son más confiables ya que se disminuyen drásticamente el número de averías [8].

De forma general, los Generadores Síncronos de Imanes Permanentes (PMSG's) se pueden clasificar en máquinas de flujo radial (RF), máquinas de flujo transversal (TF) y máquinas de flujo axial (AF) [9, 10]. La historia de las máquinas eléctricas revela que las máquinas más antiguas eran de Flujo Axial [7]. Las ventajas competitivas de los AF-PMSG's sobre sus contrapartes de flujo radial y transversal son las razones de su preferencia en algunas aplicaciones de energía renovable [11, 12]; ofrece alta potencia y densidad de par a baja velocidad, es compacto, eficiente y tiene un buen rendimiento dinámico.

En la actualidad, la implementación de la tecnología de Generadores Síncronos Multipolo de Imanes Permanentes de Flujo Axial está emergiendo rápidamente en turbinas eólicas de accionamiento directo de gran potencia, en el rango de varios megawatts (MW) [13, 14]. Sin embargo, en el sector eólico de baja potencia es donde se le ha dado un realce mayor en las últimas década.

En los trabajos realizados por J. Zouzi *et al*, M. Chircaet *et al*, A. Parviainen [8, 15, 16] se realiza una comparación de AF-PMSG's con máquinas de flujo radial presentandose resultados altamente prometedores y concluyentes a favor de las máquinas de flujo axial, ya que posee mayor relación potencia/peso, menor ruido, diseño más flexible de campo de PM y de armadura, mejor enfriamiento, mejor simplicidad y flexibilidad de diseño. Además, la forma del disco del AF-PMSG crea el plano de montaje ideal para las palas de la turbina eólica [16].

Se analizaron las diferentes configuraciones que se tienen para el diseño de los generadores de flujo axial en [7, 17], donde, las topologías se basaron en la ubicación del rotor y el estator en el generador para hacer una clasificación de los mismo. R.D. Chavan *et al* [17] analiza las dimensiones de los componentes, su material y también discute conceptos básicos de procesos de fabricación y procedimientos simples para el diseño del

generador AF-PMSG concluyendo que la topología de un rotor con dos estatores es mejor en fabricación, enfriamiento, tamaño y peso que la topología de un estator con dos rotores. Si embargo, una de las desventajas de este artículo es que no considera todas las configuraciones posibles de los AF-PMSG y solo se limita a analizar la distribución del estator y el rotor en el generador, las dimensiones y algunos materiales.

Los generadores de flujo axial son usados para generación de energía eléctrica en turbinas eólicas y otros dispositivos de generación que tienen baja velocidad de rotación debido a que tienen la característica de permitir modificar la frecuencia de la señal de tensión, aumentando o disminuyendo el número de polos magnéticos del sistema, razón por la cual no se requiere de altas velocidades de rotación para lograr frecuencias elevadas en la señal de tensión [18]. Este tipo de generadores son ideales para ser usados en turbinas eólicas de eje vertical que no alcanzan velocidades de rotación elevadas pero si pueden tener un par de rotación alto.

En los trabajos realizados por Choi *et al*, Mahmoudi *et al* [19, 20], se presentaron ecuaciones de dimensionamiento para un motor de campo axial y una representación analítica para el flujo magnético en varias partes de la máquina, respectivamente. En ambos trabajos no se informa de ningún procedimiento de diseño realizado por los autores. En [18, 21, 22], para el diseño del AF-PMSG se lleva a cabo simulaciones de campo electromagnético usando el método de Análisis de Elementos Finitos, donde, durante el proceso de diseño se evalúa el comportamiento electromagnético de los imanes seleccionados, se define la geometría a usar para el montaje de las bobinas y los imanes, se calcula el flujo máximo y posteriormente se analiza la variación del flujo magnético. En [21] se investiga el rendimiento de la máquina PM de campo axial sin núcleo. Sin embargo, no se cita ningún procedimiento de diseño para este caso.

El trabajo desarrollado por A. Daghigh *et al* [22], se busca al igual que en este trabajo, validar el algoritmo desarrollado usando Análisis de Elemento Finito, sin embargo, una de las diferencias es que el trabajo de A. Daghigh *et al* está basado a la configuración de doble rotor y un estator y se manejan ciertas restricciones de diseño con la finalidad de disminuir costos. Además no se muestra el logaritmo de diseño desarrollado.

1.3 Planteamiento del problema

La nueva tendencia para el diseño de aerogeneradores es prescindir de elementos que mejoren la eficiencia de la máquina, hagan más simple su funcionamiento y sean económicamente viables, es decir, que su costo sea competitivo en el mercado.

Los generadores síncronos de imanes permanentes, permiten prescindir de la caja multiplicadora debido a que pueden ser diseñados para acoplarse directamente con el rotor eólico. Esto permite reducir el peso total, las dimensiones, el ruido mecánico, costos de inversión, costos de operación y mantenimiento.

Para el diseño de generadores se requiere de herramientas de software para el estudio del campo electromagnético. Para ello se hace uso de Análisis de Elementos Finitos (FEA, por sus siglas en inglés) donde, se presentan las desventajas de requerir grandes tiempos computacional y un estudio previo del software para entender su funcionamiento, siendo en ocasiones complicado por disponibilidad de tiempo.

El presente trabajo se basa en realizar una metodología especialmente enfocada al Diseño de Generadores Síncrono Multipolo de Imanes Permanentes de Flujo Axial (AF-PMSG), donde, se busca desarrollar una herramienta de código abierto, que permita diseñar los generadores de baja potencia de esta índole de manera rápida y eficiente.

1.4 Justificación

Las ventajas que presentan los AF-PMSG's sobre sus contrapartes de Flujo Radial y Transversal son: alta potencia, es compacto, eficiente y tiene un buen rendimiento dinámico. Además, esta configuración de PMSG es ideal para implementarse en aerogeneradores de baja potencia de eje vertical debido a su alta densidad de par a baja velocidad. Esto se traduce en la disminución de costos de sistemas eólicos de baja potencia al prescindir del sistema de orientación.

Actualmente, existen muchas topologías de diseño de generadores eléctricos. Sin embargo, no se cuenta con herramientas de diseño de código abierto para dimensionamiento rápido de todos los parámetros geométricos de la máquina y los softwares existentes en el mercado son muy costosos.

En este trabajo de tesis se propone desarrollar una metodología propia y de código abierto para el diseño de un AF-PMSG para la región del Istmo de Tehuantepec realizada con MATLAB/Simulink y validada con FEA, destinada a fines educativos para los estudiantes de la Maestría en Ciencias en Energía Eólica, brindando una herramienta útil para el diseño y construcción de este tipo de generadores.

1.5 Objetivos

Este trabajo se centra en el cumplimiento de un objetivo general y seis objetivos específicos, los cuales se muestran a continuación:

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un Generador Síncrono Multipolo de Flujo Axial (AF-PMSG) con capacidad de 10 kW para su uso en aerogeneradores de baja potencia con transmisión directa, empleando el software MATLAB/Simulink.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Hacer un análisis del circuito magnético del AF-PMSG.
2. Desarrollar una solución algorítmica en MATLAB/Simulink para dimensionar el generador utilizando la teoría de circuitos magnéticos.
3. Hacer el análisis de elemento finito de la máquina y evaluar el desempeño del generador ante diferentes condiciones de operación.
4. Validar los resultados obtenidos del código desarrollado.
5. Contribuir al desarrollo del Software educativo para el Diseño y Simulación de Generadores Síncrono Multipolo de Imanes Permanentes.
6. Obtener la lista de materiales y los planos de fabricación del generador.

1.6 Alcances y limitaciones

Este proyecto de tesis tiene como alcance el desarrollo del diseño de un AF-PMSG en MATLAB/Simulink, basada en la teoría de máquinas eléctricas y en los métodos de análisis de circuitos magnéticos. Esta herramienta permitirá ingresar datos de operación para caracterizar el diseño del AF-PMSG. El código desarrollado será validado con software de elemento finito.

El diseño del generador será para una potencia específica de 10 kW. Sin embargo, esta herramienta puede utilizarse para el diseño de otros AF-PMSG que estén en el rango de baja potencia donde, de acuerdo con [23] debe ser menor a 30 kW.

La herramienta de diseño será de código abierto y se destinará para fines de estudios posteriores del AF-PMSG.

Las limitaciones de este trabajo se centran en el hecho de ser una herramienta aplicada a un solo tipo de PMSG, siendo el caso de esta investigación el de Flujo Axial. Además, el software no se destinará para fines comerciales y solo se compromete a obtener los planos del generador.

1.7 Estructura de tesis

La estructura del presente trabajo de investigación está compuesta por seis capítulos, tal y como se describe a continuación:

Capítulo 1: En este capítulo se abordan temas como el estado del arte, los objetivos tanto general como específicos, el marco teórico y aspectos claves que conformen esta investigación.

Capítulo 2: En este capítulo se analiza la teoría de circuitos magnéticos y máquinas eléctricas para dar fundamento al desarrollo de la investigación planteada. De igual manera, se aborda el análisis del circuito magnético de la máquina, se obtienen los parámetros geométricos, dimensionado de imanes, los diseños 3D y planos del AF-PMSG.

Capítulo 3: En este capítulo se obtienen los parámetros eléctricos, momento de inercia, masas y rendimiento del AF-PMSG, así como el desarrollo del algoritmo de diseño de la máquina y parámetros eléctricos necesarios para las simulaciones de elemento finito.

Capítulo 4: En este capítulo se aborda el Análisis de Elemento Finito para evaluar exhaustivamente el desempeño del AF-PMSG de 10 kW. El estudio inicia con la selección de la fracción magnética óptima para minimizar la distorsión armónica de voltaje total (THD por sus siglas en inglés). Posteriormente, con dicho parámetro, se evalúa el desempeño del AF-PMSG en su más amplio rango de operación a través de la prueba en vacío y con carga. Los resultados obtenidos de las simulaciones de elemento finito se comparan con el algoritmo de diseño analítico descrito en los Capítulos 2 y 3 y se mencionan las posibles limitaciones que puedan existir.

Capítulo 5: Como parte de una colaboración con el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), en este capítulo se abordará el análisis del desempeño para el más amplio rango de operación de un Generador Síncrono de Flujo Axial con software de elemento finito. Los resultados de simulación se validan con pruebas experimentales.

Capítulo 6: Como último apartado, se presentarán las aportaciones y trabajos futuros.

1.8 Marco Teórico

El generador eléctrico es el encargado de convertir la energía mecánica producida por el rotor eólico en energía eléctrica. Es el elemento central del sistema eléctrico de los aerogeneradores y el componente a partir del cual se dimensionan los elementos restantes [24].

Los generadores eléctricos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de alimentación de energía eléctrica en generadores de corriente directa (CD) y generadores de corriente alterna (CA) [24]. En el sector eólico, se puede clasificar en cuatro grupos principales: (1) generador de inducción de jaula de ardilla de velocidad fija; (2) generador de inducción de rotor bobinado con resistencia variable del rotor; (3) generador de inducción de doble alimentación basado en un convertidor electrónico de potencia entre la red y sus devanados del rotor; y (4) generador síncrono, que se divide en dos tipos: generador síncrono rotor bobinado y generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) [26].

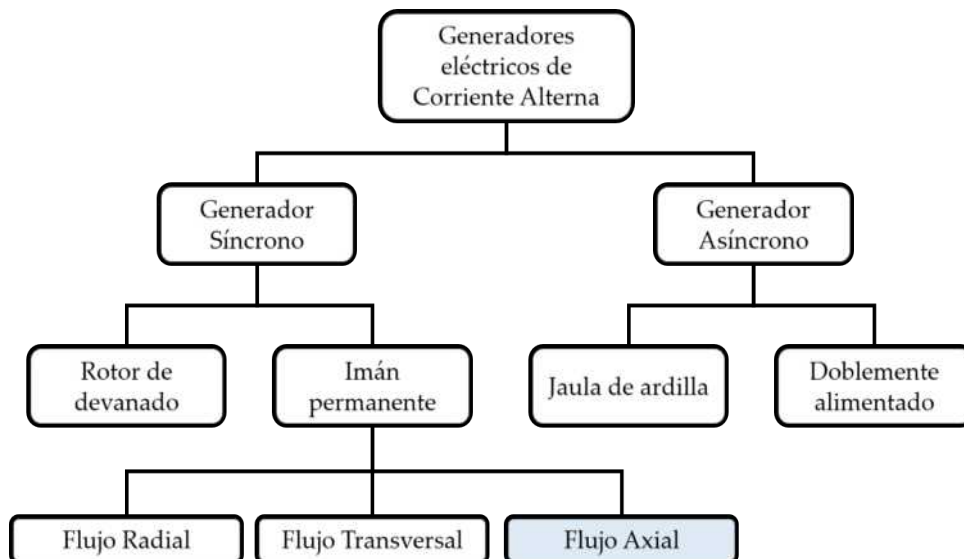


Figura 1.1. Clasificación de generadores eléctricos de Corriente Alterna.

En la Fig. 1.1 se muestra la clasificación de los generadores eléctricos de corriente alterna, de los cuales, para este trabajo de tesis solo se analizarán los Generadores Síncronos de Imanes Permanentes haciendo énfasis en los AF-PMSG.

1.8.1 Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG)

Un generador síncrono es un dispositivo que convierte potencia mecánica de un primomotor en potencia eléctrica de CA con un voltaje y frecuencia específicos. El término síncrono se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de la máquina está confinada a, o sincronizada con, la tasa mecánica de rotación del eje. Los generadores síncronos se ocupan para producir la mayor parte de la potencia eléctrica que se utiliza en todo el mundo [38].

Estos generadores presentan un incremento de precio al incorporar convertidores de mayores prestaciones. Sin embargo, se pueden realizar diseños de este tipo de generadores

con un elevado número de polos, reduciendo la velocidad de giro permitiendo eliminar la caja multiplicadora (ver Fig. 1.2). En la industria eólica, la velocidad asignada de los generadores síncronos está comprendida entre 20 y 200 rpm, dependiendo de la potencia nominal del generador [24].

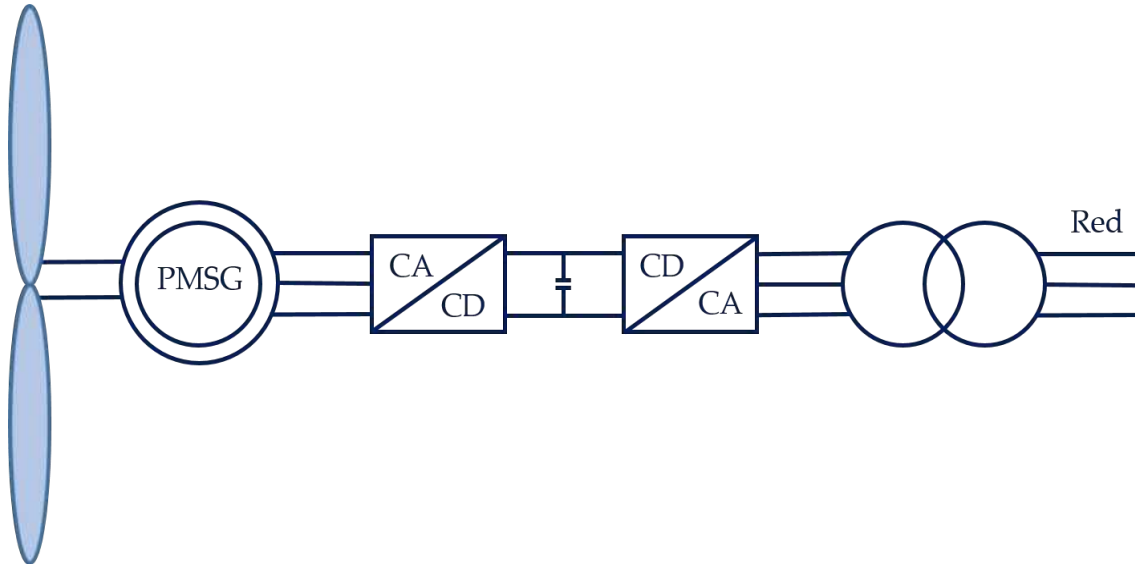


Figura 1.2. Configuración de un aerogenerador basado en PMSG conectado a la red eléctrica.

En general, las principales ventajas de las máquinas síncronas de imanes permanentes sobre sus contrapartes los generadores de rotor devanado y los generadores de inducción son [7, 25]:

- menor mantenimiento,
- menor ruido,
- mayor eficiencia,
- mayor confiabilidad,
- mayor densidad de potencia.

1.8.2 Clasificación de PMSG

En función de la orientación del entrehierro con respecto al eje de giro

La clasificación principal de las topologías de máquina PMSG para aplicaciones en aerogeneradores de acoplamiento directo son el flujo radial (RF), el flujo axial (AF) y el flujo transversal (TF) [7, 28, 29].

- **Generador Síncrono Multipolo de Imanes Permanentes de Flujo Radial (RF-PMSG):** Es el generador clásico al ser el más usado entre los tipos de generadores de imanes permanentes. El estator y el rotor están separados por un entrehierro cilíndrico, que idealmente es concéntrico con el eje de giro (ver Fig. 1.3) [31].

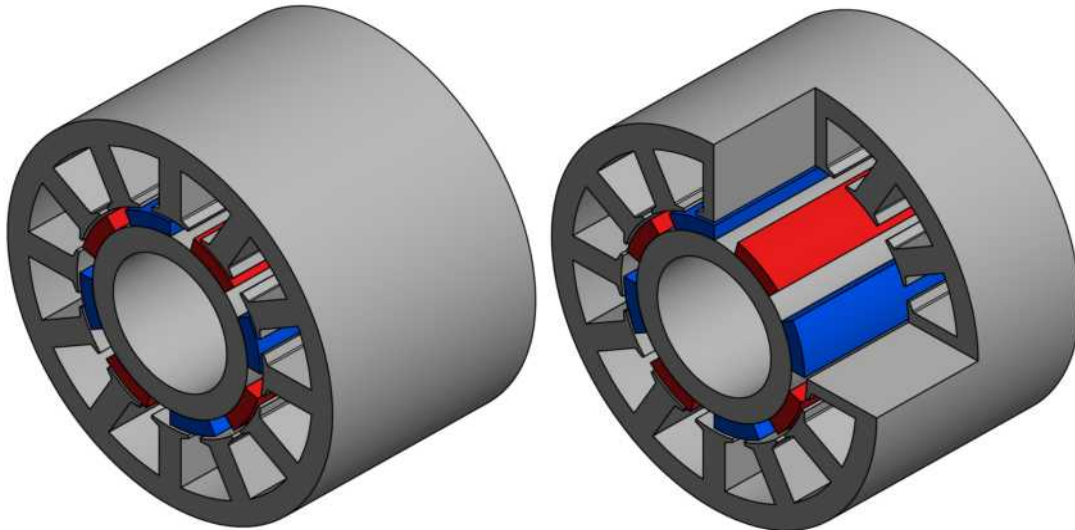


Figura 1.3. Generador de flujo radial.

- **Generador Síncrono Multipolo de Imanes Permanentes de Flujo Transversal (TF-PMSG):** Estos generadores tienen una orientación radial de entrehierro y tiene el ranurado del estator con una orientación transversal. La orientación transversal en el estator permite que el área de la bobina sea independiente de la elección del paso polar. Por tanto, el paso polar puede ser reducido a valores de 1-2 cm y en consecuencia la corriente se incrementa a valores muy altos. En este caso el campo magnético tiene una distribución tridimensional [31].
- **Generador Síncrono Multipolo de Imanes Permanentes de Flujo Axial (AF-PMSG):** El generador de flujo axial se caracteriza porque el flujo en el entrehierro lleva una dirección axial respecto al eje de giro, es decir, es paralelo al mismo [7, 9, 31]. El rotor se encuentra en forma de disco, con los imanes dispuestos a lo largo del perímetro y el estator está ranurado de forma radial. Este tipo de disposición se caracteriza por ser más compacta y más difícil de fabricar.

Un diseño adecuado para un generador con flujo axial de estator central, se basa en dos piezas rotóricas que se ubican lateralmente solidarias al eje de la máquina figura 1.4. Esta configuración de dos entrehierros tiene la ventaja de cancelar las fuerzas longitudinales sobre el estator, además, esta topología minimiza la inducancia de dispersión [30].

Si se analizan los AF-PMSG's desde el punto de vista de la construcción, éstas pueden diseñarse como de una o dos caras, con o sin ranuras de armadura, con o sin núcleo de armadura, con rotores PM internos o externos, con PM interiores o montados en superficie y como máquinas de etapa o multietapa [7].

En el caso de configuraciones de doble cara, se puede adoptar el estator externo o la disposición del rotor externo. La primera opción tiene la ventaja de utilizar menos PM a expensas de una mala utilización del devanado, mientras que la segunda se considera una topología de máquina particularmente ventajosa.

Las diversas topologías de las máquinas sin escobillas AF-PMSG se pueden cla-

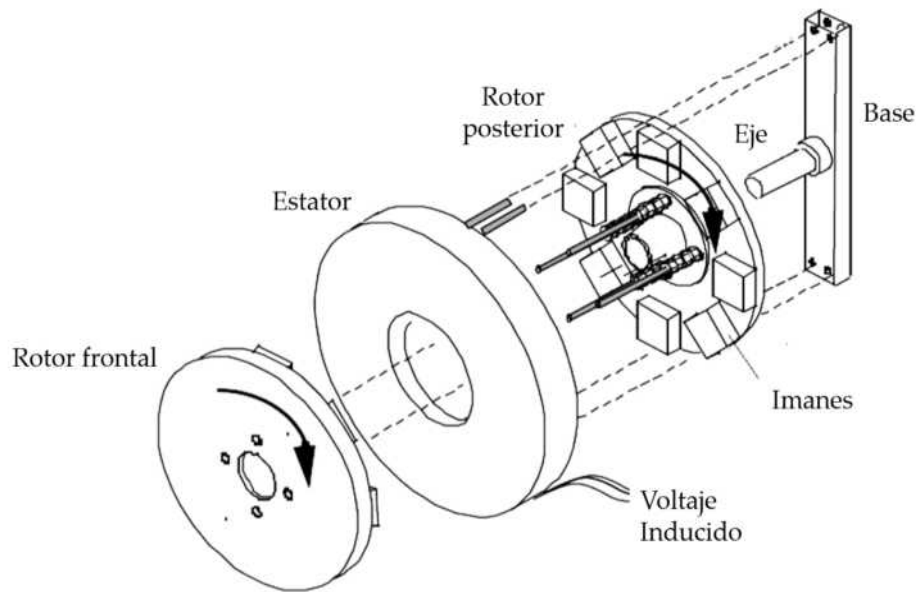


Figura 1.4. Despiece de un generador de Imanes Permanentes de Flujo Axial.

sificar de la siguiente manera:

- AF-PMSG's de una cara
 - con estator ranurado (Fig. 1.5a),
 - con estator sin ranura,
 - con estator saliente.
- AF-PMSG's de doble cara
 - con estator interno (Fig. 1.5b, d),
 - con rotor interno (Fig. 1.5c).
- AF-PMSG's multietapa (multidisco).

En la Figura 1.5, se muestran algunas topologías básicas de las máquinas AFPM donde, en *a* se muestra una máquina ranurada de una cara, en *b* una máquina sin ranura de doble cara con estator interno y rotor PM doble, en *c* una máquina de doble cara con estator ranurado y rotor PM interno y en *d* una máquina de doble rotor con estator interno sin núcleo. La numeración indica que 1 es núcleo del estator, 2 es el devanado del estator, 3 es el rotor, 4 son los imanes permanentes (PM), 5 es el bastidor, 6 los rodamientos y 7 el eje de la máquina [7].

El entrehierro del AF-PMSG con armadura ranurada es relativamente pequeño. La densidad media de flujo magnético en el entrehierro decrece debajo de cada abertura de ranura debido al aumento en la reluctancia. El cambio en la densidad media del flujo magnético causado por las aberturas de las ranuras corresponde a un aumento ficticio del entrehierro [7].

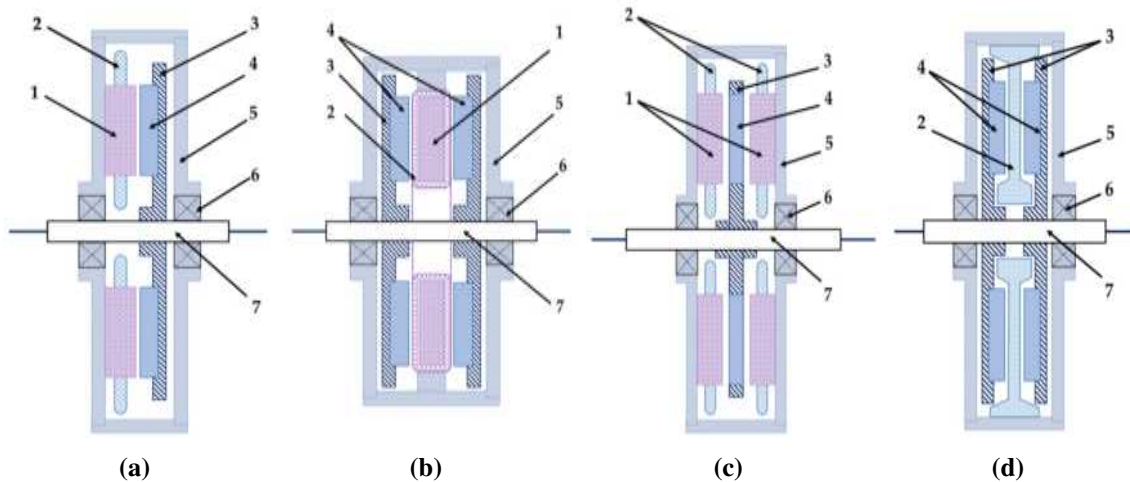


Figura 1.5. Topologías básicas de AF-PMSG.

Estator ranurado y sin ranura

Las laminaciones del estator pueden ser con o sin dientes, donde, en el estator dentado, los dientes se utilizan para transportar el flujo magnético y para mantener los conductores del estator en el lugar, mientras que en el estator sin dientes, los conductores del estator se colocan en el espacio de aire y el flujo magnético luego cruzan un espacio no magnético mucho más grueso, dando lugar a imanes con mayor volumen y/o disminuir la densidad de flujo sin carga [31].

Algunas características de esta clasificación se detallan a continuación:

- En un estator ranurado la mayor parte del flujo pasa a través de los dientes de acero, que se comportan como concentradores de flujo, en un estator sin ranura el flujo no hay concentradores por lo que el flujo se dispersa.
- En el estator ranurado la densidad de flujo y las pérdidas en el hierro es mayor en los dientes que en el yugo del estator; en el no ranurado las pérdidas de hierro son muy bajas.
- Las máquinas sin ranuras en algunos casos, presentan el aumento de pérdidas en el cobre y en pérdidas adicionales, debido al flujo magnético que pasa a través del devanado del estator, incluso sin carga.

Debido a la colocación de los imanes en el rotor

En este tipo de clasificación la colocación de los imanes se puede dar de tres formas; en la primera, los imanes se ubican sobre la superficie del rotor, en la segunda, estos se unen al rotor al ser insertados o embebidos en una ranura y en la tercera, los imanes se disponen en diferentes sentidos, siguiendo la secuencia Este-Norte-Oeste-Sur pudiendo existir o no algún tipo de material ferromagnético entre ellos a esta última configuración se le llama Imanes en un arreglo Halbach (ver Fig. 1.6) [31].

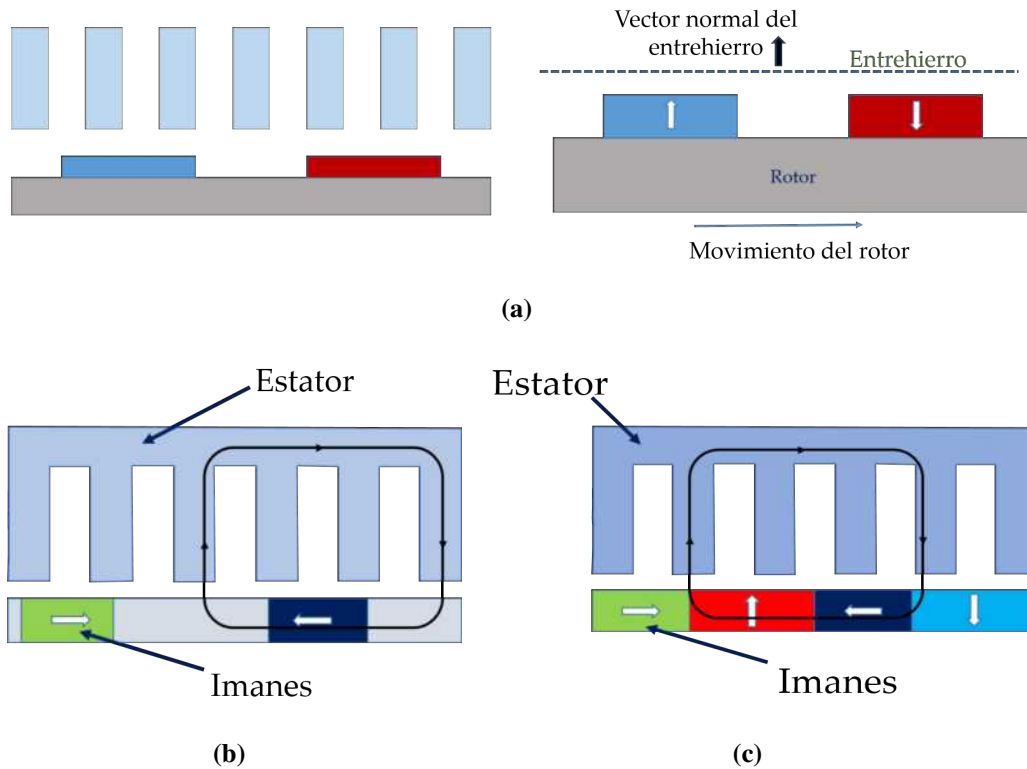


Figura 1.6. Colocación de imanes en el rotor. a) Imanes sobre la superficie, b) imanes embebidos, c) arreglo Halbach.

1.9 Metodología

En este apartado se analiza la metodología, la cual, describe a manera de puntos cada uno de los procedimientos que se llevarán a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados.

1. Análisis del Estado del Arte

Como parte fundamental para el desarrollo de este trabajo se plantea el análisis del estado del arte, donde, se pretende hacer una revisión de los avances que se tienen con respecto a la tecnología de los PMSG, incursionando de forma puntual en las características de los AF-PMSG y sus aplicaciones en la tecnología de aerogeneradores.

2. Análisis de las Topologías de AF-PMSG, para selección de la configuración de la máquina a utilizar

Los AF-PMSG's presentan diversas configuraciones en función de la ubicación del Estator y Rotor en la máquina, es por ello que se deben estudiar estas configuraciones de los AF-PMSG para seleccionar el que más se adecúe a las características de diseño planteadas.

3. Estudio de la teoría de circuitos magnéticos y obtención del mismo, aplicado al diseño del AF-PMSG de 10 kW

Se estudiará la teoría de circuitos magnéticos para conocer los parámetros que rigen a las máquinas AF-PMSG con objetivo de encontrar las expresiones matemáticas

que sean de utilidad para el diseño que se desarrollará en este trabajo de investigación.

4. **Desarrollo del algoritmo para el dimensionamiento del AF-PMSG.**

Para el diseño del AF-PMSG de 10 kW, se desarrollará en MATLAB/Simulink un algoritmo de solución donde se resolverán las ecuaciones de dimensionado de los componentes de la máquina, considerando algunos parámetros de entrada fijos como el diámetro del rotor.

5. **Realizar los planos del generador en Software CAD**

Se hará uso de Software CAD para realizar los planos $2D$ del generador AF-PMSG en función de los resultados obtenidos del algoritmo desarrollado, donde para ello se estudiará el software a utilizar como primer punto para entender su funcionamiento para poder aplicarlo.

6. **Análisis de Elemento Finito del diseño del AF-PMSG**

El Análisis de Elemento Finito se realizará con la finalidad de evaluar y verificar el desempeño del generador en diferentes condiciones de operación. Para ello, se realizarán múltiples pruebas en vacío y con carga del AF-PMSG y se registrarán los resultados obtenidos.

7. **Comparación de resultados**

Se realizará un análisis comparativo de los parámetros obtenidos de la simulación con respecto a la normativa aplicable. En caso de que se excedan los rangos de la norma aplicable para los parámetros obtenidos, se realizará el rediseño de la máquina.

8. **Contribuir al desarrollo de software educativo**

Cuando el diseño haya cumplido con la normativa aplicable, se trabajará en conjunto con otras investigaciones realizadas en la UNISTMO para desarrollar un software de código abierto y de fines educativos que permita en diseño de PMSG's tanto de Flujo Axial como de Flujo Radial y Tangencial. Dicha herramienta de diseño se prevee sea rápida y aplicable a generadores de baja potencia.

9. **Lista de materiales y planos de fabricación del generador**

Como último punto a analizar en este trabajo de tesis se proporcionará la lista de materiales del generador y los planos de fabricación que se obtuvieron en software CAD.

Análisis del Circuito Magnético del AF-PMSG

2.1 Introducción

El desarrollo de la tecnología de energía eólica enfrenta desafíos todos los días con un nuevo impulso hacia un mejor ambiente, hacia nuevas formas de producir energía y de una manera que también sea respetuosa con el medio ambiente. El objetivo de cualquier solución tecnológica debe centrarse en hacer que las energías renovables sean más sostenibles, fiables, predecibles y competitivas. Para el caso de los aerogeneradores, la progresión de las soluciones tecnológicas ha prestado especial atención a la mejora de su componente principal, el generador eléctrico, para maximizar la energía extraída del viento [35,36].

Actualmente, debido a la mayor disponibilidad y al menor costo de los materiales de alta energía de imán permanente (PM), el neodimio-hierro-boro (NdFeB), en particular, ha motivado el rápido desarrollo de generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG) en el sector eólico. Las principales ventajas de los PMSG son el peso ligero, el tamaño pequeño, la construcción mecánica simple, el fácil mantenimiento, la buena confiabilidad y la alta eficiencia [24,25,37]. Más importante aún, los PMSG's pueden suministrar energía fácilmente sin sufrir el proceso de acumulación de voltaje y no hay peligro de pérdida de excitación.

2.2 Imanes Permanentes

Un imán permanente es capaz de mantener un campo magnético sin que se le proporcione ningún enlace de corriente de excitación. El desarrollo de los imanes de alta energía *NdFeB* (neodimio-hierro-boro) aceleró la era de las máquinas modernas de imanes permanentes. Hoy en día, incluso en la producción en masa, se pueden lograr productos energéticos de más de 400 kJ/m^3 , mientras que la densidad de flujo remanente de los imanes permanentes puede ser superior a $1,4 \text{ T}$ [41].

El desarrollo rápido de nuevos materiales magnéticos y su disponibilidad comercial han incrementado su uso en el diseño de máquinas de CA y máquinas síncronas. En todas las máquinas que usan imanes permanentes para establecer el flujo magnético que se requiere, es deseable que el material que se use, posea las siguientes características [41]:

- Retentividad (densidad de flujo residual) alta, de modo que el imán sea poderoso y provea el flujo que se necesita.
- Coercitividad alta, de manera que no sea fácil que los campos magnéticos espurios lo desmagneticen.

En la Figura 2.1 se muestran las características de desmagnetización de imanes fabricados con alnico, cerámica y samario (pertenecientes a las tierras raras), todos ellos con alto contenido de cobalto, mostrándose una gran diferencia entre las curvas de desmagnetización de materiales magnéticos que pertenecen a diferentes grupos de aleaciones.

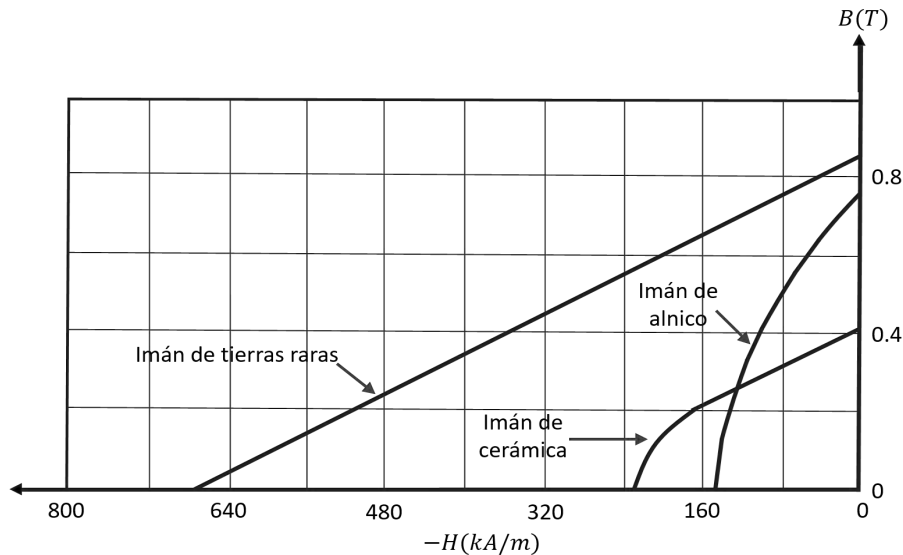


Figura 2.1. Características de desmagnetización para imanes de alnico, cerámica y tierras raras.

2.2.1 Ciclo de histéresis

Una manera de caracterizar los materiales magnéticos, es realizar un ciclo de histéresis, o sea una curva de magnetización (M) o inducción magnética (B) en función de un campo magnético aplicado (H).

En la Figura 2.2 se describe una técnica para determinar la característica de magnetización de un material magnético donde, si se conecta una fuente de corriente variable en el tiempo a una de las bobinas, se establece un flujo en el anillo que también es variable en el tiempo, el cual, a su vez, induce una fem en la otra bobina de acuerdo con la ley de la inducción de Faraday.

La fem inducida en la otra bobina ayuda a determinar los cambios en el flujo y también en la densidad del flujo magnético dentro del anillo. En otras palabras, la corriente

aplicada es una medida de la intensidad de campo magnético (H), y la fem inducida es una medida de la densidad del flujo magnético (B) en el anillo. Si se comienza a disminuir

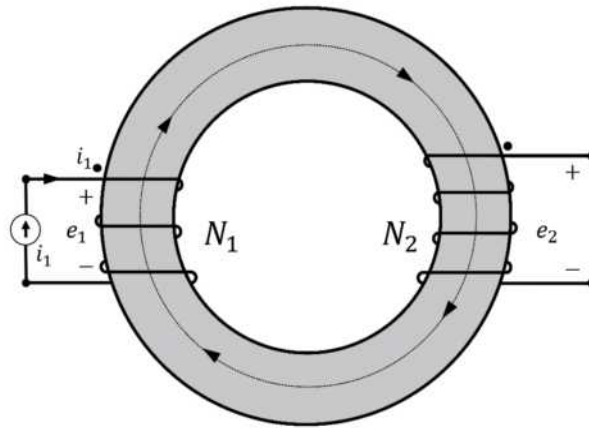


Figura 2.2. Circuito magnético con dos devanados.

el campo H reduciendo la corriente en la bobina, se encontrará que la curva no se repite sobre su trazo previo, sino que sigue otra trayectoria, como se observa en la figura 2.3. En otras palabras, se encuentra que el campo B no decrece con la misma rapidez con la que creció. Esta irreversibilidad se llama histéresis, y simplemente significa que B se atrasa con respecto a H . La curva muestra que aun cuando el campo H se reduce a cero, todavía existe en el material cierta densidad del flujo magnético. Esto se denomina remanencia o densidad residual de flujo, B_r , mientras que, el valor de H que conduce a B a cero se conoce como fuerza coercitiva, H_c .

Un material magnético permanente ideal muestra una curva de histéresis amplia, aplana, de modo que el magnetismo residual permanece en un nivel alto cuando se elimina el campo aplicado. En otras palabras, el área encerrada por la curva de histéresis es muy grande [41].

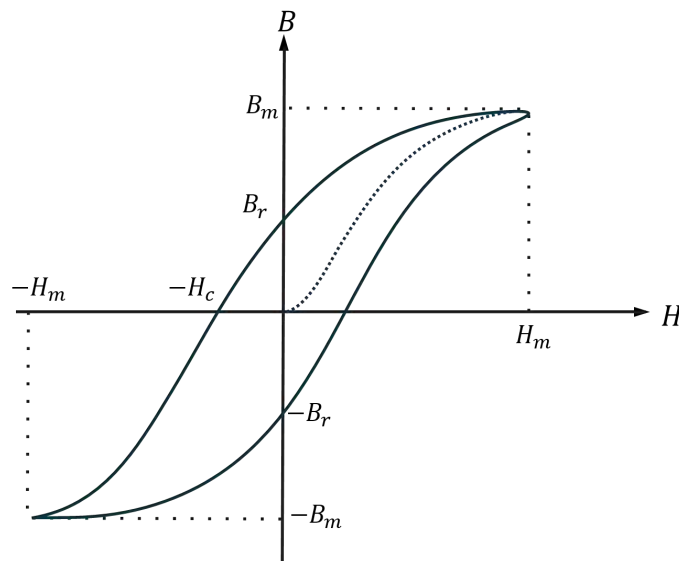


Figura 2.3. Ciclo de histéresis.

2.2.2 Punto de operación de un imán permanente

Para un adecuado uso de los imanes permanentes, se analizan las características de desmagnetización, es decir, el comportamiento de un material en el segundo cuadrante del ciclo de histéresis.

En el diseño de generadores eléctricos, en los circuitos magnéticos, es necesario buscar la operación del imán de manera que suministre el máximo de la energía. Por ello, la densidad de energía es simplemente el área del ciclo de histéresis (BH). Esta área se llama producto de energía y se muestra en la Fig. 2.4 donde, se observa la curva de desmagnetización y el punto máximo de operación del imán indicado en la figura como la intersección de las líneas punteadas.

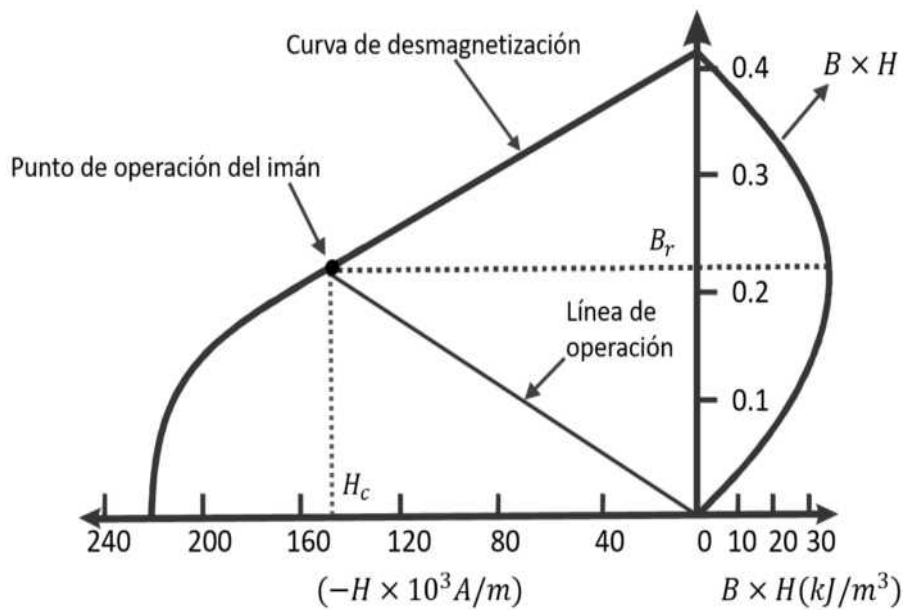


Figura 2.4. Desmagnetización típica y curvas de producto de energía de un imán permanente.

En la curva de desmagnetización, hay un solo punto en el que el valor máximo del producto BH se puede encontrar. En los materiales magnéticos modernos, para los cuales la curva de desmagnetización puede ser incluso una línea recta desde la densidad de flujo remanente B_r hasta la fuerza coercitiva H_c , el producto de energía máxima es directamente proporcional a estos valores y es $-B_r H_c / 4$. Cuanto mayor sea el producto energético, menos material de imán permanente se requiere (en principio), y más pequeña se puede hacer la máquina eléctrica.

En la Figura 2.12 se muestra un circuito magnético en serie que utiliza un imán permanente para establecer el flujo necesario en la región del entrehierro. Las secciones en forma de L generalmente están hechas con un material magnético de alta permeabilidad y son necesarias para canalizar el flujo en dirección del entrehierro. La aplicación de la ley de Ampere a un circuito magnético cerrado produce

$$H_m l_m + H_s l_s + H_g l_g + H_s l_s = 0 \tag{2.1}$$

donde, los subíndices m , s y g se utilizan para identificar las cantidades en las regiones del imán permanente, del acero y del entrehierro, respectivamente. En un circuito magnético en serie, el flujo magnético esencialmente es el mismo. Por tanto,

$$B_m A_m = B_g A_g = B_s A_s \quad (2.2)$$

Puesto que $B = \mu H$, es posible describir

$$H_g = \frac{B_m A_m}{\mu_0 A_g} \quad (2.3)$$

y

$$H_s = \frac{B_m A_m}{\mu_s A_s} \quad (2.4)$$

Luego, la ecuación 2.1 puede expresarse como

$$H_m = - \left[\frac{l_g A_m}{\mu_0 l_m A_g} + \frac{2l_s A_m}{\mu_s l_m A_s} \right] \quad (2.5)$$

La ecuación anterior se llama línea de operación, y su intersección con la curva de desmagnetización conduce al punto de operación.

2.3 Modelado del entrehierro

En todos los generadores y motores, el flujo magnético pasa entre el rotor y el estator a través del entrehierro. Por ello, es importante modelar la reluctancia en este espacio de aire.

Al considerar la estructura mostrada en la Fig. 2.5, el flujo magnético, pasa de un bloque a otro a través del espacio de aire y crea una caída de fem entre los dos bloques.

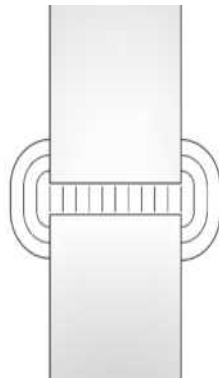


Figura 2.5. Flujo magnético en el entrehierro.

Dependiendo del grado de precisión requerido, existen varias técnicas para modelar la reluctancia en un entrehierro, tal y como se muestra en la Figura 2.6.

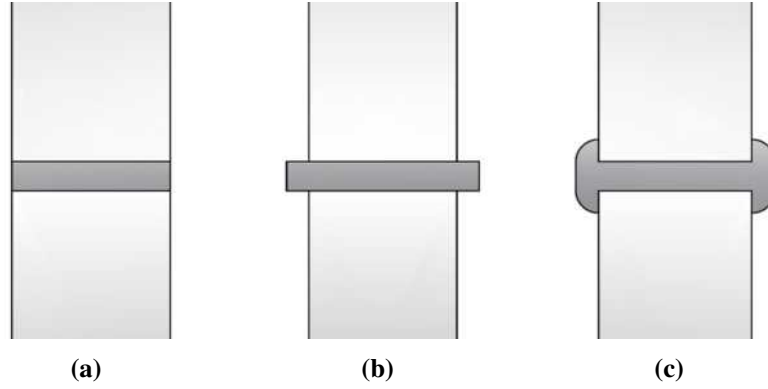


Figura 2.6. Modelos de reluctancia en el entrehierro.

En el modelo más simple mostrado en la Figura 2.6a se ignora por completo el flujo de en los extremos haciendo que el cálculo realizado sea impreciso. Este comportamiento esta representada por

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A} \quad (2.6)$$

donde:

μ_0 = permeabilidad del espacio libre con un valor de $4\pi 10^{-7} H/m$,

A = área de la sección transversal de los bloques orientados hacia el espacio de aire (m^2),

g = Longitud del entrehierro (m).

Un mejoramiento de este modelo se muestra en la Fig. 2.6b, el cual es preciso cuando g/A es pequeño. Esto permite que la longitud g se agrega al perímetro de A para obtener A' .

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A'} \quad (2.7)$$

En la Figura 2.6c, se muestra otro mejoramiento para modelar el flujo en el entrehierro considerando una reluctancia separada en paralelo con la reluctancia de la trayectoria del flujo directo a través del entrehierro. Aquí, se supone que el flujo en los bordes sigue un arco circular desde el lado de un bloque, viaja en línea recta a través del área de la brecha, luego sigue un arco circular hacia el otro bloque.

El cálculo de la reluctancia del entrehierro utilizando esta aproximación utiliza el hecho de que las reluctancias se agregan en paralelo al igual que lo hacen las conductancias eléctricas. La permeancia del entrehierro R_g mostrada en la figura 2.7 es aproximadamente igual a la suma de R_s y cuatro elementos de reluctancia etiquetados R_f . Mientras que la reluctancia en línea recta R_s se calcula utilizando (2.6), la permeancia de bordes R_f requiere más trabajo. Como se muestra en la Fig. 2.7, R_f es una suma de reluctancia de ancho diferencial, cada una de longitud $g + \pi x$. Es decir,

$$R_f = \sum \frac{l}{\mu_0 dA} = \sum \frac{l}{\mu_0 L dx} \quad (2.8)$$

donde $dA = L dx$ es el área de la sección transversal de cada reluctancia diferencial y L es la profundidad del bloque. Debido a que esta ecuación involucra la suma de elementos diferenciales, su solución está dada por la integral

$$R_{ef} = \int_0^x \frac{g + \pi x}{\mu_0 L} = \frac{g + \pi x}{\mu_0 L} \ln \left(1 + \frac{\pi x}{g} \right) \quad (2.9)$$

La única incógnita en esta ecuación es X , en la medida en que la reluctancia del borde se extiende hacia los lados de los bloques. En aquellos casos en los que X no está fija por alguna otra restricción geométrica, se elige comúnmente como un múltiplo de la longitud del entrehierro. El valor exacto elegido no es tan crítico porque la contribución de las reluctancias diferenciales disminuye a medida que uno se aleja del espacio de aire. Por lo tanto, a medida que X aumenta más allá de aproximadamente $10g$, hay poco cambio en la reluctancia total del entrehierro.

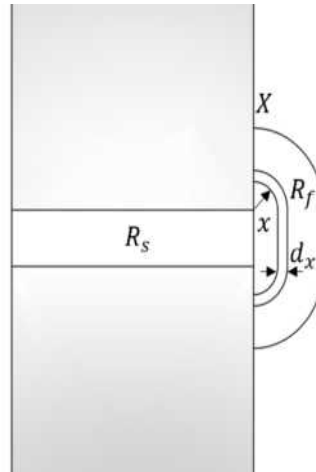


Figura 2.7. Modelo de permeancia en línea recta de arco circular.

2.4 Modelado de ranura

Las máquinas eléctricas tienen ranuras orientadas hacia el entrehierro donde, se retiene los devanados que llevan corriente. Como los devanados no son magnéticos, el flujo que cruza un espacio de aire que contiene ranuras intentará evitar la baja permeabilidad relativa, es decir, $\mu = \mu_0$, del área de la ranura. Esto agrega otro factor que debe considerarse al determinar la reluctancia de toda la región del entrehierro.

En la Figura 2.8 se observa este punto, donde las ranuras se han colocado en el bloque inferior de material con alta permeabilidad. Teniendo en cuenta solo una ranura y un diente, hay varias formas de aproximar la reluctancia del entrehierro. El método más simple es ignorar la ranura, asumiendo que contiene material de igual permeabilidad al del resto del bloque.

Una forma de determinar Reluctancia en el entrehierro en presencia de ranuras es mediante

$$R_g = \frac{g_e}{\mu_0 A}, \quad (2.10)$$

donde, g_e es una longitud efectiva del espacio de aire y se encuentra definida a través de la siguiente expresión

$$g_e = g k_c, \quad (2.11)$$

donde, $K_c > 1$ y es un factor de corrección que aumenta la longitud del espacio de aire.

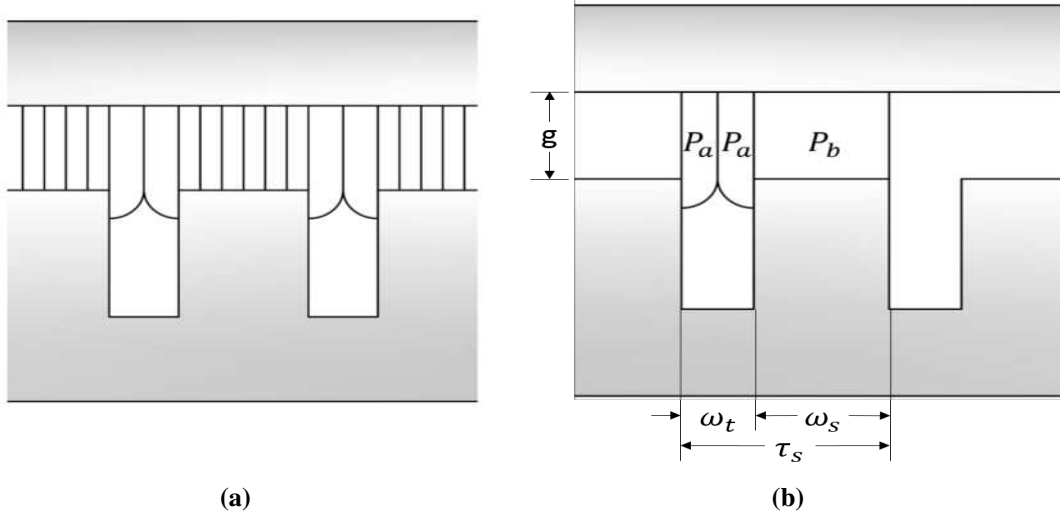


Figura 2.8. Estructura ranurada.

Al aplicar una técnica llamada cartografía conforme, Carter pudo determinar una solución de campo magnético analítico. A partir de estos resultados, Carter proporcionó valores tabulados para K_c . Para hacer que los resultados sean más útiles, otros han realizado trabajos adicionales, lo que ha llevado a expresiones analíticas para el coeficiente de Carter. Dos de tales expresiones son

$$K_{c1} = \left[1 - \frac{1}{\frac{\tau_s}{\omega_s} \left(5 \frac{g}{\omega_s} + 1 \right)} \right]^{-1} \quad (2.12)$$

$$K_{c2} = \left[1 - \frac{2\omega_s}{\pi\tau_s} \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{\omega_s}{2g} \right) - \frac{g}{\omega_s} \ln \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\omega_s}{g} \right)^2 \right] \right\} \right]^{-1} \quad (2.13)$$

El otro método para determinar la reluctancia del entrehierro utiliza el un circular como se muestra en la Fig. 2.8b. Siguiendo un enfoque similar al descrito por (2.9), la permeancia del entrehierro sobre un paso de ranura τ_s puede escribirse como

$$P_g = 2P_a + P_b = \mu_0 L \left[\frac{\omega_t}{g} + \frac{4}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi\omega_s}{4g} \right) \right] \quad (2.14)$$

donde L es la profundidad del bloque en la página. Esta solución también se puede escribir en la forma de un factor de corrección de la longitud del entrehierro donde, para este caso, K_c está dado por

$$K_{c3} = \left[1 - \frac{\omega_s}{\tau_s} + \frac{4g}{\pi\tau_s} \ln \left(1 + \frac{\pi\omega_s}{4g} \right) \right]^{-1} \quad (2.15)$$

Comparando (2.12, 2.13, 2.15) todos los factores de corrección producen longitudes del entrehierro similares. Como se ilustra en la figura 2.9, K_{c3} dicta un factor de corrección

mayor que cualquiera de las expresiones de coeficiente de Carter. En todos los casos, el factor de corrección aumenta a medida que aumenta el porcentaje de ranura ω_s/τ_s

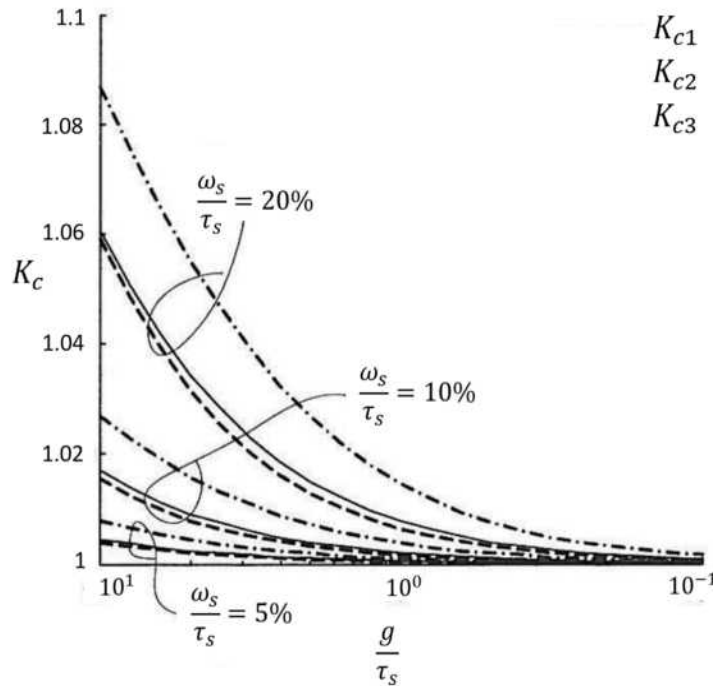


Figura 2.9. Comparación de Coeficientes de Carter.

2.5 Circuito equivalente del AF-PMSG

En esta sección se describen las topologías de diseño de los AF-PMSG's y se analiza el circuito magnético equivalente del AF-PMSG de doble cara con rotor interno.

2.5.1 Análisis de las topologías AF-PMSG's

Como se mencionó anteriormente, los AF-PMSG's se pueden clasificar de acuerdo con el número de discos como se muestra en la fig. 2.10 [42–44]:

- Máquinas de una cara,
- Máquinas de doble cara,
 - AF-PMSG con estator interno,
 - AF-PMSG con rotor interno,
- Máquinas multidiscos.

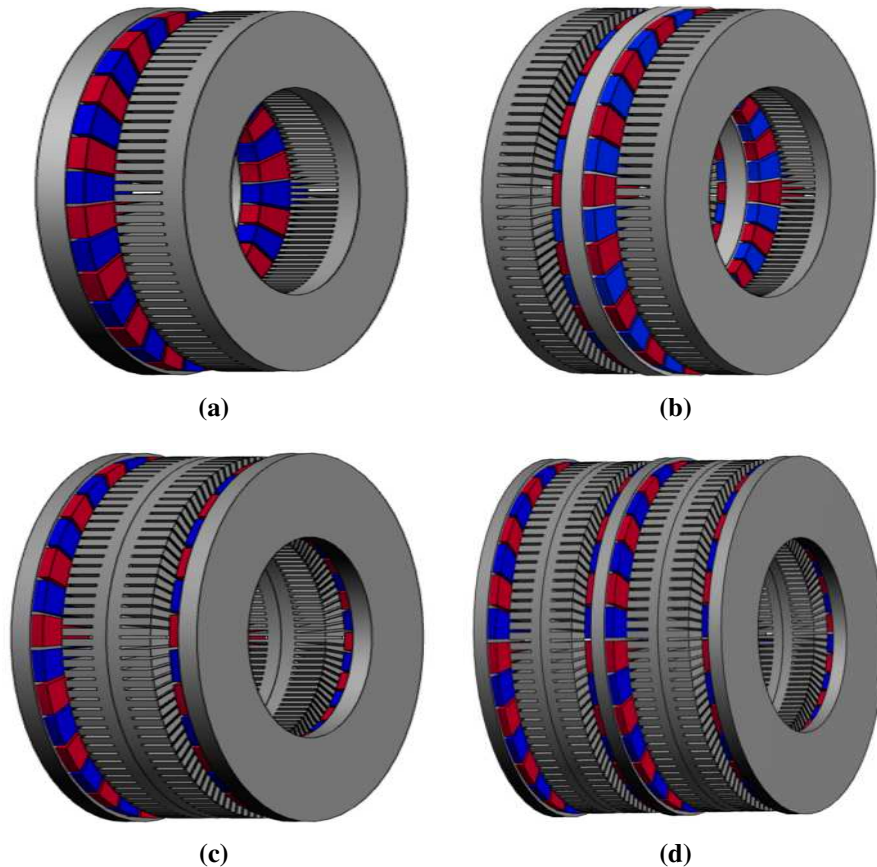


Figura 2.10. Topologías de AF-PMSG's. a) Una cara, b) doble cara (rotor interno), c) doble cara (estator interno), c) multidisco.

Las topologías mostradas en la Figura 2.10b y c, son las más empleadas en el sector eólico donde, en la fig. 2.10c, al tener el estator entre los dos rotores, la remoción de calor es mucho más difícil. Sin embargo, en la fig. 2.10b donde se muestra un generador de Campo Axial con Rotor Interno-Ranurado (AFIR-S), los estatores que producen calor están separados y en el exterior donde la eliminación de calor se realiza más fácilmente. Para generadores de baja potencia la topología AFIR-S requiere de un sistema de enfriamiento en el generador, por ello, en este proyecto de tesis se analizará esta topología.

2.5.2 Análisis del circuito equivalente de la topología de diseño

La topología de Campo Axial con Rotor Interno-Ranurado (AFIR-S) mostrada en la Figura 2.11, está compuesta por dos estatores y un rotor interno. Su complejidad se debe a la presencia de dos entrehierros, las dimensiones cambiantes con radio y al hecho de que el par se produce en los radios continuos y no en un solo radio como en el RF-PMSG. En esta topología se supone que los devanados de los dos estatores están conectados en serie para maximizar la fuerza del yugo del estator.

En la Figura 2.11 el rotor está compuesto de imanes que se alternan en polaridad, separados por espaciadores no magnéticos (que podrían ser aire) y unidos a hierro ferromagnético. El estator está compuesto de hierro ferromagnético con ranuras que contienen los devanados.

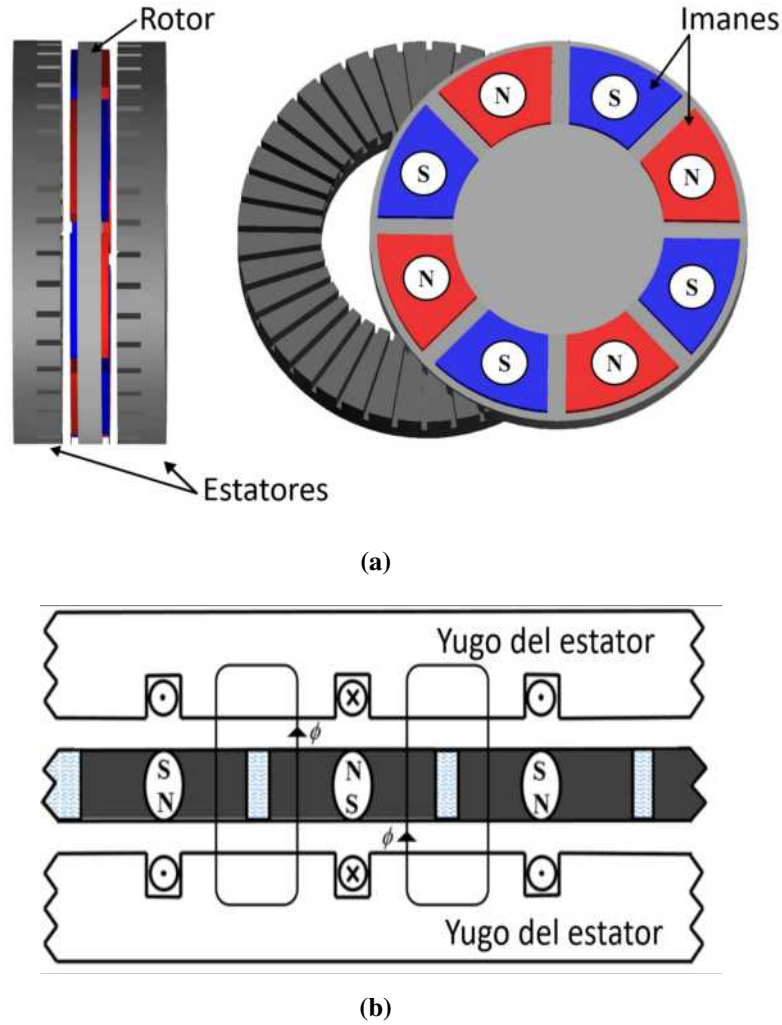


Figura 2.11. AF-PMSG de doble estator con rotor interno. a) Componentes básicos generales, b) estructura básica.

En la Figura 2.12 se muestra el circuito equivalente del AF-PMSG donde, R_r y R_s son las reluctancias del rotor y del estator, respectivamente, $2R_g$ es la reluctancia de la mitad del espacio de aire con compensación por el ranurado, $\phi/2$ es la fuente de flujo de la mitad de un imán, $2R_m$ es la reluctancia de la mitad de un imán con el espacio de aire inferior, R_{ml} es la reluctancia que modela la fuga de flujo de imán a imán, y $\phi/2$ es el flujo del entrehierro que fluye a través de la mitad del área transversal del entrehierro. Se supone que la reluctancia del espacio no magnético formado por el adhesivo que sujeta el imán a la parte posterior del rotor está incluida en R_r .

La Figura 2.13 muestra la simplificación del circuito magnético mostrado en la figura 2.12. En ambos circuitos magnéticos se tienen en cuenta todas las reluctancias. El circuito que se muestra en la Fig. 2.13a está formado por tres ramas paralelas: $4R_m$, $2R_{ml}$ y $2R_s$, este último en serie con $8R_g$. La figura 2.13b muestra un circuito magnético formado por dos reluctancias equivalentes paralelas. Las reluctancias R_r y R_s pueden ser despreciadas con respecto a R_g y R_m en cálculos posteriores.

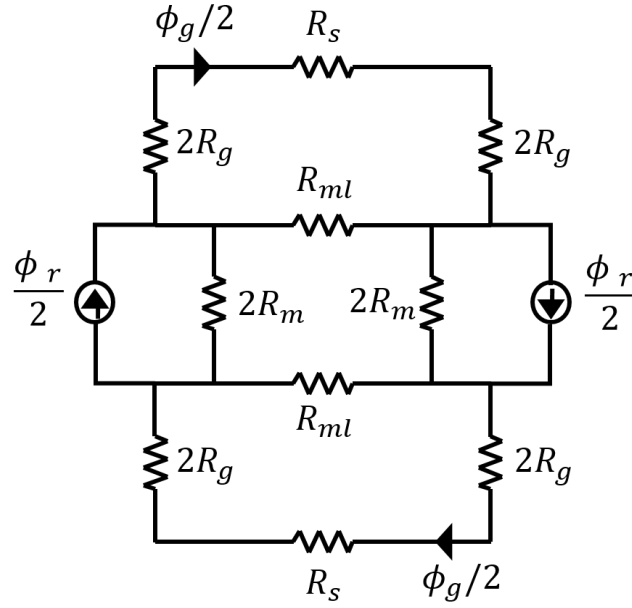


Figura 2.12. Circuito magnético equivalente del generador AFIR-S.

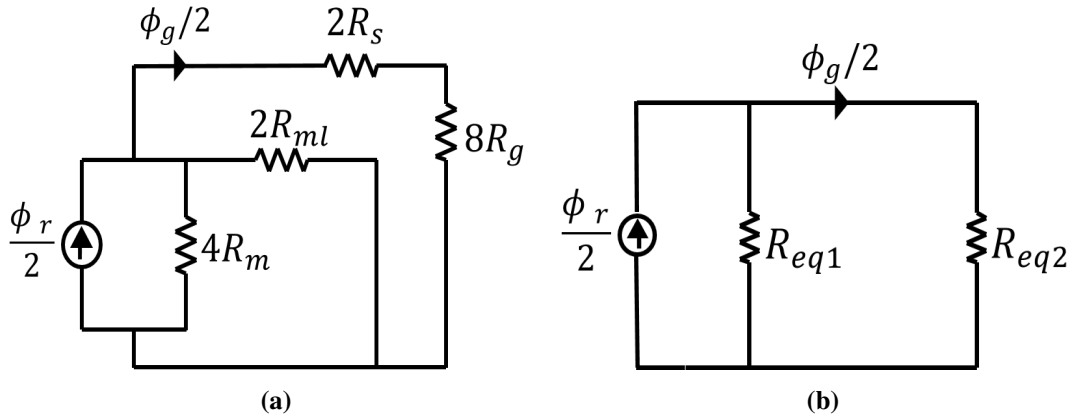


Figura 2.13. Simplificación del circuito magnético del AF-PMSG. a) Tres ramas en paralelo y una en serie, b) dos reluctancias equivalentes.

Las reluctancias equivalentes R_{eq1} y R_{eq2} , se pueden describir mediante las siguientes expresiones

$$R_{eq1} = \frac{(4R_m + R_r)(2R_{ml})}{4R_m + R_r + 2R_{ml}}, \quad (2.16)$$

y

$$R_{eq2} = 8R_g + 2R_s. \quad (2.17)$$

Por la división de flujo magnético, el flujo en el entrehierro está relacionado con el flujo del imán por:

$$\phi_g = \frac{R_{eq1}}{R_{eq1} + R_{eq2}} \phi_m \quad (2.18)$$

Para el cálculo de la reluctancia magnética R_m se emplea:

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_r \mu_0 A_m} \quad (2.19)$$

donde, el área de la sección transversal del imán A_m es

$$A_m = \frac{\pi}{N_m} (R_o^2 - R_i^2) - \tau_f (R_o - R_i) \quad (2.20)$$

de la cual, la fracción magnética para esta topología se denota con

$$\alpha_m = 1 - \frac{N_m \tau_f}{\pi (R_o - R_i)} \quad (2.21)$$

donde, τ_f es la separación entre imanes y se define como

$$\tau_f = (1 - \alpha_m) \tau_p. \quad (2.22)$$

La expresión para calcular la reluctancia entre imanes R_{ml} está dada por:

$$R_{ml} = \frac{\pi}{\mu_0 (R_o - R_i) \ln \left(1 + \frac{\pi g}{\tau_f} \right)} \quad (2.23)$$

2.6 Restricciones topológicas

El número de polos magnéticos N_m en el diseño del rotor está dado por relación de la frecuencia y las revoluciones de la máquina y se denota con la siguiente expresión:

$$N_m = \frac{120 F_e}{S_r} \quad (2.24)$$

donde:

F_e = frecuencia eléctrica (Hz),

S_r = velocidad angular (rpm).

La principal restricción de (2.24) es que debe ser un par entero, si es un número impar o una fracción, N_m debe modificarse para producir un número par entero. Después de esto, S_r se recalcula de acuerdo con el N_m corregido.

Como los imanes permanentes están formados por dos polos (norte, sur), los pares de polos se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$N_p = \frac{N_m}{2} \quad (2.25)$$

donde, N_p es el número de pares de polos.

La principal restricción en el diseño del estator es que el número total de ranuras del estator debe ser un número entero par de la cantidad de fases, es decir,

$$N_s = N_{sp}N_{ph} \quad (2.26)$$

donde, $N_{sp} \geq N_m$ es el número entero par de ranuras por fase. Esta restricción garantiza que cada fase tenga el mismo número de ranuras.

El número de ranuras por polo por fase está dado por

$$N_{spp} = \frac{N_s}{N_m N_{ph}} > 1 \text{ o } < 1 \quad (2.27)$$

donde, N_{spp} es un número real diferente de uno.

Al multiplicar (2.26) por N_{ph} , el número de ranuras por polos viene dado por:

$$N_{sm} = \frac{N_s}{N_m}. \quad (2.28)$$

2.7 Parámetros geométricos

En este apartado se denotan las ecuaciones para realizar el dimensionado geométrico del AF-PMSG tanto del rotor como de los estares de la máquina. Asimismo, se consideran parámetros de entrada como el radio interior y el radio exterior de la máquina (R_i , R_o , respectivamente) y otros parámetros necesarios para el diseño del AF-PMSG como se mostrará en apartados posteriores.

En las Figuras 2.15 y 2.16, se pueden observar los parámetros geométricos descritos en este capítulo a partir del desarrollo algorítmico de las ecuaciones que se describen en secciones posteriores.

2.7.1 Dimensionado de Imanes

Para el dimensionado de los imanes se consideró el punto de máxima energía BH_{max} , esto con la finalidad de minimizar el peso y el volumen del generador. El volumen de imanes para el diseño del AF-PMSG se obtiene mediante

$$V_m = \frac{T_{em}}{BH_{max}N_m} \quad (2.29)$$

donde:

T_m = torque mecánico (Nm),

2. Análisis del Circuito Magnético del AF-PMSG

BH_{max} = máximo producto de energía del imán (kJ/m^3),
 N_m = número de pares de polos de la máquina.

El Torque mecánico T_m de la máquina esta dado por

$$T_m = \frac{P_{in}}{\omega_m}, \quad (2.30)$$

donde:

P_{in} = potencia de entrada que proveniente del aerogenerador (W),
 ω_m = velocidad mecánica de entrada (rad/s).

Las expresiones que definen a P_{in} y a ω_m son:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}, \quad (2.31)$$

y

$$\omega_m = \frac{2\pi S_r}{60} = \frac{2\pi Fe}{Nm}, \quad (2.32)$$

donde:

η = eficiencia del AF-PMSG (%),
 P_{out} = potencia de salida del generador (W),

Las normas internacionales como NEMA MG 1-2009 y IEC 60034-30-1 recomiendan que para una potencia de 10 kW la $\eta > 87,5\%$ [32, 33] y una eficiencia premium de acuerdo a la IEC 60034-31 de $\eta \approx 93,4\%$ [34].

Para calcula la longitud del espesor del imán, se emplea

$$l_m = \frac{V_m}{A_m} \quad (2.33)$$

donde, A_m es el área del imán calculada mediante (2.20).

Los pasos del polo magnético en los radios interno y externo se obtienen con las expresiones que se muestran a continuación:

$$\tau_{pi} = R_i \theta_p \quad (2.34)$$

$$\tau_{po} = R_o \theta_p \quad (2.35)$$

donde:

θ_p = paso angular del polo (rad).

Los subíndices "i" y "o" denotan los radios interno y externo, respectivamente, como se muestra en la Fig.2.14.

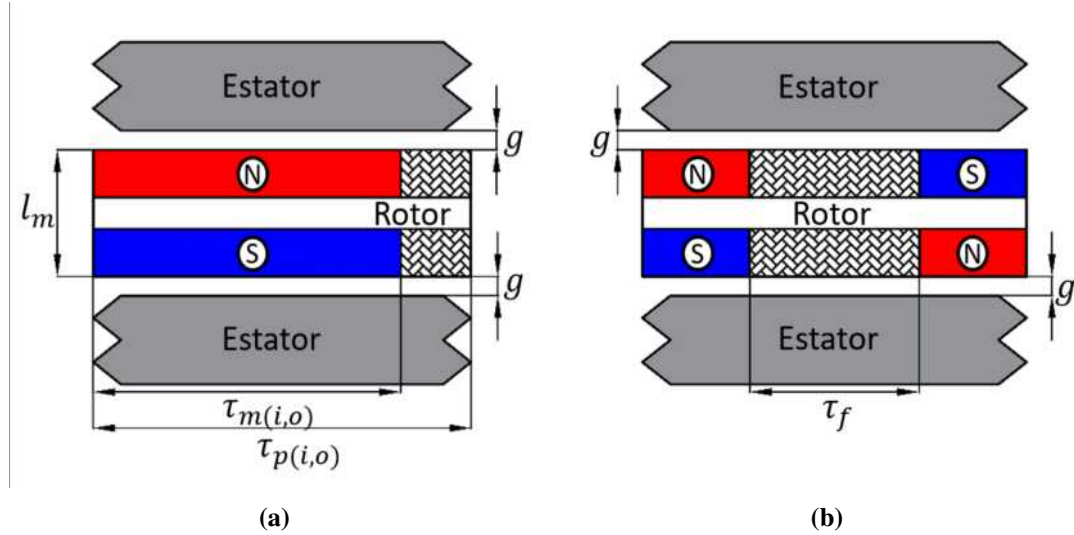


Figura 2.14. Parámetros magnéticos. a) Geometría, b) espacio entre imanes.

2.7.2 Dimensionado de ranura

Los pasos de bobina asociados a los pasos de polos se definen con las siguientes expresiones

$$\tau_{ci} = \alpha_{cp} \tau_{pi} \quad (2.36)$$

$$\tau_{co} = \alpha_{cp} \tau_{po} \quad (2.37)$$

la fracción bobina-polo α_{cp} está definida por la expresión:

$$\alpha_{cp} = \frac{\tau_c}{\tau_p} = \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}} \quad (2.38)$$

donde, $\text{int}(\cdot)$ devuelve la parte entera de su argumento. Como resultado de esta relación, el flujo máximo vinculado a la bobina desde el imán se reduce simplemente porque se reduce el área de la bobina neta expuesta a la densidad de flujo del espacio de aire.

Los intervalos de ranura en los radios interno y externo son

$$\tau_{si} = R_i \theta_s \quad (2.39)$$

$$\tau_{so} = R_o \theta_s \quad (2.40)$$

donde, θ_s es el paso angular de la ranura y se obtiene mediante $\theta_s = 2\pi/N_s$

La profundidad total de la ranura, es la suma de las profundidad del zapato $d_1 + d_2$ más la profundidad de la ranura d_3 como se muestra en la siguiente expresión

$$d_s = d_1 + d_2 + d_3 \quad (2.41)$$

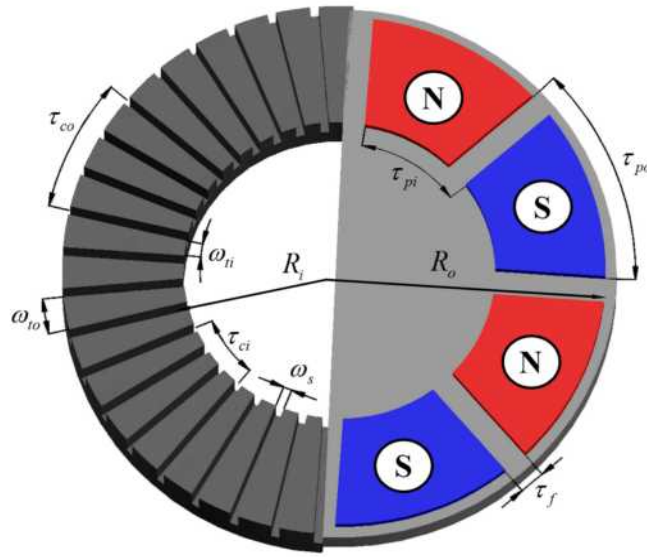


Figura 2.15. Definiciones geométricas del AF-PMSG.

donde, la profundidad de ranura del conductor d_3 , se obtiene a partir de

$$d_3 = d_s - \alpha_{sd}\omega_{tbi} \quad (2.42)$$

y, las profundidades del zapato con la expresión:

$$d_1 + d_2 = \alpha_{sd}\omega_{tbi} \quad (2.43)$$

donde, α_{sd} es la fracción de profundidad de ranura.

El área de sección transversal de la ranura disponible para conductores es rectangular en este caso y se puede expresar simplemente como

$$A_s = \omega_{sb}d_3 \quad (2.44)$$

donde, ω_{sb} es el ancho inferior de la ranura.

2.8 Parámetros magnéticos

Los parámetros desconocidos de diseño son, el ancho inferior de la ranura y el ancho de los dientes del estator. Para dar conocer estos parámetros, se hace uso de la solución del circuito magnético donde, la profundidad de la ranura se puede determinar al restringir la densidad de la corriente del conductor.

Los parámetros magnéticos se centran en mejorar el grosor de la parte posterior del yugo del estator y el ancho del diente del estator. Como el imán produce una densidad de flujo

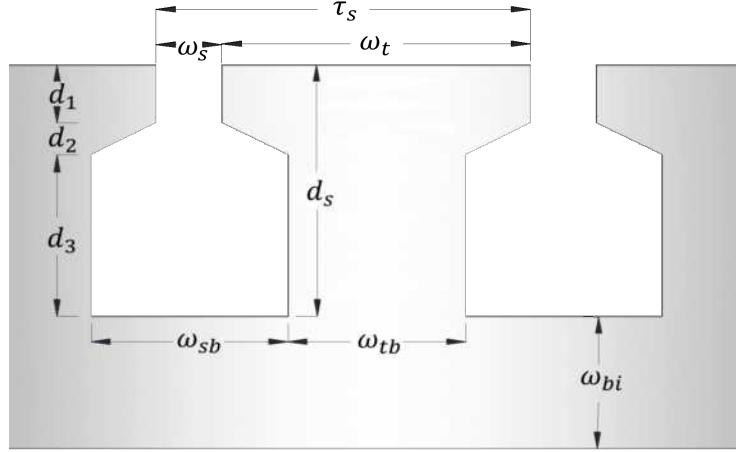


Figura 2.16. Geometría de ranura para la topología del AF-PMSG de doble estator.

constante sobre su superficie, el flujo total que cruza el espacio de aire aumenta linealmente con el radio debido al aumento del ancho del imán. Por lo tanto, la cantidad de flujo a ser soportada por el hierro posterior del estator aumenta con el radio.

El flujo que ingresa al estator desde un corte diferencial es $\phi(r) = B_g \theta_p r dr$. En el estator, este flujo se divide por la mitad en el hierro del yugo para regresar a través de imanes adyacentes. Por lo tanto, si B_{max} es la densidad de flujo máxima permitida en el yugo del estator, el flujo en este yugo es $\phi_{bi}(r) = B_{max} \omega_{bi} k_{st} dr$, donde, el espesor del yugo del estator requerido se obtiene con

$$\omega_{bi}(r) = \frac{B_g \theta_p r}{2 B_{max} k_{st}} \quad (2.45)$$

Se considera el factor k_{st} obtenido en 2.46 para calcular con precisión las densidades de flujo en materiales laminados. Los factores típicos de apilamiento varían de 0.5 a 0.95 [24].

$$K_{st} = \frac{A_{MaterialFerromagnetico}}{A_{Total}} \quad (2.46)$$

No es práctico construir estatores con un yugo de estator que aumenta linealmente. Por lo tanto, se elige un ancho de yugo constante igual al máximo de (2.45) mediante la expresión

$$\omega_{bi} = \frac{B_g \tau_{po}}{2 B_{max} k_{st}} \quad (2.47)$$

El ancho requerido en el fondo del diente es

$$\omega_{tb}(r) = \frac{2}{N_{sm}} \omega_{bi}(r) \quad (2.48)$$

del cual, el ancho de diente referido al fondo en el radio interno, se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$\omega_{tbi} = \frac{B_g \tau_{pi}}{N_{sm} B_{max} k_{st}} \quad (2.49)$$

Como el ancho de ranura es constante, la anchura del fondo del diente aumenta linealmente con el radio. Por lo tanto, aunque la anchura del diente es menor en el radio interno, la densidad de flujo en los dientes del estator es uniforme con respecto al radio. Es decir, los dientes estrechos en el radio interior no están más saturados que los dientes en el radio exterior. Además, dado que el grosor de la parte posterior del hierro del estator es más ancho que en el radio interior, la resistencia neta del acero en el radio interior es mucho menor que en el radio exterior.

El ancho inferior de la ranura, se obtiene a partir de

$$\omega_{sb} = \tau_{si} - \omega_{tbi}, \quad (2.50)$$

y la relación de aspecto de la ranura en el radio interior es denotada como se muestra a continuación:

$$\alpha_{si} = \frac{\omega_{sb}}{\omega_{tbi} + \omega_{sb}}. \quad (2.51)$$

2.9 Factores de corrección

El factor de distribución k_d y el factor de paso de polo k_p o la fracción de paso de la bobina α_{cp} , son parámetros importantes en el diseño del AF-PMSG debido a que tienen un efecto directo en la reducción de la densidad de flujo en el entrehierro B_g . Los factores k_d y α_{cp} proporcionan el grado de reducción de la fem inversa y la reducción del par electromagnético. Estos factores están dados por

$$k_d = \frac{\sin(N_{spp}\theta_{se}/2)}{N_{spp}\sin(N_{spp}\theta_{se}/2)} \quad (2.52)$$

y

$$k_p = \alpha_{cp} = \frac{\tau_c}{\tau_p} = \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}} = \frac{\theta_{ce}}{\pi} \quad (2.53)$$

donde:

N_{spp} = número de ranuras por polo por fase,

τ_c = paso de devanado (m),

τ_p = paso de polo (m).

El paso de ranura θ_{se} se obtiene con

$$\theta_{se} = \frac{\pi}{N_{sm}}, \quad (2.54)$$

y el paso de devanado como se muestra en (2.55). Ambas expresiones en radianes eléctricos.

$$\theta_{ce} = \pi\alpha_{cp} \quad (2.55)$$

Las Ecuaciones 2.54 y 2.54 son función de la fracción de inclinación de la bobina α_{cp} y el número de ranuras por polo N_{sm} .

La técnica de sesgo se utiliza para reducir los efectos no deseados del torque de tracción en el AF-PMSG [17, 35, 42]. Desafortunadamente, la principal desventaja del sesgo es la reducción del flujo total vinculado al devanado del estator. Además, el construir un generador con una cierta inclinación de los dientes del estator o de los imanes, complicaría la construcción de la máquina y aumentaría los costos considerablemente.

A partir de las expresiones anteriores, una forma de calcular el factor de sesgo es mediante

$$k_s = \frac{1 - \theta_{se}}{2\pi}. \quad (2.56)$$

2.10 Parámetros de diseño fijos

Para el desarrollo de la herramienta de diseño analítico del AF-PMSG, es indispensable considerar ciertos parámetros de entrada que están en función de los requerimientos de diseño de la máquina y las propiedades de los materiales para su fabricación. En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros fijos que se consideraron para el diseño del AF-PMSG en este trabajo de tesis.

Los parámetros de los imanes, devanados, aceros del estator y rotor, se obtuvieron de diversas fuentes [53–57]. Estos materiales pueden ser reemplazados dependiendo de los requerimientos de diseño y los resultados obtenidos de las simulaciones de elementos finitos del generador en secciones posteriores. En el **Apéndice A** se pueden apreciar diversos tipos de materiales y sus propiedades características.

Tabla 2.1. Parámetros fijos para el diseño del AF-PMSG.

Parámetro	Valor
P_{out} : Potencia de salida nominal (W),	10,000
S_r : Velocidad nominal (rpm),	225
E_{rms} : Voltaje medio cuadrático (V),	250
F_e : Frecuencia (Hz),	60
Restricciones topológicas	
N_{ph} : Número de fases,	3
Parámetros físicos	
g : Longitud del entrehierro (m),	1.00E-03
R_o : Diámetro exterior (m),	0.300
R_i : Diámetro interior (m),	0.173
τ_f : Espacio entre imanes (m),	0.009

Imanes	
Tipo de imán	NdFeB N35
Densidad del imán (kg/m^3),	7500
B_r : Densidad de flujo residual (T)	1.21
H_c : Fuerza coercitiva (kA/m)	915
H_{ci} : Fuerza coercitiva intrínseca (kA/m)	955
B_{Hmax} : Producto energético (kJ/m^3),	270
T_{max} : Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	80
T_{curie} : ($^{\circ}C$)	310
μ_R : Permeabilidad relativa del imán,	1.05
Devanados	
Densidad del conductor (kg/m^3),	8960
r_{cu} : Resistividad del conductor (W/m),	1.673E-08
b : Coeficiente de temperatura,	0.004041
k_{cp} : Factor de empaquetamiento del conductor,	0.5
Tipo de bobinado	Una o doble capa
Acero del estator y rotor	
Tipo de acero,	M36_24G
r_{bi} : Densidad de la masa del acero (kg/m^3),	7650
B_{max} : Densidad del acero (T),	2.0088
K_{st} : Factor de apilamiento de laminación,	0.95
K_h : Coeficiente de pérdida del núcleo,	211.6
K_e : Exceso de pérdida del núcleo,	1.51
K_c : Coeficiente de Carter,	1.14
μ_r : Permeabilidad Relativa del acero,	28697
Parámetros del zapato	
α_s : Fracción de ranura,	0.25
α_{sd} : Fracción de profundidad del zapato.	0.5

2.11 Resultados

Con el algoritmo desarrollado en MATLAB[®] se realizó el dimensionado geométrico del generador a partir de las ecuaciones descritas en este capítulo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.2 donde, se observan las restricciones topológicas, la geometría del rotor y estator y el dimensionado de imanes del AF-PMSG.

Esta primer diseño, se realizó considerando un generador de 32 polos y 96 ranuras con un $N_{spp} = 1$. La finalidad de este diseño es exclusivamente corroborar el adecuado funcionamiento de la herramienta de diseño en lo que respecta al cálculo de la geometría del AF-PMSG.

En el **Apéndice B** se muestran los resultados geométricos de dos diseños adicionales donde se considera un generador de 32 polos y 72 ranuras y otro diseño de generador con 32 polos y 108 ranuras. Estos generadores serán de gran utilidad en capítulos posteriores para la selección del diseño final del AF-PMSG.

Tabla 2.2. Resultados de parámetros topológicos, geometría y dimensionado de imanes del AF-PMSG.

Parámetros Topológicos			
$N_m:$	32	$N_{sp}:$	32
$N_s:$	96	$N_{spp}:$	1
Geometria			
$R_i: (m),$	0.1443	$R_o: (m),$	0.5000
$\alpha_m:$	0.7500	$C_f:$	0.8565
$\tau_{pi}: (m),$	0.0283	$\Theta_p: (rads),$	0.1963
$\tau_{po}: (m),$	0.0491	$\Theta_s: (rads),$	0.0654
$\tau_{si}: (m),$	0.0094	$\Theta_{se}: (erads)$	1.0472
$\tau_{so}: (m)$	0.0163	$V_g: (m^3),$	8.25E-06
$\tau_{ci}: (m),$	0.0283	$\tau_{co}: (m),$	0.0491
$A_g: (m^2),$	0.0036	$\omega_{sb}: (m),$	0.0064
$\omega_{bi}: (m),$	0.0118	$\omega_{tbi}: (m),$	0.003
$A_s: (m),$	1.66E-05	$\omega_{to}: (m),$	0.0136
$\omega_{ti}: (m),$	0.0066	$d_1: (m),$	0.0008
$\omega_s: (m),$	0.0028	$d_2: (m),$	0.0008
$\alpha_{si}:$	0.6782	$d_3: (m),$	0.0259
$\alpha_{cp}:$	1	$d_s: (m),$	0.0275
Dimensionado de Imanes			
$A_m: (m^2),$	0.0031	$l_m: (mm),$	0.0159
$PC:$	9.2903	$MAR:$	0.158

Empleando los resultados en la Tabla 2.2 y del **Apéndice B** se comprobó que los valores obtenidos con el algoritmo de diseño, coinciden con el CAD 3D del AF-PMSG. De lo contrario, si se presentara un error en los cálculos del diseño geométrico, el modelo 3D no podría realizarse por los errores en las mediciones de los componentes del generador.

2.12 Conclusiones

A partir del análisis del circuito magnético del AF-PMSG abordado en este capítulo, se desarrolló la metodología para el cálculo de los parámetros geométricos y de dimensionamiento de imanes considerando su punto de máximo de operación.

Dado que uno de los objetivos de la manufactura de AF-PMSG's consiste en minimizar los volúmenes y/o pesos para minimizar costos. Se realizaron variaciones en los parámetros de entrada encontrándose los diseños más óptimos con diámetros externos entre 0.5 m y 0.65 m.

Parámetros eléctricos

3.1 Introducción

Los parámetros eléctricos del AF-PMSG incluyen resistencias, inductancias, fuerza electromotriz fem y corrientes. Todos estos parámetros están en función de los devanados ubicados en los estatores de la máquina. Se supone que, independientemente del método de bobinado que se utilice, todas las bobinas que forman un bobinado de fase están conectadas en serie. Esta suposición maximiza la fem y minimiza la corriente de fase para producir el par nominal requerido.

3.2 Número de conductores en serie y paralelo

El número de conductores en serie por ranura, requerido para producir un Voltaje máximo inducido E_{max} es obtenido a partir de:

$$n_s = int \left(\frac{E_{max}}{N_m k_d k_p k_s B_g N_{spp} (R_o^2 - R_i^2) \omega_m} \right) \quad (3.1)$$

donde:

B_g = Densidad de flujo magnético en el entrehierro (T),

k_d = factor de distribución,

k_p = factor de paso de polo,

k_s = factor de sesgo,

N_{spp} = número de ranuras por polo por fase,

ω_m = velocidad de diseño en rad/s .

El número de conductores en paralelo de obtiene a partir de:

$$n_p = int \left(\frac{A_c}{n_s A_{c1}} \right) \quad (3.2)$$

donde:

A_c = área del conductor (m^2),

A_{c1} = área de un solo conductor (m^2),
 n_s = número de conductores en serie.

A_{c1} se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$A_{c1} = \frac{\pi d_{cu}^2}{4} \quad (3.3)$$

donde:

d_{cu} = diámetro del conductor (m).

Cabe mencionar que de (3.1) y (3.2), $int(\cdot)$ devuelve la parte entera de n_s y n_p , debido a que el número de vueltas en serie y en paralelo debe ser un número entero.

El voltaje máximo inducido, se obtiene a partir de:

$$E_{max} = \frac{T_{in}}{i} = N_m k_d k_p k_s B_g N_{spp} n_s (R_o^2 - R_i^2) \omega_m. \quad (3.4)$$

3.3 Cálculo de resistencias

De forma general, la resistencia se puede describir mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{\rho l_c}{A_c} \quad (3.5)$$

donde:

ρ = resistividad del conductor (kg/m^3),

l_c = longitud del conductor (m),

A_c = área del conductor (m^2).

La resistencia de ranura que contiene cierta cantidad de conductores n_s conectados en serie, se obtiene como se muestra en 3.6.

$$R_s = \frac{\rho n_s^2 (R_o - R_i)}{k_{cp} A_s} \quad (3.6)$$

donde:

n_s = número de conductores en serie,

k_{cp} = factor de empaquetamiento del conductor.

Dado que la longitud de fin de vuelta es diferente en los radios interno y externo, la resistencia de fin de vuelta por ranura es el promedio en ambos radios.

$$R_e = \frac{\rho n_s^2 \pi (\tau_{co} + \tau_{ci})}{4 k_{cp} A_s} \quad (3.7)$$

Dado que esta topología de AF-PMSG posee dos estatores, cada uno con cierta cantidad de números de ranuras por fase N_{sp} , la resistencia de fase esta dada por:

$$R_{ph} = 2N_{sp} (R_s + R_e) \quad (3.8)$$

3.4 Cálculo de corrientes

La densidad total de corriente, la corriente de fase y la densidad del conductor requeridas son obtenidas mediante las siguientes expresiones:

La corriente de la ranura

$$I_s = \frac{T}{N_m k_d k_p k_s B_g N_{spp} (R_o^2 - R_i^2)} \quad (3.9)$$

se distribuye entre n_s conductores que ocupan el área de sección transversal A_s de la ranura dada por 2.44. Parte de esta área está ocupada por el aislamiento del conductor, los inevitables espacios entre los conductores de ranura y el aislamiento adicional colocado alrededor de la periferia de la ranura, llamados revestimientos de ranura. Esta fracción se tiene en cuenta al especificar un factor de empaquetamiento del conductor como:

$$k_{cp} = \frac{A_c}{A_s} \quad (3.10)$$

donde:

A_c = área de los conductores (m^2),

A_s = área de la ranura (m^2).

Normalmente, k_{cp} es menos del 50 por ciento, pero puede ser mayor en circunstancias especiales.

Tomando en cuenta lo anterior, la densidad de corriente de la ranura del conductor es:

$$J_c = \frac{I_s}{n_s n_p A_{c1}} \quad (3.11)$$

donde:

I_s = corriente de ranura (A),

n_p = número de conductores en paralelo,

n_s = número de conductores en serie,

A_{c1} = área de un solo conductor (m^2).

Si todas las fases de N_{ph} conducen corriente simultáneamente y la fem posterior es una onda cuadrada, la corriente de fase también es una onda cuadrada que tiene un valor pico y *rms*. Esta corriente de fase, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$I_{ph} = \frac{I_s}{N_{ph}n_s}. \quad (3.12)$$

3.5 Cálculo de inductancia

3.5.1 Inductancias de fase

La inductancia de fase determina la tasa máxima de cambio en la corriente de fase, ya que $di/dt = V_{ph}/L$, donde, V_{ph} es el voltaje de fase.

El cálculo de esta inductancia requiere un poco más de trabajo que la resistencia porque la inductancia del entrehierro está influenciada por los dos estatores y dos entrehierros. La inductancia de fase (L_{ph}) del AF-PMMSG, está conformada de tres componentes como se muestra en (3.13)

$$L_{ph} = 2N_{sp} (L_g + L_s + L_e) \quad (3.13)$$

donde:

L_g = inductancia en el entrehierro (H),

L_s = inductancia de ranura (H),

L_e = inductancia de fin de vuelta (H).

Para el cálculo de la inductancia en el entrehierro L_g , se considera el número efectivo de vueltas en serie del conductor igual a $2n_s$, por tanto, la L_g se calcula mediante:

$$L_g = \frac{(2n_s)^2 \mu_R \mu_0 A_c k_d}{8(l_m + 2\mu_R k_{cg})} \quad (3.14)$$

Debido a que el área de la sección transversal del devanado no es rectangular A_c se definiría como:

$$A_c = \theta_c (R_o - R_i/2) \quad (3.15)$$

donde:

θ_c = paso angular de la bobina en radianes mecánicos definida por $\theta_c = \alpha_{cp} \theta_p$.

Sustituyendo lo anterior en (3.14) y dividiendo entre 4, la inductancia del entrehierro esta expresada por:

$$L_g = \frac{n_s^2 \mu_R \mu_0 \theta_c (R_o - R_i/2) k_d}{4(l_m + 2\mu_R k_{cg})} \quad (3.16)$$

La inductancia de fin de vuelta por ranura, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$L_e = \frac{n_s^2 \mu_0 \tau_{co}}{16} \ln \left(\frac{\tau_{co}^2 \pi}{4A_s} \right) + \frac{n_s^2 \mu_0 \tau_{ci}}{16} \ln \left(\frac{\tau_{ci}^2 \pi}{4A_s} \right). \quad (3.17)$$

3.5.2 Inductancias de dispersión de la ranura

Esta inductancia, es debida al flujo que circula de un diente al contiguo a través de la ranura. Esta inductancia depende de la geometría de la ranura y la disposición del bobinado. De modo que cuanto menor sea la anchura de la ranura, mayor será esta inductancia [39].

Las inductancias asociadas a cada trayectoria i , pueden ser denotadas por $L_{s,i}$. Las primeras tres permeancias son basadas en el análisis de la trayectoria del flujo como un bloque rectangular en el que el campo es uniforme sobre una sección transversal. Esto, se muestra como:

$$L_{s,1} = \frac{2(R_o - R_i) g \mu_0}{\omega_s + \left(\frac{\omega_{to} + \omega_{ti}}{2}\right)} \quad (3.18)$$

$$L_{s,2} = \frac{(R_o - R_i)(d_1 + d_2) \mu_0}{\omega_s} \quad (3.19)$$

$$L_{s,3} = \frac{(R_o - R_i)(d_3 - h_w) \mu_0}{\omega_{sb}} \quad (3.20)$$

La inductancia de la trayectoria 4 se calcula utilizando un enfoque basado en la energía, ya que no todo el flujo producido enlaza todo el devanado. La inductancia de la trayectoria 4 esta dada por:

$$L_{s,4} = \frac{\mu_0 (R_o - R_i) h_w}{3\omega_{sb}} \quad (3.21)$$

En la Figura 3.1 se pueden observar las trayectorias del flujo para el cálculo de las cuatro primeras inductancias de dispersión.

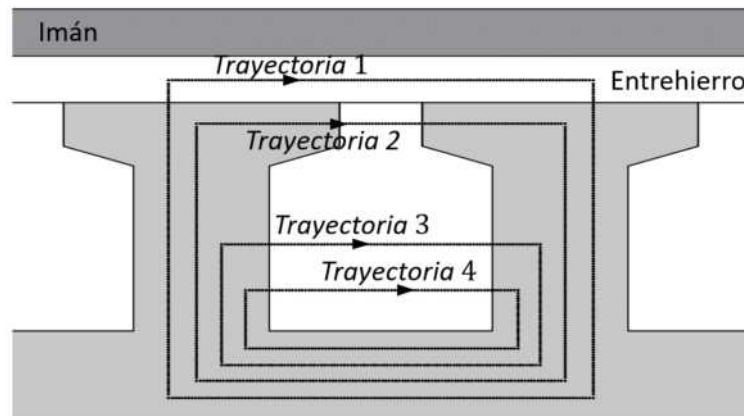


Figura 3.1. Trayectoria de las primeras inductancias de dispersión de la ranura.

Para las trayectorias 5, 6 y 7 se consideran las variaciones de las dimensiones del ancho del diente y el ancho del zapato, como consecuencia de las dimensiones cambiantes a lo largo del radio del estator. Esto se puede observar en la Figura 3.3, donde se aprecia una vista superior de la geometría de la ranura. Para el calculo de estas tres últimas trayectorias, se emplean las siguientes ecuaciones.

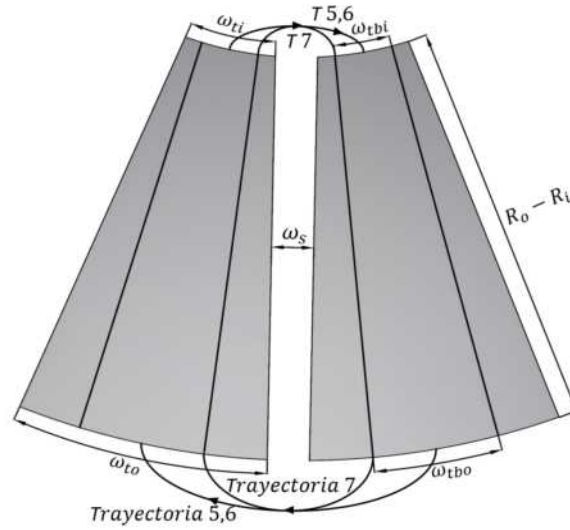


Figura 3.2. Inductancias de dispersión de las trayectorias 5, 6 y 7 (vista superior).

$$L_{s,5} = \frac{\mu_0 h_w}{3\pi} \log \left(1 + \frac{\pi \left(\frac{\omega_{tbo} - \omega_{tbi}}{2} \right)}{\omega_{sb}} \right) \quad (3.22)$$

$$L_{s,6} = \frac{\mu_0}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi \left(\frac{\omega_{tbo} - \omega_{tbi}}{2} \right)}{\omega_{sb}} \right) (d_3 - h_w) \quad (3.23)$$

$$L_{s,7} = \frac{\mu_0}{\pi} \log \left(1 + \frac{\pi \left(\frac{\omega_{to} - \omega_{ti}}{2} \right)}{\omega_{sb}} \right) \quad (3.24)$$

En la figura 3.2 se puede apreciar una vista frontal de estas tres trayectorias.

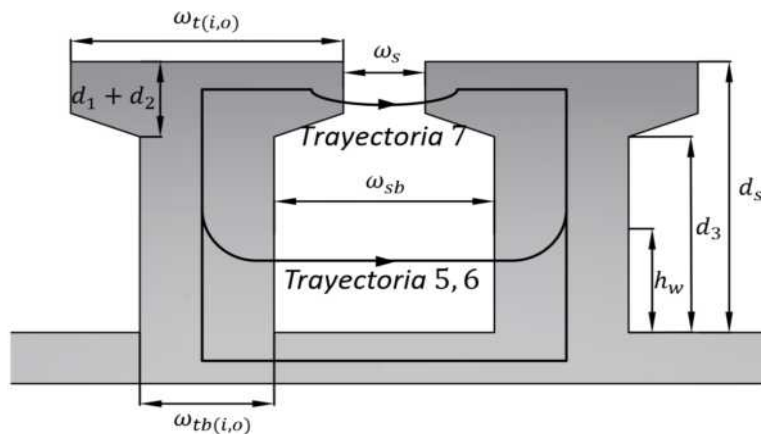


Figura 3.3. Inductancias de dispersión de las trayectorias 5, 6 y 7 (vista frontal).

Tomando en cuenta lo anterior, la inductancia de dispersión total de la ranura L_s se obtiene mediante la suma de las inductancias parciales:

$$L_s = L_{s,1} + L_{s,2} + L_{s,3} + L_{s,4} + L_{s,5} + L_{s,6} + L_{s,7}. \quad (3.25)$$

3.6 Cálculo de devanados

3.6.1 Número de simetrías del devanado

El número de simetrías de devanado, indica la cantidad de simetrías de rotación en el diseño del devanado y también la periodicidad de la máquina [59].

Este número de simetrías, se calcula como el Máximo Común Divisor (MCD) entre el número de ranuras y el número de polos del AF-PMSG:

$$MCD(N_s, N_m) \quad (3.26)$$

Como para el caso de los diseños realizados en este trabajo de tesis, se implementó la calculadora de emetor, la inversa de la cantidad de simetrías obtenidas mediante (3.26) es la fracción de la máquina que se debe modelar en un programa de elementos finitos. Para el diseño del AF-PMSG esto se considera de suma importancia debido al amplio tiempo de simulación 3D de la máquina. El contar con una mayor cantidad de simetrías del generador, implica que sea menor la fracción a analizar en elemento finito y por tanto, menor tiempo de simulación.

3.6.2 Selección del tipo de devanado

Número de ranuras por polo por fase N_{spp}

El número de ranuras por polo por fase determina cómo se organiza el diseño del devanado. También proporciona información sobre el factor de bobinado y sus armónicos.

Se pueden ubicar tres casos para el tipo de devanado en función del N_{spp}

- Si el N_{spp} es un entero, el devanado se denomina devanado de ranura entera.
- Si el N_{spp} es fraccional y superior a 1, el bobinado se denomina bobinado de ranura fraccional.
- Si el N_{spp} es fraccional e inferior a 1, el devanado se denomina devanado concentrado.

3.6.3 Distorsión Armónica Total (THD)

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente

deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas [].

La Distorsión Armónica Total (THD), es la cantidad de energía contenida en todas aquellas componentes de una señal que difieren de la frecuencia fundamental. Es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en ondas de corriente y voltaje [70]. La THD se obtiene mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), mediante la siguiente expresión.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h^2}^H V_h^2}}{V_t} \times 100 \quad (3.27)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h^2}^H I_h^2}}{I_t} \times 100 \quad (3.28)$$

Para seleccionar la fracción magnética óptima se analizó la Distorsión Armónica Total (THD) de acuerdo a estándares internacionales donde, la IEEE recomienda en IEEE 519-2014 [70] que los límites de voltaje de distorsión armónica para el Punto de Común Acoplamiento (PPC) para $V \leq 1.0 \text{ kV}$ debe ser $\leq 5\%$ para armónicos individuales y $\leq 8\%$ para la distorsión armónica total (THD) tal y como se muestra en la Tabla 3.1 donde, se aprecian de igual manera el THD para voltajes de PCC de diversas magnitudes.

Tabla 3.1. THD para el Punto de Común Acoplamiento.

Voltaje para PCC	Armónico individual (%)	THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} < V \leq 69.0 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69.0 \text{ kV} < V \leq 161.0 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161.0 < V$	1.0	1.5

3.7 Cálculo de volúmenes y masas del AF-PMSG

El volumen del estator V_{st} puede obtenerse a partir de

$$V_{st} = [\pi(R_o^2 - R_i^2) - N_s A_s] L K_{st} \quad (3.29)$$

donde:

N_s = Número de ranuras,

A_s = área de la sección transversal de la ranura,

L = longitud axial,

K_{st} = Factor de apilamiento.

Para obtener la masa del estator, se multiplica el volumen obtenido en (3.29) por la densidad del material a emplearse para la construcción del estator. Esto se puede denotar

mediante:

$$W_{st} = V_{st}\rho \quad (3.30)$$

El volumen de los imanes se calcula a partir de (2.29) y la masa de los imanes se calcula de igual manera a partir de la multiplicación del volumen de los imanes con la densidad del tipo de imanes a implementarse.

$$W_m = V_m\rho_m \quad (3.31)$$

La masa del conductor W_{cu} se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W_{cu} = (\pi(R_o^2 - R_i^2)(\omega_{bi} + d_s) - N_s A_s (R_o - R_i)) 2k_{st} \quad (3.32)$$

mientras que el volumen se obtiene a partir de la división de la masa respecto a la densidad del conductor. Esto se muestra como:

$$V_{cu} = \frac{W_{cu}}{\rho_{cu}} \quad (3.33)$$

Para calcular el volumen del disco del rotor de la máquina, se emplea la siguiente expresión.

$$V_{ro} = (\pi(R_o l_m)^2 - R_i^2) 0,5 l_m \quad (3.34)$$

La masa del rotor se calcula mediante la multiplicación del volumen con la densidad del material del disco.

$$W_{ro} = V_{ro}\rho_{ro} \quad (3.35)$$

El volumen total V_t del AF-PMSG es igual a la suma de los volúmenes de sus componentes previamente calculados.

$$V_t = V_{st} + V_m + V_{cu} + V_{ro} \quad (3.36)$$

Por otra parte, de igual manera, la masa total W_t del AF-PMSG, será igual a la suma de la masa de cada uno de sus componentes.

$$W_t = W_{st} + W_m + W_{cu} + W_{ro} \quad (3.37)$$

3.8 Rendimiento del AF-PMSG

3.8.1 Pérdidas

Las pérdidas en máquinas eléctricas se pueden dividir en los siguientes componentes:

- Pérdidas del cobre,

- Pérdidas de hierro o del núcleo,
- Pérdidas por fricción o miscelaneas,
- Pérdidas extras o adicionales.

Si bien esta división es algo imprecisa, se usa ampliamente en la literatura [60–62, 64].

Pérdidas del cobre

La mayoría de las pérdidas que se producen en una máquina eléctrica son en realidad pérdidas por resistencia [65]. En la práctica, sin embargo, el término se utiliza para denotar las pérdidas óhmicas en los conductores de la máquina [60, 62]. En las máquinas síncronas, el devanado del estator es el contribuyente más importante [65].

Para este generador, las pérdidas resistivas o pérdidas óhmicas de los conductores, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$P_{cu} = N_{ph} I_{ph}^2 R_{ph} \quad (3.38)$$

donde:

- N_{ph} = número de fases,
- I_{ph} = corriente de fase (A),
- R_{ph} = Resistencia de fase (Ω).

Pérdidas del núcleo

Las pérdidas de hierro son pérdidas de energía que tienen lugar en las partes de hierro magnéticamente activas de la máquina debido a la densidad de flujo variable en el tiempo [65, 67, 68].

Para calcular estas pérdidas, se emplea la siguiente expresión [67, 68]:

$$P_{cl} = k_h B_m^a f + k_e B_m^2 f^2 + k_a B_m^{3/2} f^{3/2} \quad (3.39)$$

donde:

- k_h = coeficiente de pérdidas por histéresis,
- k_e = coeficiente de pérdidas clásicas por corrientes eddy,
- k_a = coeficiente de pérdidas adicionales por corrientes eddy.

Pérdidas mecánicas

Las pérdidas mecánicas abarcan, como su nombre lo indica, las pérdidas debidas a la fricción en los cojinetes, la resistencia del aire en las piezas giratorias y los ventiladores de refrigeración, y otras pérdidas de naturaleza inherentemente mecánica [66].

Su magnitud de este tipo de pérdidas dependen de la naturaleza de la máquina en cuestión. En este caso específico, al ser una máquina diseñada para bajas rpm, estas pérdidas

se consideran como un 1 % de la potencia de entrada de la máquina descrita mediante la siguiente expresión.

$$P_s = 0,01P_{in} = 0,01T_m\omega_m \quad (3.40)$$

3.8.2 Eficiencia (η)

La eficiencia del AF-PMSG es definida de forma directa por:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{T_m\omega_m - P_{cu} - P_{cl} - P_s}{T_m\omega_m} 100 = \frac{\sqrt{3}V_{ph}I_{ph}}{T_m\omega_m} \quad (3.41)$$

donde:

$T_{promedio}$ = torque mecánico (Nm),

ω_m = velocidad mecánica (rad/s),

P_{in} = potencia de entrada (W),

P_{out} = potencia de salida (W).

El cálculo de la potencia de entrada y salida de la máquina se realizan mediante:

$$P_{in} = T_m\omega_m \quad (3.42)$$

y

$$P_{out} = T_m\omega_m - P_{cu} - P_{cl} - P_s = \sqrt{3}V_{ph}I_{ph} \quad (3.43)$$

3.8.3 Densidad de calor del AF-PMSG

Sin desarrollar un modelo térmico para el generador o realizar un análisis térmico, es al menos beneficioso identificar la densidad de calor que sale de los conductores de la ranura y pasa hacia los dientes y el yugo del estator.

Usando $(R_o - R_i)(2d_3 + \omega_{sb})$ como el área de la ranura en contacto con los conductores, la densidad de calor en W/m^2 que sale de los conductores de la ranura es definida mediante la siguiente expresión.

$$q_s = \frac{P_{cu}}{(R_o - R_i)(2h + \omega_{sb})N_s} \quad (3.44)$$

Finalmente, al sumar las pérdidas del cobre y del núcleo y dividir las por el área periférica del estator se obtiene una estimación de la densidad de calor máxima en el estator. Esto se expresa como:

$$q_{st} = \frac{P_{cu} + P_{cl}}{2\pi(R_o^2 - R_i^2)}. \quad (3.45)$$

Si bien las Ecuaciones (3.44) y (3.45) permiten identificar las densidades de calor en la ranura y en el estator, es necesario el realizar un análisis térmico del generador mediante el análisis de elementos finitos.

3.8.4 Torque de tracción

El valor del torque en vacío depende de la posición, de acuerdo con la ubicación de los dientes del estator en relación con los imanes permanentes, ya que los imanes buscan constantemente una posición de mínima reluctancia [45].

En términos de la razón de cambio de la reluctancia con respecto a la posición del rotor, el torque se expresa mediante:

$$T_{cog} = -\frac{1}{2}\phi_g^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (3.46)$$

Para la reducción del torque de tracción, existen diferentes métodos. Entre los más destacados se encuentran [45–50]:

- El número de ranuras por polo por fase (N_{spp}) debe ser fraccionario ($N_{spp} < 1$ o $N_{spp} > 1$) debido a que si es de ranura entera ($N_{spp} = 1$), se genera una mayor fuerza de tracción por que cada borde de cada polo se alinea con las aberturas de las ranuras en el estator.
- Inclinación de los imanes en el rotor de la máquina, considerando un factor de sesgo (k_s).
- Inclinación de los devanados del estator igualmente por un factor de sesgo (k_s).
- Minimizar la separación entre los zapatos del estator ω_s .
- Variar la fracción magnética α_m .
- Disminuir el espesor del imán l_m .

Emplear un sesgo complica la fase de construcción de la máquina por la inclinación que debe realizarse en los devanados o imanes aumentando los costos del proceso de fabricación del generador. En este proyecto de tesis, se optó por analizar tres topologías de diseño con $N_{spp} = 1$, $N_{spp} < 1$ y $N_{spp} > 1$ a fin de analizar el torque y disminuirlo.

3.8.5 Torque de ondulación

El torque de ondulación se genera principalmente por la interacción de la fuerza magnetomotriz de la corriente del estator y la distribución del flujo magnético en el rotor de las máquinas con imanes permanentes en la superficie [51]. En otras palabras, es el torque electromagnético a plena carga ante condiciones nominales [45]. Para obtener el porcentaje de torque de ondulación se emplea la siguiente expresión:

$$T_{rizado} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{promedio}} \times 100 \quad (3.47)$$

donde:

T_{max} = torque máximo (Nm),

T_{min} = torque mínimo (Nm),

$T_{promedio}$ = torque promedio (Nm).

Entre menor sea el porcentaje de torque de ondulación, mayor será la disminución del ruido y las vibraciones en el generador, garantizando de esta manera un mejor funcionamiento.

3.8.6 Momento de inercia

El momento de inercia es una medida de la resistencia de un objeto a cambios en su rotación. También se define como la capacidad de una sección transversal para resistir la flexión y debe especificarse con respecto a un eje de rotación.

Para el AF-PMSG el momento de inercia se calcula a partir de la expresión descrita a continuación.

$$J_{rot} = \frac{1}{2}W_{ro}(R_i^2 + (R_o - l_m)^2) + \frac{1}{2}W_m(R_o^2 + (R_o - l_m)^2) \quad (3.48)$$

donde:

W_{ro} = masa del disco rotor (kg),

l_m = longitud del imán (m),

W_m = masa de imanes (kg).

3.9 Diseño analítico en MATLAB® y LabVIEW®

La etapa de diseño analítico del AF-PMSG, contempla los siguientes puntos descritos a continuación:

- **Parámetros de entrada:** Estos parámetros son definidos por el diseñador donde, se considera la potencia de salida del AF-PMSG, la velocidad nominal, el voltaje máximo inducido, la frecuencia de operación, el número de fases, el radio externo y otros parámetros ingresados en función de los materiales deseados para diseñar la máquina.
- **Restricciones Topológicas:** Son calculadas a partir de los parámetros de entrada, con la finalidad de restringir ciertos parámetros como el número de polos y número de ranuras por fase.
- **Geometría del AF-PMSG:** En función de los parámetros de entrada y las restricciones topológicas, se calcula parte de la geometría del estator y rotor.
- **Tamaño de Imanes:** El dimensionado de los imanes, se realiza considerando el punto máximo de operación del imán seleccionado, el diámetro del generador y la separación entre imanes.
- **Distribuciones de Flujo:** Para obtener las distribuciones de flujo en el entrehierro y el yugo del estator, es indispensable analizar del circuito magnético de la máquina para posteriormente recalcular parámetros geométricos y obtener la geometría final del generador.
- **Parámetros Eléctricos:** Se obtienen los números de vueltas en serie y en paralelo para inducir el voltaje deseado de la máquina, además, otros resultados obtenidos en este apartado son, las corrientes, resistencias inductancias de dispersión, reactancias y momento de inercia del AF-PMSG.
- **Rendimiento del AF-PMSG:** En este apartado se calculan los volúmenes y masas de los componentes del AF-PMSG de forma individual y total, así como también se calculan las pérdidas y la eficiencia del generador.

Esta herramienta algorítmica desarrollada en MATLAB®, permite realizar cálculos rápidos para el dimensionado de AF-PMSG's. Si bien su precisión no es tan exacta como los softwares de elementos finitos, su rapidez y fácil utilidad son de suma importancia en el diseño de este tipo de máquinas.

En el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.4 se muestra el procedimiento algorítmico descrito en los puntos anteriores.

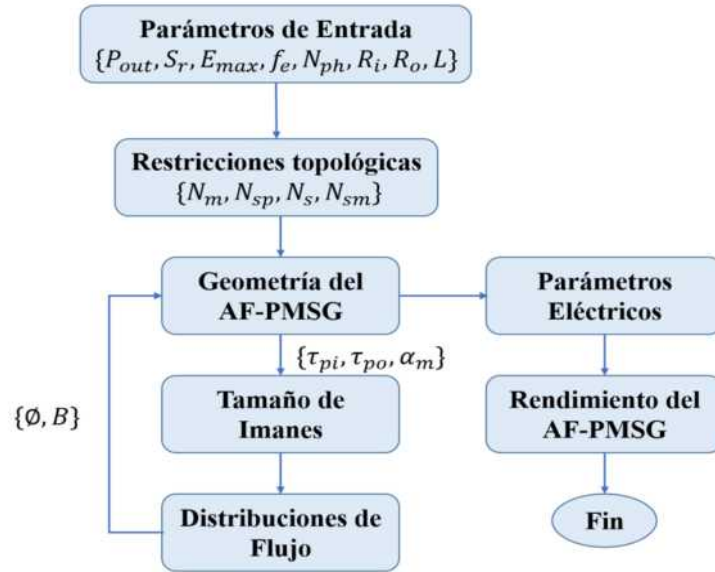


Figura 3.4. Diagrama de diseño del AF-PMSG.

Posterior al desarrollo del algoritmo en MATLAB[®], se procedió a crear una herramienta de diseño en LabVIEW 2017[®], con la finalidad de realizar una interfaz más amena para los usuarios, donde, sea más fácil la manipulación de los parámetros de entrada y la visualización de los resultados sean más gráficos. En la Figura 3.8 se aprecia la pantalla de inicio de esta herramienta.



Figura 3.5. Entorno gráfico para el diseño del AF-PMSG en LabVIEW[®].

En el **Apéndice D** se describe detalladamente la herramienta desarrollada en LabVIEW[®] 2017.

3.10 Resultados

3.10.1 Resultados de parámetros eléctricos

A continuación se analizan los resultados correspondientes a los parámetros eléctricos de la máquina, obtenidos a partir de la metodología de diseño desarrollada.

En la Tabla 3.2 se aprecian los resultados de los cálculos de los factores de corrección, cálculos de flujos en el entrehierro y en el yugo del estator, así como también el cálculo de los conductores y parámetros eléctricos del AF-PMSG.

Tabla 3.2. Resultados de parámetros topológicos, geometría y dimensionado de imanes del AF-PMSG.

Factores de Corrección			
k_d :	1.037	k_p :	1.000
k_s :	0.778	k_c :	0.500
Cálculo de flujos			
$\Phi_g(Wb)$:	0.004	$\Phi_{bi}(Wb)$:	0.002
$\beta_g(Wb/m^2)$:	0.766	$\beta_{bi}(Wb/m^2)$:	0.383
Devanados			
$A_c(m^2)$:	9.852E5	$d_{cu}(m)$:	1.4E-3
Parámetros eléctricos			
n_s :	8	n_p :	8
$E_{max}(V)$:	290.745	$E_{max}(V)$:	411.176
$I_s(A)$:	476.581	$R_s(Ohms)$:	0.0014
$I_{ph}(A)$:	19.857	$R_{ph}(Ohms)$	0.0744
$J_c(A/m^2)$:	4.837E6	$R_e(Ohms)$:	1.713E-4
$L_{ph}(Henrios)$:	0.0017	$X_{ph}(Ohms)$:	0.6301
$L_g(Henrios)$:	4.248E-4	$X_g(Ohms)$:	0.1601
$L_s(Henrios)$:	3.856E-4	$X_s(Ohms)$:	0.1454
$L_e(Henrios)$:	2.530E-5	$X_e(Ohms)$:	0.0095
$L_q(Henrios)$:	8.104E-4	$X_q(Ohms)$:	0.3055
$L_d(Henrios)$:	8.104E-4	$X_d(Ohms)$:	0.3055
$L_0(Henrios)$:	3.856E-4	$X_0(Ohms)$:	0.1454

Debido a que el generador fue diseñado a partir de una velocidad nominal de 225 rpm, es necesario realizar un estudio meticuloso donde, se analice el comportamiento del voltaje a partir de la variación las rpm de la máquina y la carga.

Las gráficas mostradas a continuación, muestran el perfil de voltaje y el mapa de regulación del voltaje.

Perfil de voltaje

En la Figura 3.6 se muestra el perfil de voltaje *rms* que se obtiene variando la carga de 0 % al 100 % y variando la S_r del rotor de 0 a 400 *rpm*, donde se observa que el voltaje nominal en condiciones de vacío a $S_r = 225 \text{ rpm}$ es de 290.5 Volts, mientras que por otra parte, cuando el generador está funcionando a plena carga o $P_{out} = 10 \text{ kW}$, el voltaje en las terminales disminuye hasta 269.3 Volts.

Conforme aumentan las *rpm* de la máquina, se observa que en condiciones de vacío el voltaje aumenta hasta 516.2 Volts a 400 *rpm*, mientras que, a plena carga a esta misma velocidad, el voltaje cae hasta 449.4 Volts.

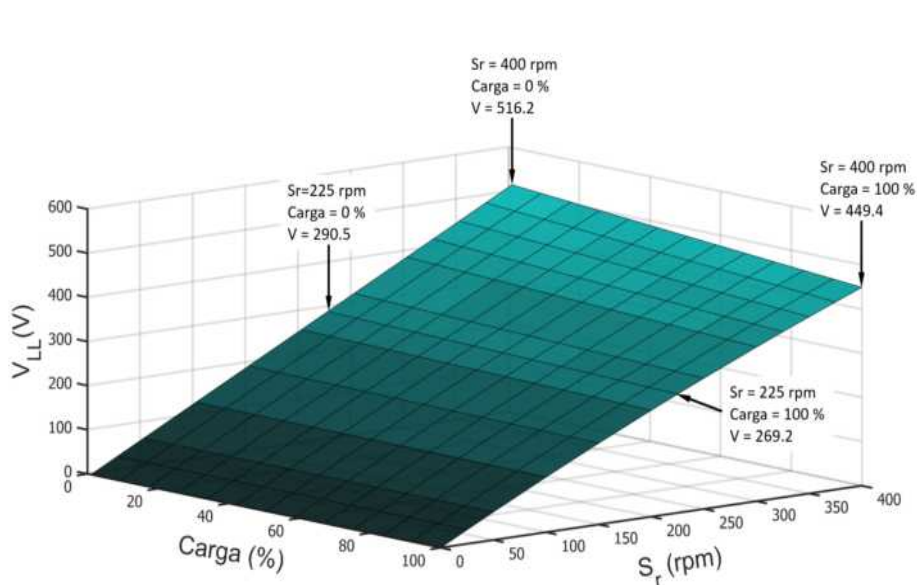


Figura 3.6. Perfil de voltaje del AF-PMSG en vacío y variando la carga a diferentes *rpm*.

Mapa de regulación de voltaje

La Regulación de Voltaje *RV* es una medida de la habilidad del generador para mantener un voltaje constante en sus terminales cuando la carga varía [38].

Una *RV* pequeña es mejor en el sentido de que el voltaje en los terminales del generador será más constante ante las variaciones en la carga [38]. Esta regulación de voltaje, es obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$V_{reg} = \frac{V_{oc} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100 \tag{3.49}$$

donde:

V_{oc} = Voltaje en vacío en las terminales,

V_{fl} = Voltaje a plena carga.

En la Figura 3.7 se muestra el mapa de regulación de voltaje donde, se aprecian cinco

regiones principales, las cuales se describen a continuación tomando como referencia las condiciones nominales a 225 rpm.

- La regulación de voltaje será $V_{reg} \leq 1\%$ para cargas del 0 al 14.6 %,
- La regulación de voltaje será $1\% < V_{reg} \leq 2\%$ para cargas de 14.6 a 26.7 %,
- La regulación de voltaje $2\% < V_{reg} \leq 5\%$ para cargas del 26.7 al 65.1 %,
- La regulación de voltaje será $5\% < V_{reg} \leq 10\%$ para cargas del 65.1 al 100 %
- La regulación de voltaje será $V_{reg} > 10\%$ para S_r mayores a 278 rpm.

La regulación de voltaje del AF-PMSG de 10 kW, específicamente para las 225 rpm al 100 % de carga es de 7.934 %, lo cual quiere decir que el voltaje no presentará grandes variaciones a plena carga.

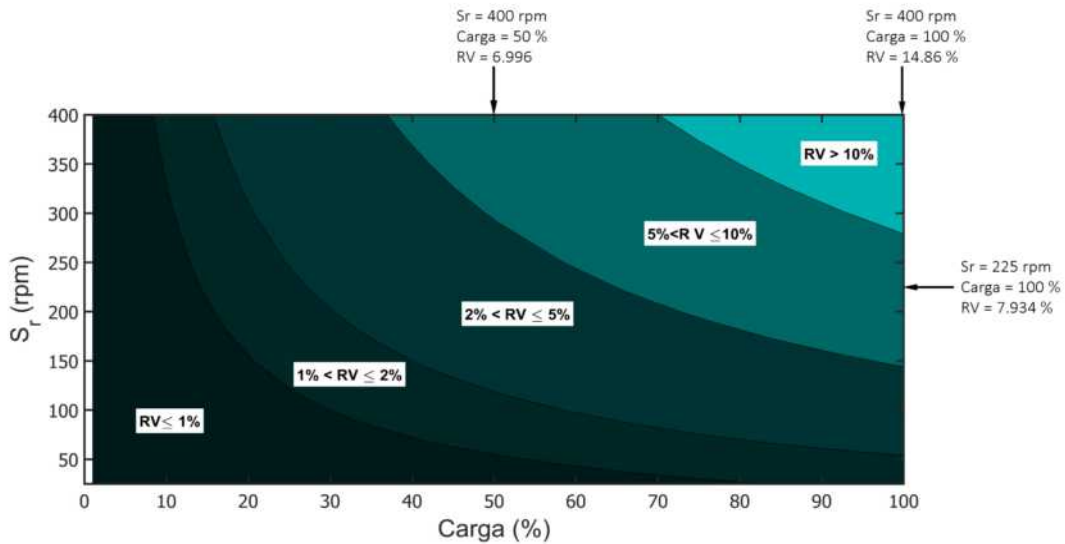


Figura 3.7. Mapa de regulación de voltaje del AF-PMSG.

Si se analiza el mapa de regulación de voltaje anterior a partir de las variaciones de las S_r de la máquina, de 0 a 400 rpm y a plena carga, se pueden notar cuatro regiones de RV , tal y como se describe a continuación:

- La regulación de voltaje será $\leq 1RV \leq 2\%$ para S_r de 0 a 54 rpm,
- La regulación de voltaje será $\leq 2RV \leq 5\%$ para S_r de 54 a 142 rpm,
- La regulación de voltaje será $\leq 5RV \leq 10\%$ para S_r de 142 a 278 rpm.
- La regulación de voltaje será $RV > 10\%$ para S_r de 278 a 400 rpm.

Lo anterior muestra una relación lineal donde, se nota un aumento en la regulación del voltaje conforme las S_r y la carga a la que se somete el generador aumentan.

3.10.2 Resultados de rendimiento

El estudio del rendimiento del AF-PMSG se basó primeramente en la selección del diseño que tuviera mejores resultados en cuanto a eficiencia y masa del generador se refiere. Para ello, en la Tabla 3.3 se muestran los diseños analizados donde, se pueden observar las eficiencias y las masas totales calculadas con el algoritmo de diseño a partir de la modificación de la separación entre imanes τ_f .

Tabla 3.3. Rendimiento de los AF-PMSG's analizados.

τ_f (mm)	Masa (kg)	Eficiencia (%)
5.00	117.724	95.44
7.00	118.045	95.61
9.00	118.296	95.65
12.00	118.641	96.62
15.20	119.042	95.53
18.90	119.622	95.48

De la Tabla 3.3, se seleccionó el tercer generador cuya masa es de 118.296 kg y eficiencia del 95.65 %. Esto debido a que obtiene una eficiencia ligeramente mayor a los demás diseños analizados. En la Tabla 3.4 se presentan los resultados de las masas correspondientes a los componentes del generador (estator, conductores, imanes y disco del rotor), así como también las pérdidas del núcleo (P_{cl}), perdidas del conductor (P_{cu}) y pérdidas por fricción o miscelaneas (P_s).

Tabla 3.4. Pérdidas y rendimiento del AF-PMSG.

Masas	
$W_{st}(kg):$	73.196
$W_{cu}(kg):$	26.611
$W_m(kg):$	11.790
$W_{rot}(kg):$	6.692
$W_{tot}(kg):$	118.296
Pérdidas	
$P_{cl}(W):$	230.3
$P_{cu}(W):$	86.04
$P_s(W):$	110
$P_{tot}(W):$	426.34
Rendimiento	
η (%):	95.65

En la Figura 3.8 se muestra a manera de gráficas de pastel, el porcentaje correspondiente de las masas de los componentes del generador donde se tiene que el 62 % es de los estatores, el 22 % de los conductores, el 10 % de imanes y el 6 % del disco del rotor.

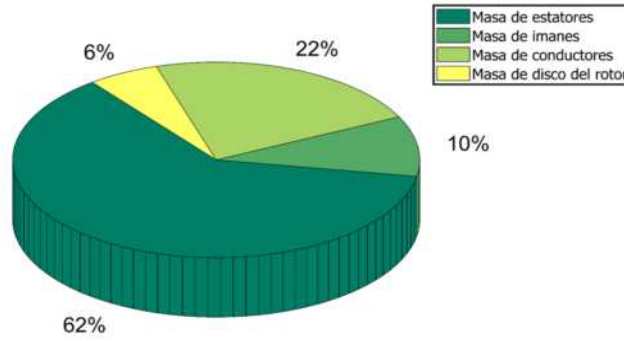


Figura 3.8. Masas del AF-PMSG.

Por otra parte, en la Figura 3.9 se muestra de igual manera los porcentajes de las pérdidas del AF-PMSG donde, se puede apreciar que el 54 % son pérdidas del núcleo, 26 % son pérdidas por fricción o misceláneas y 21 % son pérdidas del conductor.

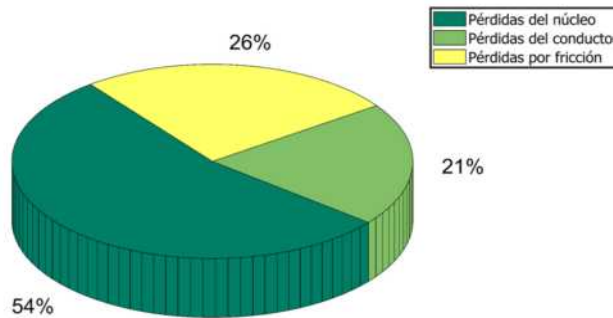


Figura 3.9. Pérdidas del AF-PMSG.

En los sistemas eólicos siempre habrá variaciones en la velocidad del viento. Esto conlleva a que las *rpm* del generador también cambien. Si a esto le agregamos el echo de que, de igual manera, se presentarán variaciones en la carga de la máquina, las pérdidas y la eficiencia se encontrarán oscilando entre ciertos rangos dependiendo de las condiciones a las que se vea sometido el generador.

A continuación, en los siguientes puntos se analizan los rangos a los que puede operar el AF-PMSG ante condiciones de operación variable. Ya sea modificando la carga o las *rpm* de la máquina.

Pérdidas del núcleo

Las pérdidas en el núcleo son las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que se presentan en el material magnético del generador. Estas pérdidas, varían conforme al cuadrado de la densidad del flujo magnético y, en el estator, conforme a la 1.5ava potencia de la velocidad de rotación de los campos magnéticos [38].

Para el cálculo de las pérdidas del núcleo, se empleó (3.39). Los resultados obtenidos, se muestran en la Figura 3.10 donde se aprecian estas pérdidas en función de la variación de las S_r y la carga a la que se someta la máquina.

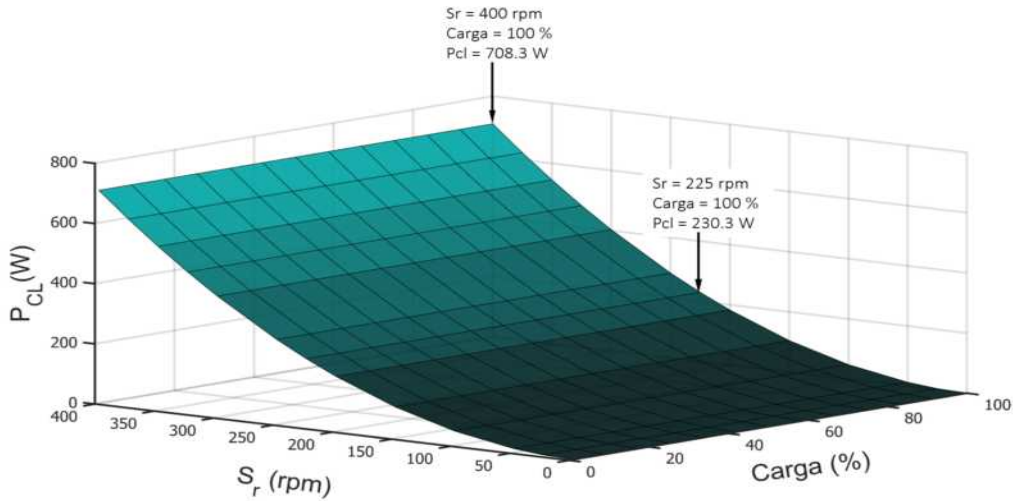


Figura 3.10. Pérdidas en el núcleo del AF-PMSG.

El comportamiento que se aprecia es un aumento en las pérdidas conforme las S_r de la máquina también aumenten. Por otra parte, la carga no impacta en este tipo de pérdidas debido a que se mantienen constantes ante la variación de las mismas. A condiciones nominales de operación, a 225 rpm, las pérdidas del núcleo del AF-PMSG son de 230.3 W tanto al 0 % de la carga como al 100 % de la misma, mientras que por otra parte, a un S_r de 400 rpm, las pérdidas del núcleo aumentan hasta 708.3 W a 0 % y 100 % de la carga.

Pérdidas del conductor

Las pérdidas en el cobre son producidas por el calentamiento resistivo que se presenta en los devanados del estator y del rotor de la máquina [38]. Los cálculos para obtener este tipo de pérdidas en el AF-PMSG se efectuaron mediante (3.38). En la Figura 3.11 se puede apreciar que para el punto de operación nominal de la máquina a 225 rpm con el 100 % de la carga, las P_{cu} son de 86.04 W y a 400 rpm con el 100 % de la carga, las pérdidas son de 268.8 W.

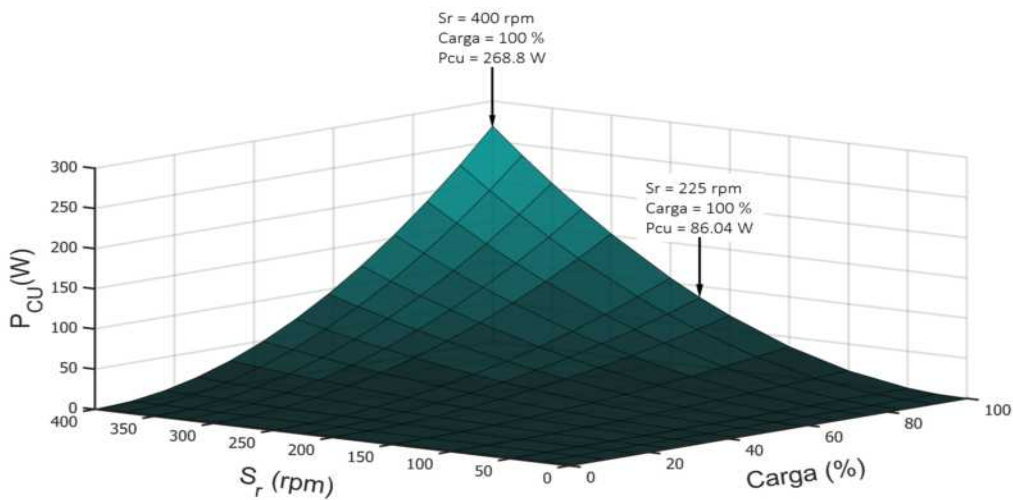


Figura 3.11. Pérdidas del conductor del AF-PMSG.

De forma contraria a las pérdidas del núcleo, en este tipo de pérdidas, a medida que aumenta la carga en la máquina, también habrá un aumento en las pérdidas del conductor, esto debido están en función de la corriente y la resistencia del conductor, lo cuál conlleva un incremento de estas pérdidas conforme se aumenta la corriente por la variación de la carga.

Eficiencia del AF-PMSG

La eficiencia de la máquina fue obtenida a través del porcentaje de la división de la potencia de salida del generador entre la potencia de entrada (3.41). Por tanto, entre menores sean las pérdidas presentes en el generador, mayor será su eficiencia. En la Figura 3.12, se muestra en un gráfico 3D las eficiencias de la máquina ante diferentes rangos de operación, ya sea variando la carga de 0 % al 100 % o variando las S_r de 0 a 400 rpm.

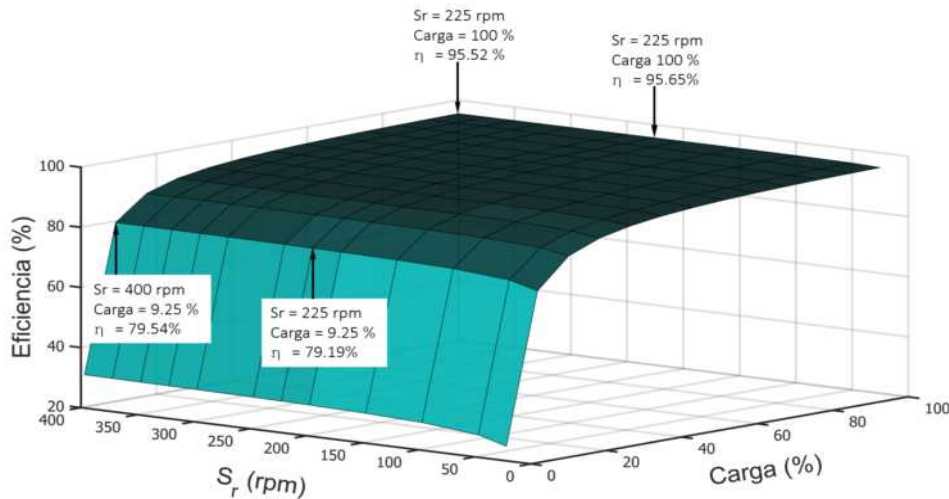


Figura 3.12. Diagrama de diseño del AF-PMSG.

A operación nominal con 225 rpm, se tiene una eficiencia de 95.65 % a plena carga, mientras que a 400 rpm en condiciones de carga al 100 %, se tiene una eficiencia del 95.52 %.

Mapa de eficiencia

Un mapa de eficiencia es un diagrama de contorno donde se muestra la eficiencia de la máquina eléctrica en función velocidad de giro a la que se encuentre. Describe la eficiencia máxima para cualquier combinación de velocidad y carga, siendo una forma conveniente de representar los puntos de operación del generador.

En la Figura 3.13 se muestra que para el AF-PMSG, hay cinco regiones principales de eficiencia, las cuales se describen a continuación para las condiciones nominales de operación a 225 rpm variando la carga de la máquina.

- La eficiencia será $\eta \leq 60\%$ para cargas del 0 % al 7.22 %,
- La eficiencia será $60\% < \eta \leq 80\%$ para cargas de 7.22 % al 9.93 %,

- La eficiencia será $80\% \leq \eta \leq 90\%$ para cargas del 9.93 % al 24.16 %,
- La eficiencia será $90\% \leq \eta \leq 95\%$ para cargas del 24.16 % al 69.75 %,
- La eficiencia será $90\% \leq \eta \leq 95\%$ para cargas del 69.75 % al 100 %

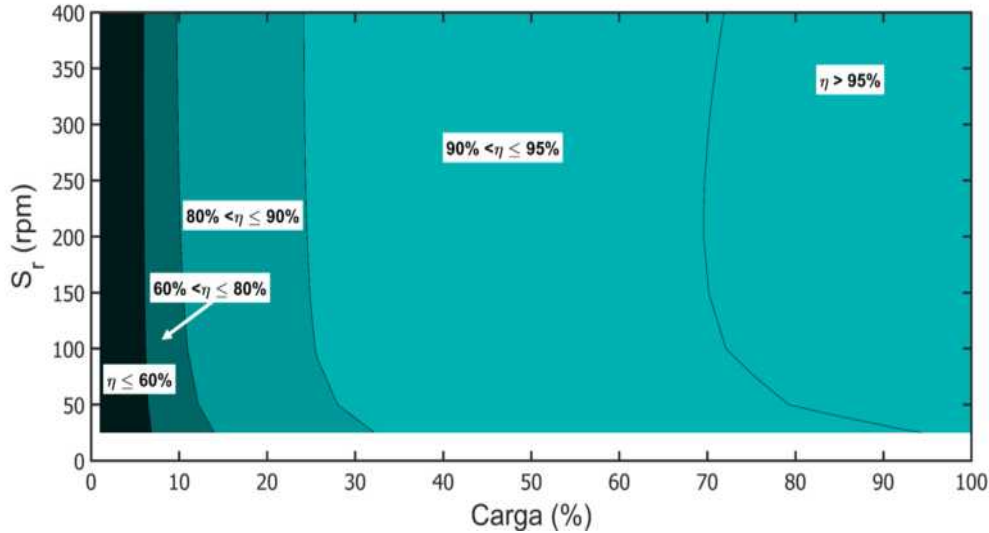


Figura 3.13. Mapa de eficiencia del AF-PMSG.

La eficiencia de la máquina a plena carga para las 225 rpm será de 95.65 % de acuerdo a lo mostrado en el mapa de eficiencias anterior, mientras que para un S_r de 400 rpm, la eficiencia aumentará al 95.52 %.

3.11 Conclusiones

Como parte de la metodología desarrollada en MATLAB® para el diseño analítico del AF-PMSG, en este capítulo se abordaron las formulaciones correspondientes al cálculo de los factores de corrección, los flujos magnéticos, parámetros eléctricos, rendimientos, volúmenes y masas de los componentes del generador.

El comportamiento del AF-PMSG a condiciones nominales de operación y a plena carga, muestra una regulación de voltaje del 7.934 %, esto se traduce en un buen funcionamiento de la máquina debido a las bajas variaciones del voltaje al ser sometido a cargas.

En lo que respecta a la distribuciones de las masas y volúmenes de los componentes de la máquina, de los 118.3 kg se tiene que el 62 % pertenece a los estatores, el 22 % a los conductores, 10 % a los imanes y el 6 % al disco del rotor. Para las pérdidas de la máquina, de los 426.34 W de pérdidas totales, el 54 % son pérdidas del núcleo, 26 % son pérdidas por fricción o misceláneas y 21 % son pérdidas del conductor.

Por otra parte, se considera que los resultados en cuanto al rendimiento de la máquina se refiere, son aceptables debido a que en la mayor parte de su rango de operación, el

generador cuenta con eficiencia entre el 90 % y el 95 %. Mientras que a partir del 70 al 100 % de la carga aproximadamente, la eficiencia del AF-PMSG será mayor al 95 %, encontrándose que a la S_r nominal de 225 rpm, la $\eta = 95,65\%$ a plena carga.

Es importante señalar que conforme se modifican los parámetros de entrada para los cálculos realizados en el capítulo dos y los de este capítulo, las masas y las pérdidas de la máquina varían considerablemente. Por ello, es necesario evaluar diferentes diseños con la metodología desarrollada para seleccionar la que se considere más óptima.

Las distribuciones del flujo en el entrehierro y el yugo del estator, los voltajes obtenidos en condiciones de vacío y en carga del AF-PMSG con la metodología desarrollada en MATLAB[®], serán validados con análisis de elementos finitos donde, es indispensable el número de vueltas en serie n_s y la resistencia por fase R_{ph} para las simulaciones realizadas en el capítulo posterior.